

ВПЛИВ ЧАСТОТИ ЗОВНІШНЬОГО ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ НА СТРУКТУРУ ЗВАРНИХ З'ЄДНАНЬ СТАЛІ 09Г2С

О.Д. Размишляєв, С.Ю. Максимов, О.М. Берднікова, О.О. Прилипко, О.С. Кушнарєва,
Т.О. Алексеєнко

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

Досліджено особливості структури металу зварних з'єднань сталі 09Г2С при зварюванні із застосуванням поздовжнього зовнішнього електромагнітного поля. Вивчено вплив частоти ($f = 2; 12; 50$ Гц) поля на фазовий склад, мікроструктуру та мікротвердість металу зварних з'єднань. Встановлено, що в дослідженому діапазоні частот відбуваються значні зміни структурних параметрів в металі швів та на ділянках зони термічного впливу (ЗТВ). Більшою мірою дія частоти електромагнітного впливу при зварюванні низьколегованої сталі спостерігається у металі швів та ЗТВ у ділянці перегріву (великого зерна). Застосування $f = 12$ Гц забезпечило рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і по ділянках ЗТВ та подрібнення зеренної структури металу у ділянці перегріву (І ЗТВ) зварного з'єднання сталі 09Г2С. Бібліогр. 15, табл. 2, рис. 3.

Ключові слова: сталь 09Г2С, зварні з'єднання, зовнішній електромагнітний вплив, поздовжнє магнітне поле, частота, зона термічного впливу, фазовий склад, параметри мікроструктури, мікротвердість

Для керування процесами плавлення електродного і основного металів, а також процесом кристалізації металу зварювальної ванни перспективним є застосування зовнішніх магнітних полів, що впливають на краплю, дугу та рідкометалеву ванну [1, 2]. При дуговому зварюванні застосовують поздовжні магнітні поля (ПДМП) і поперечні магнітні поля (ПОМП). У перших вектор індукції паралельний, у других – перпендикулярний до осі електрода та дуги. Магнітне керування має переваги в порівнянні з механічними способами, оскільки воно здійснюється без безпосереднього контакту пристроїв, що керують, із зоною наплавлення (зварювання) [3].

Застосування ПДМП і ПОМП при дуговому наплавленні і зварюванні дозволяє інтенсифікувати процес розплавлення електрода, регулювати ефективність проплавлення основного металу, впливати на процес кристалізації металу шва [4, 5]. Аналізу фізики процесу проплавлення металу під зовнішнім електромагнітним впливом (ЗЕВ), розподілу тиску по радіусу дуги, руху електродної краплі, потоків рідкого металу у зварювальній ванні, кристалізації металу, а також механізмів подрібнення структури металу швів присвячено багато досліджень, у тому числі кластерні теорії кристалізації рідкого металу [4, 6–8]. Саме подрібнення структури металу призводить до підвищення рівня зміцнення металу (згідно залежності Холла-Петча [9]), а також буде забезпечувати його тріщиностійкість [4, 10, 11]. Звісно, що структурний стан, який формується у металі зварних з'єднань під впливом термодформаційних умов зварювання, впливає на їх фізико-механічні властивості.

Як відомо, частота струму істотно впливає на характер силової дії електромагнітного поля на рідкий метал [8]. Із зменшенням частоти, з одного боку, по-

гіршується електромагнітна взаємодія індуктора з розплавом, з іншого – розширюється зона дії об'ємних електромагнітних сил у рідкому металі.

Якщо змінювати полярність підключення обмоток з певною частотою, то і напрямок потоків розплавленого металу також зміниться. Такий рух рідкої ванни в реальному процесі дугового зварювання (наплавлення) сприяє подрібненню зерен металу в процесі його кристалізації. При взаємодії вздовж осі OX з компонентом густини струму в металі ванни компонента індукції B_x ПОМП створює електромагнітну силу, що спрямовує потік рідкого металу вздовж осі OY . Додатково виникає вертикальна компонента електромагнітної сили (F_z) від взаємодії густини струму j_y у бокових кромках ванни з компонентом індукції B_x . При зміні полярності відбувається перемішування рідкого металу поперек осі ванни [7].

