

ВПЛИВ КОНФІГУРАЦІЇ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ МЕТАЛУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ КОНСТРУКЦІЙНОЇ СТАЛІ

О.Д. Размишляєв¹, С.Ю. Максимов², О.М. Берднікова², О.О. Прилипко², О.С. Кушнарьова²,
Т.О. Алексеєнко²

¹ДВНЗ «ПДТУ». 87500, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7. E-mail: office@psty.edu

²ІЕЗ ім. С.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Досліджено особливості структури металу зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі після зварювання із застосуванням зовнішнього електромагнітного поля. Вивчено фазовий склад, мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань, отриманих без та із застосуванням знакозмінних магнітних полів – поздовжнього або поперечного. Проаналізовано структурні параметри в металі швів та ділянках зони термічного впливу. Встановлено умови одержання якісних зварних з'єднань під час зварювання низьколегованих сталей під впливом зовнішнього електромагнітного поля, які забезпечують зміцнення та тріщиностійкість металу. Бібліогр. 10, табл. 1, рис. 4.

Ключові слова: конструкційна низьколегована сталь, зварні з'єднання, зовнішній електромагнітний вплив, знакозмінні магнітні поля, зона термічного впливу, фазовий склад, мікроструктура, мікротвердість

Вступ. Вимоги до якості й надійності зварних з'єднань постійно зростають. Потреба в розширенні асортименту сталей при зварюванні привели до розвитку наукового напрямку щодо використання зовнішнього електромагнітного впливу (ЗЕВ) на розплави зварювальної ванни для інтенсифікації процесів його дегазації, зниження вмісту водню, подрібнення структури, підвищення значень показників міцності й пластичності швів. У результаті експериментальних досліджень показана справедливність теоретичних висновків про ефективність ЗЕВ для зниження схильності металу швів до утворення пор, а механізм дегазації, сформований під впливом ЗЕВ, сприяє досягненню високого ступеня однорідності дрібнопористості. Для його уточнення потрібно визначити характер розподілу ліній електричного струму в зварювальній ванні з урахуванням умов зварювання. На основі цього стає можливим визначення оптимальних параметрів ЗЕВ і виконання розрахунків індуктора. Останній повинен бути виконаний таким чином, щоб створити магнітну індукцію саме в активній частині зварювальної ванни, тобто області, в якій відбувається ефективна взаємодія електричного струму і зовнішнього електромагнітного поля, що викликає переміщення розплаву [1–3].

Розв'язання актуальної проблеми підвищення ефективності процесу дугового наплавлення і зварювання плавким електродом з дією керуючих магнітних полів дозволить підвищити продуктивність процесу розплавлення електродного дроту, ефективність керування глибиною та шириною зварних

швів та наплавлених валиків, ефективність перемішування рідкого металу зварювальної ванни.

При дуговому зварюванні застосовують поздовжні магнітні (ПДМП) і поперечні магнітні поля (ПОМП). У перших вектор індукції паралельний, у других – перпендикулярний до осі електрода та дуги [3, 4].

Розрахунками визначено значення швидкості й прискорення, які досягає рідкий метал під дією знакозмінного ЗЕВ, а також оптимальні значення індукції та частоти ПДМП, ПОМП, що забезпечують ефективне перемішування розплаву по всій довжині ванни при електродуговому наплавленні [5–10]. Проте невідомо про вплив ПДМП і ПОМП на структуру, що при цьому формується в металі зварних швів та у зоні термічного впливу (ЗТВ).

Метою даної роботи є встановлення закономірностей впливу знакозмінного ЗЕВ (ПДМП, ПОМП) на структурно-фазовий склад, мікротвердість та мікроструктуру зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С.

Матеріал та методи. В результаті зварювання конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С (товщиною 14 мм) присадковим дротом Св-08А (діаметром 3 мм) (флюс АН-348) отримано зварні з'єднання без та із застосуванням ЗЕВ на режимах зварювання: струм $I = 360$ А; напруга на дузі $U = 30 \dots 32$ В; швидкість зварювання $v = 30$ м/год, зворотна полярність, на флюсомідній підкладці. Тип з'єднання С4 (ГОСТ 8713–78).

