

ВПЛИВ ЗОВНІШНЬОГО ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ФОРМУВАННЯ ПОВЕРХНІ ЗЛИВКІВ ЕШП

В.Б. Порохонько, І.В. Протоковілов, Д.А. Петров

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

Досліджено вплив постійного і імпульсного поздовжнього магнітних полів індукцією $B = 0,16 \dots 0,30$ Тл на якість зовнішніх поверхонь титанових зливок діаметром 85 мм, отриманих способом ЕШП. Показано, що поряд із позитивними ефектами дії магнітного поля, виражених у збільшенні продуктивності процесу ЕШП, підвищенні хімічної однорідності зливок, подрібненні їх кристалічної структури, застосування магнітних полів призводить до погіршення якості формування бокової поверхні зливок. При цьому, степінь погіршення поверхні залежить від індукції магнітного поля і тривалості імпульсів його дії. Встановлено, що використання імпульсних магнітних полів в меншій мірі призводить до погіршення поверхонь зливок, ніж використання постійних магнітних полів. Описано механізми, які негативно впливають на якість формування поверхні зливка під дією поздовжнього магнітного поля. Вони полягають у винесенні і твердінні електродних крапель біля стінок кристалізатора та періодичній зміні товщини гарнісажної кірки внаслідок вібрації розплавів шлакової та металеві ванн. Бібліогр. 8, рис. 5.

Ключові слова: електрошлаковий переплав; поздовжнє магнітне поле; імпульсне поле; зливок; поверхня; титан

Вступ. Зовнішні магнітні поля є ефективним інструментом керування тепломасопереносом та кристалізацією металу при ЕШП [1–6]. Перевага їх використання полягає у можливості безконтактного силового впливу на розплави шлакової та металеві ванн для досягнення тих чи інших металургійних ефектів. Зокрема, у роботах [3–6] була показана можливість подрібнення кристалічної структури та підвищення хімічної і фізичної однорідності зливок ЕШП із застосуванням зовнішніх магнітних полів. Встановлено, що під дією імпульсного поздовжнього магнітного поля в металургійному розплаві утворюються електровихрові течії і вібрації, які забезпечують інтенсивне перемішування рідкого металу, інтенсифікують процеси плавлення витратного електрода, сприяють подрібненню кристалітів, що формуються в двофазній зоні, і утворенню нових центрів кристалізації. Це призводить до низки позитивних ефектів, виражених у підвищенні хімічної однорідності зливок, подрібненні їх кристалічної структури та збільшенні продуктивності процесу ЕШП. Через це застосування магнітних полів при ЕШП дозволило отримати зливки титанових сплавів, лита структура яких наближається до структури деформованого металу.

Також було встановлено, що дія зовнішніх магнітних полів може призводити до погіршення якості формування бокової поверхні зливок.

На рис. 1 наведено зовнішній вигляд титанового зливка діаметром 65 мм, нижня частина якого виплавлена без використання магнітного поля, а верхня — з використанням постійного поздовжнього магнітного поля індукцією 0,25 Тл. На фото

чітко видно границю цього розмежування. Зокрема, нижня частина зливка, отримана без накладення магнітного поля, характеризується відмінною якістю формування поверхні. Проте поверхня зливка, отримана із використанням магнітного поля, характеризується наявністю значних раковин, шлакових включень та гофр. Цілком очевидно, що подальше використання зливок з такою поверхнею потребує їх механічної обробки з великою кількістю відходів.



Рис. 1. Титановий зливок діаметром 65 мм, виплавлений без (1) та з використанням (2) поздовжнього магнітного поля індукцією 0,25 Тл

В.Б. Порохонько — <https://orcid.org/0000-0002-6490-7221>, І.В. Протоковілов — <https://orcid.org/0000-0002-5926-4049>, Д.А. Петров — <https://orcid.org/0000-0003-2937-9299>



Рис. 2. Зовнішній вигляд титанових зливків, виплавлених ЕШП з використанням поздовжнього постійного магнітного поля різної індукції, Тл: *a* — 0,16; *б* — 0,24; *в* — 0,30

Мета цієї роботи — дослідження впливу поздовжніх постійних і імпульсних магнітних полів на формування поверхні зливків ЕШП та визначення механізмів, що призводять до погіршення якості поверхні.

Матеріали і методика досліджень. Експериментальні дослідження проводили при виплавці зливків технічного титану ВТ1-0 діаметром 85 мм із застосуванням різних параметрів поздовжнього магнітного поля.

