

ВСТАНОВЛЕННЯ ВПЛИВУ ЗМІНИ ЗАХИСНОГО ГАЗУ НА УДАРНУ В'ЯЗКІСТЬ СТИКОВИХ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 09Г2С, ОДЕРЖАНИХ ЛАЗЕРНИМ ЗВАРЮВАННЯМ

Артемій Бернацький

кандидат технічних наук, старший дослідник

завідувач відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, bernatskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0002-8050-5580

Олександр Сіора

науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, siora_ov@ukr.net

OCRID: 0000-0003-1927-790X

Микола Соколовський

інженер-технолог I категорії відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, taras_nabok@bigmir.net

OCRID: 0000-0003-3243-5060

Тарас Набок

молодший науковий співробітник відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання»

Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, m_sokolovskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0002-9582-5763

Наталія Шамсутдінова

інженер відділу «Спеціалізована високовольтна техніка та лазерне зварювання» Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона Національної академії наук України, вул. Казимира Малевича, 11, Київ, Україна, 03150, shamsutaliia@gmail.com

OCRID: 0000-0002-3525-0080

Прокат із сталі 09Г2С застосовується при виробництві будівельних конструкцій різної форми й розміру. При цьому висока механічна міцність марки вможливує створення більш тонких виробів, ніж із інших сталей. Також зі сталі 09Г2С виготовляють парові котли, різноманітні труби для транспортування газів і рідин, нафтогазове обладнання, компоненти сільськогосподарських машин. Висока термостійкість дозволяє використовувати дану сталь за широкого спектру температур. За стандартом це сталь для зварних конструкцій, однак насправді сфера її використання дуже широка, це найпопулярніша марка легованої сталі в Україні. Саме з неї виготовляється більша частина фасонного прокату підвищеної міцності. Також саме з цієї марки сталі виготовляють більшу частину листів підвищеної міцності призначених для ємностей під тиском. Достатньо добре вивчені такі способи зварювання сталі 09Г2С, як ручне дугове, дугове під флюсом, дугове в захисному газовому середовищі, аргонодугове неплавким електродом і контактне зварювання. Для таких інноваційних способів зварювання, як лазерне, набуває актуальності потреба у визначенні залежностей зміни характеристик зварних з'єднань, при варіюванні параметрів режимів зварювання. Метою роботи було встановлення впливу зміни захисного газу на ударну в'язкість стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С, одержаних лазерним зварюванням. За результатами виконання досліджень встановлено вплив зміни захисного газу на ударну в'язкість стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С, одержаних лазерним зварюванням. Показано, що заміна газової суміші 82%Ar+18%CO₂ на CO₂ призводить до зростання як абсолютних значень показників, так й зменшення розкиду значень, як для шва так й для зони термічного впливу.

Для зразків, зварених з використанням CO_2 , зростання швидкості зварювання призводить до зменшення абсолютних значень КСУ як для металу шва, так й для зони термічного впливу. Така саме тенденція спостерігається для зразків, зварених з використанням газової суміші $82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$. Для зниження фінансових витрат на виготовлення виробів, що містять у собі стикові зварні з'єднання зі сталі 09Г2С, рекомендується застосування у якості захисного газу CO_2 при застосуванні лазерного способу зварювання.

Ключові слова: сталь 09Г2С, лазерне зварювання, стикові зварні з'єднання, захисний газ, ударна в'язкість.