ЗЕВ здійснювали індуктором, розміщеним на тримачі механізму, який подавав порошковий дріт,

Максимов С.Ю. – <https://orcid.org/0000-0002-5788-0753>, Берднікова О.М. – <https://orcid.org/0000-0001-9754-9478>, Прилипко О.О. – <https://orcid.org/0000-0001-5244-5624>, Кушнарьова О.С. – <https://orcid.org/0000-0002-2125-1795>, Алексеєнко Т.О. – <https://orcid.org/0000-0001-8492-753X>

© О.Д. Размишляєв, С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, О.С. Кушнарьова, Т.О. Алексеєнко, 2022

співвісно з ним. Живлячись змінним струмом промислової частоти, індуктор створював змінне магнітне поле, яке пронизувало зварювальну ванну рідкого металу. Магнітна індукція в зоні зварювальної ванни становила 20...25 мТл. Отримано три варіанти зварних з'єднань: без застосування ЗЕВ; із застосуванням ПДМП ($f = 2$ Гц) та ПОМП ($f = 6$ Гц).

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової мікроскопії (мікроскопи «Neophot-32» і «Versamet-2», Японія). Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі М-400 (фірми «Лесо», США) при навантаженні 0,1 кг.

Результати та їх обговорення. У зварних з'єднаннях досліджено основний метал (ОМ), метал швів, лінію сплавлення (ЛС), ЗТВ по ділянках: I – перегріву (великого зерна); II – нормалізації (повної перекристалізації); III – неповної перекристалізації; IV – рекристалізації. Вивчали структури фериту Φ , перліту Π , розміри зерен D_3 , ширину кристалітів $h_{кр}$, товщину феритних прошарків $\delta(\Phi)$ та мікротвердість HV .

Встановлено, що ПДМП і ПОМП мають вплив на розміри ділянок ЗТВ (таблиця). У досліджуваних зварних з'єднаннях при застосуванні ЗЕВ ширина ділянок ЗТВ збільшується (таблиця), що пов'язано із характером руху рідкого металу в зварювальній ванні під дією ЗЕВ, особливостями нагрівання та охолодження металу.

Ширина (мкм) ділянок ЗТВ зварних з'єднань

Ділянки ЗТВ	Зварні з'єднання		
	Без ЗЕВ	ПДМП	ПОМП
I	1000...1600	1000...1600	1600...2200
II	1000	1200	1600
III	600	1000	1400
IV	600	800	1000

Структура ОМ сталі 09Г2С феритно-перлітна при $D_3(\Phi) = 10...20$ мкм, $D_3(\Pi) = 40...80$ мкм і $HV = 1650...1760$ (рис. 1, а). Структура металу зварних швів у всіх з'єднаннях також феритно-перлітна (Φ - Π) (рис. 1, б-г).

У центрі металу шва без ЗЕВ розмір (ширина) кристалітів перліту становить $h_{кр}(\Pi) = 140...340$ мкм (рис. 1, б) при $HV(\Pi) = 2060$ МПа, а ширина зерна фериту – $h_{кр}(\Phi) = 40...100$ мкм та $HV(\Phi) = 1810...1870$ МПа. У корені шва $h_{кр}(\Pi)$ та $h_{кр}(\Phi)$ становлять 60...100 мкм. У ЛС, як і в корені шва, отримано невелике зниження мікротвердості порівняно з центром шва – на 130 і 110...170 МПа відповідно.

