

УДК 621.326

Ігор Протоковілов¹, д.т.н., с.н.с.; Віталій Порохонько¹, к.т.н., с. досл.; Музаффар Абралов², к.т.н.

¹ Інститут електрозварювання імені Є.О. Патона НАН України, Україна

² Ташкентський державний технічний університет, Узбекистан

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ВПЛИВОМ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ МЕТАЛУ ШВА

Анотація. Розглянуто метод впливу на процес електрошлакового зварювання, спрямований на оптимізацію структури металу шва. Показано, що ефективним інструментом керування кристалізацією металу при ЕШЗ є зовнішні магнітні поля, які дозволяють здійснювати безконтактний силовий вплив на зварювальну ванну. Наведено експериментальні дані щодо структуроутворення металу шва при ЕШЗ титанових плит товщиною 120 мм під впливом постійного та імпульсного поперечного магнітного поля. Встановлено, що імпульсне магнітне поле індукцією 0,06 Тл дозволяє гомогенізувати і подрібнювати структуру металу шва при зменшенні в 2,6 рази середнього розміру зерен металу.

Ключові слова: електрошлакове зварювання; титан; магнітне поле; зварний шов; макроструктура

Igor Protokovilov, Ph.D.; Vitalii Porokhonko, Ph.D.; Muzaffar Abralov, Ph.D.

ELECTROSLAG WELDING OF TITANIUM WITH ELECTROMAGNETIC INFLUENCE ON WELD METAL CRYSTALLIZATION

Abstract. The method of influence on the process of electroslag welding, aimed at optimizing the structure of the weld metal, is considered. It is shown that external magnetic fields, which allow non-contact force influence on the welding pool, are an effective tool for controlling metal crystallization during welding. Experimental data on the structuring of the weld metal during the ESW of titanium plates with a thickness of 120 mm under the influence of a DC and pulsed transverse magnetic field are given. It was established that a pulsed magnetic field by induction of 0.06 T allows to homogenize and refine the metal structure of the weld while reducing the average size of the metal grains by 2,6 times.

Keywords: electroslag welding; titanium; magnetic field; weld seam; macrostructure

Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) є ефективним способом з'єднання товстостінних виробів та конструкцій, який дозволяє з'єднувати за один прохід без розроблення кромки елементи з товщиною стінки від 30 до 350 мм і більше [1-3]. При товщині стінки понад 120 мм це практично єдиний спосіб, яким можна зварити конструкції зі сталі, титанових сплавів та інших матеріалів.

Основними конкурентними перевагами ЕШЗ є: висока продуктивність процесу зварювання (наприклад швидкість зварювання плит завтовшки 120 мм становить 2...2,5 м/год); надійність та відносно низька вартість обладнання, що використовується (процес не потребує використання громіздких та дорогих вакуумних камер, як, наприклад, при електронно-променевому зварюванні); щільна структура металу шва без пор, шлакових включень, несплавлень та інших дефектів; відсутність випаровувань в процесі зварювання легуючих компонентів сплаву; можливість використання присаджувального матеріалу аналогічного за хімічним складом металу, що зварюється.

Попри зазначені переваги ЕШЗ має і певні недоліки, які пов'язані з погіршенням механічних властивостей зварного з'єднання через крупнозернисту структуру металу

шва, перегрів основного металу та несприятливі структурні перетворення в зоні термічного впливу.

У зв'язку з цим актуальним завданням є розроблення методів впливу на формування металу шва ЕШЗ з метою подрібнення і гомогенізації його кристалічної будови.

Одним з ефективних інструментів впливу на кристалізацію металу при ЕШЗ є застосування зовнішніх магнітних полів. Фізичний механізм впливу зовнішнього магнітного поля на процес ЕШЗ полягає в його взаємодії зі зварювальним струмом. Внаслідок такої взаємодії в розплавах шлакової і металевої ванн утворюється об'ємна електромагнітна сила \vec{F}_e , яка призводить до силової дії на розплав зварювальної ванни. Величина та напрямок дії зазначеної сили визначаються векторним добутком щільності струму в розплаві \vec{j} та індукції зовнішнього магнітного поля \vec{B} : $\vec{F}_e = \vec{j} \times \vec{B}$.

