

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ СТАЛІ 09Г2С МАЛОЇ ТОВЩИНИ

П.І. Онищенко, С.М. Козулін

ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: pw1_37@ukr.net

У статті наведено результати досліджень можливості отримання якісного зварного з'єднання при електрошлаковому зварюванні (ЕШЗ) сталі 09Г2С завтовшки 20 мм дротами діаметром 1,6; 2,0 та 3,0 мм. Метою роботи є розробка технології та техніки ЕШЗ металу завтовшки 20 мм, яка забезпечує стійкість процесу, якісне формування шва та необхідні механічні властивості зварних з'єднань. Основні завдання роботи: виконання лабораторних експериментальних досліджень з метою пошуку режимів і техніки виконання ЕШЗ в умовах малого поперечного перерізу стику; порівняльна оцінка глибини провару основного металу та площі поперечного перерізу швів, виконаних ЕШЗ електродними дротами різного діаметра; дослідження макро- та мікроструктури зварних з'єднань; вимірювання твердості основного металу, шва та ЗТВ; визначення балу зерна в характерних ділянках зварних з'єднань; випробування металу шва, ЗТВ та основного металу на ударний вигин. Сучасне зварювальне обладнання з інверторним джерелом живлення та високошвидкісними механізмами подачі дроту дозволило застосовувати дріт діаметром 1,6 мм, за рахунок чого вдалося зменшити зазор між кромками на 30 %, збільшити в 1,5 рази швидкість зварювання, знизити величину питомої погонної енергії з 162 до 109 кДж/см² та зменшити розміри з'єднання: площу шва – на 40 %, площу ЗТВ – на 20 % порівняно зі зварюванням дротом діаметром 3,0 мм. У результаті металографічних досліджень дефектів у швах не виявлено. Аналіз мікроструктури металу основних ділянок з'єднання показав, що в металі шва формується однорідна структура голчастого фериту з ділянками полігонального фериту та твердістю 54...57 HRA, у металі ЗТВ – бейнітна структура з ділянками полігонального фериту та твердістю 54...57 HRA. Застосування більш легованих марок дротів підвищило на 55 % (до 120 Дж/см²) ударну в'язкість металу шва (при +20 °С). Бібліогр. 17, табл. 4, рис. 10.

Ключові слова: низьколегована сталь, електрошлакове зварювання, електродні дроти, твердість, макроструктура, мікроструктура, бал зерна, ударна в'язкість

Вступ. На сьогоднішній день в Україні та світі в гірничодобувній, металургійній, енергетичній та інших галузях промисловості широко використовуються зварні конструкції із металу великої товщини, у тому числі виготовлені способом електрошлакового зварювання (ЕШЗ) [1–4]. Зокрема при виготовленні металоконструкцій завтовшки 8...30 мм для виконання вертикальних стиків зварювання проводять у вертикальному положенні покритими електродами за декілька проходів, механізованим зварюванням електродними дротами, механізованим електродуговим зварюванням порошковими дротами, а також дротами суцільного перерізу з примусовим формуванням [5–9]. Однак способи ручного та механізованого електродугового зварювання мають низьку продуктивність та не гарантують якість зварного з'єднання, а використання порошкових дротів відрізняється їх високою вартістю. Способи зварювання з примусовим формуванням дротами суцільного перерізу економічніші, але наразі мало вивчені, через що не знайшли широкого застосування.

Відомо, що найпродуктивнішим і найекономічнішим способом зварювання металу великої товщини є ЕШЗ [10–13]. Однак значним недоліком, який обмежує сфери застосування ЕШЗ, є високе

тепловкладення в основний метал, що спричиняє зростання зерна в зоні термічного впливу (ЗТВ), внаслідок чого погіршуються пластичні властивості металу в цій зоні. Покращення властивостей зварного з'єднання здійснюють проведенням після зварювання високотемпературного оброблення (ВТО), яке не завжди можна виконати в монтажних умовах.

Разом з тим, відомий досвід успішної експлуатації виробів, виготовлених із застосуванням ЕШЗ без подальшого ВТО, які працюють при плюсових температурах навколишнього середовища [10].

У відповідності до вимог нормативно-технічної документації ЕШЗ металів практично будь-якої товщини виконують з використанням електродних дротів діаметром 3 мм, а за кордоном – 2,4 мм [10, 11, 14]. У літературних джерелах є дані про застосування ЕШЗ для зварювання металу завтовшки менше 30 мм [6]. Однак у виробничій практиці невідомі приклади промислового застосування ЕШЗ малих товщин, тому що вважається, що в таких випадках неможливо забезпечити стійке протікання процесу та отримання якісного формування зварного з'єднання. До того ж, Використання дротів діаметром 3 мм і більше потребує великого зазору між кромками, що призводить до високих

Онищенко П.І. – <https://orcid.org/0000-0002-1120-8056>, Козулін С.М. – <https://orcid.org/0000-0002-8368-4545>

© П.І. Онищенко, С.М. Козулін, 2025

витрат електродного дроту та підвищеного тепловкладення в основний метал. Мінімальна товщина, яка зварюється за один прохід відповідно до діючого стандарту, складає 30 мм [14]. Проте потреба у з'єднанні металу завтовшки менше 30 мм способом ЕШЗ існує завдяки високій продуктивності процесу, економічності та малій чутливості до підготовки кромок, що зварюються. Тому пошук прийомів з'єднання ЕШЗ металоконструкцій завтовшки менше 30 мм є перспективним напрямком.