Дослідженнями зразка із застосуванням ПДМП встановлено, що ширина кристалітів Φ - Π структури металу зварного шва становить: $h_{кр}(\Pi) = 100...160$ мкм (рис. 1, в) при $HV(\Pi) = 1990...2080$ МПа; $h_{кр}(\Phi) = 40...100$ мкм при $HV(\Phi) = 1760...1930$ МПа. У корені шва $h_{кр}(\Pi) = 60...140$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 20...40$ мкм. У ЛС $h_{кр}(\Pi) = 60...140$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 20...40$ мкм з невеликим зростанням мікротвердості порівняно із центром шва: $HV(\Pi) = 1990...2280$ МПа, $HV(\Phi) = 1680...1990$ МПа. Слід зазначити, що у зварному з'єднанні із застосуванням ПДМП у зоні ЛС, тобто при переході від металу шва до I ділянки ЗТВ, утворилася велика холодна тріщина довжиною 1600 мкм (рис. 1, д).

Дослідженнями зразка із застосуванням ПОМП встановлено, що ширина кристалітів у металі зварного шва $h_{кр}(\Pi) = 100...200$ мкм (рис. 1, г) при $HV(\Pi) = 1930$ МПа, а ширина феритних зерен – $h_{кр}(\Phi) = 20...60$ мкм при $HV(\Phi) = 1600...1760$ МПа. У корені шва та у ЛС розмір зерна $h_{кр}(\Pi) = 60...220$ мкм і $h_{кр}(\Phi) = 40...140$ мкм при $HV(\Pi) = 1930...2060$ МПа, $HV(\Phi) = 1600...1760$ МПа.

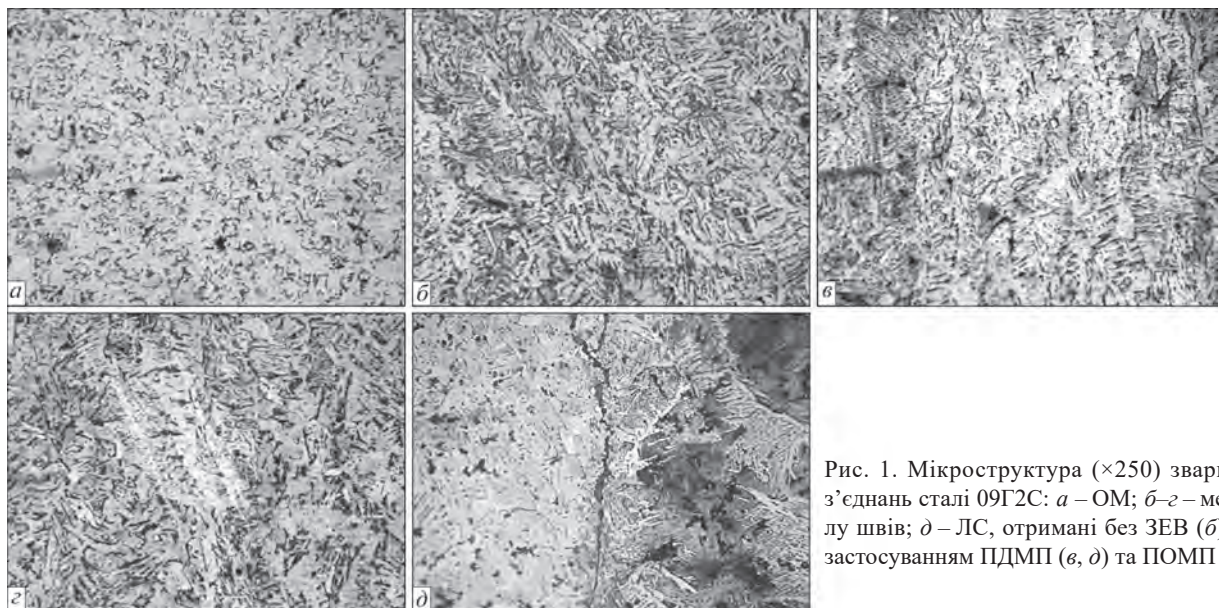


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 250$) зварних з'єднань сталі 09Г2С: а – ОМ; б-г – металу швів; д – ЛС, отримані без ЗЕВ (б), із застосуванням ПДМП (в, д) та ПОМП (г)