Вступ. Прокат із сталі 09Г2С застосовується при виробництві будівельних конструкцій різної форми й розміру [1–3]. При цьому висока механічна міцність марки вможливує створення більш тонких виробів, ніж із інших сталей [4–6]. Також зі сталі 09Г2С виготовляють парові котли, різноманітні труби для транспортування газів і рідин (нафта, вода, природний газ), нафтогазове обладнання, компоненти сільськогосподарських машин [7–9]. Висока термостійкість дозволяє використовувати дану сталь за широкого спектру температур, від $-70\text{ }^\circ\text{C}$ до $+450\text{ }^\circ\text{C}$. За стандартом це сталь для зварних конструкцій, однак насправді сфера її використання дуже широка, це найпопулярніша марка легованої сталі в Україні [1; 3; 7]. Саме з неї виготовляється більша частина фасонного прокату (двотаврів, швелерів, кутників) підвищеної міцності. Також саме з цієї марки сталі виготовляють більшу частину листів підвищеної міцності призначених для емностей під тиском (котлів і т.ін.). Сталь 09Г2С є наймасовішою низьколегованою і, взагалі, не рядовою маркою сталі в Україні. Саме на неї припадає більше половини випуску усіх спецсталей в Україні.

Достатньо добре вивчені такі способи зварювання сталі 09Г2С, як ручне дугове, дугове під флюсом, дугове в захисному газовому середовищі, аргонодугове неплавким електродом, електрошлакове зварювання [9], контактне зварювання. Для таких інноваційних способів зварювання, як лазерне, набуває актуальності потреба у визначенні залежностей зміни характеристик зварних з'єднань, при варіюванні параметрів режимів зварювання.

Метою роботи є встановлення впливу зміни захисного газу на ударну в'язкість стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С, одержаних лазерним зварюванням.

МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

Хімічний склад сталі 09Г2С наведений у табл. 1.

Мікроструктура сталі 09Г2С являла собою ферито-перлітну суміш із об'ємною часткою перлітної складової 25–30%, смугастістю 3–4 бали Ряд Б за ДСТУ 8974:2019. Величина феритного зерна сталі відповідала переважно 6–7 номеру; перлітного зерна, близького до полідрічної форми, – 8–9 номеру.

Виконані експерименти по лазерному зварюванню стикових з'єднань пластин сталі 09Г2С розміром $L \times B \times h = 300 \times 150 \times 3$ мм. Для фокусування випромінювання лазера «Rofin-Sinar DY044» використовувалася кварцова лінза з фокусною відстанню 300 мм. Обробка виконувалася при варіюванні потужності лазерного випромінювання в межах $P = 3,0 \dots 4,4$ кВт, швидкості обробки $V = 40,0 \dots 150,0$ м/год і величини расфокусування випромінювання $\Delta F = 0 \dots 2$ мм. Захист зварювальної ванни та остигаючого металу шва зварного з'єднання здійснювався за допомогою подачі захисного газу. В якості захисних газів використовувалися вуглекислота (CO_2) і суміш аргону з вуглекислотою ($82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$). Витрати захисного газу варіювалися від 10 л/хв до 14 л/хв.

За результатами візуального, капілярного і радіографічного контролю виконано роботи з оцінки рівня якості отриманих стикових зварних з'єднань пластин зі сталі 09Г2С, згідно ДСТУ EN ISO 13919-1:2015. На окремих режимах виявлені дефекти у вигляді поодиноких пор і їх скупчень, а також просідання шва і незаварений кратер в кінці шва. Для усунення виявлених дефектів були розроблені і використані такі технологічні прийоми:

- 1) зміна складу газу, що захищає зварювальну ванну, замість суміші ($82\% \text{Ar} + 18\% \text{CO}_2$) застосували CO_2 ;
 - 2) виконання прихваток перед зварюванням;
 - 3) використання вивідних планок.
- 3 використанням розроблених технологічних

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 09Г2С

Масова частка елементів (максимальна), %								
C	Si	Mn	Al	Ti	V	Nb	S	P
0,092	0,568	1,48	0,009	0,008	<0,02	<0,002	0,014	0,012

приймів, виконано виготовлення бездефектних зразків на таких режимах: потужність лазерного випромінювання складала $P = 3,0$ кВт; розфокусування лазерного випромінювання становило $\Delta F = -1$ мм; витрати захисного газу 14 л/хв. Змінювались швидкість зварювання та вид захисного газу (див. табл. 2). Для цієї групи зразків проведено випробування на ударний вигин.