Метою роботи є розробка технології та техніки ЕШЗ металу завтовшки 20 мм, яка забезпечує стійкість процесу, якісне формування шва та необхідні механічні властивості зварних з'єднань.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити ряд завдань:

- виконання лабораторних експериментальних досліджень з метою пошуку режимів і техніки виконання ЕШЗ, які забезпечують стійке протікання процесу в умовах малого поперечного перерізу стику;

- порівняльна оцінка глибини провару основного металу та площ поперечного перерізу швів, виконаних ЕШЗ електродними дротами різного діаметра;

- дослідження макро- та мікроструктури металу шва й ЗТВ;

- визначення балу зерна в характерних ділянках зварних з'єднань;

- вимірювання твердості основного металу, шва та ЗТВ;

- випробування металу шва, ЗТВ та основного металу на ударний вигин.

Обладнання, матеріали та методика проведення експериментів. При проведенні експериментальних досліджень виконували ЕШЗ зразків із конструкційної сталі 09Г2С завтовшки 20 мм на постійному струмі зворотної полярності з використанням серійних електродних дротів Св-08Г2С діаметром 1,6 мм; Св-08ХГ2СМА – 2,0 мм; Св-10НМА – 3,0 мм та плавленого флюсу АН-8У. При зварюванні дротами діаметром 2,0 та 3,0 мм використовували зварювальні апарати А535 УХЛ4 і АД-381Ш з джерелом живлення постійного струму ВДУ 1201, а для дроту діаметром 1,6 мм – зварювальний апарат ОТС DAIHEN P500L (Японія) з вбудованим джерелом живлення інверторного типу. Для забезпечення співставності результатів експериментів кожену серію експериментів проводили з використанням вказаних дротів на одному зразку завтовшки 20 мм з розділенням по висоті стику на три частини. Оцінку стійкості процесу проводили візуально

та за осцилограмами струму та напруги (відсутність коротких замикань, виплеску металу, переривань процесу зварювання, відкритого дугового проміжку над розплавленою шлаковою ванною). Макроструктуру з'єднань виявляли відповідно до вимог ДСТУ 8975:2019 [15] на повнопрофільному темплеті, вирізаному в поперечному напрямку зварного шва. Травлення шліфованих зразків здійснювалось водним розчином хлорного заліза. Глибину провару та ширину ЗТВ визначали шляхом дослідження поперечних макрошліфів, використовуючи програму КОМРАS-3D V12. Вимірювання твердості зразків проводили на твердомірі РОКВЕЛЛ методом *HRA* при навантаженні 60 кг згідно з ДСТУ ISO 6508-1:2013 [16]. Випробування металу шва та ЗТВ на ударний вигин проводили на зразках типу Менаже згідно з ДСТУ EN ISO 9016:2022. Згідно з ДСТУ 8972:2019 [17] визначали бал зерна у характерних ділянках зварних сполук. Для металографічних досліджень було використано темплети з отриманих зварних з'єднань. Мікроструктура виявлялась хімічним травленням у 4%-ому спиртовому розчині азотної кислоти. Дослідження та мікрорізка отриманих структур виконувалась на мікроскопі НЕОРНОТ-32.



Рис. 1. Зовнішній вигляд зварних швів, отриманих при ЕШЗ зразка завтовшки 20 мм з використанням електродних дротів діаметром 1,6 мм (Св-08Г2С), 2,0 мм (Св-08ХГ2СМА) і 3,0 мм (Св-10НМА)

Отримані результати та їх аналіз. З метою оцінки можливості отримання якісного зварного з'єднання при ЕШЗ металу завтовшки 20 мм виконано ряд експериментальних досліджень з використанням електродних дротів різного діаметра (рис. 1).

Для забезпечення стійкості процесу ЕШЗ при зварюванні стиків дротом діаметром 3,0 мм (Св10НМА) обмежували швидкість подачі дроту, глибину шлакової ванни та швидкість зварювання. Це викликало відносно глибоке проплавлення зварюваних кромок (13...15 мм), що характеризує підвищене тепловкладення в основний метал.

Протікання процесу ЕШЗ дротом діаметром 2,0 мм (Св-08ХГ2СМА) було стійкішим. За рахунок вищого коефіцієнта розплавлення присаджувального матеріалу швидкість подачі електродного дроту вдалось збільшити на 54 %. Глибина проплавлення основного металу зменшилась до 8...10 мм.