Вплив знакозмінного ПОМП призводить до розширення наплавлених валиків [12, 13]. При частоті $f = 50$ Гц розширення валика відбувалося пропорційно до індукції. Але слід враховувати, що змінне ПОМП частотою до 1 Гц дає хвилясте поперечне переміщення осі валика, і для усунення цього недоліку необхідно використовувати частоту ПОМП від 2 Гц і вище.

У роботі [14] було вивчено, як при дуговому зварюванні дія знакозмінних магнітних полів з невеликими частотами впливає на мікротвердість, параметри мікроструктури металу зварних з'єднань сталі 09Г2С та розміри зони термічного впливу (ЗТВ). Проте залишилося невивченим вплив частоти зовнішнього електромагнітного поля на структуру зварних з'єднань, яка формується у металі зварних швів та ЗТВ.

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>, Кушнарєва 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. Кушнарєва, Т.О. Алексеєнко, 2023

Тому метою даної роботи було встановлення закономірностей впливу частоти зовнішнього електромагнітного поля, а саме ПДМП на структурно-фазовий склад, мікротвердість та мікроструктуру зварних з'єднань конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С.

Матеріал та методики. Для створення ПДМП використовували методику, описану в роботі [9]. У результаті зварювання конструкційної низьколегованої сталі 09Г2С (завтовшки 4 мм) присадковим дротом Св-08А (діаметром 3 мм) (флюс АН-348) було отримано зварні з'єднання з застосуванням ПДМП на режимах зварювання: струм $I = 360$ А; напруга на дузі $U = 30 \dots 32$ В; швидкість зварювання $v = 30$ м/год; зворотна полярність; на флюсо-мідній підкладці. Тип з'єднання С4 (ГОСТ 8713-78). Магнітна індукція в зоні зварювальної ванни становила $20 \dots 25$ мТл. Було отримано два варіанта зварних з'єднань при різній частоті: $f = 12$ та $f = 50$ Гц. Результати експериментальних досліджень мікроструктури зварних з'єднань, що отримано із застосуванням ПДМП при вказаних частотах, подальше порівнювали з експериментальними даними, які отримано при $f = 2$ Гц [14].

Дослідження мікроструктури проводили методами світлової мікроскопії (мікроскопи Neophot-32 і Versamet-2, Японія). Твердість за Віккерсом вимірювали на твердомірі М-400 (фірми Leco, США) при навантаженні 0,1 кг. Вивчали морфологію фериту (Ф) та перліту (П), розміри зерен (D_3), ширину кристалітів ($h_{кр}$), товщину феритних прошарків ($h_{пр}$)

та мікротвердість (HV). У зварних з'єднаннях було досліджено основний метал (ОМ), метал швів, лінію сплавлення (ЛС), зону термічного впливу (ЗТВ) по ділянках: I – перегріву (великого зерна); II – нормалізації (повної перекристалізації); III – неповної перекристалізації; IV – рекристалізації.

Результати та їх обговорення. Структура основного металу сталі 09Г2С феритно-перлітна при $D_3(Ф) = 10 \dots 20$ мкм, $D_3(П) = 40 \dots 80$ мкм та $HV = 1650 \dots 1760$ (рис. 1, а). Структура металу зварних швів також феритно-перлітна (Ф-П), рис. 1, б–г. Ширина кристалітів П-складової при $f = 2$ та $f = 12$ Гц практично однакова (рис. 1, в, табл. 1). Але при $f = 50$ Гц $h_{кр}(П)$ збільшується в середньому на 48 % (рис. 1, г) із зменшенням мікротвердості на 10 % (у порівнянні з режимом $f = 2$ Гц) та на 17 % (у порівнянні з режимом $f = 12$ Гц, табл. 1). Ф-складова дрібніша з приблизно однаковими розмірами для всіх режимів та меншою мікротвердістю, ніж перлітна. Збільшення ширини кристалітів при підвищенні f корегує з даними роботи [14]. Але при $f = 50$ структура дрібніша в середньому на 17 % у порівнянні з режимом без застосування ЗЕВ [14].

