

УДК 621.791.92
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.3\(496\).5](https://doi.org/10.15589/znp2024.3(496).5)

INFLUENCE ANALYSIS OF CHANGES IN THE GAS-DYNAMIC PROCESS PARAMETER DURING LASER WELDING ON THE LEVEL OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF JOINTS MADE OF 09G2S STEEL

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗМІНИ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ЛАЗЕРНОМУ ЗВАРЮВАННІ НА РІВЕНЬ МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК З'ЄДНАНЬ ЗІ СТАЛІ 09Г2С

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

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

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

Valentyna I. Bondarieva
laser-77@online.ua
ORCID: 0000-0002-4745-0995

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

М. В. Соколовський,
аспірант, провідний інженер

О. В. Сіора,
науковий співробітник

Ю. Ю. Юрченко,
аспірант, провідний інженер

В. І. Бондарєва,
заступник завідувача відділу

А. В. Бернацький,
канд. техн. наук, старший дослідник, завідувач відділу

E. O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv
Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, м. Київ

Abstract. During manufacturing of various structures and parts of products in various industries, the task of studying the features of gas-dynamic laser welding processes in different spatial positions was raised. The scientific results obtained in the course of the research are planned for usage in the development of laser welding technologies for products in various industries. The purpose of this study is to analyze the effect of changes in the parameters of gas-dynamic processes on the level of mechanical characteristics of welded joints made of 09G2S steel during laser welding in different spatial positions. In order to research this subject, a number of experimental studies were conducted, including the creation of a series of experimental samples of butt welded joints in different spatial positions using various gas protection systems and welding directions, tensile testing of these samples, measurement of their microhardness, and study of the microstructure of their surfaces. Based on the data obtained from the experiment, the influence of the relative spatial position of the workpiece, welding head, and gas shielding on the weld pool and welded joint characteristics during laser welding in different spatial positions was analyzed. After conducting the experiments and analyzing results of the study, it was determined that during laser welding of low-alloy steels, the use of argon and, to a greater extent, a mixture of argon and carbon dioxide, leads to an increase in the hardness of the weld metal due to an increase in the amount and hardness of the bainite component. At the same time, during laser welding of 09G2S steel, an increased manganese content contributes to an increase in joint hardness. In addition to the effects usage of the gas protection system, the cooling rate of the welding bath has increased, which allowed for the additional increase in its hardness. The use of a 80 %Ar + 20 %CO₂ mixture leads to a slight (10...30 %) increase in the width of the welds, combined with a significant improvement in the formation of the upper reinforcement and the elimination of the tendency to undercutting.

Key words: 09G2S steel; laser welding; welded joints; shielding gas; various spatial positions.

Анотація. При виготовленні різних конструкцій та деталей виробів різних галузей промисловості постало завдання вивчення особливостей газодинамічних процесів лазерного зварювання у різних просторових положеннях та їх впливу на характеристики зварних з'єднань. Мета даної роботи – аналіз впливу зміни параметрів газодинамічних процесів на рівень механічних характеристик зварних з'єднань зі сталі 09Г2С при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях. Одержані в ході виконання досліджень наукові результати планується використати при відпрацюванні технологій лазерного зварювання виробів різних галузей промисловості. З метою вивчення даної проблеми, було проведено ряд експериментальних робіт, включаючи виготовлення серії експериментальних зразків стикових зварних з'єднань у різних просторових положеннях з використанням різних систем газового захисту та напрямків зварювання, випробування цих зразків на розтяг, вимірювання їх мікротвердості, а також вивчення мікроструктури шліфів. На базі даних, отриманих з допомогою експерименту, було проаналізовано вплив відносного просторового положення заготовки, зварювальної головки та газового захисту на ванну розплаву та характеристики зварних з'єднань при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях. Після виконання робіт було визначено, що при лазерному зварюванні низьколегованих сталей, застосування аргону і, більшою мірою, суміші аргону з вуглекислим газом, призводять до підвищення твердості металу швів за рахунок зростання кількості і твердості бейнітної складової. При цьому, під час лазерного зварювання сталі 09Г2С підвищений вміст марганцю сприяє збільшенню твердості з'єднання. Встановлено, що в додачу до використання системи газового захисту, швидкість охолодження рідкого металу підвищувалася, що є причиною додаткового зростання твердості. Застосування суміші 80 %Ar + 20 %CO₂ призводить до невеликого (10...30 %) збільшення ширини швів в поєднанні зі значним поліпшенням формування верхнього посилення і усуненням схильності до утворення підрізів.

