

ВПЛИВ ЗОВНІШНЬОГО ПОЗДОВЖНЬОГО МАГНІТНОГО ПОЛЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІ РЕЖИМИ ЕШП

І.В. Протоковілов, В.Б. Порохонько, 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 зовнішнього поздовжнього постійного і імпульсного магнітних полів на електричні режими ЕШП. Експерименти проводили при перепаві витратних електродів з технічного титану ВТ1-0 діаметром 70 мм в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі діаметром 105 мм. Зовнішнє поздовжнє магнітне поле індукцією 0,1...0,28 Тл створювали соленоїдом, розташованим зовні кристалізатора. Встановлено, що застосування постійного поздовжнього магнітного поля призводить до зменшення на 12...20 % струму плавки і збільшення амплітуди його коливань до 15...18 %. При застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля зменшення струму плавки має циклічний характер, а величина його падіння може сягати 70...80 %. Запропоновано механізми впливу поздовжнього магнітного поля на струм ЕШП, які полягають в зміні площі контакту витратного електрода з рідким шлаком внаслідок вібрацій і прогину вільної поверхні шлакової ванни. Біблогр. 6, рис. 4.

Ключові слова: електрошлаковий перепад; поздовжнє магнітне поле; імпульсне поле; шлакова ванна; струм плавки; електричні режими

У роботах [1, 2] показано позитивний вплив зовнішніх електромагнітних полів на структуру і властивості електрошлакового металу. Відзначається, що механізм дії магнітних полів на процес ЕШП полягає у взаємодії зовнішнього магнітного поля з робочим струмом, що протікає в розплавах шлаку і металу, в результаті чого в згаданих розплавах утворюються об'ємні електромагнітні сили, які впливають на їх гідродинаміку. Завдяки цьому досягаються необхідні металургійні ефекти, метою яких є гомогенізація і подрібнення структури литого металу.

Слід підкреслити, що електрошлаковий процес є сприятливим з точки зору електромагнітного керування. Це пов'язано з тим фактом, що при ЕШП через розплави шлаку і металу протікають потужні електричні струми. Через це при ЕШП немає необхідності застосовувати складні і енерговитратні електромагнітні пристрої індукційного типу задля створення в розплавах шлаку і металу електричного струму індукційним способом [3–5]. Крім того ЕШП характеризується широким інтервалом стабільних режимів його протікання, що розширює межі можливого використання електромагнітних впливів при даній технології.

Електричні параметри є одними з основних характеристик процесу ЕШП. Від них залежать теплова потужність перепаду, характер плавлення електрода і умови кристалізації зливка. Експерименти із застосування магнітних полів при ЕШП показали помітний їх вплив на електричні параметри процесу, перш за все на струм перепаду. Проте чітких уявлень про особливості і механізми дії магнітних полів

на струм перепаду досі не було. Це зумовило актуальність проведення експериментальних досліджень щодо впливу зовнішнього поздовжнього магнітного поля на електричні режими ЕШП.

Методика проведення експериментів. Схема експериментальної установки наведена на рис. 1. Експерименти проводили в електрошлаковій печі камерного типу при перепаві витратних електродів з технічного титану ВТ1-0 діаметром 70 мм в мідному водоохолоджуваному кристалізаторі діаметром 105 мм. Використовували фторидно-хлоридний флюс АН-Т4 та «твердий» старт електрошлаково-

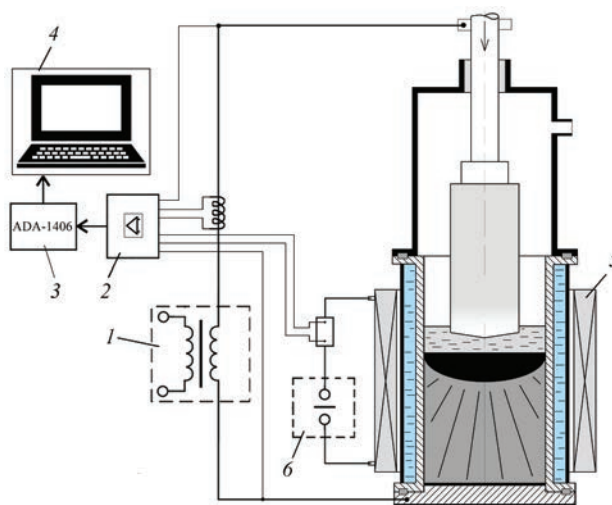


Рис. 1. Схема установки для проведення експериментів: 1 — трансформатор ТШП-10000-1; 2 — перетворювач сигналів з гальванічною ізоляцією; 3 — аналого-цифровий перетворювач; 4 — комп'ютер; 5 — електромагнітна система; 6 — джерело живлення електромагнітної системи