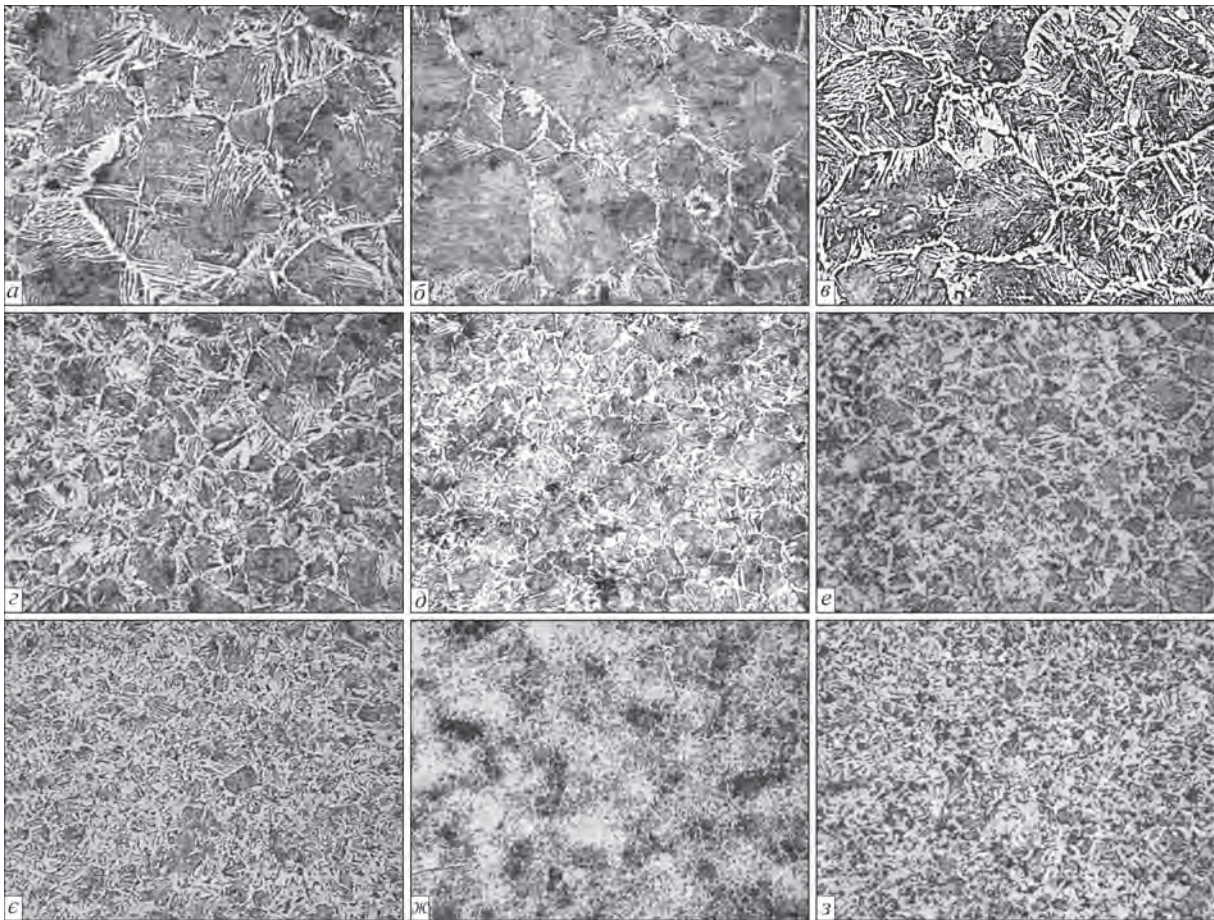


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 250$) металу ЗТВ зварних з'єднань сталі 09Г2С по ділянках: а–в – I ЗТВ; г–е – II ЗТВ; ж–з – III, IV ЗТВ, що отримані без ЗЕВ (а, г, е), із застосуванням ПДМП (б, д, ж) та ПОМП (в, е, з)