Звісно, що збільшення ширини кристалітів відбувається на стадії кристалізації. Якщо вісь сусіднього дендрита не співпадає з направленням теплового потоку, то він росте швидше. При цьому скрита теплота плавлення, яка виділяється у навколишню рідку ванну перед ростучими дендритами зменшує величину переохолодження та буде спри-

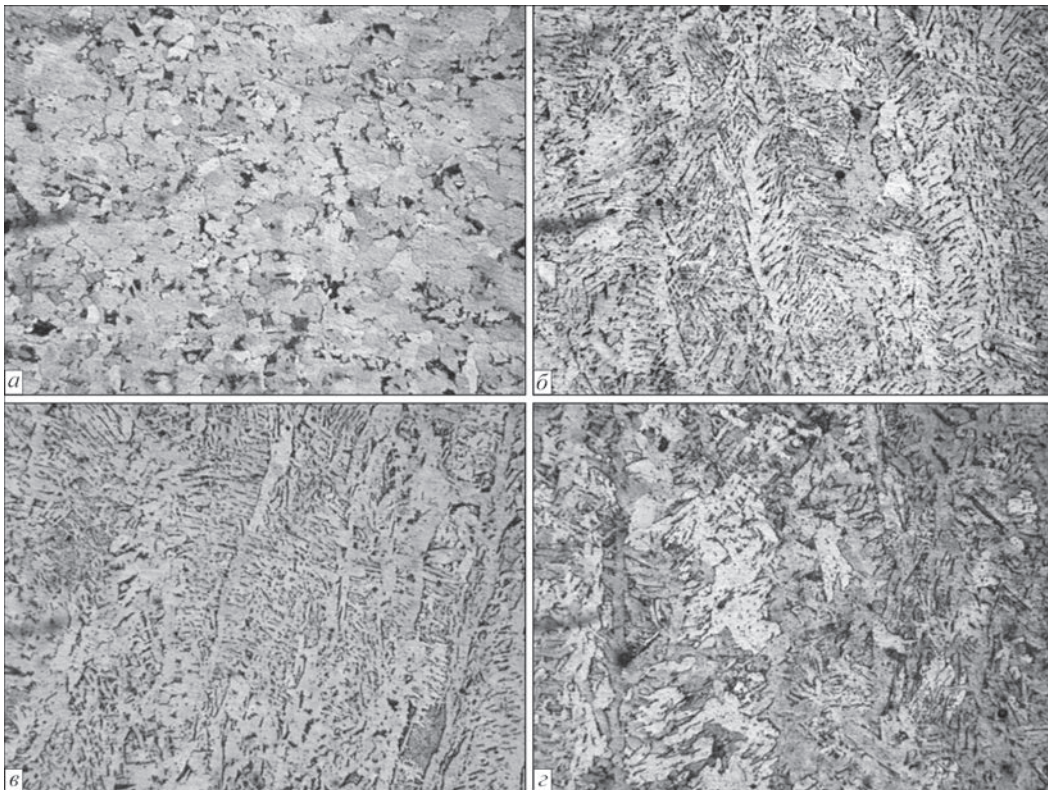


Рис. 1. Мікроструктура ($\times 250$) основного металу (а) сталі 09Г2С та зварних швів (б–г), що отримані при різній частоті: б – $f = 2$ Гц; в – 12; г – 50