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

го процесу. Живлення здійснювали пічним трансформатором ТШП-10000-1 з жорсткою вольт-амперною характеристикою. Поздовжнє магнітне поле створювали соленоїдом, розташованим ззовні кристалізатора. Експерименти проводили без та із застосуванням постійного та імпульсного магнітних полів індукцією 0,1...0,28 Тл при інших рівних умовах. Реєстрацію параметрів процесу здійснювали з використанням комп'ютерної техніки і програмного продукту LabVIEW.

Результати експериментів та їх обговорення.

Реєстрограми режимів дослідних плавки наведені на рис. 2. Аналіз отриманих даних свідчить, що в усіх експериментах електрична напруга на шлаковій ванні у період стаціонарного плавлення електрода була стабільною і змінювалася незначно. Це пов'язано із жорсткою вольт-амперною характеристикою джерела живлення електрошлакового процесу — трансформатора ТШП-10000-1.

В експериментах без використання магнітного поля струм плавки був достатньо стабільним (рис. 2, а). Його коливання в процесі ЕШП були

незначними, їх величина в середньому не перевищувала 5 %. На реєстрограмах струму іноді спостерігались «прогини» з плавним характером падіння та зростання струму, що пов'язано із характером роботи механізму подавання електрода. Загалом, це типова діаграма струму, яка дає підстави стверджувати, що процес ЕШП був стабільним.

Використання постійного зовнішнього магнітного поля індукцією 0,2 Тл викликало деяку дестабілізацію струму плавки (рис. 2, б). Застосування магнітного поля призвело, по перше, до зменшення на 12...20 % струму плавки, по друге, до збільшення амплітуди його коливань до 15...18 %. Очевидно це пов'язане, в першу чергу, з вібраціями, які виникають в шлаковій ванні внаслідок взаємодії змінного струму плавки з постійним магнітним полем. Згадані вібрації призводять до коливань поверхонь шлакової та металевої ванн, внаслідок чого постійно змінюються площа і щільність контакту витратного електрода з рідким шлаком і відстань між торцем електрода та дзеркалом металевої ванни. Через це струм плавки є нестабільним. Такий вплив по-