Дослідженнями ЗТВ металу зварних з'єднань (рис. 2) встановлено, що у I ділянці ЗТВ зразка без ЗЕВ перлітна структура з розміром D_3 (П) = 100...360 мкм та прошарками фериту δ (Ф) = 30...70 мкм при HV (П) = 2130...2210 МПа (рис. 2, а), HV (Ф) = 1810...1990 МПа. У II ділянці ЗТВ структура подрібнюється до D_3 (Ф–П) = 30...80 мкм, мікротвердість практично не змінюється (HV (П) = 2060 МПа; HV (Ф) = 1870...1930 МПа) (рис. 2, г). У III, IV ділянках ЗТВ D_3 (Ф–П) = 10...50 мкм при HV (Ф–П) = 1810...1930 МПа (рис. 2, е).

Дослідженнями зразка із застосуванням ПДМП встановлено, що у I ділянці ЗТВ формується П-структура з розміром D_3 (П) = 140...340 мкм та прошарками фериту δ (Ф) = 20...100 мкм при HV (П) = 2130...2210 МПа (рис. 2, б), HV (Ф) = 2060 МПа. У II–IV ділянках ЗТВ структура помітно подрібнюється до D_3 (Ф–П) = 30...100 мкм (II ділянка ЗТВ, рис. 2, д), D_3 (Ф–П) = 10...40 мкм (III ділянка ЗТВ, рис. 2, ж) та D_3 (Ф–П) = 20...80 мкм (IV ділянка ЗТВ). У II ділянці ЗТВ мікротвердість практично відповідає мікротвердості у I ді-

лянці ЗТВ при подальшому її зменшенні у III, IV ділянках ЗТВ до HV (Ф–П) = 1700...1930 МПа.

При застосуванні ПОМП у I ділянці, ЗТВ формується перлітна структура з розміром D_3 (П) = 100...280 мкм та прошарками фериту δ (Ф) = 20...50 мкм (рис. 2, в) при HV (П) = 1990...2060 МПа, HV (Ф) = 1760...1930 МПа. У II ділянці ЗТВ формується дрібнозерниста структура (D_3 (Ф–П) = 20...70 мкм (рис. 2, е), мікротвердість незначно зменшується (HV (П) = 1870...1990 МПа; HV (Ф) = 1760...1810 МПа). У III, IV ділянках ЗТВ структура подрібнюється до D_3 (Ф–П) = 10...70 мкм (рис. 2, з) при HV (Ф–П) = 1700...1870 МПа (III ділянка ЗТВ) та HV (Ф–П) = 1760...1930 МПа (IV ділянка ЗТВ) при HV (Ф–П) = 1810...1930 МПа.

Зіставленням параметрів HV (рис. 3) та мікроструктури (рис. 4) досліджуваних зразків встановлено наступне. У зразка, отриманого без ЗЕВ, спостерігається помітне підвищення HV у I та II ділянках ЗТВ відносно металу шву (рис. 3, а). У зразка із застосуванням ПДМП (рис. 3, б) порівняно зі зразком без ЗЕВ біля ЛС з боку шва та у I ділянці ЗТВ спостерігається підвищення HV . При цьому градієнт ΔHV стано-