Таблиця 1. Ширина кристалітів ($h_{кр}$, мкм) та мікротвердість (HV , МПа) металу швів зварних з'єднань при різній частоті (f) ПДМП

Зона	$h_{кр}(\Phi)$	$h_{кр}(\Pi)$	$HV(\Phi)$	$HV(\Pi)$
	$f = 2$ Гц			
Шов	40...100	100...160	1760...1930	1990...2080
ЛС	20...40	60...140	1680...1990	1990...2280
$f = 12$ Гц				
Шов	20...100	80...160	1760...1930	2210
ЛС	20...60	60...140	1860	2060...2280
$f = 50$ Гц				
Шов	20...100	100...300	1650...1760	1810...1870
ЛС	50...100	60...200	1560...1700	1870

яти зменшенню росту сусідніх [15]. Таким чином має місце повільне охолодження металу.

У всіх випадках поблизу лінії сплавлення (ЛС) у порівнянні з металом шва ширина кристалітів зменшується (рис. 2, а, табл. 1), що пов'язано з більш інтенсивним охолодженням металу у цій зоні. У зразку, що отримано при $f = 2$ Гц біля ЛС спостерігається незначне підвищення HV (на 5 %, табл. 1). При $f = 50$ Гц у цій зоні середня HV не змінюється, але найбільш рівномірний рівень HV при переході від металу шва до ЛС спостерігається у зварному з'єднанні, що отримано із застосуванням $f = 12$ Гц. Слід зазначити, що у всіх зварних з'єднаннях у зоні лінії сплавлення, тобто при переході від металу шва у І ЗТВ утворюються одиничні холодні тріщини.

Дослідженнями ЗТВ зразків із застосуванням ПДМП при різній частоті встановлено, що у І ЗТВ зразків на всіх режимах формується П-структу-

ра з прошарками фериту (рис. 2, б). У І ЗТВ зразків при $f = 12$ та 50 Гц у порівнянні зі зразком, що отримано при $f = 2$ Гц, П-структура подрібнюється (табл. 2). Максимальний розмір зерна та товщина феритних прошарків зменшуються, відповідно, на 17 та 29 %. При цьому незначно знижується мікротвердість – у середньому на 5 %. У ІІ–ІV ЗТВ на всіх режимах структура подрібнюється при подальшому рівномірному зменшенні HV (рис. 2, в–д).

Дослідженнями металу ЗТВ також встановлено, що при ПДМП частота зовнішнього електромагнітного поля має вплив на розміри ділянок ЗТВ (табл. 2). У досліджуваних зварних з'єднаннях при $f = 12$ та $f = 50$ Гц у порівнянні зі зварним з'єднанням, що отримано при $f = 2$ Гц середня ширина (δ) І ЗТВ збільшується на 25 та 8 %. Це пов'язано з більш інтенсивним рухом рідкого металу у зварювальній ванні при збільшенні f та, відповідно з термомеханічними умовами структуроутворення у металі ЗТВ.

Збільшення параметрів І ЗТВ, а саме ділянки перегріву може відбуватися за рахунок зміни умов процесу плавлення та кристалізації металу, а саме – підвищення швидкості нагріву рідкого металу у зварювальній ванні, а також температури його нагріву під дією імпульсів струму. Відповідно це має вплив на збільшення розміру ділянки перегріву (І ЗТВ) при збільшенні параметра f . При цьому температурний градієнт, що виникає, сприяє збільшенню ступеня переохолодження та швидкості кристалізації металу ділянки перегріву (І ЗТВ). Це у свою чергу призводить до подрібнення зерен-