Найвища стійкість протікання процесу ЕШЗ спостерігалась при зварюванні дротом діаметром 1,6 мм (Св-08Г2С). Швидкість подачі електрода

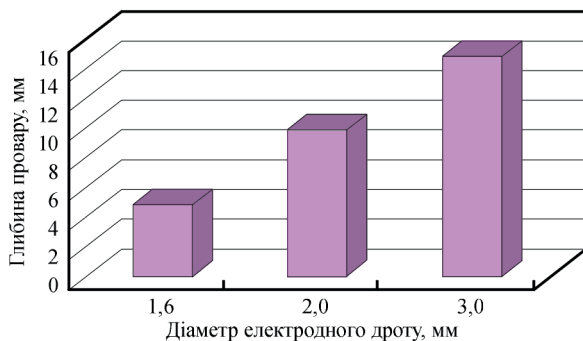


Рис. 2. Глибина провару основного металу при ЕШЗ зразків завтовшки 20 мм електродними дротами діаметром 1,6 мм (Св-08Г2С), 2,0 мм (Св-08ХГ2СМА) і 3,0 мм (Св-10НМА)

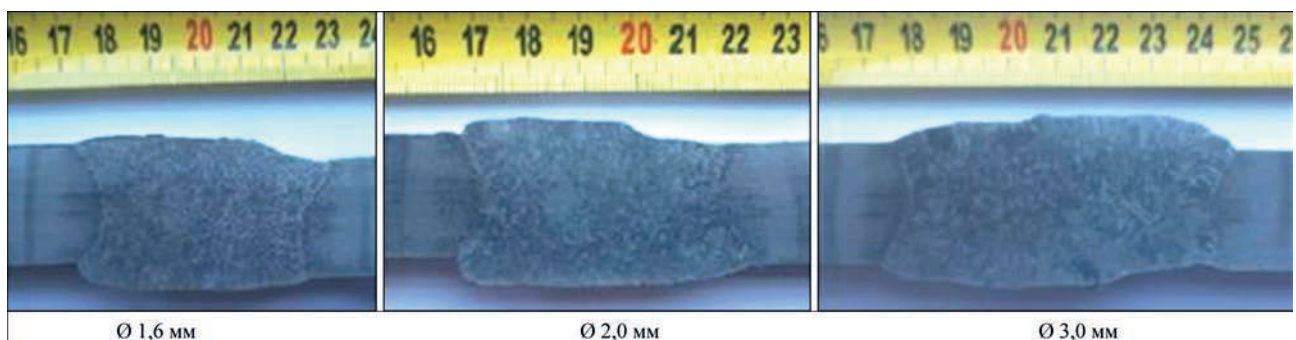


Рис. 3. Поперечні макрошліфи зразків, виконаних ЕШЗ електродними дротами діаметром 1,6 мм (Св-08Г2С), 2,0 мм (Св-08ХГ2СМА) і 3,0 мм (Св-10НМА)

у порівнянні зі зварюванням дротом діаметром 2,0 мм була збільшена в 2,2 рази. Завдяки малому діаметру електродного дроту та методу його введення в зазор вдалося зменшити величину зазору з 28 до 20 мм. Глибина проплавлення основного металу зменшилась до 4...5 мм, що свідчить про зниження тепловкладення в основний метал (рис. 2).

На рис. 3 наведено поперечні макрошліфи отриманих зварних з'єднань. Їх аналіз показав, що у всіх з'єднаннях спостерігається щільна структура металу швів, відсутні дефекти у вигляді непроварів, пор, неметалевих включень і тріщин.

Розрахунково-експериментальним шляхом визначено значення питомої погонної енергії ЕШЗ $E_{зв}$, які забезпечує стабільне протікання процесу, задовільну якість формування швів, відсутність дефектів у зварних з'єднаннях. ЕШЗ дротом діаметром 3,0 мм виконували на $E_{зв} = 162$ кДж/см²; дротом діаметром 2,0 мм – $E_{зв} = 141,5$ кДж/см²; дротом діаметром 1,6 мм – $E_{зв} = 109$ кДж/см². Показано, що зменшення діаметра дротів дозволило знизити величину питомої погонної енергії (рис. 4).

Таким чином, за рахунок використання дротів малого діаметра вдалося забезпечити стійке протікання процесу ЕШЗ, зменшити зазор та знизити тепловкладення, що відображується значним зменшенням розмірів поперечного перерізу мета-

Таблиця 1. Розміри поперечного перерізу металу шва та ЗТВ у залежності від діаметра використаного електродного дроту

Діаметр дроту, мм та марка дроту	Площа шва, мм ²	Площа ЗТВ, мм ²	Загальна площа, мм ²
1,6; Св-08Г2С	1264	562	1826
2,0; Св-08ХГ2СМА	1445	595	2040
3,0; Св-10НМА	2115	704	2819

Таблиця 2. Хімічний склад основного металу та металу швів у залежності від марки використаного електродного дроту

Марка дроту	Хімічний склад металу швів та основного металу, мас. %										
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Cu	Mo	V	As
Св-08Г2С	0,09	0,83	1,5	0,015	0,020	0,29	0,20	0,26	<0,01	<0,01	–
Св-08ХГ2СМА	0,10	0,43	1,0	0,017	0,020	0,26	0,88	0,20	0,25	<0,01	–
Св-10НМА	0,10	0,50	1,0	0,017	0,020	0,32	0,84	0,25	0,22	<0,01	–
Сталь 09Г2С	<0,12	0,5...0,8	1,3...1,7	<0,035	<0,03	<0,3	<0,3	<0,3	–	<0,12	<0,08

