

УДК 621.791:669.295

ЕЛЕКТРОШЛАКОВЕ ЗВАРЮВАННЯ ТИТАНУ ЗА ЕЛЕКТРОМАГНЕТНОГО ВПЛИВУ НА КРИСТАЛІЗАЦІЮ МЕТАЛУ ШВА

В. О. ШАПОВАЛОВ¹, І. В. ПРОТOKОВІЛОВ¹, В. Б. ПОРОХОНЬКО¹,
С. Ю. МАРИНЕНКО²

¹ Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ;

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Проаналізовано метод впливу на електрошлакове зварювання (ЕШЗ), щоб оптимізувати структуру металу шва. Виявлено, що ефективними для керування кристалізацією металу під час ЕШЗ є зовнішні магнетні поля (МП), які дають можливість безконтактно діяти на зварювальну ванну. Наведено експериментальні результати структуроутворення металу шва під час такого зварювання титанових плит завтовшки 120 мм за постійного та імпульсного поперечного МП. Встановлено, що під впливом імпульсного МП з індукцією 0,06 Т можна гомогенізувати і подрібнювати його структуру, зменшуючи в 2,6 раза середній розмір зерен металу, збільшуючи на 23% відносне видовження і на 19% – ударну в'язкість.

Ключові слова: електрошлакове зварювання, титан, магнетне поле, зварний шов, макроструктура, механічні властивості.

The method of the influence on the process of electroslag welding (ESW), aimed at optimizing the structure of the weld metal, is considered. It is shown that external magnetic fields (MF), which allow non-contact force influence on the welding pool, are an effective tool to control metal crystallization during welding. Experimental data on the structuring of the weld metal during 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 MF by induction of 0.06 T allows us to homogenize and refine the metal structure of the weld while reducing the average size of the metal grains in 2.6 times, and increase in the specific elongation of the weld metal by 23% and the impact strength – by 19%.

Keywords: electroslag welding, titanium, magnetic field, welded joint, macrostructure, mechanical properties.

Вступ. Електрошлакове зварювання (ЕШЗ) – ефективний спосіб з'єднання товстостінних виробів та конструкцій за один прохід без оброблення крайок елементів з товщиною стінки від 30 до 350 мм і більше [1–5]. За товщини стінки понад 120 мм це практично єдиний метод зварювання конструкцій зі сталі, титанових сплавів та інших матеріалів [6].

Основні переваги ЕШЗ – висока продуктивність (наприклад, швидкість зварювання плит завтовшки 120 мм становить 2...2,5 м/х); надійність та відносно низька вартість застосовуваного обладнання; щільна структура металу шва без пор, шлакових включень, непроплавів тощо; відсутність випаровувань під час зварювання легувальних компонентів сплаву; можливість використовувати присаджувальний матеріал з таким же хімічним складом, як зварювальний метал.

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

перегрівання основного металу та несприятливі структурні перетворення в зоні термічного впливу. Це перш за все стосується титанових сплавів, які все частіше застосовують як силові конструкції морської та авіаційної техніки, товстостінні елементи обладнання для хімічної промисловості, енергетики тощо [6–8]. Тому актуально розробити методи впливу на формування металу шва ЕШЗ, щоб по-дрібнити і гомогенізувати його кристалічну будову.

Одним з найефективніших способів є застосування під час ЕШЗ зовнішнього магнетного поля (МП), яке взаємодіє зі зварювальним струмом, що протікає крізь розплави шлакової і металевої ванн. Внаслідок цього в розплавах утворюється об'ємна електромагнетна сила $\vec{F}_e$, яка діє на шлак і рідкий метал. Її значення та напрямок визначає векторний добуток густини струму в розплаві $\vec{J}$ на індукцію зовнішнього МП $\vec{B}$: $\vec{F}_e = \vec{J} \times \vec{B}$.