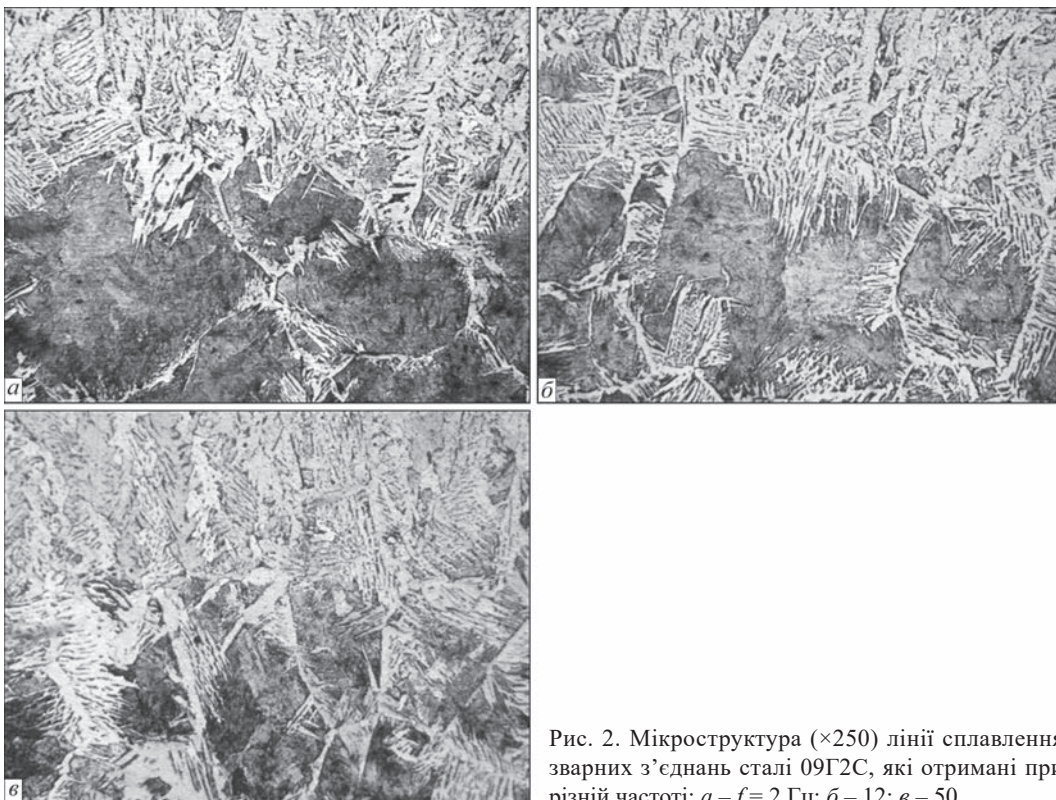
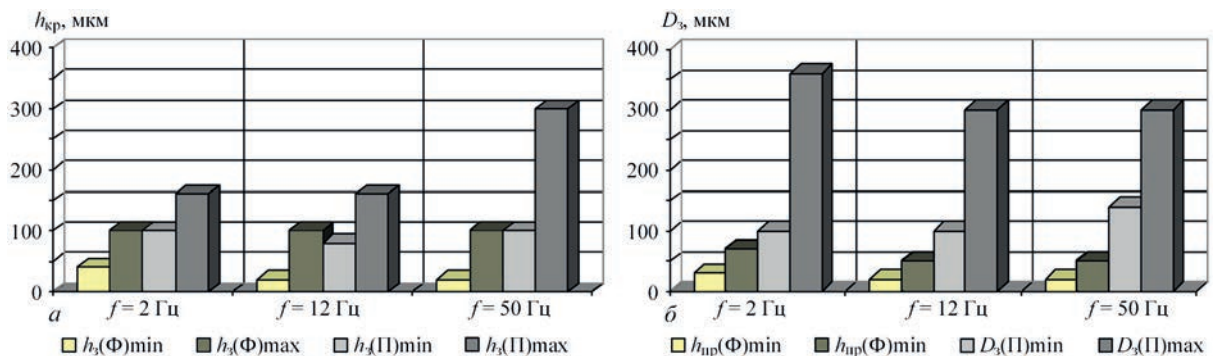


