

УДК: 621.791.75:537.811

СТРУКТУРА З'ЄДНАНЬ НИЗЬКОЛЕГОВАНОЇ СТАЛІ ЗА ЗВАРЮВАННЯ ПІД ДІЄЮ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГО ПОЛЯ

О. Д. РАЗМИШЛЯЄВ¹, С. Ю. МАКСИМОВ², О. М. БЕРДНІКОВА²,
О. О. ПРИЛИПКО², О. С. КУШНАРЬОВА², І. І. АЛЕКСЕЄНКО²

¹ ГВУЗ "Приазовський державний технічний університет", Маріуполь;

² Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ

Вивчено параметри зони термічного впливу (ЗТВ), мікроструктуру, фазовий склад та мікротвердість металу зварних з'єднань (ЗЗ) сталі 09Г2С, отриманих без та зі застосуванням поздовжнього або поперечного електромагнетних полів. Проаналізовано зміни структурних параметрів металу швів і ЗТВ на ділянках перегріву, нормалізації тощо. Встановлено умови одержання якісних ЗЗ під впливом зовнішнього електромагнетного поля, які забезпечують тріщиностійкість металу.

Ключові слова: *низьколегована сталь, зварні з'єднання, магнетне поле, зона термічного впливу, мікроструктура, фазовий склад, мікротвердість.*

Parameters of heat-affected zone (HAZ) effect on microstructure, phase composition, and microhardness of welded joints (WJ) metal of 09Г2С steel, obtained without and with the use of longitudinal and transverse electromagnetic fields, are studied. Changes in the structural parameters of the weld metal and the heat affected zone in the areas of overheating, normalization, etc. were analyzed. The conditions for obtaining high-quality crack resistant welded joints under the influence of an external electromagnetic field were determined.

Keywords: *low-alloy steel, welded joints, magnetic field, heat-affected zone, microstructure, phase composition, microhardness.*

Вступ. Ефективність процесів дугового зварювання та наплавлення залежить від продуктивності розплавлення електродного металу зварювального дроту та можливості управляти геометричними розмірами поздовжнього перерізу зварних швів або наплавлених валиків. Існують різні методи впливу на дугове зварювання (наплавлення). Щоб керувати процесами плавлення електродного та основного металів, а також кристалізацією металу зварювальної ванни, доцільно застосовувати зовнішнє електромагнетне поле (ЗЕП), яке впливає на краплю, дугу та рідкий метал ванни. Під час дугового зварювання використовують поздовжні та поперечні ЗЕП, коли вектор індукції паралельний або перпендикулярний до осі електрода та дуги.

Під час застосування ЗЕП керуючі пристрої не контактують зі зоною зварювання та не потрібно суттєво змінювати стандартне обладнання та техніку. Слід, однак, зауважити, що багато аспектів впливу зовнішніх магнетних полів на дугове зварювання не досліджено [1, 2]. Виявлено, що магнетні поля під час дугового наплавлення та зварювання збільшують коефіцієнт розплавлення електродного дроту, а форму, розміри шва в перерізі і якість формування швів визначає характер руху рідкого металу в зварювальній ванні під дією ЗЕП. Проте не відомо, на

якій стадії подрібнюється структура металу зварних швів: під час первинної кристалізації, чи вторинних перетворень. Відсутня інформація про оптимальні параметри знакозмінних магнетних полів для ефективного перемішування розплаву в ванні [3–9].

Мета дослідження – вивчити дію знакозмінних магнетних полів на мікроструктуру, фазовий склад та мікротвердість металу зварних з'єднань (ЗЗ) низьколегованої сталі, отриманих під впливом ЗЕП.

Матеріал та методика. Зварювали пластини зі сталі 09Г2С товщиною 4 mm. Режими зварювання: струм $I = 360$ А; напруга на дузі $U = 30...32$ V; швидкість зварювання $v = 30$ m/h; флюс АН-348 А; присадковий дріт Св-08А, $\varnothing 3$ mm; зворотна полярність; на флюсо-мідній підкладці. Тип з'єднання С4 (ГОСТ 8713-78). Отримали три варіанти зразків: № 1 – без застосування ЗЕП; № 2 та 3 – з використанням поздовжнього ($f = 2$ Hz) та поперечного ($f = 6$ Hz) магнетних полів.

ЗЕП створювали індуктором, розміщеним на тримачі механізму, який подавав порошковий дріт. Живлячись змінним струмом промислової частоти, індуктор викликав змінне магнетне поле, яке пронизувало зварювальну ванну рідкого металу. Магнетна індукція в зоні ванни становила $20...25$ mT.