В роботі [4] розглянуті різні варіанти створення зовнішніх магнітних полів у зварювальному зазорі при ЕШЗ. Показано, що найбільш технологічним варіантом є використання поперечного магнітного поля, силові лінії якого орієнтовані в площині поперечного перерізу зварювальної ванни. Таке поле можна створити при розташуванні полюсів електромагніту з протилежних боків зварювальних кромок біля планок, що формують бокову поверхню шва (рис. 1).

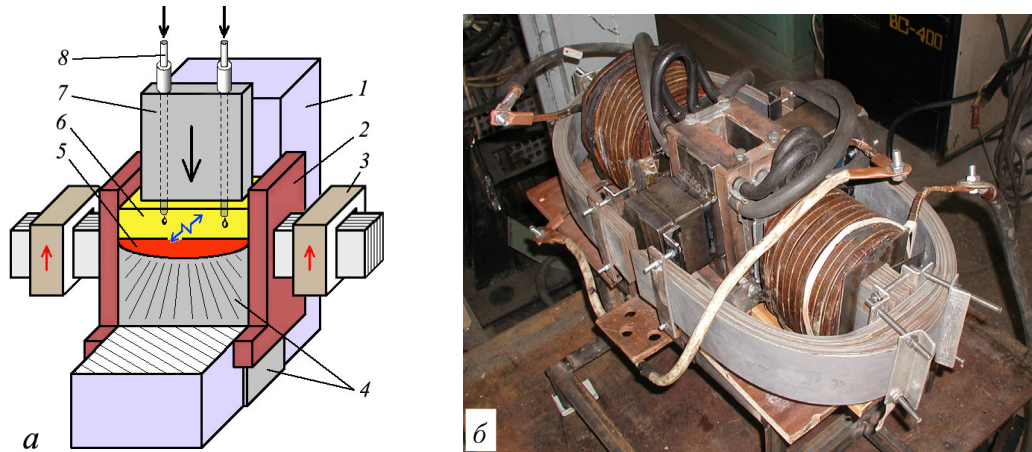


Рис. 1. Схема електрошлакового зварювання плавким мундштуком в поперечному магнітному полі (а) і зовнішній вигляд електромагнітного пристрою (б): 1 – плита, яку зварюють; 2 – формуючі планки; 3 – електромагнітний пристрій; 4 – зварний шов; 5 – металева ванна; 6 – шлакова ванна; 7 – плавкий мундштук; 8 – електродний дріт

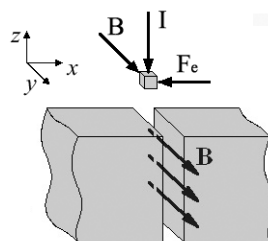


Рис. 2. Напрямок векторів індукції магнітного поля B , сили струму I і електромагнітної сили F_e при ЕШЗ в поперечному магнітному полі

Достатньо компактними є електромагніти з однострижневими сердечниками рис. 1. Такий пристрій створює магнітне поле, силові лінії якого перпендикулярні зварювальним крокам. В даному випадку, в декартовій системі координат (x, y, z)

електромагнітна сила матиме складові $\vec{F}e = (-j_z B_y, 0, j_x B_y)$ (рис.2). Тобто, з урахуванням того, що осьова z -складова сили струму значно більше ніж поперечна x -складова $j_z > j_x$, основна компонента електромагнітної сили буде спрямована впоперек кромки, що зварюються (вздовж осі x , рис. 2). У разі використання постійного магнітного поля і змінного струму зварювання це призведе до утворення вібрації розплаву ванни впоперек зварювальних кромки з частотою струму зварювання (50 Гц). Такі зворотно-поступальні рухи розплаву сприяють подрібненню структури металу шва. Поперечна вібрація в зварювальному зазорі також збільшує проплавлення кромки основного металу, що дозволяє знижувати погонну енергію зварювання.