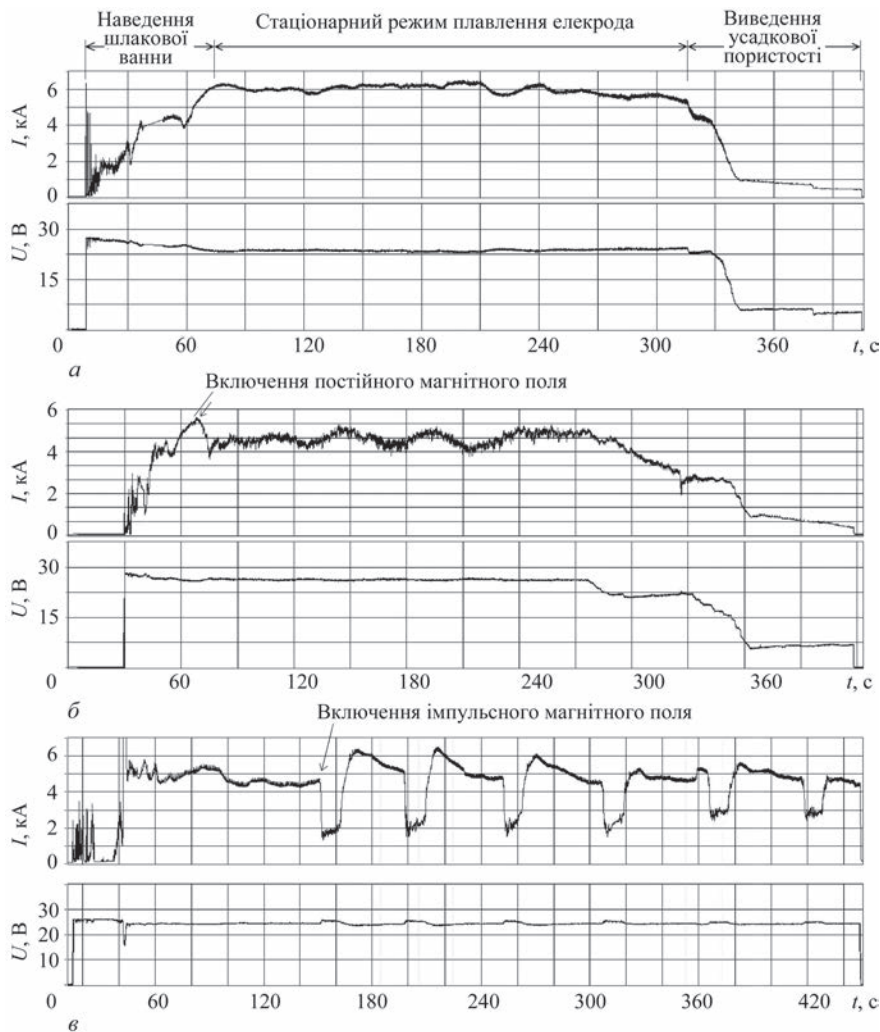


Рис. 2. Реєстрограми електричного струму і напруги при ЕШП: а — без використання магнітного поля; б — із використанням постійного магнітного поля індукцією 0,2 Тл; в — із використанням імпульсного магнітного поля індукцією 0,28 Тл, $t_{\text{имп}} = 10 \text{ с}$, $t_{\text{н}} = 40 \text{ с}$

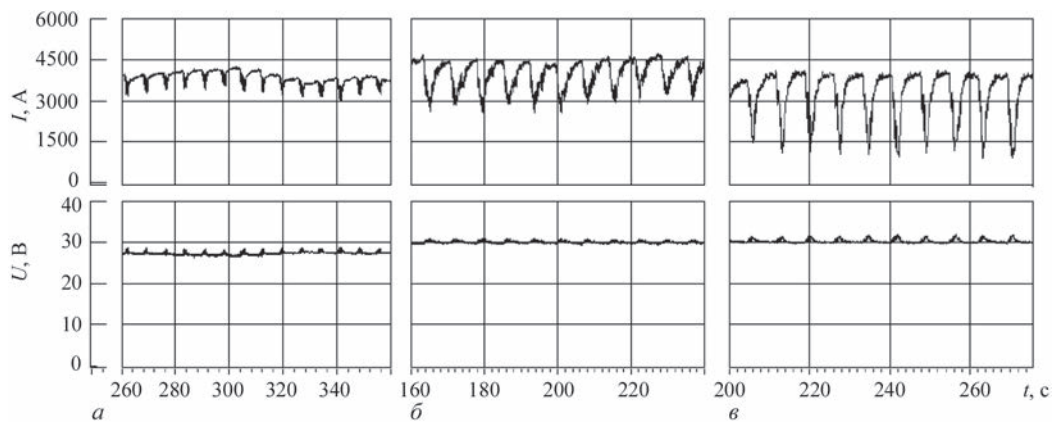


Рис. 3. Фрагменти реєстрограм ЕШП із використанням імпульсних магнітних полів: *a* — $B = 0,1$ Тл, $t_{\text{імп}} = 0,8$ с; *б* — $B = 0,22$ Тл, $t_{\text{імп}} = 0,8$ с; *в* — $B = 0,22$ Тл, $t_{\text{імп}} = 1,8$ с

стійного магнітного поля на струм плавки спостерігається протягом всього періоду його дії.

На рис. 2, *в* представлені реєстрограми електричного струму і напруги при використанні імпульсного магнітного поля індукцією 0,28 Тл з тривалістю імпульсів його дії ($t_{\text{імп}}$) 10 с та пауз ($t_{\text{п}}$) 40 с. Як видно, реєстрограма струму плавки кардинально відрізняється від попередніх випадків. На ній чітко помітно дію імпульсів магнітного поля. Вона проявляється в різкому падінні струму плавки в момент включення магнітного поля на 70...80 %. В межах тривалості дії імпульсу магнітного поля струм плавки плавно зростає. Відключення магнітного поля призводить до різкого зростання струму і в подальші 5...6 с він сягає максимальних значень, після чого стабілізується на початковому рівні. Таке коливання струму відбувається без цілеспрямованої зміни напруги та інших параметрів процесу.