Досліджували основний метал (ОС), метал швів (МШ), лінію сплавлення (ЛС) та різні ділянки зони термічного впливу (ЗТВ): I – перегріву (великого зерна); II – нормалізації (повної перекристалізації); III – неповної перекристалізації; IV – рекристалізації. Вивчали морфологію фериту (F) та перліту (P), розміри зерен (D), їх ширину (h) за витягнутої форми, товщину феритних прошарків (δ_F) та мікротвердість (HV). Мікроструктуру досліджували, використовуючи мікроскопи Neophot-32 і Versamet-2 (Японія). Твердість за Віккерсом вимірювали приладом М-400 (Лесо, США) за навантаження 100 g.

Результати та їх обговорення. Структура ОМ при $D_F = 10...20$ μm , $D_P = 40...80$ μm і $HV = 1650...1760$ МПа (рис. 1а), а також МШ варіанта № 1 феритно-перлітна. У центрі шва ширина зерна перліту $h_P = 40...140$ μm (рис. 1б) при $HV_P = 2060$ МПа, а зерна фериту $h_F = 40...100$ μm при $HV_F = 1810...1870$ МПа. У корені шва h_P та $h_F = 60...100$ μm . На ЛС мікротвердість порівняно із центром шва дещо знижується: $HV_P = 1930$ МПа; $HV_F = 1700$ МПа.

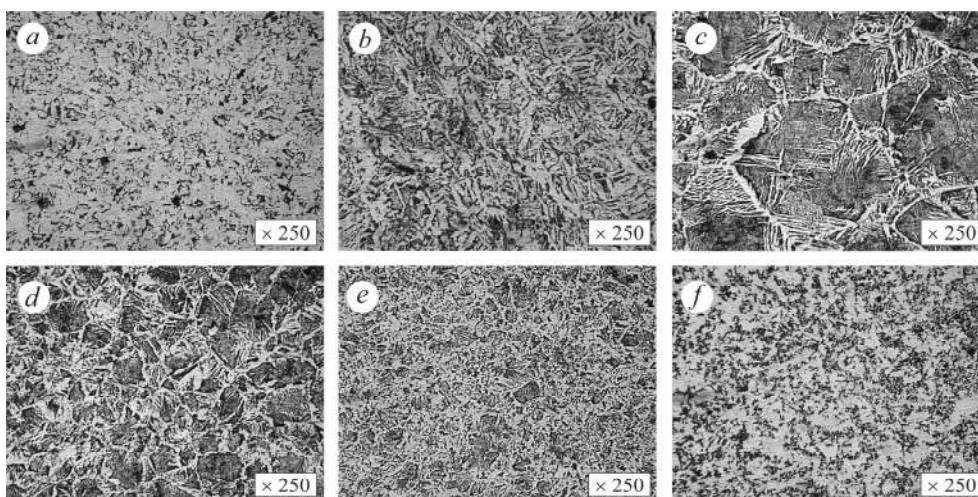


Рис. 1. Мікроструктура ОМ (а), МШ (б) та ЗТВ: I (с); II (д); III (е); IV (ф) ЗЗ варіанта № 1.

Fig. 1. Microstructure of base metal (a), weld metal (b) and heat-affected zone: I (c); II (d); III (e); IV (f) welded joint of variant № 1.

У ЗТВ I формується перлітна структура з розміром зерен $D_P = 140...340 \mu\text{m}$ та прошарками фериту $\delta_F = 20...100 \mu\text{m}$ при $HV_P = 2130...2210 \text{ MPa}$ і $HV_F = 2060 \text{ MPa}$ (рис. 1с). У ЗТВ II–IV вона помітно подрібнюється (табл. 1; рис. 1d–f). У ЗТВ II мікротвердість така ж, як і в ЗТВ I, і зменшується у ЗТВ III–IV.

Таблиця 1. Розмір зерен (D , μm) та мікротвердість (HV , MPa) металу ЗТВ зварних з'єднань

Зони	D_F	D_P	HV_F	HV_P
З'єднання № 1				
ЗТВ I	–	140...340	2060	2130...2210
ЗТВ II	30...50	30...100	2060	2210
ЗТВ III	10...40	10...40	1930...1990	
ЗТВ IV	20...50	30...80	1700...1930	
З'єднання № 2				
ЗТВ I	–	100...360	1810...1990	2110...2130
ЗТВ II	30...70	30...80	1870...1930	2060
ЗТВ III	20...30	10...40	1810...1930	
ЗТВ IV	20...50	10...50	1870	
З'єднання № 3				
ЗТВ I	–	100...280	1760...1930	1990...2060
ЗТВ II	10...60	20...70	1760...1810	1870...1990
ЗТВ III	20...40	10...30	1700...1870	
ЗТВ IV	40...70	10...40	1760...1930	