Ключові слова: сталь 09Г2С; лазерне зварювання; зварні з'єднання; захисний газ; різні просторові положення.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

При виготовленні різних конструкцій та деталей виробів ракетно-космічної, авіаційної, хімічної, приладобудівної та інших галузей промисловості постає завдання, що полягає у зварюванні різних деталей у незвичних відносних просторових положеннях оснастки та заготовок. Через специфіку зварювання у нижніх просторових положеннях було запропоновано використання технологій лазерного зварювання. Відповідно постає задача вивчення впливу зміни параметрів газодинамічних процесів, що утворюються при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях на рівень механічних характеристик зварних з'єднань зі сталей та сплавів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

У більшості зварювальних процесів енергія вкладається на поверхню заготовки, а потім транспортується всередину за допомогою механізмів теплопровідності [1]. При зварюванні лазерним випромінюванням енергія вкладається порівняно глибоко всередині вузької порожнини, створеної падаючим променем [2]. Це важлива особливість, щоб сконцентрувати дуже високу енергію в дуже маленьку площу, ось чому лазерні технології являють собою унікальний метод зварювання матеріалів з мінімальними тепловими спотвореннями і металургійними ушкодженнями заготовки [3]. Коли щільність потужності збільшується вище певного порогового рівня ($> 10^6$ Вт/см²), передача тепла відбувається за допомогою механізму, відомого як «keyholing», через явно видиму форму поперечного розрізу зварного з'єднання, яку ми одержуємо. Матеріал в «keyhole» при застосуванні лазерів високої потужності випаровується в межах розплавленої області,

і високий тиск парів, вироблених потім, штовхає розплавлений метал уздовж стінок порожнини. Як тільки це буде створено, він діє майже як чорне тіло і поглинає більшу частину лазерної енергії, а також сприяє в розподілі тепла у глибину матеріалу [4]. Випаровування викликано поглинанням лазерного випромінювання або безпосередньо з фокусної плями або в процесі його багаторазового відбиття від стінок зварювальної ванни [5].

Порожнина, оточена розплавленим металом, який сам оточений твердою фазою, підтримується відкритим за допомогою безперервного випаровування матеріалу, а індукований тиск діє з тиском абляції проти тисків, що утворюються завдяки потоку рідини та ефекту поверхневого натягу [6].

Механізм лазерного зварювання, як обробки матеріалу дуже складний, тому що ряд параметрів, наприклад теплофізичні властивості матеріалу, параметри лазера і швидкість обробки, впливають на це [7-9]. Тому існує велика кількість математичних моделей, які можуть бути використані для пояснення деяких аспектів фізичної проблеми і можуть підтвердити це експериментами [10-12].

В статті [13] дається огляд деяких моделей, знайдених в літературі. Справді, хороше розуміння поведінки «keyhole» і процесу його формування та динаміки дозволяють поліпшити якість зварного з'єднання за рахунок оптимізації параметрів лазерної обробки і процедури зварювання. Більшість опублікованих робіт визначають «keyhole» як стаціонарний об'єм, який рухається зі швидкістю зварювання за зразком.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

У даній роботі, на відміну від розглянутих робіт, буде розглянуто вплив відносного просторового

положення заготовки, зварювальної головки та газового захисту на ванну розплаву та характеристики зварних з'єднань при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є аналіз впливу зміни параметрів газодинамічних процесів на рівень механічних характеристик зварних з'єднань зі сталі 09Г2С при лазерному зварюванні в різних просторових положеннях.

МЕТОДИ, ОБ'ЄКТ ТА ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

09Г2С – низьколегована конструкційна сталь, котра використовується для виробництва різноманітних зварних конструкцій, які працюють при температурі від -70°C до $+425^{\circ}\text{C}$ під тиском. Наявність феросиліцію, як ферито-утворювального елемента, збільшує кислотостійкість металу (Таблиця 1). Введення міді покращує корозійні властивості та параметри пластичності. А нікель зміцнює ферит, не знижуючи в'язкості.

Спочатку було визначено рекомендовані режими зварювання, які дозволяли одержати зварні з'єднання з заданою геометрією. З цієї метою виконували провари у зразках зі сталі 09Г2С товщиною $\delta = 10\text{ мм}$ в нижньому положенні, з застосуванням різних захисних систем та з різними діаметрами сопел, використовуючи CO_2 та Ar в якості захисного газу.

При використанні системи газового захисту у вигляді трубки розташованої під різними кутами до осі променя лазера у різних просторових положеннях. Схеми процесів зварювання, котрі використовувались при виготовленні зразків, наведені на рис. 1.

Зварювання проводилось з розташуванням захисної системи як попереду так і позаду променя лазера. На кінці трубки було розташоване сопло з діаметром отвору 0,7 мм, 1,0 мм та 1,5 мм. Режим зварювання

був наступний: потужність лазерного випромінювання $P = 4,4\text{ кВт}$, швидкість переміщення лазерного променя $V_{\text{зв}} = 1\text{ м/хв}$, величина розфокусування $\Delta F = -2\text{ мм}$, захисний газ подавався з витратою від 1 л/хв до 32 л/хв.