Описано [9] різні варіанти створення зовнішніх МП у зварювальному зазорі під час ЕШЗ (рис. 1). Встановлено, що найтехнологічнішим з них є використання поперечного МП, силові лінії якого орієнтовані поперек осі зварювання вздовж зварювальних крайок (рис. 1с). Таке поле можна сформувати, розташовуючи полюси електромагнету з протилежних боків крайок біля планок, що формують бокову поверхню шва. Під час виконання протяжних стиків передбачено переміщення електромагнетів уздовж крайок зі швидкістю зварювання (рис. 2).

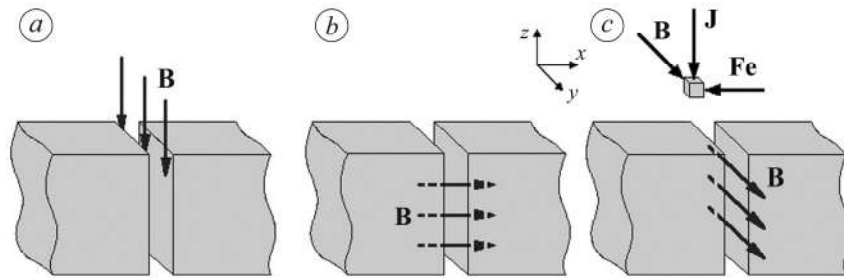


Рис. 1. Варіанти введення зовнішніх МП у зварювальний зазор під час ЕШЗ: *a* – поздовжнє МП; *b*, *c* – поперечні МП. $\vec{B}$, $\vec{J}$, $\vec{F}_e$ – вектори індукції МП, сили струму і електромагнетної сили, відповідно.

Fig. 1. Variants of introducing external magnetic fields (MF) into the welding gap during electroslag welding (ESW): *a* – longitudinal MF; *b*, *c* – transverse MF. $\vec{B}$, $\vec{J}$, $\vec{F}_e$ – vectors of MF, current and electromagnetic force, respectively.

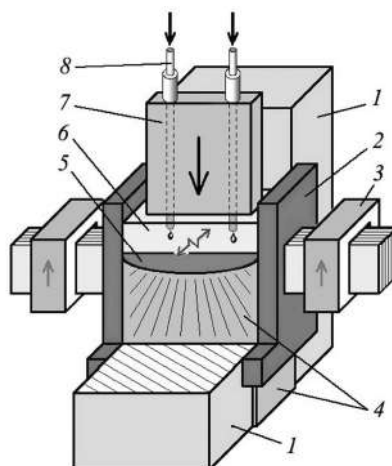
Сердечники електромагнетів бувають як стрижневої, так і П-подібної форм. Достатньо компактні електромагнети з однострижневими сердечниками (рис. 2), що створюють МП зі силовими лініями, паралельними до зварювальних крайок. У цьому випадку в декартовій системі координат x , y , z струм зварювання має компоненти j_x , j_y , j_z , а зовнішнє МП – 0 , B_y , 0 . Відповідно електромагнетна сила $\vec{F}_e = (-j_z B_y, 0, j_x B_y)$ (рис. 1). Тобто, оскільки осьова z -компонента сили струму суттєво більша, ніж поперечна x -компонента ($j_z > j_x$), то основна компонента електромагнетної сили спрямовуватиметься впоперек зварювальних крайок (уздовж осі x ; рис. 1). За використання постійного МП і змінного струму зварювання це призведе до вібрації розплаву ванни впоперек зварювальних крайок з частотою струму зварювання 50 Hz. Такі рухи розплаву біля фронту кристалізації сприяють подрібненню структури металу шва. Поперечна вібрація в зварювальному зазорі також повинна збільшити проплавлення крайок основного металу, що дасть можливість знизити погонну енергію зварювання.

Рис. 2. Схема ЕШЗ у поперечному МП:

- 1 – зварювальні плити;
- 2 – мідні формувальні планки;
- 3 – електромагнетний пристрій;
- 4 – зварний шов;
- 5, 6 – металева і шлакова ванни;
- 7 – плавкий мундштук;
- 8 – електродний дріт.

Fig. 2. Schematic of ESW in a transverse MF:

- 1 – plates being welded;
- 2 – copper forming plates;
- 3 – electromagnetic device;
- 4 – welded joint; 5, 6 – metal and slag pools;
- 7 – fusible nozzle; 8 – electrode wire.