Випробування на ударний вигин зразків, виготовлених з стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С, проводилися на маятниковому копрі типу 2130 КМ-0,3. В результаті випробування визначена ударна в'язкість КСУ металу шва і зони термічного впливу (ЗТВ) зразків при температурі -60 °С. Дані за результатами випробувань на ударний вигин зведені в табл. 2.

Як видно з табл. 2, межі варіювання значень КСУ стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С від 47 до 191 Дж/см². За результатами випробувань встановлено, що всі зразки зварних з'єднань відповідають технічним вимогам, до таких з'єднань (ударна в'язкість на зразках КСУ повинна бути не менше 29 Дж/см² при температурі випробувань мінус 60 °С).

Аналіз результатів випробувань стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С на ударний вигин показує, що при заміна газової суміші 82% Ar + 18% CO₂ на CO₂ призводить до зростання як абсолютних значень показників, так й зменшення розкиду значень, як для шва так й для ЗТВ.

Для зразків № 1025 та № 1027, зварених з використанням CO₂, зростання швидкості зварювання призводить до зменшення абсолютних значень КСУ як для металу шва, так й для ЗТВ. Така саме тенденція спостерігається для зразків № 1024 та № 1028, зварених з використанням газової суміші 82% Ar + 18% CO₂.

Таким чином, для зниження фінансових витрат на виготовлення виробів, що містять у собі стикові зварні з'єднання зі сталі 09Г2С, можна рекомендувати застосування у якості захисного газу CO₂ при виготовленні виробів із застосуванням лазерного зварювання.

Висновки. 1. За результатами виконання досліджень встановлено вплив зміни захисного газу на ударну в'язкість стикових зварних з'єднань сталі 09Г2С, одержаних лазерним зварюванням. Показано, що заміна газової суміші

Таблиця 2

Результати випробувань на ударний вигин зварних з'єднань сталі 09Г2С, зварених лазерним зварюванням

Номер зразка	Маркування зварного з'єднання та параметри зварювання	Ударна в'язкість КСУ, Дж/см ² при -60°	Примітка
1	№1025 Швидкість зварювання $V = 90$ м/год. Захисний газ – CO ₂	151,5	Надріз по шву
2		156,8	Надріз по шву
3		167,3	Надріз по шву
4		81,7	Надріз по ЗТВ
5		63,8	Надріз по ЗТВ
6		90,30	Надріз по ЗТВ
7		№1027 Швидкість зварювання $V = 60$ м/год. Захисний газ – CO ₂	191,8
8	165,7		Надріз по шву
9	191,2		Надріз по шву
10	84,0		Надріз по ЗТВ
11	93,3		Надріз по ЗТВ
12	97,3		Надріз по ЗТВ
13	№1028 Швидкість зварювання $V = 72$ м/год. Захисний газ – (82% Ar + 18% CO ₂)	138,1	Надріз по шву
14		115,6	Надріз по шву
15		136,9	Надріз по шву
16		94,3	Надріз по ЗТВ
17		95,83	Надріз по ЗТВ
18		96,0	Надріз по ЗТВ
19	№1024 Швидкість зварювання $V = 90$ м/год. Захисний газ – (82% Ar + 18% CO ₂)	91,5	Надріз по шву
20		125,7	Надріз по шву
21		96,74	Надріз по шву
22		40,31	Надріз по ЗТВ
23		84,7	Надріз по ЗТВ
24		47,1	Надріз по ЗТВ

82% Ar + 18%CO₂ на CO₂ призводить до зростання як абсолютних значень показників, так і зменшення розкиду значень, як для шва, так і для ЗТВ.

2. Для зразків, зварених з використанням CO₂, зростання швидкості зварювання призводить до зменшення абсолютних значень КСУ як для металу шва, так і для ЗТВ. Така саме тенденція спостерігається для зразків, зварених з використанням газової суміші 82% Ar + 18% CO₂.