Таблиця 3. Розмір зерна характерних ділянок зварних з'єднань

Діаметр дроту, мм та марка дроту	Номер зерна G (у чисельнику) і середня площа перерізу зерна (у знаменнику), мм^2			
	Шов	Зона крупного зерна	Зона дрібного зерна	Зона неповної перекристалізації
1,6; Св-08Г2С	$\frac{4}{0,00781}$	$\frac{2}{0,0312}$	$\frac{5}{0,0039}$	$\frac{6}{0,00195}$
2,0; Св-08ХГ2СМА	$\frac{3}{0,0156}$	$\frac{1}{0,0625}$	$\frac{5}{0,0039}$	$\frac{6}{0,00195}$
3,0; Св-10НМА	$\frac{3,4}{0,0156...0,00781}$	$\frac{1,2}{0,0625...0,0312}$	$\frac{4,5}{0,00781...0,0039}$	$\frac{5,6}{0,0039...0,00195}$

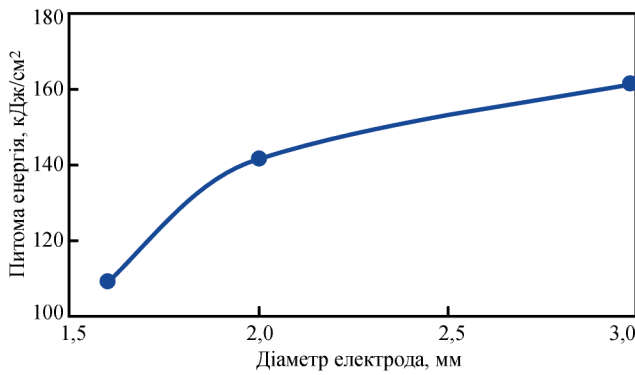


Рис. 4. Вплив діаметра електродного дроту на величину питомої погонної енергії при ЕШЗ металу завтовшки 20 мм (діаметром 1,6 мм марки Св-08Г2С; 2,0 мм марки Св-08ХГ2СМА; 3,0 мм марки Св-10НМА)

лу шва та ЗТВ (табл. 1). Так, площа поперечного перерізу шва зменшилась на 40 %, ЗТВ – на 20 %, порівнюючи зварювання дротами діаметром 3,0 та 1,6 мм.

У табл. 2 наведено результати аналізу хімічного складу металу швів та основного металу досліджуваних зварних з'єднань.

Проведено оцінку розмірів зерна [17] у характерних ділянках зварних з'єднань у залежності від використання електродних дротів різного діаметра при ЕШЗ. Дані щодо балу зерна в металі швів і ЗТВ наведено в табл. 3. Результати вимірювань показали, що зі зменшенням діаметра електродного дроту в діапазоні питомої погонної енергії 100...180 кДж/см² відбувається деяке зменшення розмірів зерна у всіх ділянках з'єднання, порівнюючи зварювання дротами діаметром 3,0 та 1,6 мм.

Мікроструктура основного металу – дрібнодисперсна ферито-перлітна з характерним розміром зерен 15...20 мкм. На рис. 5–8 наведено мікроструктури окремих ділянок зразків.

У зразку, виконаному з використанням дроту Св-08Г2С діаметром 1,6 мм, у металі шва (рис. 5, в) формується однорідна структура голчастого фериту з ділянками полігонального фериту. На ділянці зони термічного впливу (рис. 6, в) переважає бейнітна структура з ділянками полігонального фериту та характерним розміром між ділянками полігонального фериту 100...250 мкм. У зоні дрібного зерна (рис. 7, в) формується голчас-

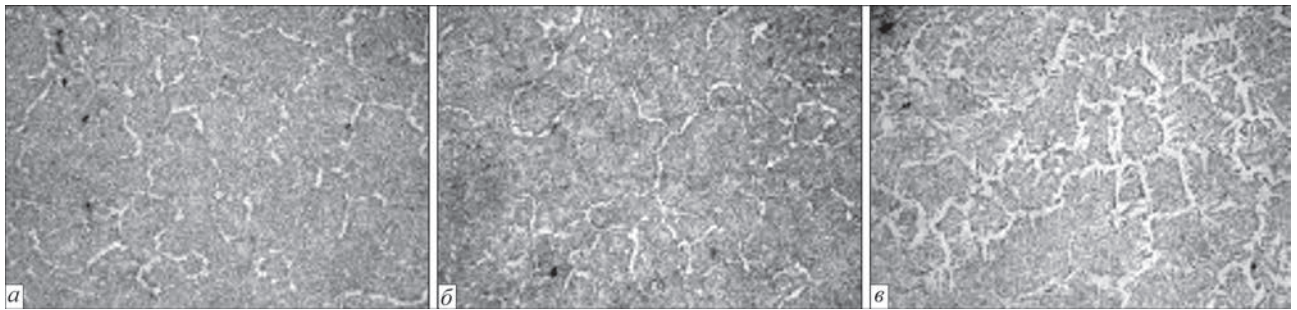


Рис. 5. Мікроструктура металу шва, $\times 100$: дріт Св-10НМА діаметром 3,0 мм (а); Св-08ХГ2СМА – 2,0 мм (б); Св-08Г2С – 1,6 мм (в)