Експериментальні дослідження проводили при зварюванні покровок товщиною 120 мм з технічного титану ВТ1-0. ЕШЗ здійснювали з використанням плавкого мундштука з титану ВТ1-0 з двома каналами для зварювальних дротів діаметром 5 мм. Використовували фторидно-хлоридний флюс АН-Т4. Експерименти проводили без застосування зовнішнього магнітного поля (експ. №1), а також з використанням постійного і імпульсного поперечного магнітного поля (експ. №2, 3). В усіх випадках зварювальний зазор становив 30 мм. Режими проведених експериментів наведені в таблиці. З отриманих зварних з'єднань виготовляли поздовжні темплети для аналізу структури металу.

Таблиця. Режими ЕШЗ титанових заготовок $\delta_{0.м.}=120$ мм

№	U _{зв} , В	I _{зв} , А	V _{дроту} , м/год	V _{зв} , м/год	Зовнішнє магнітне поле	
					тип поля	B, Тл
1	22-24	3600	100	2,0	-	-
2	18-19	3800	140	2,4	постійне	0,04
3	22-23	3550	150	2,2	імпульсне t _{імп} =1,5 с, t _{паузи} =10 с	0,06

На рис. 3 наведено макроструктури отриманих зварних з'єднань. В усіх випадках структура металу щільна, без пор, шлакових включень та інших дефектів. Добре помітні структурні зони зварного з'єднання: основний метал, зона термічного впливу, метал шва.

Метал шва, отриманого без електромагнітного впливу, характеризується стовпчастою структурою з крупними кристалітами витягнутими в напрямку відведення тепла (рис. 3 а). Така структура є типовою для литого металу і формується в умовах великого об'єму металеві ванни і відносно низької швидкості охолодження рідкого металу, які характерні процесу ЕШЗ.

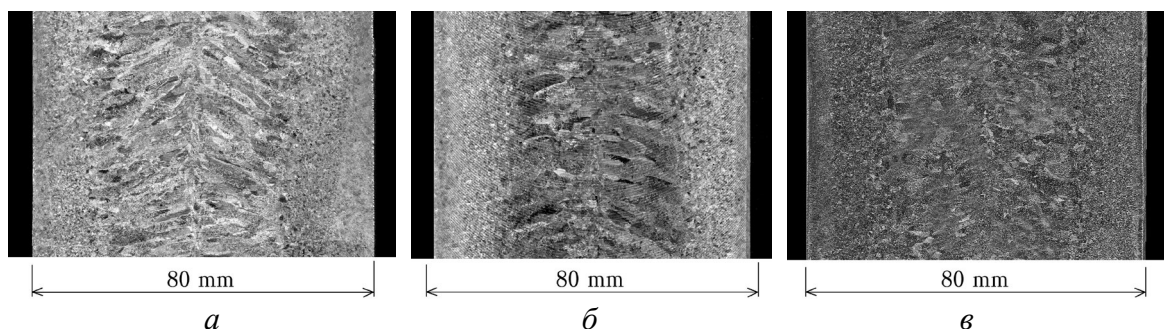


Рис. 3. Макроструктура зварних з'єднань, отриманих традиційним ЕШЗ (а) і ЕШЗ в постійному (б) і імпульсному (в) поперечному магнітному полі

На рис. 4 представлені результати аналізу макроструктури металу, отримані за допомогою програмного забезпечення MIPAR. Аналіз отриманих даних свідчить, що метал шва, отриманого під впливом імпульсного магнітного поля індукцією 0,06 Тл характеризується більш дрібнозернистою структурою, у порівнянні з металом шва традиційного ЕШП. Так, середній розмір зерна (еквівалентний діаметр) в полі макрошліфа традиційного ЕШЗ становить 1,91 мм в той час як при застосуванні імпульсного магнітного поля – 0,74 мм, тобто в 2,6 рази менший. В разі застосування постійного поля індукцією 0,04 Тл подрібнення структури відбулось меншою мірою. В цьому випадку середній розмір зерна становив 0,86 мм.