Також використовували захисну систему у вигляді коаксіального сопла з діаметрами сопел $d = 1,0$; 2,0 та 3,0 мм. Захисна система розташована на відстані 3 мм над зразком. На обраних режимах виконували лазерне зварювання стикових зварних з'єднань зі сталі 09Г2С (на зразках 3+3 мм і 1,7+1,7 мм і 3+4 мм). Випробування на розтяг стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С проводилися на сервогидравлічній машині MTS 318.25. Механічні властивості основного металу і зварних з'єднань визначали на стандартних зразках відповідно до ГОСТ 1497-84 і ГОСТ 6996-66 за результатами випробування стандартних зразків.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

За результатами дослідження макроструктури шліфів, встановлено, що при зварюванні з розміщенням газового захисту попереду лазерного випромінювання, характерним є лінійний характер зміни глибини провару, який мало залежить від витрат газу. Різниця абсолютних значень глибини проварів у цьому випадку на перевищує 10% для різних діаметр сопел та всіх діапазонів витрат газу. При зміні положення газового захисту та розміщенні його позаду випромінювання, характер залежностей змінюється з лінійного на криволінійний з явними максимумами значень. При цьому різниця значень глибини проварів доходить до 30% від одержаної глибини провару.

У той же час, збільшення витрат захисного газу не завжди призводить до збільшення площі провару. Це підтверджується нелінійним характером одержаних відповідних залежностей. Це пов'язано зі змінами форми провару, що спричинено впливом газової складової процесу зварювання.

Таблиця 1. Хімічний склад сталі 09Г2С згідно ДСТУ 8541:2015

Масова частка елементів (максимальна), %										
C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	N	As	Fe
0,12	0,5-0,8	1,3-1,7	0,04	0,035	0,3	0,3	0,3	0,012	0,08	основ.

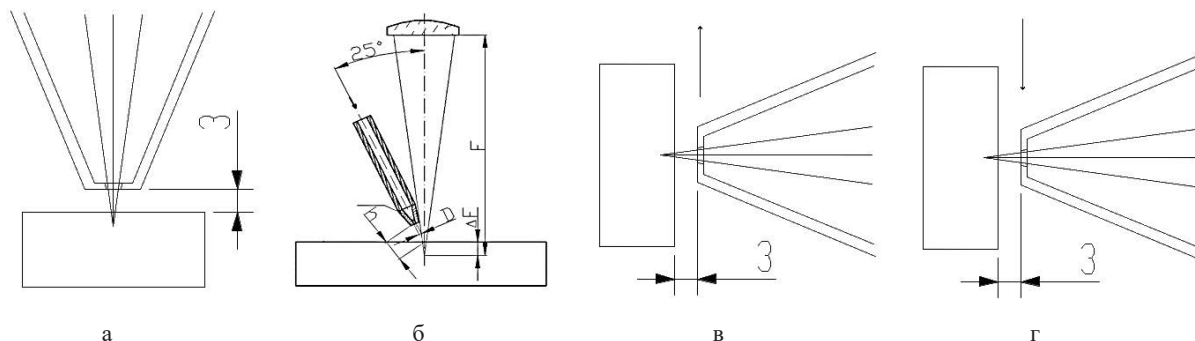


Рис. 1. Схеми зварювання, що використовувались при виготовленні зразків: а) зразок № 1426, б) зразок № 1432; в) зразок № 1449; г) зразок № 1450

Застосування газової системи захисту показало, що при зменшенні діаметра сопла для забезпечення найбільшого значення глибини провару потрібно менше захисного газу. У той же час, чим при збільшенні діаметру сопла характерним стає й збільшення глибини провару та ширина шва.

В результаті випробування на розтягнення стикових з'єднань із сталі 09Г2С (на зразках 3+3 мм і 1,7+1,7 мм і 3+4 мм) на випробувальній машині «MTS 318.25», визначені межа міцності при розтягуванні і положення розриву в стиковому зварному з'єднанні. Всі зразки зруйнувалися по основному металу, межа міцності при розтягуванні $\sigma_b = 436...465$ МПа.

В результаті випробування на розтягнення з'єднань в напусток зі сталі 09Г2С (на зразках 3+3 мм і 1,7+1,7 мм) визначені зусилля розриву при розтягуванні і розташування розриву в напустковому зварному з'єднанні. Всі зразки зруйнувалися по основному металу, зусилля розриву при розтягуванні 23...28 кН. Встановлено, що введення додаткового газового струменя, необхідної конфігурації, змінює форму шва, збільшує глибину провару до 30%, а об'єм металу шва до 45-50 %.

На рисунку 2 наведено 3 графіки для зразків 1426.4 (зварювання у нижньому положенні при використанні коаксіального сопла з діаметром отвору 3 мм), 1449.4 (зварювання угору у вертикальному положенні при використанні коаксіального сопла з діаметром отвору 3 мм), 1450.4 (зварювання донизу у вертикальному положенні при використанні коаксіального сопла з діаметром отвору 3 мм). На цьому рисунку графічні залежності дозволяють зробити порівняння зміни мікротвердості та структурних змін

при однаковому тиску (швидкості потоку), але різних просторових положеннях чи напрямках руху).