3. Для зниження фінансових витрат на виготовлення виробів, що містять у собі стикові зварні з'єднання зі сталі 09Г2С, рекомендується застосування у якості захисного газу CO₂ при застосуванні лазерного способу зварювання.

ЛІТЕРАТУРА

1. Laukhin D. et al. Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Т. 3. №. 12(111). С. 25–31. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234783>
2. Gloc M. et al. Hydrogen influence on microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of low alloy steel and explosively clad steel used for hydrogen storage salt caverns. *Applied Mechanics and Materials*. 2018. Т. 875. С. 47–52. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.875.47>
3. Nyrkova L. I. et al. Regularities of stress-corrosion cracking of pipe steel 09G2S at cathodic polarization in a model soil environment. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2021. Т. 22. №. 4. С. 828–836. URL: <https://doi.org/10.15330/pcss.22.4.828-836>
4. Degtyarev V. A. Effect of weld strengthening techniques on the fatigue resistance enhancement. *Strength of Materials*. 2013. Т. 45. №. 5. С. 574–586. URL: <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9495-5>
5. Knysh V. V., et al. Effectiveness of strengthening butt welded joints after long-term service by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding Journal*. 2014. Т. 3. №. 11. С. 43. URL: <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.11.08>
6. Degtyarev V. A. Effect of residual stresses on the fatigue resistance of welded joints of steels of different strength levels. *Strength of Materials*. 2020. Т. 52. №. 2. С. 268–274. URL: <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00174-x>
7. Poznyakov V. D. et al. Microstructural features of fatigue damageability and methods to improve the fatigue life of welded joints from 09G2S steel. *The Paton Welding Journal*. 2012. Т. 5. №. 26. С. 32–37. URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/05/6.pdf>
8. Laukhin D. et al. Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Key Engineering Materials*. 2020. Т. 844. С. 146–154. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146>
9. Protokovilov I. V., Porokhonko V. B. Control of formation of welded joints in ESW. *The Paton Welding Journal*. 2012. №. 10. С. 49–54. URL: <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/10/10.pdf>

DETERMINATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE SHIELDING GAS CHANGE ON THE IMPACT TOUGHNESS OF 09G2S STEEL BUTT-WELDED JOINTS OBTAINED VIA LASER WELDING

Artemii Bernatskyi

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,

Head of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kazymyr Malevych str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150, Bernatskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0002-8050-5580

Oleksandr Siora

Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kazymyr Malevych str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150, siora_ov@ukr.net

OCRID: 0000-0003-1927-790X

Mykola Sokolovskyi

Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kazymyr Malevych str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150, sokolovskyi@paton.kiev.ua

OCRID: 0000-0003-3243-5060

Taras Nabok

Researcher of the Department of the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kazymyr Malevych str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150, taras_nabok@bigmir.net

OCRID: 0000-0002-9582-5763

Nataliia Shamsutdinova

Engineer of the Department the Specialized High-Voltage Engineering and Laser Welding

E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kazymyr Malevych str., 11, Kyiv, Ukraine, 03150, shamsutaliia@gmail.com