На рис. 2 наведено зовнішній вигляд зливків, виплавлених в умовах дії постійного магнітного поля індукцією 0,16...0,30 Тл. Аналіз отриманих даних показує, що при інших рівних умовах якість поверхні погіршується зі збільшенням індукції магнітного поля. Якщо при 0,16 Тл поверхня зливка є задовільною (рис. 2, *a*), то при її збільшенні до 0,24...0,30 Тл на поверхні зливків утворюються дефекти у вигляді зашлакувань, раковин, гофр та ін. глибиною до 1,5...2,0 мм (рис. 2, *б*, *в*).

Подальші експерименти проводили в умовах дії імпульсного поздовжнього магнітного поля. Змінювали як індукцію магнітного поля (в межах $B = 0,16...0,24$ Тл), так і тривалість імпульсів та пауз його дії (в межах $t_{\text{имп}} = 0,3...21$ с, $t_{\text{п}} = 10...33$ с відповідно).

На рис. 3, *a–в* наведено зливки, отримані при однаковій індукції магнітного поля (0,24 Тл), але при різній тривалості імпульсів його дії $t_{\text{имп}} = 0,3...2,0$ с. При цьому тривалість пауз в усіх випадках дорівнювала $t_{\text{п}} = 10$ с.

Отримані результати показали, що при тривалості імпульсів магнітного поля $t_{\text{имп}} = 0,3$ с їх вплив на якість поверхні зливка практично непомітний (рис. 3, *a*). На поверхні зливка ледь видно сліди дії магнітного поля. Це говорить про те, що при такій малій тривалості імпульсів поля в металур-

гійній ванні не встигають сформуватися достатньо потужні гідродинамічні течії, які б впливали на якість поверхні зливка. Проте при збільшенні тривалості імпульсів до $t_{\text{имп}} = 1...2$ с на поверхнях зливків вже помітна гофристість, яка збільшується з ростом тривалості імпульсів магнітного поля (рис. 3, *б–г*). Загалом, при тривалості імпульсів до 1,5 с поверхню зливків можна вважати хорошою (рис. 3, *a–в*).

В наступних експериментах величину індукції магнітного поля зменшили до 0,22...0,16 Тл, а тривалість імпульсів і пауз магнітного поля збільшили до $t_{\text{имп}} = 11...21$ та $t_{\text{п}} = 21...33$ с відповідно (рис. 3, *д–ж*). В цьому випадку на поверхні зливків чітко помітні зони дії магнітного поля, що проявилися у вигляді поперечних смуг (гофр). Глибина таких гофр становила до 1...2 мм, а висота — 2...5 мм, причому зі збільшенням тривалості імпульсів магнітного поля глибина і протяжність цих зон збільшувалася (рис. 3, *е, ж*).

Слід підкреслити, що вплив імпульсного магнітного поля на формування поверхонь меншою індукцією ($B = 0,16$ Тл), але довшою тривалістю імпульсу ($t_{\text{имп}} = 21$ с) (рис. 3, *ж*) є вищий ніж при індукції $B = 0,24$ Тл та тривалості дії імпульсу $t_{\text{имп}} = 1$ с (рис. 3, *б*). Очевидно, поясненням такого явища можуть бути результати фізичного моделювання, в яких показано, що для формування в шлаковій ванні гідродинамічних течій максимальної інтенсивності тривалість імпульсу магнітного поля повинна перевищувати деяку величину, яка для зливків відповідних діаметрів (60...100 мм) становить біля 2,5 с [7, 8]. При меншій тривалості імпульсу інтенсивність течій буде меншою, і відповідно, вплив на формування поверхні теж буде меншим.

Таким чином, при застосуванні імпульсного магнітного поля на формування поверхні зливка



Рис. 3. Зовнішній вигляд титанових зливок, виплавлених ЕШП з використанням поздовжнього імпульсного магнітного поля: *a* — $B = 0,24$ Тл, $t_{\text{імн}} = 0,3$ с, $t_{\text{п}} = 10$ с; *б* — $B = 0,24$ Тл, $t_{\text{імн}} = 1,0$ с, $t_{\text{п}} = 10$ с; *в* — $B = 0,24$ Тл, $t_{\text{імн}} = 1,5$ с, $t_{\text{п}} = 10$ с; *г* — $B = 0,24$ Тл, $t_{\text{імн}} = 2,0$ с, $t_{\text{п}} = 10$ с; *д* — $B = 0,22$ Тл, $t_{\text{імн}} = 11$ с, $t_{\text{п}} = 21$ с; *е* — $B = 0,16$ Тл, $t_{\text{імн}} = 11$ с, $t_{\text{п}} = 33$ с; *ж* — $B = 0,16$ Тл, $t_{\text{імн}} = 21$ с, $t_{\text{п}} = 33$ с