Слід підкреслити, що, незважаючи на суттєві коливання струму плавки, дія імпульсного магнітного поля не призводила до викидів шлаку, утворення дугових розрядів та інших порушень стабільності електрошлакового процесу. Він проходив достатньо стабільно, в квазістаціонарному режимі, із циклічною зміною струму плавки і формуванням зливків з прийнятною поверхнею.

Було встановлено, що величина падіння струму при використанні імпульсного магнітного поля залежить як від величини індукції, так і від тривалості імпульсів його дії. На рис. 3 наведені фрагменти реєстрограм процесу ЕШП із використанням магнітних полів різної індукції і тривалості імпульсів. Тривалість пауз та інші параметри процесу ЕШП були однаковими. Видно, що при застосуванні магнітного поля індукцією 0,1 Тл із короткотривалими імпульсами ($t_{\text{імп}} = 0,8$ с) падіння струму є мінімальним (рис. 3, *a*). Збільшення індукції до 0,22 Тл, при незмінній тривалості імпульсів 0,8 с, призвело до збільшення величини падіння струму плавки, яка становила до 30 % (рис. 3, *б*). Подальше збільшення тривалості імпульсів магнітного поля до 1,8 с, при тій самій індукції ($B = 0,22$ Тл)

також призвело до збільшення величини падіння струму плавки, яка в цьому випадку становила 50...60 % (рис. 3, *в*). Тобто струм плавки зменшується тим більше, чим більше індукція магнітного поля і тривалість його імпульсів.

Механізм дії імпульсного магнітного поля на електричний струм при ЕШП наступний. Як було показано в роботі [6], застосування поздовжнього магнітного поля призводить до формування в шлаковій ванні горизонтальних обертових течій навколо вісі симетрії. Такі течії, за рахунок дії відцентрових сил, призводять до прогину вільної поверхні шлакової ванни по її вісі (рис. 4, *б*). Внаслідок цього зменшується глибина занурення електрода у шлакову ванну і площа його контакту з рідким шлаком. Відповідно зменшується і струм плавки. Імпульсний характер дії магнітного поля зумовлює періодичність процесів зменшення і збільшення струму плавки.

Той факт, що величина падіння струму залежить не лише від індукції магнітного поля, але і від тривалості його імпульсів, підтверджує описаний вище механізм. Це пов'язане з тим, що для формування стійких обертових течій в шлаковій ванні потрібен деякий час. Так, в роботі [6] показано, що протягом перших 0...2,5 с дії магнітного поля швидкість обертання шлаку лінійно збільшується, а потім стабілізується на певному рівні. Це говорить про те, що швидкість обертання, глибина прогину поверхні шлакової ванни та величина падіння струму залежатимуть від тривалості імпульсів магнітного поля.

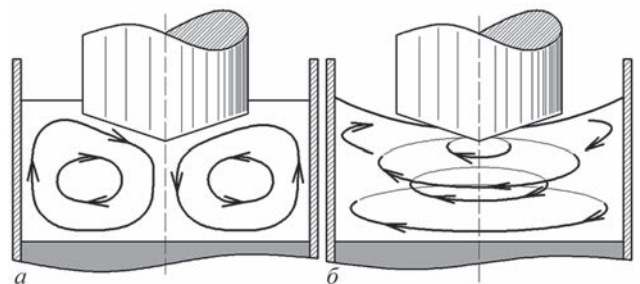


Рис. 4. Траєкторії течій шлаку і розташування електрода в шлаковій ванні при відсутності зовнішнього магнітного поля (*a*) та під впливом поздовжнього магнітного поля (*б*)

Таким чином, при імпульсному електромагнітному впливі на процес ЕШП важливим фактором є не лише величина індукції магнітного поля, але й тривалість імпульсів його дії.

Як відомо, тепловиділення в процесі ЕШП визначається електричною напругою і струмом плавки. Тому періодичні коливання струму плавки під дією імпульсного магнітного поля призводять до періодичної зміни теплової потужності процесу ЕШП. Тобто імпульсне магнітне поле викликає дискретно-порційне тепловиділення, створюючи додаткові можливості керування процесом кристалізації зливка і властивостями його металу. Крім того, імпульсне магнітне поле сприяє постійній перебудові структури гідродинамічних течій в металургійній ванні та, відповідно, забезпечує інтенсивне перемішування рідкого металу. Це перешкоджає утворенню стійких вихрових течій рідкого металу в однаковому напрямку, що може призводити до формування різного роду хімічних неоднорідностей в зливку.