OCRID: 0000-0002-3525-0080

Rolled 09G2S steel is used in the production of differently shaped and sized building structures. At the same time, the high mechanical strength of the material allows for the creation of thinner products compared to steels. Steam boilers, various pipes for transporting gases and liquids, oil and gas equipment as well as components of agricultural machines are also made from 09G2S steel. High heat resistance of this steel alloy allows for its usage in a wide range of temperatures. According to the standard, this steel is meant for creation of welded constructions, however, in reality the scope of its usage is very wide, being the most widely used steel alloy in Ukraine. It is from this material that most of the rolled complex shape products of increased strength are made. Also, it is the most used type of steel alloy, from which the high-strength sheets intended for pressure vessels are made. Such methods of welding 09G2C steel as: manual arc, arc under flux, arc in a protective gas environment, argon arc with a non-fusible electrode as well as contact welding are quite well researched. Meanwhile, for such innovative methods of welding such as laser welding, the need to determine the dependence of changes in the characteristics of welded joints, when the parameters of the welding modes are varied, is becoming more relevant. The aim of this study is to establish the effectiveness of changing the shielding gas on the impact toughness of 09G2S steel butt-welded joints obtained by laser welding. According to the results of the research, the effectiveness of shielding gas changes on the impact toughness of butt-welded joints of 09G2S steel obtained by laser welding was calculated. It was shown that the replacement of the 82% Ar + 18% CO₂ gas mixture with CO₂ leads to an increase in both the absolute values of the indicators as well as a decrease in the spread of values, both for the seam and for the heat-affected zone. For samples welded using CO₂, an increase in the welding speed leads to a decrease of the absolute KCU values for both the weld metal and the heat-affected zone. The same trend is observed for samples welded using a gas mixture of 82% Ar + 18% CO₂. To reduce the financial costs of manufacturing products containing butt-welded joints made of 09G2C steel, it is recommended to use CO₂ as a shielding gas during laser welding.

Key words: 09G2S steel, laser welding, butt-welded joints, shielding gas, impact toughness.

REFERENCES

1. Laukhin, D., Poznyakov, V., Kostin, V., Beketov, O., Rott, N., Slupska, Y., ... & Liubymova-Zinchenko, O. (2021). Features in the formation of the structural state of low-carbon micro-alloyed steels after electron beam welding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12(111)), 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.234783>
2. Gloc, M., Szwed, M., Zagórski, A., & Mizera, J. (2018). Hydrogen influence on microstructure, corrosion resistance and mechanical properties of low alloy steel and explosively clad steel used for hydrogen storage salt caverns. *Applied Mechanics and Materials*, 875, 47–52. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.875.47>
3. Nyrkova, L. I., Lisovy, P. E., Goncharenko, L. V., Osadchuk, S. O., Kostin, V. A., & Klymenko, A. V. (2021). Regularities of stress-corrosion cracking of pipe steel 09G2S at cathodic polarization in a model soil environment. *Physics and Chemistry of Solid State*, 22(4), 828-836. <https://doi.org/10.15330/pccs.22.4.828-836>
4. Degtyarev, V. A. (2013). Effect of weld strengthening techniques on the fatigue resistance enhancement. *Strength of Materials*, 45(5), 574-586. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9495-5>
5. Knysh, V. V., Solovej, S. A., & Kuzmenko, A. Z. (2014). Effectiveness of strengthening butt welded joints after long-term service by high-frequency mechanical peening. *The Paton Welding Journal*, 3(11), 43. <https://doi.org/10.15407/tpwj2014.11.08>

6. Degtyarev, V. A. (2020). Effect of residual stresses on the fatigue resistance of welded joints of steels of different strength levels. *Strength of Materials*, 52(2), 268–274. <https://doi.org/10.1007/s11223-020-00174-x>

7. Poznyakov, V. D., Dovzhenko, V. A., Kasatkin, S. B., & Maksimenko, A. A. (2012). Microstructural features of fatigue damageability and methods to improve the fatigue life of welded joints from 09G2S steel. *The Paton Welding Journal*, 5(26), 32–37. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/05/6.pdf>

8. Laukhin, D., Pozniakov, V., Beketov, O., Rott, N., & Shchudro, A. (2020). Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels. *Key Engineering Materials*, 844, 146–154. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.844.146>

9. Protokovilov, I. V., & Porokhonko, V. B. (2012). Control of formation of welded joints in ESW. *The Paton Welding Journal*, (10), 49–54. Retrieved from <https://patonpublishinghouse.com/tpwj/pdf/2012/pdfarticles/10/10.pdf>

Стаття надійшла 10.08.2022