Зовнішні МП під час ЕШЗ впливають не тільки на кристалізацію металу шва, а й на характер плавлення і крапельне перенесення електродного металу. Досліджено [10–12] вплив поздовжнього і поперечного МП на еволюцію крапель електродного металу під час електрошлакового переплаву. Встановлено, що поздовжнє МП, викликає інтенсивні потоки у шлаковій ванні, призводить до збільшення швидкості плавлення електрода та частоти відриву крапель електродного металу. При цьому краплі мають менший розмір, долають більший шлях у ванні рідини, а місце їх падіння на поверхню рідкого металу стає розосередженішим [10].

Аналогічний ефект зменшення середнього розміру крапель отримали і під час застосування зовнішнього поперечного МП [11, 12]. При цьому через зменшення розміру крапель значно збільшуються площа межі поділу між металом і шлаком та час контакту краплі зі шлаком, що вказує на поліпшення умов для очищення металу.

Мета цього дослідження – вивчити вплив поперечного МП на формування структури металу шва і його механічні характеристики під час ЕШЗ титанових плит завтовшки 120 mm.

Матеріали і методика випроб. Зварювали плити завтовшки 120 mm з технічного титану BT1-0, використовуючи плавкий мундштук з двома каналами для подачі зварювальних дрітів діаметром 5 mm (рис. 2). Матеріал мундштука і зварювальних дрітів – також титан BT1-0. Для формування шлакової ванни застосовували безкисневий фторидно-хлоридний флюс АН-Т4 (CaF_2 –20% SrCl_2), який стабілізує процес і не забруднює метал киснем. Для додаткового захисту зварювальної ванни й електродного металу від взаємодії з повітрям у зварювальний зазор подавали аргон. Випробовували без зовнішнього МП (експеримент № 1), а також з постійним і імпульсним поперечними МП (експерименти № 2 і 3). В усіх випадках ширина зварювального зазору 30 mm (табл. 1).

За результатами експериментів аналізували стабільність процесу і якість формування металу шва. З отриманих зварних з’єднань виготовляли поздовжні темплети, щоб оцінити особливості структуроутворення металу шва. Полірували зразки до 14-го класу чистоти поверхні, далі травили в реактиві зі суміші плавикової і азотної кислот. Використовували металографічний світловий мікроскоп “Neophot-32” з різним збільшенням. Структуру металу за розміром зерен оцінювали за допомогою програмного забезпечення MIPAR.

Механічні характеристики визначали шляхом випробувань на розтяг і ударну в’язкість (KCU) зразків металу шва (по 9 зразків для кожного випробування), які вирізали у поперечній площині (вздовж осі Ox , рис. 1) з центральної частини шва. Розтягували згідно з ДСТУ ISO 6892-1:2019 на універсальному сервогідрав-

лічному комплексі MTS 318.25 з максимальним зусиллям 250 kN. Контролювали параметри під час дослідження за допомогою стандартного програмного забезпечення TestWorks 4 системи MTS 318.25.

Основний метал (за ДСТУ ISO 148-1:2022) та зварні з'єднання (за ДСТУ EN ISO 9016:2019) випробовували на ударну в'язкість методом Шарпі на маятниковому копрі КМ-30 з граничною енергією копра 300 J.

Таблиця 1. Режими ЕШЗ титанових плит завтовшки 120 mm

Напруга зварювання, V	Струм зварювання, A	Швидкість подачі дроту, м/х	Швидкість зварювання, м/х	Зовнішнє МП	
				тип	індукція, Т
22...24	3600	100	2,0	—	—
18...19	3800	120	2,4	Постійне	0,04
22...23	3550	110	2,2	Імпульсне $t_{imp}=1,5$ s, $t_{pause}=10$ s	0,06

Результати та їх обговорення. Усі експерименти відбувались без порушень стабільності ЕШЗ і викидів шлаку. Тобто зовнішнє МП індукцією 0,04...0,06 Т не змінювало стабільності процесу.