З огляду графіків, наведених на рисунку 2 можна сказати, що при просуванні вглиб до кореня шва, мікротвердість зварного шва загалом зростає, досягаючи максимальних значень на дистанції 2600-3500 мкм від посилення шва. При цьому на всіх зразках спостерігається різке падіння мікротвердості в зоні термічного впливу (як в крупнозернистих, так і в дрібнозернистих ділянках).

На всіх трьох графіках наявні місцеві піки та просадки в мікротвердості, натякаючи на можливі місцеві утворення різнорідних мікроструктур або тріщин.

Найвищі значення мікротвердості на всьому шві показує зразок 1426.4, зварений у нижньому просторовому положенні. Його схема мікротвердості має лише одну місцеву просадку в показнику мікротвердості в районі 1900 мкм від краю поверхні шва. Зразок 1449.4 має дуже стабільні значення мікротвердості в зоні 1500-3500 мкм. Зразок 1450.4 ж самий нестабільний, з двома яскраво вираженими піками, одним яскравим та одним ступінчастим падінням мікротвердості. Падіння значення мікротвердості в цього зразка починається теж раніше, що свідчить про меншу глибину провару в даному випадку.

На рисунку 3 наведено графіки для зразків 1426.1, 1426.4, 1426.7 (порівняння зміни мікротвердості та структурних змін при зміні тиску (швидкості потоку), у нижньому просторовому положенні при використанні коаксіального сопла з діаметром отвору 3 мм).

З огляду графіків, наведених на рисунку 3, можна сказати, що при просуванні вглиб до кореня мікротвердість зварного шва загалом стабільний, досягаючи максимальних значень на дистанції 2600-2800 мкм