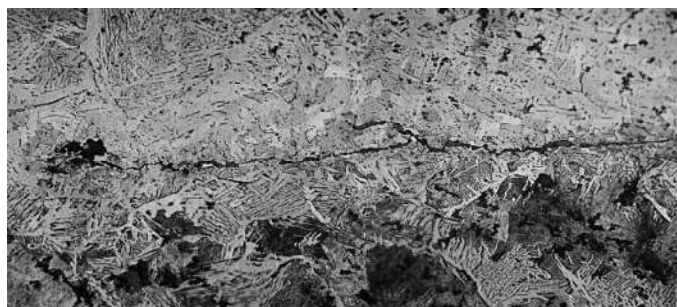
У зразку варіанта № 2 ширина кристалітів F і P металу зварного шва така: $h_P = 100...160 \mu\text{m}$ при $HV_P = 1990...2080 \text{ MPa}$ і $h_F = 40...100 \mu\text{m}$ при $HV_F = 1760...1930 \text{ MPa}$. У корені шва $h_P = 60...140 \mu\text{m}$ і $h_F = 20...40 \mu\text{m}$. На ЛС $h_P = 60...140 \mu\text{m}$ і $h_F = 20...40 \mu\text{m}$ із невеликим зростанням мікротвердості порівняно із центром шва: $HV_P = 1990...2280 \text{ MPa}$ і $HV_F = 1680...1990 \text{ MPa}$.

У ЗТВ I структура перлітна з розміром зерен $D_P = 100...360 \mu\text{m}$ та прошарками фериту $\delta_F = 30...70 \mu\text{m}$ при $HV_P = 2130...2210 \text{ MPa}$, $HV_F = 1810...1990 \text{ MPa}$. У ЗТВ II–IV вона подрібнюється, а мікротвердість практично не змінюється (табл. 1).

У ЗТВ варіанта № 2 у зоні ЛС, тобто за переходу від МШ у ЗТВ I, зафіксували холодну тріщину довжиною $1600 \mu\text{m}$ (рис. 2).

Рис. 2. Тріщина вздовж ЛС (варіант № 2).

Fig. 2. Crack along the fusion line (variant № 2).



Досліджуючи зразок варіанта № 3, встановили, що ширина зерна перліту у металі зварного шва $h_p = 100...200 \mu\text{m}$ при $HV_p = 1930 \text{ МПа}$, а феритних зерен $h_F = 20...60 \mu\text{m}$ при $HV_F = 1600...1760 \text{ МПа}$. У корені шва та на ЛС $h_p = 60...220 \mu\text{m}$ і $h_F = 40...140 \mu\text{m}$ при $HV_p = 1930...2060 \text{ МПа}$ і $HV_F = 1600...1760 \text{ МПа}$.

У ЗТВ I структура перлітна з розміром зерен $D_p = 100...280 \mu\text{m}$ та прошарками фериту $\delta_F = 20...50 \mu\text{m}$ при $HV_p = 1990...2060 \text{ МПа}$, $HV_F = 1760...1930 \text{ МПа}$ (табл. 1). У ЗТВ II–IV вона дрібнозерниста за незначного зменшення мікротвердості.

Зіставляючи значення HV та розміри зеренної структури зразків, виявили таке. Для варіанта № 1 (без ЗЕП) мікротвердість HV у ЗТВ I та II помітно підвищується проти МШ. Для варіанта № 2 (поздовжнє магнетне поле), порівняно з варіантом № 1, біля ЛС від шва та у ЗТВ I вона зростає. При цьому її градієнт ΔHV між структурними складниками до 320 МПа , що може бути причиною тріщиноутворення за подальшого крихкого руйнування ЗЗ.

Найрівномірніший розподіл значень HV як у МШ, так і ЗТВ для ЗЗ варіанта № 3 (поперечне магнетне поле). Під час застосування ЗЕП у ЗЗ варіантів № 2 та 3 порівняно з № 1 (без ЗЕП) у МШ поблизу ЛС зеренна структура незначно укрупняється. За переходу до ЗТВ вона подрібнюється: незначно – для варіанта № 2 та більше – для варіанта № 3.

Для варіанта № 3 у ЗТВ I та II зерно подрібнюється відчутніше (в середньому у 1,3 рази), ніж для варіанта № 1. Таке диспергування структури забезпечуватиме як міцність, так й підвищуватиме в'язкість руйнування металу, а отже, тріщиностійкість ЗЗ. Слід зазначити, що вплив ЗЕП на структурні зміни найпомітніший у таких локальних ділянках ЗЗ, як ЛС та ЗТВ I і II.