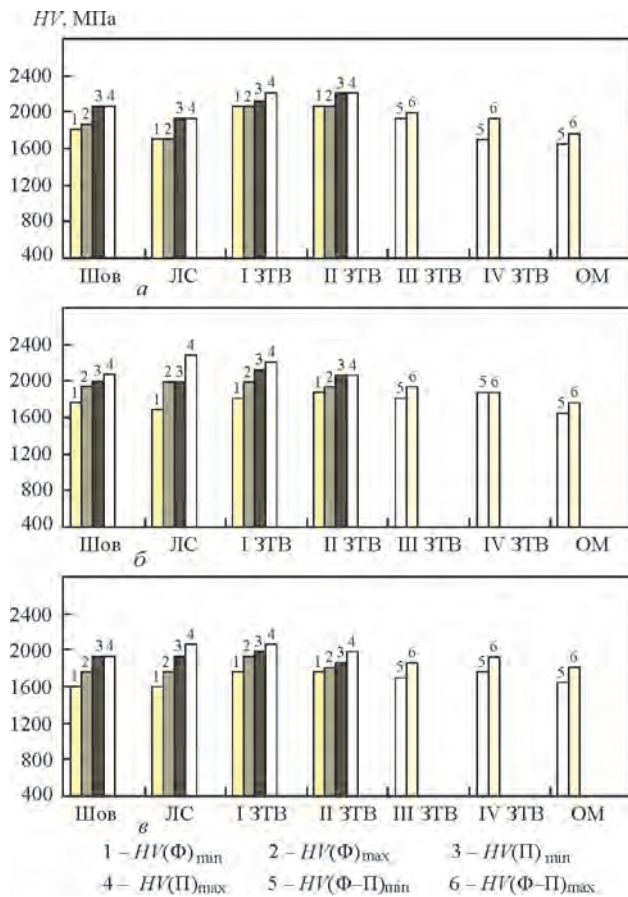


Рис. 3. Мікротвердість (HV) металу зварних з'єднань сталі 09Г2С, отриманих без ЗЕВ (а), із застосуванням ПДМП (б) та ПОМП (в)

віль до 320 МПа. Це може бути причиною тріщиноутворення з подальшим крихким руйнуванням зварного з'єднання. Найбільш рівномірний рівень HV як у металі шва, так і в ЗТВ, спостерігається у зварному з'єднанні, отриманому із застосуванням ПОМП (рис. 3, в).

При застосуванні ПДМП і ПОМП у зварних з'єднаннях порівняно із зразком без ЗЕВ у металі швів поблизу ЛС зеренна структура незначно укрупнюється (рис. 4). При переході до ЗТВ відбувається подрібнення структури, незначне – при застосуванні ПДМП та більше при ПОМП. При цьому ширина прошарків фериту при ПОМП зменшується в середньому в 1,4 та 1,7 раза порівняно зі зразками без ЗЕВ та ПДМП. Також при застосуванні ПОМП у I та II ділянках ЗТВ зерно подрібнюється в середньому в 1,3 раза порівняно зі зразком без ЗЕВ. Таке диспергування структури буде забезпечувати як міцність, так і підвищувати в'язкість руйнування металу та відповідно тріщиностійкість зварного з'єднання. Слід також зазначити, що вплив ЗЕВ на структурні зміни найбільш помітний у таких локальних ділянках зварних з'єднань, як ЛС та I, II ділянках ЗТВ.

Таким чином, встановлено, як дія ЗЕВ, зокрема ПДМП та ПОМП, впливає на розміри ЗТВ, мікро-