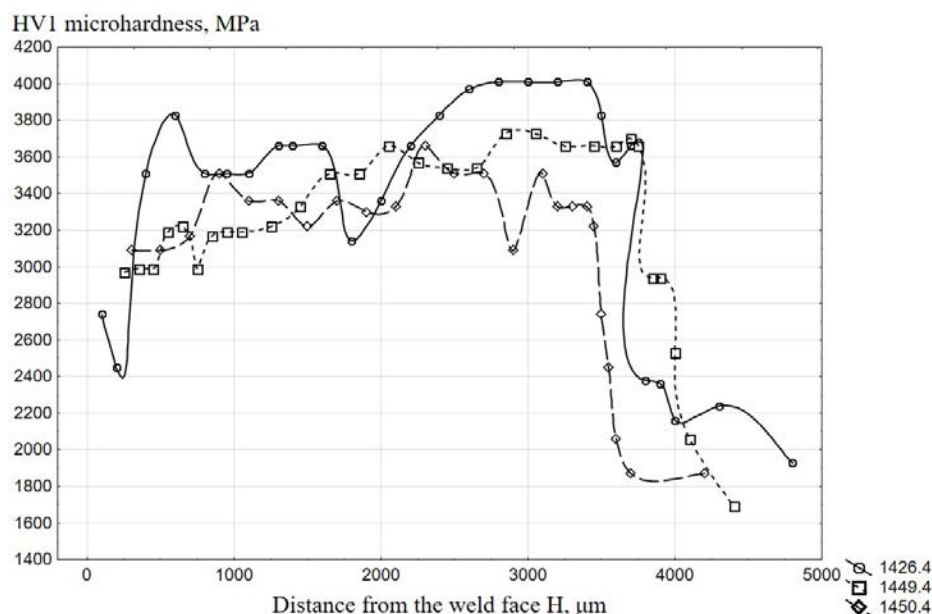


Рис. 2. Порівняння зміни мікротвердості у зразках 1426.4, 1449.4 та 1450.4

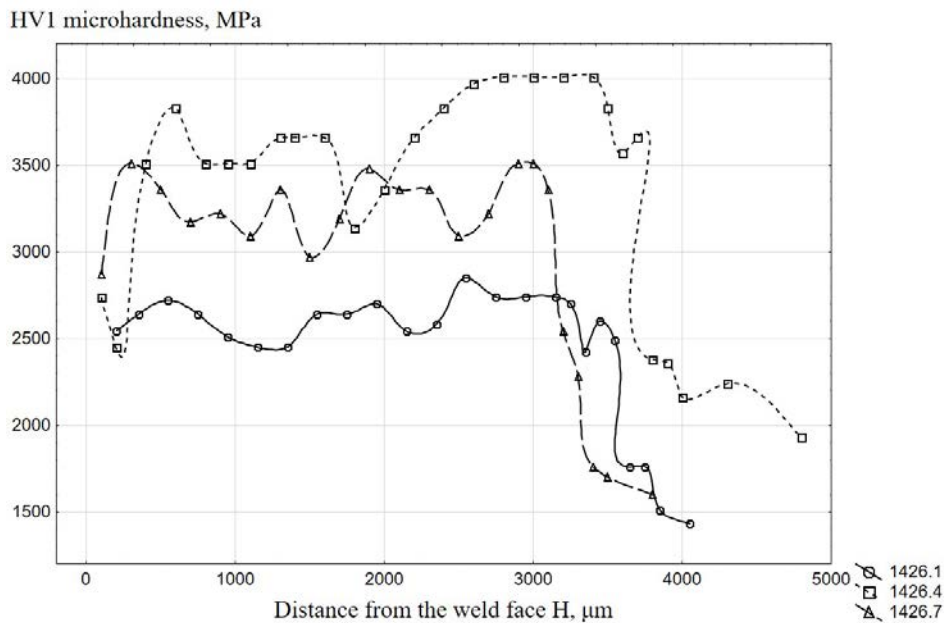


Рис. 3. Порівняння зміни мікротвердості у зразках 1426.1, 1426.4, 1426.7

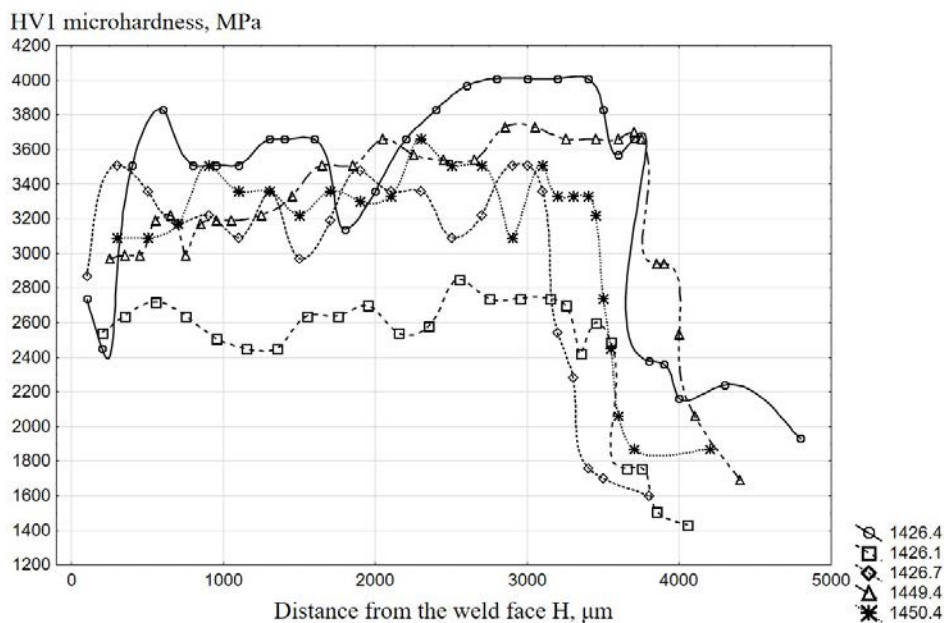


Рис. 4. Порівняння зміни мікротвердості у зразках 1426.1, 1426.4, 1426.7, 1449.4, 1450.4

від поверхні шва. При цьому на всіх зразках спостерігається різке падіння мікротвердості в зоні термічного впливу (як в крупнозернистих, так і в дрібнозернистих ділянках).

На графіках зразків 1426.4 та 1426.7 спостерігаються місцеві піки та просадки в мікротвердості, натякаючи на можливі місцеві утворення різномірних мікроструктур або тріщин. На графіку 1426.1 мікротвердість змінюється плавно, вказуючи на більш однорідну структуру або більш стабільний перебіг процесу зварювання.

Зразок 1426.1 має досить стабільні значення мікротвердості в зоні до 3000 мкм, з місцевим зниженням твердості перед сильним падінням значення в зоні термічного впливу. Зразок 1426.4 показує найвищі значення мікротвердості на всьому шві. Його графік мікротвердості має одну значну місцеву просадку в показнику мікротвердості в районі 1900 мкм від краю поверхні шва. Зразок 1426.7 є самим нестабільним, з численними піками та падіннями мікротвердості. Падіння значення мікротвердості в цьому зразку при цьому починається раніше, що свідчить про меншу глибину провару в цьому зразку.

На Рис. 4, для порівняння з двома попередніми, наведено порівняльний (узагальнюючий) графік для зразків 1426.1, 1426.4, 1426.7, 1449.4, 1450.4.

На рисунку 5 наведено графіки зміни мікротвердості для зразків 1432.2, 1432.5, 1432.7 (порівняння зміни мікротвердості та структурних змін при зміні тиску (швидкості потоку), у нижньому просторовому положенні при використанні системи захисту у вигляді трубки, розташованої під кутом 25° до напрямку дії лазерного випромінювання).

З огляду цих графіків, можна сказати, що при просуванні вглиб до кореня мікротвердість зварного шва загалом зростає, досягаючи максимальних значень

на границі кореня шва у великозернистому відрізку зони термічного впливу. На всіх зразках спостерігається різке падіння мікротвердості в зоні термічного впливу.

На всіх графіках зразків спостерігаються місцеві піки та провали в мікротвердості, натякаючи на вкрай неоднорідну структуру зварного шва з можливими місцевими утвореннями різномірних мікроструктур або наявністю великої кількості тріщин. З огляду на металографічне дослідження, можна висунути гіпотезу, що дана нестабільність мікротвердості спостерігається через наявність різних феритних структур всередині шва.