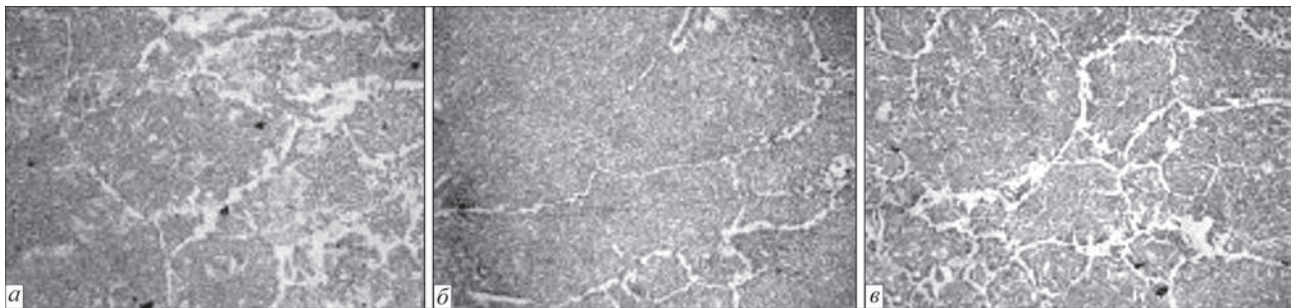


Рис. 6. Мікроструктура металу зони крупного зерна, $\times 100$: дріт Св-10НМА діаметром 3,0 мм (а); Св-08ХГ2СМА – 2,0 мм (б); Св-08Г2С – 1,6 мм (в)

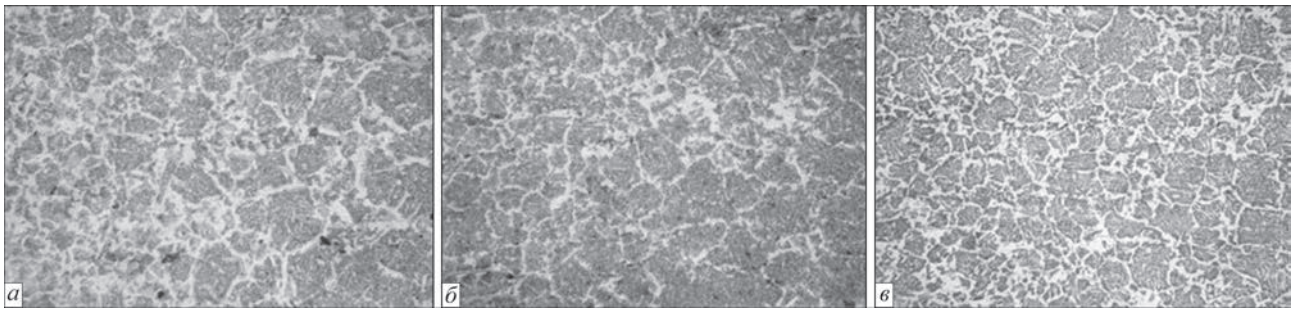


Рис. 7. Мікроструктура металу зони дрібного зерна, $\times 100$: Св-10НМА діаметром 3,0 мм (а); Св-08ХГ2СМА – 2,0 мм (б); Св-08Г2С – 1,6 мм (в)

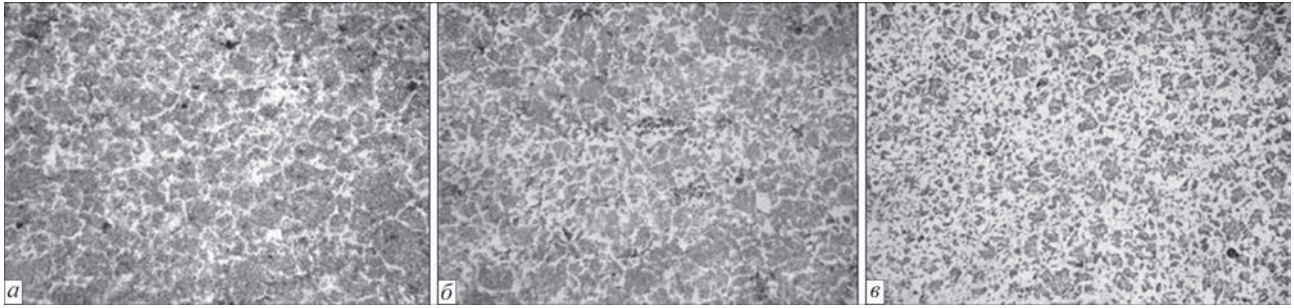


Рис. 8. Мікроструктура металу зони перекристалізації, $\times 100$: Св-10НМА діаметром 3,0 мм (а); Св-08ХГ2СМА – 2,0 мм (б); Св-08Г2С – 1,6 мм (в)

тий ферит з полігональним феритом і характерним розміром між ділянками полігонального фериту 20...50 мкм. У зоні перекристалізації (рис. 8, в) формується дрібнодисперсна ферито-перлітна структура, близька до основного металу.