В усіх випадках поверхня зварних швів сріблястого кольору без ознак окиснення (рис. 3). Шви сформовані добре, поверхневі дефекти відсутні. Поверхня шва, одержаного під дією МП (рис. 3b, c), шорсткіша, ніж шва, без такого впливу (рис. 3a). Очевидно, це пов'язано з вібрацією зварювальної ванни внаслідок взаємодії змінного струму зварювання зі зовнішнім МП, через що періодично змінюється товщина гарнісажної кірки на поверхні шва, що, в свою чергу, призводить до появи характерних заглиблень (опуклостей). Також слід звернути увагу, що в усіх випадках відсутня кутова деформація виробів, що дуже важливо під час зварювання товстостінних листів і плит. Макроструктура зварних з'єднань щільна, без пор, шлакових включень та інших дефектів (рис. 4). Добре помітні зони зварного з'єднання: основний метал, зона термічного впливу, метал шва.

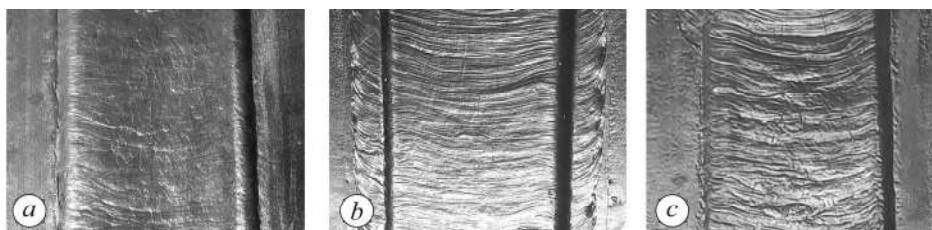


Рис. 3. Вигляд поверхні зварних швів, отриманих традиційним ЕШЗ (a), а також у постійному (b) та імпульсному (c) МП.

Fig. 3. View of the welded joints obtained by traditional ESW (a) and in constant (b) and pulsed (c) MFs.

Метал шва, отриманого без електромагнетного впливу, має стовпчасту структуру з великими кристалітами, витягнутими в напрямку відведення тепла (рис. 4a). Така структура типова для литого металу і формується у великій за об'ємом металевій ванні та за відносно низької швидкості охолодження рідкого металу, які характерні ЕШЗ. Під дією зовнішнього МП структура металу шва складається і зі стовпчастих, і з рівновісних кристалів. Причому такі зміни чіткіше проявляються під впливом імпульсного МП індукцією 0,06 Т (рис. 4c).

Виявили (рис. 5), що структура металу шва, отриманого під впливом імпульсного МП індукцією 0,06 Т, дрібнозернистіша, ніж одержаного традиційним

ЕШЗ. Зокрема, середній розмір зерна (еквівалентний діаметр d_{eq}) за традиційного зварювання становив 1,91 mm, а зі застосуванням імпульсного МП – 0,74 mm, тобто в 2,6 раза менший. Під час застосування постійного поля індукцією 0,04 Т подрібнення структури не таке відчутне. Тут середній розмір зерна 0,86 mm.

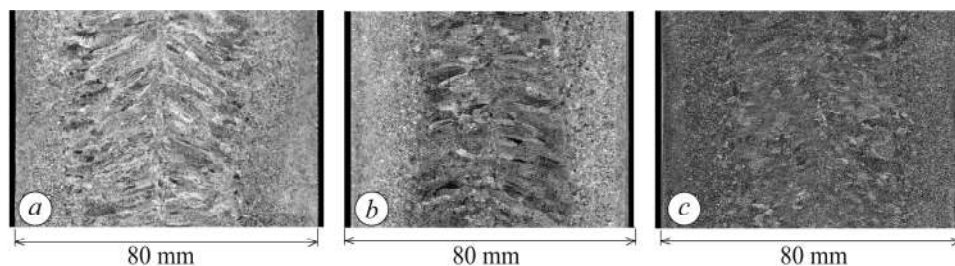


Рис. 4. Макроструктура зварних з'єднань, отриманих традиційним ЕШЗ (а), а також в постійному (b) та імпульсному (c) МП.