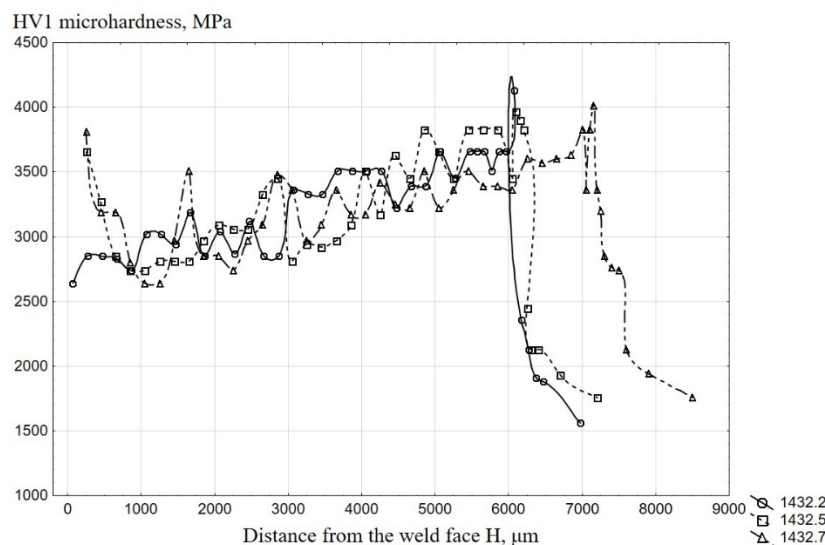


Рис. 5. Порівняння зміни мікротвердості у зразках 1432.2, 1432.5, 1432.7

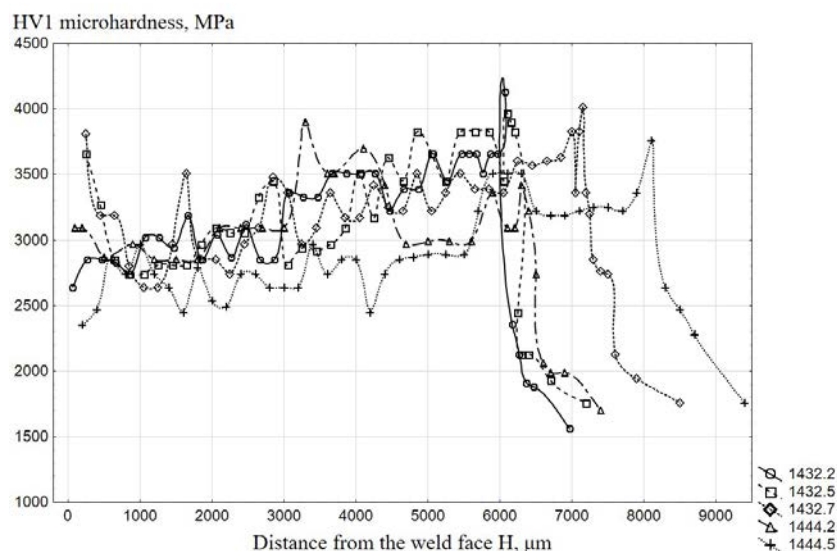


Рис. 6. Порівняння зміни мікротвердості у зразках 1432.2, 1432.5, 1432.7, 1444.2, 1444.5

Зразок 1432.2 має кілька досить стабільних зон мікротвердості в зоні до 6000 мкм, після чого спостерігається максимальне значення мікротвердості в великозернистому відрізку зони термічного впливу перед типовим спадом мікротвердості в дрібнозернистому відрізку ЗТВ. Скоріше за все, це пов'язано з бейнітною структурою шва в корені, з утворенням кристалітів та близькості до лінії сплавлення. Зразок 1432.5 показує посередні значення мікротвердості на всьому шві. Зразок 1432.7 є самим нестабільним, з численними піками та падіннями мікротвердості. Падіння значення мікротвердості в цьому зразку при цьому починається пізніше інших, що свідчить про більшу глибину провару. Зразки 1432.5 та 1732.7 при цьому мають характерно вищу мікротвердість на поверхневих шарах зварного шва.

На рисунку 6 наведено 5 графіків для зразків 1432.2, 1432.5, 1432.7, 1444.2, 1444.5. Ці зразки були обрані заради порівняння зміни мікротвердості та структурних змін при зміні тиску (швидкості потоку) у нижньому просторовому положенні, але при зміні положення системи газового захисту.

З огляду цих графіків, можна сказати, що при просуванні вглиб до кореня мікротвердість зварного шва загалом зростає, досягаючи максимальних значень на границі кореня шва у великозернистому відрізку зони термічного впливу. На всіх зразках спостерігається різке падіння мікротвердості в зоні термічного впливу.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ СТАТТІ

На всіх графіках зразків спостерігаються місцеві піки та просадки в мікротвердості, натякаючи на вкрай неоднорідну структуру зварного шва з можливими місцевими утвореннями різнорідних мікроструктур або наявністю великої кількості тріщин. З огляду на металографічне дослідження, можна висунути гіпотезу, що дана нестабільність мікротвердості спостерігається через наявність різних феритних структур всередині шва.