У зразку, виконаному з використанням дроту Св-08ХГСМА діаметром 2,0 мм, у металі шва (рис. 5, б) формується однорідна бейнітна структура з ділянками полігонального фериту. На ділянці зони термічного впливу (рис. 6, б) переважає бейнітна структура з ділянками полігонального фериту та характерним розміром між ділянками полігонального фериту 200...350 мкм. У зоні дрібного зерна (рис. 7, б) формується бейнітна структура з полігональним феритом і характерним розміром між ділянками полігонального фериту 20...80 мкм. У зоні перекристалізації

(рис. 8, б) формується дрібнодисперсна бейнітна структура з феритною.

У зразку, виконаному з використанням дроту Св-10НМА діаметром 3,0 мм, у металі шва (рис. 5, а) формується однорідна бейнітна структура з незначними ділянками полігонального фериту. На ділянці зони термічного впливу (рис. 6, а) переважає крупнозерниста бейнітна структура з ділянками полігонального фериту та характерним розміром між ділянками полігонального фериту 300...500 мкм. У зоні дрібного зерна (рис. 7, а) формується бейнітна структура з полігональним феритом і характерним розміром між ділянками полігонального фериту 0...100 мкм. У зоні перекристалізації (рис. 8, а) формується дрібнодисперсна структура глобулярного бейніту з ділянками полігонального фериту з характерними розмірами 20...50 мкм.

На рис. 9 показано окремі зразки з'єднань з розміткою контрольних точок вимірювання твердості.

На рис. 10 наведено результати вимірювання твердості в характерних ділянках зварних з'єднань, виконаних ЕШЗ з використанням електродних дротів різного діаметра.

Показано, що твердість основного металу швів і ЗТВ, виконаних ЕШЗ з використанням дротів різного діаметра та різних марок, практично однакова, проте її величина в ділянках перегріву стрибкоподібно збільшується на 4...8 HRA, що характерно для зварних з'єднань, які не проходили подальшого ВТО. Поява ділянок з пониженою твердістю у ЗТВ обумовлено тепловкладенням.

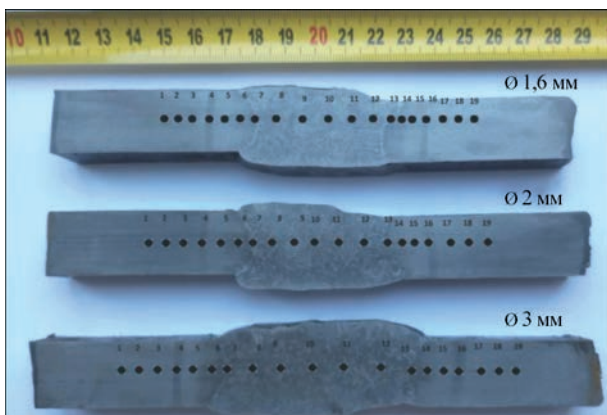


Рис. 9. Розмітка контрольних точок вимірювання твердості зразків: дріт Св-10НМА діаметром 3,0 мм; Св-08ХГ2СМА – 2,0; Св-08Г2С – 1,6

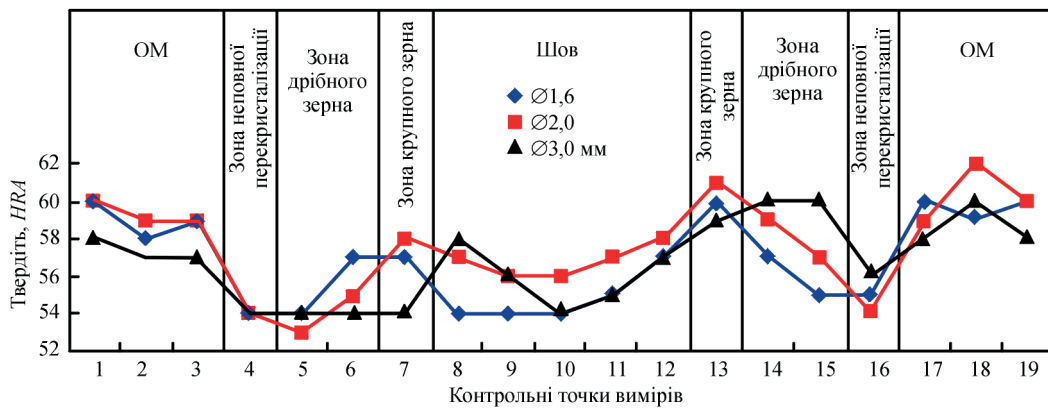


Рис. 10. Показники твердості в характерних ділянках зварних з’єднань, виконаних ЕШЗ з використанням електродних дрітвів різного діаметра: дріт Св-10НМА діаметром 3,0 мм; Св-08ХГ2СМА – 2,0; Св-08Г2С – 1,6