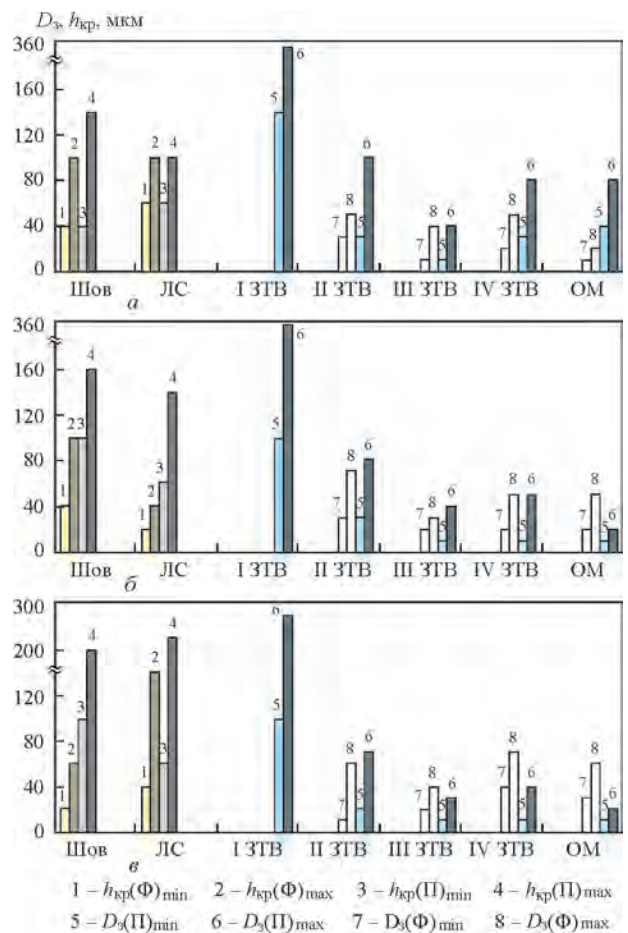


Рис. 4. Структурні параметри в металі зварних з'єднань сталі 09Г2С, отриманих без ЗЕВ (а), із застосуванням ПДМП (б) та ПОМП (в)

структуру, мікротвердість металу швів, ЗТВ, тріщиноутворення у зварних з'єднаннях низьколегованої сталі 09Г2С.

При застосуванні ПДМП у зоні ЛС формується великозерниста структура, спостерігаються градієнти мікротвердості, утворюються тріщини. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування зварного з'єднання.

Застосування ПОМП забезпечує подрібнення зеренної структури у ділянці перегріву (I ЗТВ) та нормалізації (II ЗТВ), рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і в ділянках ЗТВ. Такі структурні зміни будуть забезпечувати міцність та підвищувати в'язкість руйнування металу і відповідно забезпечувати тріщиностійкість зварного з'єднання.

Висновки

1. При дуговому зварюванні дія знакозмінних магнітних полів впливає на мікротвердість, параметри мікроструктури металу зварних з'єднань та розміри ЗТВ.

2. Більшою мірою дія зовнішнього електромагнітного впливу при зварюванні низьколегованої сталі спостерігається у зоні ЛС та ЗТВ впливу

на ділянках перегріву (великого зерна) і нормалізації (повної перекристалізації).

3. При застосуванні поздовжнього магнітного поля у зоні ЛС формування великозернистої структури при градієнтах за мікротвердістю призвело до тріщиноутворення. Це може бути причиною подальшого крихкого руйнування зварного з'єднання.

4. Застосування поперечного магнітного поля забезпечило формування найприйнятнішої структури металу зварного з'єднання при рівномірному рівні мікротвердості як у металі шва, так і на ділянках ЗТВ, та помітному подрібненні структури у ділянці перегріву (І ЗТВ) і нормалізації (ІІ ЗТВ). Такі структурні зміни будуть забезпечувати як міцність, так і підвищувати в'язкість руйнування металу та відповідно тріщиностійкість зварного з'єднання.

5. Найбільш ефективним при зварюванні низьколегованої сталі під дією ЗЕВ є застосування поперечних магнітних полів, у яких вектор індукції перпендикулярний до осі електрода та дуги.

Список літератури

1. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д., Прилипко Е.А. (2005) Методика расчета параметров управляющего электромагнитного воздействия при дуговой сварке конструкционных сталей. *Вестник НТТУ «КПИ»*, **45**, 176–177.
2. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–44.
3. Кузнецов В.Д., Рыжов Р.Н. (2005) Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки. *Там же*, **6**, 27–31.
4. Рыжов Р.Н. (2007) Влияние импульсных электромагнитных воздействий на процесс формирования и кристаллизацию швов. *Сварочное производство*, **2**, 56–58.
5. Ahieieva, A.D. (2019) Rational Using of the Controlling Longitudinal and Transverse Magnetic Fields at arc Welding and Surfacing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
6. Ageeva M.V., Razmyshlyayev A.D. (2019) Влияние комбинированного магнитного поля на производительность расплавления проволоки при дуговой наплавке. *Технічні науки та технології*, **18**, 4, 22–27.
7. Болдырев А.М., Биржев В.А., Черных А.В. (1992) К расчету гидродинамических параметров жидкого металла на

дне сварочной ванны при дуговой сварке. *Сварочное производство*, **2**, 31–33.