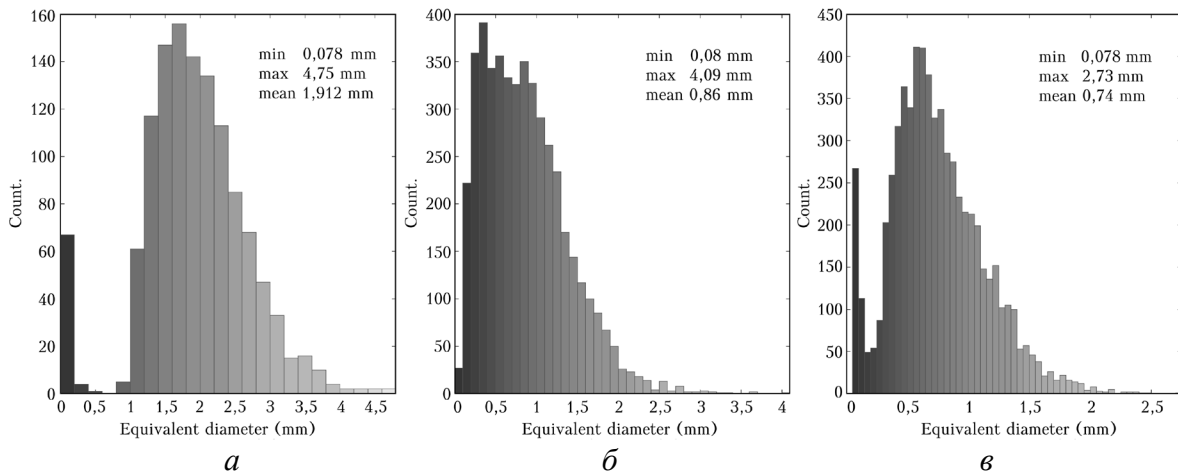


Рис. 4. Розподіл зерен в полі макрошліфа зварного з'єднання по їх розміру: *а* – традиційне ЕШЗ; *б* – ЕШЗ в поперечному постійному магнітному полі; *в* – ЕШЗ в поперечному імпульсному магнітному полі

Менший вплив постійного магнітного поля на структуроутворення металу пояснюється перш за все меншим значенням індукції магнітного поля, через що зменшується електромагнітна сила, що діє на рідкий метал. Крім того, при імпульсній дії магнітного поля відбуваються гідродинамічні "удари" на фронт кристалізації в момент включення і відключення магнітного поля, які сприяють подрібненню структури шва.

Загалом, механізм подрібнення структури металу шва під впливом магнітного поля пов'язаний з руйнуванням або частковим оплавленням/розчиненням гілок зростаючих дендритів під впливом електромагнітної вібрації і потоків рідкого металу. Інтенсивність подрібнення металу залежить від величини індукції магнітного поля, частоти і тривалості імпульсів його дії.

Таким чином експериментально доведена можливість гомогенізації і подрібнення структури металу шва при ЕШЗ титану шляхом застосування імпульсного поперечного магнітного поля.

1. В. Paton, К. Yushchenko, S. Kozulin, I. Lychko. 2019. Electrosag welding process. Analysis of the state and tendencies of development. The Paton Welding Journal 10, 33–40.
2. К. Yushchenko, I. Lychko, S. Kozulin et al. 2018. Application of welding in construction. The Paton Welding Journal 9, 23–27. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.05>
3. E. Kaluc, E. Taban, A. Dhooge. 2006. Electrosag welding process and industrial applications. Metal Duniyasi 152 (13), 100–104.
4. Протоковилон И.В., Порохонько В.Б., Назарчук А.Т. и др. 2013. Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки. Автоматическая сварка. №12. С.45-50.