Таблиця 4. Ударна в’язкість металу шва та ЗТВ у залежності від марки та діаметра електродного дроту

Діаметр дроту, мм; марка дроту	Ударна в’язкість KCU, Дж/см ² (при +20 °С)	
	Шов	ЗТВ
1,6; Св-08Г2С	78	223
2,0; Св-08ХГ2СМА	95	253
3,0; Св-10НМА	120	247
Основний метал Ст. 09Г2С	Не менше 59	

Для оцінки величини ударної в’язкості (KCU) основного металу, металу шва та ЗТВ виконано випробування на ударний вигин при температурі +20 °С. Результати випробувань наведено в табл. 4. Зі збільшенням рівня легування наплавленого металу значно підвищилась (майже на 55 %) ударна в’язкість металу шва. Ударна в’язкість металу ЗТВ у зоні крупного зерна, що межує з лінією сплавлення, при використанні електродних дрітвів з різним рівнем легування, має близькі значення. При цьому для всіх марок дрітвів отримані результати перевищують показники основного металу.

Висновки

1. Відпрацьовано параметри режимів ЕШЗ сталі 09Г2С завтовшки 20 мм дрітми стандартного та малого діаметра, які забезпечують задовільну стійкість процесу та отримання якісних зварних з’єднань, у т.ч. із застосуванням сучасних інверторних джерел живлення та високошвидкісних механізмів подачі дроту.

2. Використання дрітвів малого діаметра дозволило зменшити зазор між кромками з 28 до 20 мм і знизити витрати електродного дроту на 39 %. Показано, що зі зменшенням діаметра електродного дроту на відносно близьких режимах зварювання відбувається зниження глибини проплавлення основного металу з 13...15 до 4...5 мм, що свідчить про зменшення тепловкладення в основний метал.

3. Аналіз макроструктури зварних з’єднань засвідчив, що всі отримані зразки мають щільна

структуру металу швів, дефекти у вигляді непроварів, пор, неметалевих включень і тріщин відсутні.

4. Дослідження мікроструктури зварних з’єднань показали, що при ЕШЗ дротом діаметром 1,6 мм у шві формується однорідна структура голчастого фериту з ділянками полігонального фериту, а в ЗТВ переважає бейнітна структура з ділянками полігонального фериту розміром між ділянками полігонального фериту 100...250 мкм. У зоні дрібного зерна формується голчастий ферит з полігональним феритом і характерним розміром між ділянками полігонального фериту 20...50 мкм. У зоні перекристалізації формується дрібнодисперсна ферито-перлітна структура, близька до основного металу.

5. Для всіх марок дрітвів отримані результати вимірювань ударної в’язкості металу шва та ЗТВ на ділянці крупного зерна перевищують показники основного металу.

Список літератури

1. Лашенко Г.И. (2019) Сварочное производство в экономике Украины. *Автоматичне зварювання*, 11, 3–10. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.11.01>
2. Ющенко К.А., Лычко И.И., Козулин С.М. и др. (2018) Применение электрошлаковой сварки в строительстве. *Автоматическая сварка*, 9, 29–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2018.09.05>
3. Сушук-Слюсаренко И.И., Лычко И.И., Козулин М.Г., Семенов В.М. (1989) *Электрошлаковая сварка и наплавка в ремонтных работах*. Київ, Наукова думка.
4. Turpin, B., Danks, D. (2002) *Electroslag field welding of railroad rail*. IDEA program final report for the period September 2002 to November 2003. Contract number HSR-37.
5. (1974) *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением*. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
6. Авраменко В.И., Богдановский В.А. (1976) *Технология электродуговой и электрошлаковой сварки углеродистых и низколегированных сталей*. Київ, Наукова думка.
7. Резнік С.А., Козулін С.М., Супрун С.О. (2024) Удосконалення технології та обладнання для зварювання вертикальних стиків з примусовим формуванням шва. *Автоматичне зварювання*, 5, 48–54. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.05.06>
8. Sasaki, S., Suda, K., Motomatsu, R. et al. (2004) *Development of two-electrode electroslag arc welding process*. Nip-