впливає не тільки величина індукції магнітного поля, а й тривалість імпульсів і пауз його дії. Очевидно, що механізми впливу магнітного поля на формування поверхні зливок ЕШП пов'язані з силовою дією, яку чинить магнітне поле на розплави шлаку і металу. Ця дія виникає внаслідок взаємодії поздовжнього магнітного поля з електричним струмом плавки. В результаті такої взаємодії в струмонесучих розплавах шлаку і металу формується об'ємна електромагнітна сила (сила Лоренца), яка призводить до руху або вібрації рідкого шлаку і металу.

Безпосередньо механізми погіршення якості формування поверхні зливка можуть бути пов'язані з періодичними змінами товщини і руйнуванням гарнісажної кірки на поверхні зливка, викликаними вібраціями розплаву, а також з розкиданням крапель електродного металу і їх твердінням на стінках кристалізатора і поверхні зливка (рис. 4).

Так, при фізичному моделюванні крапельного перенесення при ЕШП було встановлено, що поздовжнє магнітне поле може призводити до закручення і рознесення крапель електродного металу в шлаковій ванні і їх винесення до стінок кристалізатора [7, 8]. В цьому випадку при ЕШП краплі електродного металу будуть піддаватися інтенсивному охолодженню та кристалізуватися біля стінок кристалізатора або в гарнісажній кірці на поверхні зливка, що призведе до погіршення якості її формування (рис. 4, б, в).

Про високу імовірність описаного вище механізму свідчить виявлення крапель електродного металу у зашлакуваннях (рис. 5, а) та безпосередньо на поверхні зливок, які виплавляли в магнітному полі (рис. 5, б, в).

Інший механізм погіршення поверхні зливка може бути пов'язаний із вібрацією розплавів шлакової і металевої ванн внаслідок дії магніт-

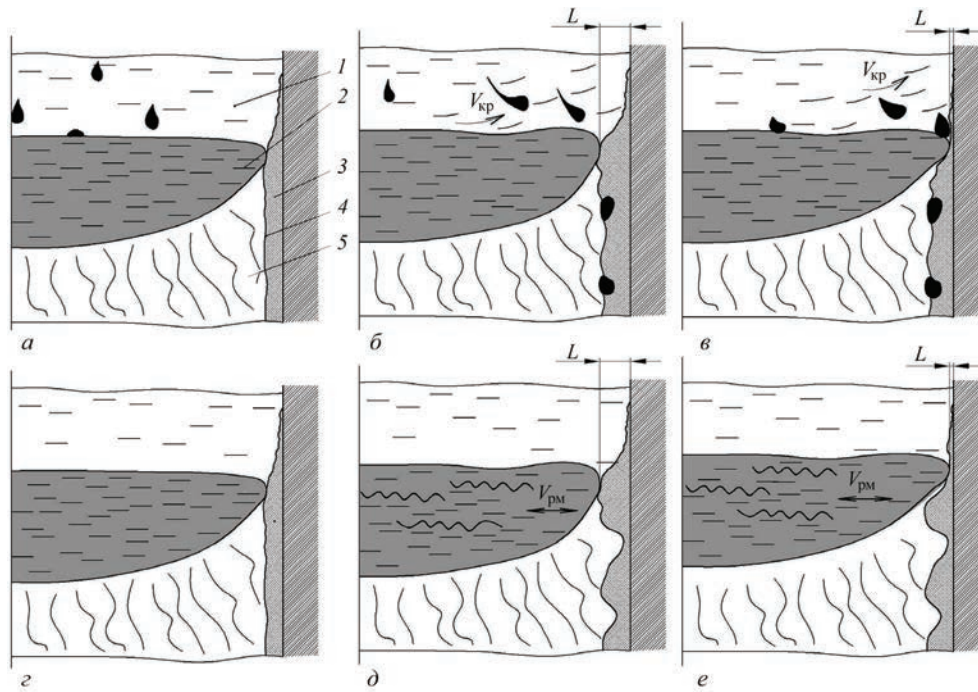


Рис. 4. Механізми погіршення поверхні зливків ЕШП при використанні поздовжнього магнітного поля внаслідок хаотично рознесених крапель (*a–в*) та вібрації розплавів шлакової та металеві ванн (*г–е*): 1 — шлакова ванна; 2 — металеві ванна; 3 — гарнісажна кірка; 4 — поверхня зливка; 5 — зливоч; L — товщина гарнісажної кірки; $V_{кр}$ — рух крапель електродного металу; $V_{рм}$ — вібрація рідкого металу