Зразок 1432.2 має кілька досить стабільних зон мікротвердості в зоні до 6000 мкм, після чого спостерігається максимальне значення мікротвердості в великозернистому відрізку зони термічного впливу перед типовим спадом мікротвердості в дрібнозернистому

відрізку ЗТВ. Скоріше за все, це пов'язано з бейнітною структурою шва в корені, з утворенням кристалітів та близькості до лінії сплавлення. Зразок 1432.5 показує посередні значення мікротвердості на всьому шві. Зразок 1432.7 є самим нестабільним, з численними піками та падіннями мікротвердості. Падіння значення мікротвердості в цьому зразку при цьому починається пізніше інших, що свідчить про більшу глибину провару. Зразки 1432.5 та 1732.7 при цьому мають характерно вищу мікротвердість на поверхневих шарах зварного шва. Зразок 1444.2 відрізняється від загального спостереження нестабільного зростання мікротвердості характерним відрізком з різким підвищенням мікротвердості на періоді в 3000-4500 мкм. Зразок 1444.5 – самий стабільний з усіх представлених, з великою кількістю зон з відносно статичною величиною мікротвердості. Даний зразок при цьому має декілька явно виражених піків та падінь, що може вказувати на місцеві концентрації легуючих елементів та хімічних сполук.

ВИСНОВКИ

1. При лазерному зварюванні низьколегованих сталей, застосування аргону і, більшою мірою, суміші аргону з вуглекислим газом, призводять до підвищення твердості металу швів за рахунок зростання кількості і твердості бейнітної складової.

2. У сталі 09Г2С збільшенню твердості сприяє підвищений вміст марганцю (1,3-1,7%). Зростання твердості частково пов'язане зі зміною прозорості плазми факела, що утворюється над парогозовим каналом, а також з умовами тепловідводу при використанні різних захисних газових середовищ. Так, через екранування випромінювання плазмовим факелом в разі використання аргону глибина проплавлення знижувалася більш ніж в два рази. При цьому швидкість охолодження рідкого металу підвищувалася, що призводить до зростання твердості.

3. Застосування суміші 80 %Ar + 20 %CO₂ призводить до невеликого (10...30 %) збільшення ширини швів в поєднанні зі значним поліпшенням формування верхнього посилення і усуненням схильності до утворення підрізів. Глибина проплавлення при цьому не зростає.

REFERENCES

- [1] Mayi, Y. A., Dal, M., Peyre, P., Bellet, M., & Fabbro, R. (2023). Physical mechanisms of conduction-to-keyhole transition in laser welding and additive manufacturing processes. *Optics & Laser Technology*, 158, 108811. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108811>
- [2] Nam, K., & Ki, H. (2023). One camera-based laser keyhole welding monitoring system using deep learning. *Journal of Manufacturing Processes*, 104, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.056>
- [3] Ai, Y., Dong, G., Yuan, P., Liu, X., & Yan, Y. (2023). The influence of keyhole dynamic behaviors on the asymmetry characteristics of weld during dissimilar materials laser keyhole welding by experimental and numerical simulation methods. *International Journal of Thermal Sciences*, 190, 108289. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108289>
- [4] Cai, W., Shu, L., Geng, S., Zhou, Q., & Cao, L. (2024). Real-time monitoring of weld surface morphology with lightweight semantic segmentation model improved by attention mechanism during laser keyhole welding. *Optics & Laser Technology*, 174, 110707. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110707>