- pon Steel Technical Report № 90, July 2004. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
9. Терещенко В.И., Либанов А.В. (1987) *Выбор и применение способов сварки при изготовлении конструкций*. Київ, Наукова думка.
 10. (1980) *Электрошлаковая сварка и наплавка*. Патон Б.Е. (ред.). Москва, Машиностроение.
 11. Патон Б.Е., Ющенко К.А., Козулин С.М., Лычко И.И. (2019) Электрошлаковый сварочный процесс. Анализ состояния и тенденции развития (Обзор). *Автоматическая сварка*, **10**, 36–46. DOI: <https://doi.org/10.15407/as2019.10.05>
 12. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, **91**(5), 24–31.
 13. Chambers, J.J., Manning, B.R. (2016) Electroslag welding: From Shop to Field. *Structure magazine*, February 2016, 20–23.
 14. ДСТУ 3490-96. *Электрошлакове зварювання сталей. Вимоги до технологічного процесу*.
 15. ДСТУ 8975:2019. *Сталь. Методи випробування та оцінювання макроструктури*.
 16. ДСТУ ISO 6508-1:2013. *Металеві матеріали. Визначення твердості за Роквеллом. Частина 1. Метод випробування (шкали А, В, С, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT)*.
 17. ДСТУ 8972:2019. *Сталі та сплави. Методи виявлення та визначення величини зерна*.
 4. Turpin, B., Danks, D. (2002) *Electroslag field welding of railroad rail*. IDEA program final report for the period September 2002 to November 2003. Contract number HSR-37.
 5. (1974) *Technology of electric welding of metals and alloys by fusion*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 6. Avramenko, V.I., Bogdanovsky, V.A. (1976) *Technology of electric arc and electroslag welding of carbon and low-alloy steels*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 7. Reznik, S.A., Kozulin, S.M., Suprun, S.O. (2024) Improvement of technology and equipment for welding vertical joints with forced seam formation. *Автоматичне Зварювання*, **5**, 48–54. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.05.06>
 8. Sasaki, S., Suda, K., Motomatsu, R., Hashiba, Y., Ohkita, S., Imai, S. (2004) *Development of two-electrode electrogas arc welding process*. Nippon Steel Technical Report № 90, July 2004. <https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9013.pdf>
 9. Tereshchenko, V.I., Libanov, A.V. (1987) *Selection and application of welding methods in the manufacture of structures*. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
 10. (1980) *Electroslag welding and surfacing*. Ed. by B.E. Paton. Moscow, Mashinostroenie [in Russian].
 11. Paton, B.E., Yushchenko, K.A., Kozulin, S.M., Lychko, I.I. (2019) Electroslag welding process. Analysis of the state and development trends (Overview). *The Paton Welding J.*, **10**, 33–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/tpwj2019.10.05>
 12. Turpin, B., Danks, D., Callaghan, I., Wood, W. (2012) Narrow gap electroslag is process of choice for welding San Francisco-Oakland Bay Bridge. *Welding J.*, **91**(5), 24–31.
 13. Chambers, J.J., Manning, B.R. (2016) Electroslag welding: From shop to field. *Structure magazine*, February 2016, 20–23.
 14. DSTU 3490-96. *Electroslag welding of steels. Requirements for the technological process* [in Ukrainian].
 15. DSTU 8975:2019. *Steel. Methods of testing and evaluation of macrostructure* [in Ukrainian].
 16. DSTU ISO 6508-1:2013. *Metallic materials. Determination of Rockwell hardness. Pt 1. Test method (scales A, B, C, D, E, F, G, H, K, N, T) (ISO 6508-1:2005, IDT)* [in Ukrainian].
 17. DSTU 8972:2019. *Steels and alloys. Methods for detecting and determining grain size* [in Ukrainian].

References

ELECTROSLAG WELDING OF 09G2S STEEL OF SMALL THICKNESS

P.I. Onyshchenko, S.M. Kozulin

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

E-mail: pwj_37@ukr.net

The paper presents the results of studies of the possibility of obtaining a high-quality welded joint in ESW of 09G2S steel with a thickness of 20 mm using wires 1.6, 2.0 and 3.0 mm in diameter. The aim of the work is to develop a technology and technique for ESW of 20 mm thick metal that ensures process stability, high-quality weld formation and the required mechanical properties of welded joints. The main tasks of the work are: laboratory experimental studies to establish the modes and techniques of ESW in the conditions of a small cross-section of the joint; comparative assessment of the depth of base metal penetration and the cross-sectional areas of welds made by ESW with electrode wires of different diameters; study of macro- and microstructure of welded joints; measurement of hardness of the base metal and the weld and HAZ metal; determination of grain size in the characteristic areas of welded joints; testing of the weld and HAZ metal and base metal for impact bending. Modern welding equipment with an inverter power source and high-speed wire feed mechanisms allowed using a wire with a diameter of 1.6 mm, which enabled reducing the gap between the edges by 30% and increasing the welding speed by 1.5 times, lowering the specific linear energy from 162 kJ/cm² to 109 kJ/cm² and reducing the dimensions of the joint: of the weld area by 40%, and of the HAZ by 20%, compared to welding with a 3.0 mm wire. No defects were found as a result of metallographic studies of the joints. Analysis of the metal microstructure in the main areas of the joint showed that a homogeneous structure of acicular ferrite with polygonal ferrite areas and a hardness of 54...57 HRA is formed in the weld metal, and a bainitic structure with polygonal ferrite areas and a hardness of 54 to 57 HRA is formed in the HAZ metal. The use of higher alloyed wire grades increased the impact toughness of the weld metal by 55% (up to 120 J/cm²) (at +200 C°). 17 Ref., 4 Tabl., 10 Fig.

Keywords: low-alloy steel, electroslag welding, electrode wires, hardness, macrostructure, microstructure, grain size, impact toughness

Отримано 14.05.2025

Отримано у переглянутому вигляді 17.06.2025

Прийнято 25.07.2025