Рис. 2. Мікроструктура ($\times 250$) лінії сплавлення зварних з'єднань сталі 09Г2С, які отримані при різній частоті: а – $f = 2$ Гц; б – 12; в – 50

Таблиця 2. Ширина ділянок ЗТВ (δ , мкм), розмір зерен (D_3 , мкм) та мікротвердість (HV , МПа) металу ЗТВ зварних з'єднань при різній частоті (f) ПДМП

Зона	δ	$D_3(\Phi) h_{np}(\Phi)^*$	$D_3(\Pi)$	$HV(\Phi)$	$HV(\Pi)$
$f = 2 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1300	30...70*	100...360	1810...1990*	2130...2210
II ЗТВ	1200	30...70	30...80	1870...1930	2060
III ЗТВ	1000	20...30	10...40	1810...1930	
IV ЗТВ	800	20...50	10...50	1870	
$f = 12 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1650	20...50*	100...300	1760...1860*	2060
II ЗТВ	1000	50...100	30...100	1860	2060
III ЗТВ	1250	30...50	20...40	1700...1930	
IV ЗТВ	950	30...70	20...50	1650...1870	
$f = 50 \text{ Гц}$					
I ЗТВ	1400	20...50*	140...300	1810...1870*	1890...2210
II ЗТВ	1500	20...80	50...100	1810...1870	2060
III ЗТВ	800	20...50	10...30	1760...1990	
IV ЗТВ	800	20...50	10...40	1600...1990	

Рис. 3. Зміна структурних параметрів у металі зварних з'єднань сталі 09Г2С, що отримані: із застосуванням ПДМП при різній частоті f : a – ширина кристалітів ($h_{кр}$) в металі зварного шва; b – розмір зерен перліту ($D_3(\Pi)$) та товщина феритних прошарків ($h_{np}(\Phi)$) у I ЗТВ

ної структури на цій ділянці. У даному випадку збільшення ширини I ЗТВ, що має місце при підвищенні f не буде негативно впливати на властивості зварних з'єднань за рахунок подрібнення структури, а також вирівнювання градієнта ($\Delta\delta$) по ширині цієї зони практично у два рази – від $\Delta\delta = 600$ мкм ($f = 2$ Гц) до $\Delta\delta = 300$ мкм ($f = 12$ Гц) та $\Delta\delta = 400$ мкм ($f = 50$ Гц) (табл. 2). Це буде забезпечувати більш рівномірний рівень механічних властивостей зварного з'єднання.

Дослідженнями встановлено, що вплив частоти магнітного поля на структурні зміни найбільш помітний у таких ділянках зварних з'єднань, як шов та I–II ЗТВ. Найбільші градієнти по розміру зеренної структури характерні для металу шва при $f = 50$ Гц (рис. 3, a) та металу I ЗТВ при $f = 2$ Гц (рис. 3, b). При $f = 12$ Гц забезпечується подрібнення зеренної структури як в металі шва, так і у ділянці перегріву (I ЗТВ).

Таким чином, встановлено, як дія частоти зовнішнього електромагнітного поля, зокрема, при застосуванні ПДМП, впливає на розміри ЗТВ, мікроструктуру, мікротвердість металу швів та ЗТВ у зварних з'єднаннях низьколегованої сталі 09Г2С. Застосування ПДМП при $f = 12$ Гц забезпечує подрібнення зеренної структури у металі

шва та ділянці перегріву (I ЗТВ), а також рівномірний рівень мікротвердості.

Висновки

1. Встановлено, що при збільшенні частоти електромагнітного поля від $f = 2$ до 12 та 50 Гц змінюються мікротвердість та параметри мікроструктури металу швів та ЗТВ зварних з'єднань сталі 09Г2С. При цьому фазовий склад основного металу, металу швів та ЗТВ однаковий – феритно-перлітний.