8. Болдырев А.М., Биржев В.А., Мартыненко А.И. (2008) Исследование влияния переменного аксиального магнитного поля на процесс плавления электродной проволоки. *Там же*, **2**, 6–8, 63, 64.
9. Миронова М.В. (2013) К выбору оптимальных схем устройств ввода поперечного магнитного поля для процессов дуговой сварки и наплавки. *Збірник наук. праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки)*, **1**(21), 74–78.
10. Лазаренко М.А., Размышляев А.Д. (2000) Структура управляющих магнитных полей для процессов сварки и наплавки при использовании устройств с цилиндрической 304 симметрией. *Вісник ПДТУ: Зб. наук. пр.*, **9**, 160–163.

References

1. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D., Prilipko, E.A. (2005) Calculation procedure of controlling electromagnetic effect parameters in arc welding of structural steels. *Vestnik HTUU KPI*, **45**, 176–177 [in Russian].
2. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 36–44.
3. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2005) Choice of optimal parameters of external electromagnetic action in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 27–31.
4. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of electromagnetic actions on process of formation and solidification of welds. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 56–58 [in Russian].
5. Ahieieva, A.D. (2019) Rational using of the controlling longitudinal and transverse magnetic fields at arc welding and surfacing. *IOP Conference Series: Mater. Sci. and Engin.*
6. Ageeva, M.V., Razmyshlyayev, A.D. (2019) Influence of combined magnetic field on wire melting rate in arc surfacing. *Tekhnichni Nauky ta Tekhnologii*, **18**(4), 22–27 [in Russian].
7. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1992) To calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal on welding pool bottom in arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 31–33 [in Russian].
8. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Martynenko, A.I. (2008) Examination of influence of variable axial magnetic field on process of electrode wire melting. *Ibid.*, **2**(6–8), 63, 64 [in Russian].
9. Mironova, M.V. (2013) To choice of optimal schemes of input devices of transverse magnetic field for processes of arc welding and surfacing. In: *Zbirnyk Nauk. Prats of DSTU, Tekhnichni Nauky*, **1**(21), 74–78 [in Russian].
10. Lazarenko, M.A., Razmyshlyayev, A.D. (2000) Structure of controlling magnetic fields for welding and surfacing processes using the devices with cylindrical 304 symmetry. *Visnyk PDTU*, **9**, 160–163 [in Russian].

EFFECT OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD CONFIGURATION ON METAL STRUCTURE OF WELDED JOINTS OF STRUCTURAL STEEL

O.D. Razmyshlyayev¹, S.Yu. Maksymov², O.M. Berdnikova², O.O. Prylypko², O.S. Kushnyaryova², T.O. Alekseyenko²

¹Pryazovskyi State Technical University, 7 Universytetska Str., 87500, Mariupil, Ukraine. E-mail: office@psty.edu

²E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The peculiarities of metal structure of welded joints of structural low-alloy steel after welding using external electromagnetic field were studied. The phase composition, microstructure and microhardness of metal of welded joints produced without and with the use of alternating magnetic fields – longitudinal or transverse were studied. The structural parameters in the metal of the welds and areas of the heat-affected zone were analyzed. The conditions for producing high-quality welded joints during welding of low-alloy steels under the effect of external electromagnetic field, which provide strengthening and crack resistance of the metal, were found. 10 Ref., 1 Tabl., 4 Fig.

Key words: structural low-alloy steel, welded joints, external electromagnetic effect, alternating magnetic fields, heat-affected zone, phase composition, microstructure, microhardness

Надійшла до редакції 29.08.2022