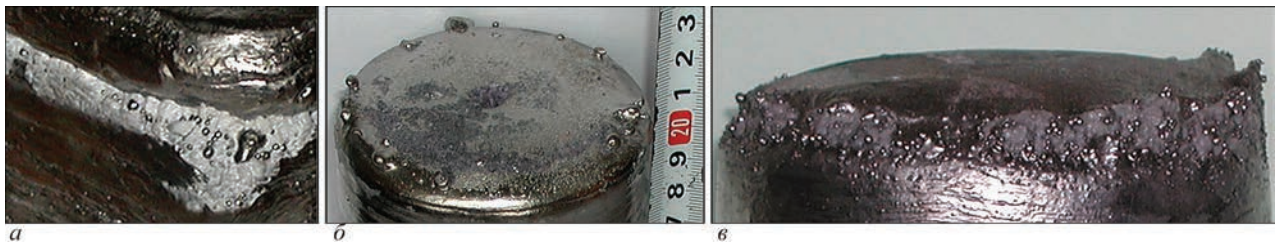


Рис. 5. Краплі електродного металу при ЕШП в магнітному полі: *a* — в шлаковій кірці; *б, в* — в периферійних ділянках на поверхні зливка

ного поля (рис. 4, *г–е*). Така вібрація з частотою 50 Гц утворюється при взаємодії змінного струму плавки з постійним магнітним полем. При застосуванні імпульсного магнітного поля вібрація посилюється за рахунок гідродинамічних ударів, які відбуваються в момент включення і відключення магнітного поля. Такі коливання шлакової і металеві ванн призводять до хаотичної зміни товщини гарнісажної кірки L (рис. 4, *д, е*) і до погіршення якості формування поверхні зливка.

Цілком можливо, що описані вище механізми діють одночасно і призводять до погіршення якості формування поверхні зливків ЕШП під впливом поздовжнього магнітного поля.

Висновки

1. Показано, що застосування зовнішнього поздовжнього магнітного поля при ЕШП поряд із позитивними ефектами (збільшення продуктивності процесу ЕШП, підвищення хімічної і структурної однорідності зливків) має і негативний вплив,

який проявляється у погіршенні якості формування бокової поверхні зливків. Причому міра погіршення поверхні зливків залежить від типу та параметрів магнітного поля.

2. Встановлено, що при збільшенні індукції магнітного поля і тривалості імпульсів його дії якість формування поверхні погіршується, а також, що застосування імпульсних магнітних полів в меншій мірі призводить до погіршення поверхні зливків та проявляється лише у вигляді поперечних смуг. Їх глибина і протяжність залежать від параметрів імпульсного магнітного поля. При короткій тривалості імпульсів магнітного поля його негативний вплив на формування поверхні зливків малопомітний. Можна припустити, що механізми погіршення поверхні полягають у винесенні крапель до стінок кристалізатора і їх твердінні там, а також пов'язані з дією вібрації розплавів шлакової та металеві ванн на формування гарнісажної кірки на поверхні зливка.

3. У цій статті не розглядали позитивний вплив позовжнього магнітного поля на структуроутворення металу і його хімічну однорідність, проте в реальних умовах ЕШП очевидно є необхідність визначення співвідношення степені погіршення поверхні зливків до ефективності покращення внутрішніх характеристик зливків ЕШП, отриманих під впливом зовнішнього магнітного поля.