2. При $f = 50$ Гц у металі зварного шва ширина кристалітів перлітної складової збільшується в середньому на 48 % із зменшенням мікротвердості на 10 % (у порівнянні з режимом $f = 2$ Гц) та на 17 % (у порівнянні з режимом $f = 12$ Гц). Але при $f = 50$ структура дрібніша в середньому на 17 % у порівнянні з режимом без застосування ЗЕВ.

3. У зразку, що отримано при $f = 2$ Гц біля ЛС спостерігається незначне підвищення HV (на 5 %), а у I ЗТВ формується найбільш великозерниста структура.

4. У I ЗТВ зразків при $f = 12$ та 50 Гц у порівнянні з режимом $f = 2$ Гц структура подрібнюється, відповідно, на 17 та 29 %. При цьому незначно знижується мікротвердість – у середньому на 5 %.

5. Підвищення від $f = 2$ до 12 та 50 Гц призводить до збільшення ширини І ЗТВ у середньому на 25 та 8 %, але це не буде негативно впливати на властивості зварних з'єднань за рахунок подрібнення структури, а також вирівнювання градієнта по ширині цієї зони з обох сторін зварних швів.

6. Встановлено, що режим при $f = 12$ Гц забезпечує найбільш рівномірний рівень мікротвердості як у металі шва, так і по ділянках ЗТВ та формування дрібнозернистої феритно-перлітної структури у зварному з'єднанні.

Список літератури

1. Рыжов Р.Н., Кузнецов В.Д. (2006) Внешние электромагнитные воздействия в процессах дуговой сварки и наплавки (обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–44.
2. Кузнецов В.Д., Рыжов Р.Н. (2005) Выбор оптимальных параметров внешнего электромагнитного воздействия при дуговых способах сварки. *Там же*, **6**, 27–31.
3. Грабин В.Ф. (1982) *Металловедение сварки плавлением*. Киев, Наукова думка.
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*, 582.
6. Кораб Н.Г., Кузнецов В.Д., Черныш В.П. (1990) Оценка воздействия управляющего магнитного поля на кристаллизацию при дуговой сварке. *Автоматическая сварка*, **2**, 33–36.
7. Абралов М.А., Абдурахманов Р.У. (1982) О механизме измельчения первичной структуры металла сварного шва при электромагнитном воздействии. *Там же*, **2**, 18–21.
8. Размышляев А.Д., Агеева М.В. (2018) О механизме измельчения структуры металла шва при дуговой сварке с воздействием магнитных полей (Обзор). *Автоматичне зварювання*, **3**, 29–33.
9. Размышляев О.Д., Агеева М.В. (2014) Об оптимальности устройств ввода поперечного магнитного поля применительно к процессам дуговой сварки и наплавки. *V Международная научно-практическая конференция «Инновационные технологии и экономика в машиностроении»*. Т. 1, 22–23 мая 2014 г., сс. 83–88.
10. Гольдштейн М.И., Литвинов Б.М., Бронфин В.С. (1986) *Металлофизика высокопрочных сплавов*. Москва, Металлургия.
11. Романив О.Н. (1979) *Вязкость разрушения конструкционных сталей*. Москва, Металлургия.
12. 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.
13. Болдырев А.М., Биржев В.А., Мартыненко А.И. (2008) Исследование влияния переменного аксиального магнит-

ного поля на процесс плавления электродной проволоки. *Там же*, **2**, 6–8, 63, 64.

14. Размышляев О.Д., Максимов С.Ю., Бердникова О.М. та ін. (2022) Вплив конфігурації зовнішнього електромагнітного поля на структуру металу зварних з'єднань конструкційної сталі. *Автоматичне зварювання*, **10**, 17–21.
15. Грабин В.Ф., Денисенко А.В. (1978) *Металловедение сварки низко- и среднелегированных сталей*. Киев, Наукова думка.