Fig. 4. Macrostructure of welded joints obtained by traditional ESW (a) and in constant (b), pulsed (c) MFs.

Слабший вплив постійного МП на структуру металу пояснюють меншим значенням його індукції, через що знижується електромагнетна сила, що діє на рідкий метал. Крім того, за імпульсного МП, в моменти його вмикання і вимкнення, відбуваються гідродинамічні “удари” на фронт кристалізації, які сприяють подрібненню структури шва. Загалом механізм такого подрібнення пов'язаний з руйнуванням або частковим оплавленням (розчиненням) гілок дендритів під впливом електромагнетної вібрації і потоків рідкого металу. Інтенсивність подрібнення металу залежить від індукції МП, а також частоти і тривалості його імпульсів.

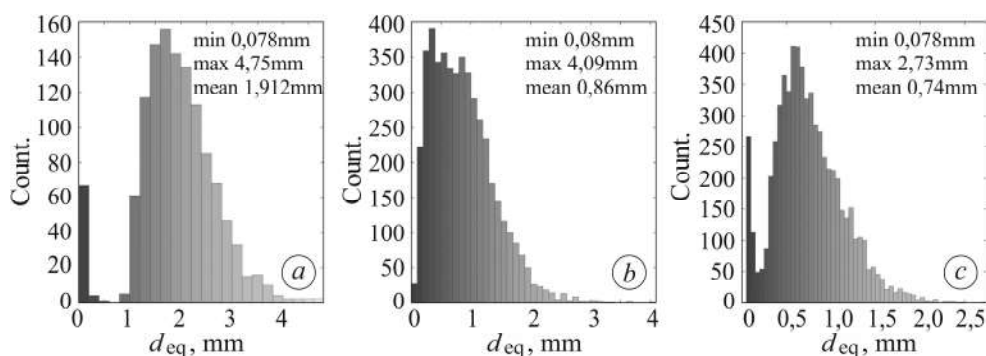


Рис. 5. Розподіл зерен у полі макрошліфа зварного з'єднання за їх розміром: а – традиційне ЕШЗ; b, c – у постійному та імпульсному МП.

Fig. 5. Distribution of grains in the macrosection of the welded joint by their size: a – traditional ESW; b, c – ESW in constant and pulsed MFs.

Таблиця 2. Механічні характеристики зварних швів плит зі сплаву ВТ1-0 завтовшки 120 mm

№ эксперименту	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ	$KCU,$ J/cm^2
	МПа		%		
1	$326 \pm 18,6$	$390 \pm 14,2$	$29,2 \pm 4,0$	$59,7 \pm 4,5$	$161 \pm 8,2$
2	$323 \pm 9,1$	$387 \pm 11,9$	$31,8 \pm 3,4$	$66,5 \pm 3,8$	$182 \pm 5,8$
3	$324 \pm 5,5$	$384 \pm 7,9$	$36,0 \pm 2,1$	$70,1 \pm 2,0$	$192 \pm 3,6$

За результатами механічних випробувань металу зварних швів (табл. 2) виявили, що за відносно однакових значень міцності метал швів, виконаних зі застосуванням поперечного МП, пластичніший. Зокрема, під дією імпульсного МП індукцією 0,06 Т відносне видовження збільшилось у середньому на 23% (з 29,2 до 36%), а ударна в'язкість – на 19% (з 161 до 192 J/cm²). Таке підвищення характеристик пластичності металу шва пов'язане з подрібненням макроструктури металу. При цьому особливу увагу слід звернути на мінімальний розкид механічних характеристик металу шва, що свідчить про його структурну однорідність (табл. 2).