Список літератури

1. Дудко Д.А., Рублевский И.Н. (1960) Электромагнитное перемешивание шлаковой и металлической ванн при электрошлаковом процессе. *Автоматическая сварка*, **9**, 12–16.
2. Трочун И.П., Черныш В.П. (1965) Магнитное управление кристаллизацией при ЭШП. *Сварочное производство*, **11**, 3–5.
3. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Ус В.И., Томиленко С.В. (1989) Разработка и исследование методов управления структурой кристаллизующегося слитка ЭШП путем наложения магнитного поля. *Пробл. спец. электрометаллургии*, **4**, 3–7.
4. Компан Я.Ю., Протоковилів І.В. (2002) Некоторые технологические аспекты магнитоуправляемой электрошлаковой плавки (МЭП) титановых сплавов. *Материалы Международной научно-технической конференции «Специальная металлургия: вчера, сегодня, завтра», 8–9 октября 2002 г., Киев*, сс. 256–262.
5. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Протоковилів І.В. (2007) К вопросу интенсификации электромагнитного воздействия при магнитоуправляемой электрошлаковой плавке титановых сплавов. *Современная электрометаллургия*, **4**, 3–7.
6. Компан Я.Ю., Назарчук А.Т., Протоковилів І.В., Петров Д.А. (2012) Возможности использования импульсных электромагнитных воздействий в электрошлаковых процессах. *Там же*, **2**, 8–13.
7. Protokovilov I., Shapovalov V., Porokhonko V. et al. (2021) Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magneto-hydrodynamics*, **57**(4), 559–568. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>
8. Протоковилів І.В., Порохонько В.В. (2017) Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЭШП с наложением импульсных магнитных полей. *Современная электрометаллургия*, **3**, 9–13. DOI: <https://doi.org/10.15407/semsem2017.03.02>

References

1. Dudko, D.A., Rublevsky, I.N. (1960) Electromagnetic stirring of slag and metal pool in electroslag process. *Avtomatich. Svarka*, **9**, 12–16 [in Russian].
2. Trochun, I.P., Chernysh, V.P. (1965) Magnetic control of crystallization in ESR. *Svarochn. Proizvodstvo*, **11**, 3–5 [in Russian].
3. Paton, B.E., Medovar, B.I., Us, V.I., Tomilenko, S.V. (1989) Development and examination of methods of control of ESR crystallizing ingot structure by magnetic field superposition. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, **4**, 3–7 [in Russian].
4. Kompan, Ya.Yu., Protokovilov, I.V. (2002) Some technological aspects of magnetically-controlled electroslag melting (MEM) of titanium alloys. *Int. Sci.-Tech. Conf. on Special Metallurgy: Yesterday, Today, Tomorrow (Ukraine, Kyiv, 8–9 October 2002)*. 256–262.
5. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V. (2007) Towards the problem of intensification of electromagnetic action in magnetically-controlled electroslag melting of titanium alloys. *Advances in Electrometallurgy*, **4**, 3–7.
6. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V., Petrov, D.A. (2012) Possibilities of application of pulsed electromagnetic effects in electroslag processes. *Ibid.*, **2**, 8–13.
7. Protokovilov, I., Shapovalov, V., Porokhonko, V. et al. (2021) Effect of the longitudinal magnetic field on the droplets evolution during electroslag remelting process. *Magneto-hydrodynamics*, **57**(4), 559–568. DOI: <https://doi.org/10.22364/mhd.57.4.10>
8. Protokovilov, IV., Porokhonko, V.B. (2017) Physical modeling of electrode metal drop transfer in ESM with superposition of pulsed magnetic fields. *Suchasna Elektrometal.*, **3**, 9–13 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/semsem2017.03.02>

INFLUENCE OF EXTERNAL LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD ON FORMATION OF ESM INGOT SURFACE

V.B. Porokhonko, I.V. Protokovilov, D.A. Petrov

E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine.

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: office@paton.kiev.ua

The influence of constant and pulsed longitudinal magnetic fields with induction $B = 0.16 \dots 0.30$ T on the quality of outer surfaces of titanium ingots of 85 mm diameter, produced by ESM process, was studied. It is shown that alongside the positive effects of magnetic field action, manifested in increase of ESM process efficiency, improvement of chemical homogeneity of the ingots, and refinement of their crystalline structure, application of magnetic fields leads to deterioration of the quality of formation of the ingot side surface. Here, the degree of surface deterioration depends on magnetic field induction and duration of its pulses. It is found that application of pulsed magnetic fields leads to deterioration of the ingot surfaces to a smaller extent than application of constant magnetic fields. Described are the mechanisms which negatively affect the quality of ingot surface formation under the impact of the longitudinal magnetic field. They consist in removal and solidification of electrode drops near the mould walls and periodical change of the skull crust thickness as a result of the slag and metal pool melt vibration. Ref. 8, Fig. 5.

Key words: electroslag remelting; longitudinal magnetic field; pulsed field; ingot; surface; titanium

Надійшла до редакції 29.09.2022