References

1. Ryzhov, R.N., Kuznetsov, V.D. (2006) External electromagnetic effects in the processes of arc welding and surfacing (Review). *The Paton Welding J.*, **10**, 29–35.
2. Kuznetsov, V.D., Ryzhov, R.N. (2005) Choice of optimal parameters of external electromagnetic action in arc methods of welding. *The Paton Welding J.*, **6**, 27–31.
3. Grabin, V.F. (1982) *Metals science of fusion welding*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
4. Ryzhov, R.N. (2007) Influence of pulse electromagnetic effects on process of formation and crystallization 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: Materials Sci. and Engineering*, 582.
6. Korab, N.G., Kuznetsov, V.D., Chernysh, V.P. (1990) Evaluation of effect of controlling magnetic field on crystallization in arc welding. *Avtomatich. Svarka*, **2**, 33–36 [in Russian].
7. Abralov, M.A., Abdurakhmanov, R.U. (1982) On refinement mechanism of weld metal primary structure under electromagnetic action. *Ibid.*, **2**, 18–21 [in Russian].
8. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2018) On mechanism of weld metal structure refinement in arc welding under action of magnetic fields (Review). *The Paton Welding J.*, **3**, 29–33.
9. Razmyshlyayev, A.D., Ageeva, M.V. (2014) On optimality of input devices of transverse magnetic field with regard to processes of arc welding and surfacing. *In: Proc. of Int. Sci.-Pract. Conf. on Innovative Technologies and Economics in Mechanical Engineering*. Vol.1, 22–23 May, 2014, 83–88.
10. Goldshtein, M.I., Litvinov, B.M., Bronfin, V.S. (1986) *Physics of metals of high-strength alloys*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
11. Romaniv, O.N. (1979) *Fracture toughness of structural steels*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
12. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Chernykh, A.V. (1992) To calculation of hydrodynamic parameters of liquid metal on bottom of welding pool in arc welding. *Svarochn. Proizvodstvo*, **2**, 31–33 [in Russian].
13. Boldyrev, A.M., Birzhev, V.A., Martynenko, A.I. (2008) Examination of influence of alternating axial magnetic field on process of electrode wire melting. *Ibid.*, **2**(6–8), 63, 64 [in Russian].
14. Razmyshlyayev, O.D., Maksymov, S.Yu., Berdnikova, O.M. et al. (2022) Effect of external electromagnetic field configuration on metal structure of welded joints of structural steel. *The Paton Welding J.*, **10**, 13–17.
15. Grabin, V.F., Denisenko, A.V. (1978) *Metals science of welding of low- and medium-alloy steels*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].

INFLUENCE OF THE FREQUENCY OF EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD ON THE STRUCTURE OF 09G2S STEEL WELDED JOINTS

O.D. Razmyshlyayev, S.Yu. Maksymov, O.M. Berdnikova, O.O. Prylypko, O.S. Kushnarjova, T.O. Alekseenko

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine. 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: office@paton.kiev.ua

Features of metal structure in 09G2S steel welded joints were studied in welding with application of a longitudinal external electromagnetic field. The influence of field frequency ($f = 2; 12; 50$ Hz) on phase composition, microstructure and microhardness of welded joint metal was studied. It was found that significant changes of structural parameters in the weld metal and in the subzones of the heat-affected zone (HAZ) take place in the studied frequency range. The influence of frequency of electromagnetic impact in low-alloyed steel welding is more pronounced in the metal of the weld and HAZ in the overheated subzone (coarse grain). Application of $f = 12$ Hz ensured a uniform microhardness level both in the weld metal and in the HAZ subzones, as well as grain structure refinement in the overheated subzone (I HAZ) of 09G2S steel welded joint. 15 Ref., 2 Tabl., 3 Fig.

Keywords: 09G2S steel, welded joints, external electromagnetic impact, longitudinal magnetic field, frequency, heat-affected zone, phase composition, microstructural parameters, microhardness

Надійшла до редакції 16.12.2022