- [5] Li, J., Jiang, P., Geng, S., & Xiong, J. (2023). Numerical and experimental study on keyhole dynamics and pore formation mechanisms during adjustable-ring-mode laser welding of medium-thick aluminum alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 214, 124443. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124443>
- [6] Wang, L., Yao, M., Gao, X., Kong, F., Tang, J., & Kim, M. J. (2023). Keyhole stability and surface quality during novel adjustable-ring mode laser (ARM) welding of aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 161, 109202. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109202>
- [7] Wang, Z., Jiang, M., Chen, X., Du, Y., Lei, Z., Zhao, S., & Chen, Y. (2024). Mitigating spatters in keyhole-mode laser welding by superimposing additional ring-shaped beam. *Optics & Laser Technology*, 168, 109869. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109869>
- [8] Mukherjee, T., Gao, M., Palmer, T. A., & DebRoy, T. (2023). Keyhole mode wobble laser welding of a nickel base superalloy-Modeling, experiments, and process maps. *Journal of Manufacturing Processes*, 106, 465-479. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.017>
- [9] Kurita, Y., Sato, Y., Fujio, S., Mizutani, M., & Tsukamoto, M. (2023). Influence of the laser-induced plume on welding behavior in keyhole welding for stainless steel using a 16 kW disk laser. *Journal of Laser Applications*, 35(4), 042033. <https://doi.org/10.2351/7.0001173>
- [10] Xia, P., Wang, C., Mi, G., Zhang, M., Xiong, L., Zhang, X., ... & Hu, Y. (2023). Numerical simulation of molten pool flow behavior and keyhole evolution behavior in dual-laser beam oscillating bilateral synchronous welding of T-joints. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 209, 124114. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124114>
- [11] Tan, C., Liu, Y., Xu, B., Wang, H., Liu, F., Gong, X., ... & Song, X. (2023). Numerical and experimental study of thermal fluid flow and keyhole dynamic in laser welding of aluminum alloy assisted by electromagnetic field. *Optics & Laser Technology*, 157, 108718. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108718>
- [12] Ma, C., Li, Y., Cheng, L., Zhao, Y., Wang, J., & Zhan, X. (2024). Numerical analysis of gravity-induced coupling dynamics of keyhole and molten pool in laser welding. *International Journal of Thermal Sciences*, 201, 108987. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108987>
- [13] Svenungsson, J., Choquet, I., & Kaplan, A. F. (2015). Laser welding process—a review of keyhole welding modelling. *Physics Procedia*, 78, 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.042>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Mayi, Y. A., Dal, M., Peyre, P., Bellet, M., & Fabbro, R. (2023). Physical mechanisms of conduction-to-keyhole transition in laser welding and additive manufacturing processes. *Optics & Laser Technology*, 158, 108811. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108811>
- [2] Nam, K., & Ki, H. (2023). One camera-based laser keyhole welding monitoring system using deep learning. *Journal of Manufacturing Processes*, 104, 17-27. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.08.056>
- [3] Ai, Y., Dong, G., Yuan, P., Liu, X., & Yan, Y. (2023). The influence of keyhole dynamic behaviors on the asymmetry characteristics of weld during dissimilar materials laser keyhole welding by experimental and numerical simulation methods. *International Journal of Thermal Sciences*, 190, 108289. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2023.108289>
- [4] Cai, W., Shu, L., Geng, S., Zhou, Q., & Cao, L. (2024). Real-time monitoring of weld surface morphology with lightweight semantic segmentation model improved by attention mechanism during laser keyhole welding. *Optics & Laser Technology*, 174, 110707. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.110707>
- [5] Li, J., Jiang, P., Geng, S., & Xiong, J. (2023). Numerical and experimental study on keyhole dynamics and pore formation mechanisms during adjustable-ring-mode laser welding of medium-thick aluminum alloy. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 214, 124443. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124443>
- [6] Wang, L., Yao, M., Gao, X., Kong, F., Tang, J., & Kim, M. J. (2023). Keyhole stability and surface quality during novel adjustable-ring mode laser (ARM) welding of aluminum alloy. *Optics & Laser Technology*, 161, 109202. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109202>
- [7] Wang, Z., Jiang, M., Chen, X., Du, Y., Lei, Z., Zhao, S., & Chen, Y. (2024). Mitigating spatters in keyhole-mode laser welding by superimposing additional ring-shaped beam. *Optics & Laser Technology*, 168, 109869. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.109869>
- [8] Mukherjee, T., Gao, M., Palmer, T. A., & DebRoy, T. (2023). Keyhole mode wobble laser welding of a nickel base superalloy-Modeling, experiments, and process maps. *Journal of Manufacturing Processes*, 106, 465-479. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.10.017>
- [9] Kurita, Y., Sato, Y., Fujio, S., Mizutani, M., & Tsukamoto, M. (2023). Influence of the laser-induced plume on welding behavior in keyhole welding for stainless steel using a 16 kW disk laser. *Journal of Laser Applications*, 35(4), 042033. <https://doi.org/10.2351/7.0001173>
- [10] Xia, P., Wang, C., Mi, G., Zhang, M., Xiong, L., Zhang, X., ... & Hu, Y. (2023). Numerical simulation of molten pool flow behavior and keyhole evolution behavior in dual-laser beam oscillating bilateral synchronous welding of T-joints. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 209, 124114. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124114>
- [11] Tan, C., Liu, Y., Xu, B., Wang, H., Liu, F., Gong, X., ... & Song, X. (2023). Numerical and experimental study of thermal fluid flow and keyhole dynamic in laser welding of aluminum alloy assisted by electromagnetic field. *Optics & Laser Technology*, 157, 108718. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108718>
- [12] Ma, C., Li, Y., Cheng, L., Zhao, Y., Wang, J., & Zhan, X. (2024). Numerical analysis of gravity-induced coupling dynamics of keyhole and molten pool in laser welding. *International Journal of Thermal Sciences*, 201, 108987. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.108987>
- [13] Svenungsson, J., Choquet, I., & Kaplan, A. F. (2015). Laser welding process—a review of keyhole welding modelling. *Physics Procedia*, 78, 182-191. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.042>

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

Дата надходження статті до редакції: 25.06.2024

Дата затвердження статті до друку: 09.07.2024