ВИСНОВКИ

Встановлено можливість реалізації ЕШЗ титанових плит у поперечному магнетному полі без порушень стабільності процесу з формуванням швів без поверхневих дефектів і зі щільною структурою. Виявлено, що імпульсне поперечне магнетне поле індукцією 0,06 Т призводить до зменшення в 2,6 раза середнього розміру зерен металу шва (з 1,91 до 0,74 mm), збільшення на 23% відносного видовження (з 29,2 до 36%) і на 19% – ударної в'язкості (з 161 до 192 J/cm²). Таким чином, експериментально доведена можливість гомогенізації і подрібнення структури металу шва і поліпшення його механічних властивостей з допомогою імпульсного поперечного магнетного поля під час ЕШЗ титану.

1. *Electroslag welding process. Analysis of the state and tendencies of development* / B. E. Paton, K. A. Yushchenko, S. M. Kozulin, and I. I. Lychko // *The Paton Welding J.* – 2019. – **10**. – P. 33–40.
2. *Application of welding in construction* / K. A. Jushchenko, I. I. Lychko, S. M. Kozulin, A. A. Fomakin, and I. S. Nesena // *The Paton Welding J.* – 2018. – **9**. – P. 23–27. <https://doi.org/10.15407/tpwj2018.09.05>
3. *Kaluc E., Taban E., and Dhooqe A. Electroslag welding process and industrial applications* // *Metal Dnyasi.* – 2006. – **152**, № 13. – P. 100–104.
4. *Shapovalov V. O, Protokovilov I. V., and Porokhonko V. B. Structure and mechanical properties of thick-walled joints of Ti–6–4 titanium alloy made by electroslag welding* // *Proc. Struct. Integrity.* – 2022. – **36**. – P. 262–268. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.033>
5. *Repair of through cracks in large-thickness parts on site by multi-pass electroslag welding* / S. M. Kozulin, I. I. Lychko, S. A. Reznik, T. B. Maydanchuk, and E. P. Lukianchenko // *Proc. Struct. Integrity.* – 2024. – **59**. – P. 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.056>
6. *Preparing permanent joints of titanium alloys with steel (A review)* / V. M. Korzhyk, V. Y. Khaskin, V. V. Kvasnytskyi, O. V. Ganushchak, I. D. Hos; S. I. Peleshenko, O. I. Demianov, O. V. Konoreva, and N. M. Fialko // *Materials Science.* – 2023. – **59**, № 2. – P. 129–137. <https://doi.org/10.1007/s11003-024-00753-2>
7. *Lavrys S. M., Pohrelyuk I. M., and Shliakhetka K. Corrosion resistance of additively manufactured titanium alloys in hydrochloric acid* // *Materials Science.* – 2023. – **58**, № 5. – P. 585–590. <https://doi.org/10.1007/s11003-023-00702-5>
8. *Corrosion resistance of welded joints of titanium synthesized by the method of powder metallurgy* / O. E. Kapustyan, O. V. Ovchynnykov, A. A. Skrebtsov, I. M. Pohrelyuk, and R. V. Proskurnyak // *Materials Science.* – 2018. – **54**, № 3. – P. 430–437. <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0202-3>
9. *Способы создания внешних магнитных полей для управления процессом электрошлаковой сварки* / И. В. Протокилов, В. Б. Порохонько, А. Т. Назарчук, Ю. П. Ивочкин, Д. А. Виноградов // *Автомат. сварка.* – 2013. – **12**. – С. 45–50.
10. *Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process* / I. Protokovilov, V. Shapovalov, V. Porokhonko, and T. Beinerts // *Magneto-hydrodynamics.* – 2021. – **57**, № 4. – P. 559–568. <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>
11. *Influences of the transverse static magnetic field on the droplet evolution behaviors during the low frequency electroslag remelting process* / H. Wang, Y. Zhong, Q. Li, W. Li., W. Ren, Z. Lei, Z. Ren, and Q. He // *ISIJ Int.* – 2017. – **57**, № 12. – P. 2157–2164. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-267>
12. *Coupled 3D numerical model of droplet evolution behaviors during the magnetically controlled electroslag remelting process* / H. Wang, Y. Zhong, L. Dong, Z. Shen, Q. Li, W. Li, T. Zheng, W. Ren, Z. Lei, and Z. Ren // *JOM.* – 2018. – **70**. – P. 2917–2926. <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3029-3>

Одержано 02.09.2024