Встановили, що зовнішні магнетні поля не тільки впливають на форму та розмір зварних швів [4], а й на розміри ділянок ЗТВ (табл. 2). У ЗЗ № 2 та 3 їх ширина дещо збільшується (табл. 1), що пов'язано із характером руху рідкого металу в зварювальній ванні під дією ЗЕП та особливостями його нагріву та охолодження.

Таблиця 2. Ширина (μm) ділянок ЗТВ зварних з'єднань

ЗТВ	№ варіанта з'єднання		
	1	2	3
ЗТВ I	1000...1600	1000...1600	1600...2200
ЗТВ II	1000	1200	1600
ЗТВ III	600	1000	1400
ЗТВ IV	600	800	1000

Таким чином, і поздовжнє, і поперечне магнетні поля впливають на структуру, мікротвердість металу швів та ЗТВ, а також на формування тріщин у ЗЗ низьколегованої сталі. Під дією поздовжнього поля у зоні ЛС формується крупнозерниста структура, спостерігаються градієнти мікротвердості та утворюються тріщини. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування ЗЗ. Поперечне магнетне поле забезпечує рівномірну мікротвердість як у МШ, так і на ділянках ЗТВ, подрібнення зеренної структури на ділянках перегріву (ЗТВ I) та нормалізації (ЗТВ II). Через такі структурні зміни збільшуватиметься не тільки міцність, а й в'язкість руйнування металу, а отже, тріщиностійкість ЗЗ [10].

ВИСНОВКИ

Під час дугового зварювання магнетні поля впливають на розмір ЗТВ та параметри зернової структури і мікротвердість металу з'єднання. Зовнішнє електромагнетне поле під час зварювання сталі 09Г2С діє у зоні ЛС та ЗТВ I і II. Під час застосування поздовжнього магнетного поля у зоні ЛС крупнозерниста структура і градієнт мікротвердості призводять до тріщиноутворення. Поперечне магнетне поле сприяє формуванню структури металу ЗЗ за рівномірної мікротвердості як у МШ, так і на ділянках ЗТВ та помітне подрібнення структури на ділянках перегріву (ЗТВ I) та нормалізації (ЗТВ II).

1. Рыжов Р. Н., Кузнецов В. Д. Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор) // Автомат. сварка. – 2006. – № 10. – С. 36–44.
2. Черныш В. П. Расчет параметров движения металла при электромагнитном перемешивании // Автомат. сварка. – 1977. – № 10. – С. 26.
3. Ahieieva A. D. Rational using of the controlling longitudinal and transverse magnetic fields at arc welding and surfacing // IOP Conf. Series: Mater. Sci. and Eng. – 2019. – **582**. – 6 p.
4. Агеева М. В., Размышляев А. Д. Влияние комбинированного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при дуговой наплавке // Технічні науки та технології. – 2019. – **18**, № 4. – С. 22–27.
5. Болдырев А. М., Биржев В. А., Черных А. В. К расчету гидродинамических параметров жидкого металла на дне сварочной ванны при дуговой сварке // Сварочное производство. – 1992. – № 2. – С. 31–33.
6. Болдырев А. М., Биржев В. А., Мартыненко А. И. Исследование влияния переменного аксиального магнитного поля на процесс плавления электродной проволоки // Сварочное производство. – 2008. – № 2. – С. 6–8.
7. Миронова М. В. К выбору оптимальных схем устройств ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки // Зб. наук. пр. Дніпродзержинськ. держ. техн. ун-ту (технічні науки). – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. – Вип. 1 (21). – С. 74–78.
8. Сидорец В. Н., Жерносеков А. М., Рымар С. В. Импульсно-дуговая сварка как основа современных технологий сварки плавящимся электродом // Вісник Донбаськ. держ. машинобудівної академії. – 2016. – № 2 (38). – С. 221–225.
9. Лазаренко М. А., Размышляев А. Д. Структура управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки при использовании устройств с цилиндрической симметрией // Вісник ПДТУ. – Маріуполь, 2000. – Вип. 9. – С. 160–163.
10. Influence of external electromagnetic fields on the structure of joints in the course of underwater welding / O. M. Berdnikova, S. Y. Maksimov, O. O. Prilipko, T. A. Alekseenko, E. V. Polovetskyi, and I. I. Alekseienco // Materials Science. – 2021. – **57**, № 1. – P. 61–70.

Одержано 12.05.2022