Висновки

1. Встановлено, що застосування при ЕШП постійного поздовжнього магнітного поля призводить до зменшення струму плавки і збільшення амплітуди його коливань без цілеспрямованої зміни інших параметрів процесу.

2. Показано, що у випадку застосування імпульсного поздовжнього магнітного поля зменшення струму плавки має циклічний характер. Зокрема, в момент дії імпульсу магнітного поля відбувається різке падіння електричного струму плавки, величина якого залежить від індукції і тривалості імпульсів магнітного поля, а протягом паузи магнітного поля струм плавки відновлюється до початкового рівня.

3. Запропоновано механізми дії поздовжнього магнітного поля на струм ЕШП. Вони полягають в утворенні вібрацій в шлаковій ванні внаслідок взаємодії змінного струму плавки з постійним магнітним полем, а також в циклічній зміні глибини занурення електрода і площі його контакту з

рідким шлаком внаслідок прогину вільної поверхні шлакової ванни. Згадані чинники призводять до зміни електроопору міжелектродного проміжку і коливань струму плавки.

Список літератури

1. Kompan Ya.Yu., Nazarchuk A.T., Protokovilov I.V. (2006) Burn-resistant titanium of MEM technology for aeroengines. *Materials Technology. Advanced Performance Materials*, 21(2), 80–84.
2. Protokovilov I., Porokhonko V., Nazarchuk, A. (2016) ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. *Proc. of the Medovar Memorial Symposium, June 7–10, 2016*. Kyiv, Ukraine, 110–115.
3. Протоковилів І.В. (2011) МГД-технології в металургії. *Современная электрометаллургия*, 4, 32–41.
4. Тир Л.Л., Столов М.Я. (1975) *Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах*. Москва, Металлургия.
5. Верте Л.А. (1975) *Магнитная гидродинамика в металлургии*. Москва, Металлургия.
6. Протоковилів І.В., Порохонько В.Б. (2017) Физическое моделирование капельного переноса электродного металла при ЕШП с наложением импульсных магнитных полей. *Современная электрометаллургия*, 3, 9–13.

References

1. Kompan, Ya.Yu., Nazarchuk, A.T., Protokovilov, I.V. (2006) Burn-resistant titanium of MEM technology for aeroengines. *Materials Technology. Advanced Performance Materials*, 21(2), 80–84.
2. Protokovilov, I., Porokhonko, V., Nazarchuk, A. (2016) ESR of titanium with electromagnetic effect on metal solidification. In: *Proc. of the Medovar Memorial Symposium (June 7–10, 2016, Kyiv, Ukraine)*, 110–115.
3. Protokovilov, I.V. (2011) MHD-technologies in metallurgy (Review). *Sovrem. Elektrometal.*, 4, 32–41 [in Russian].
4. Tir, L.L., Stolov, M.Ya. (1975) *Electromagnetic device for control of melt circulation in electric furnaces*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
5. Verte, L.A. (1975) *Magnetic hydrodynamics in metallurgy*. Moscow, Metallurgiya [in Russian].
6. Protokovilov, I.V., 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].

INFLUENCE OF EXTERNAL LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD ON ESR ELECTRIC MODES

I.V. Protokovilov, V.B. Porokhonko, 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 impact of external longitudinal constant and pulsed magnetic fields on ESR electric modes was studied. Experiments were conducted at remelting of consumable electrodes of 70 mm dia. from commercial purity titanium VT1-0 in a copper water-cooled mould of 105 mm dia. External longitudinal magnetic field with 0.1...0.28 T induction was created by a solenoid located outside the mould. It was found that application of a constant longitudinal magnetic field leads to 12...20 % reduction of the melting current and increase of its oscillation amplitude to 15...18 %. At application of a pulsed longitudinal magnetic field reduction of melting current is of a cyclic nature, and the magnitude of its drop can reach 70...80 %. The mechanisms of the influence of a longitudinal magnetic field on ESR current are suggested, which consist in the change of the area of contact of consumable electrode with liquid slag, as a result of vibrations and sagging of the slag pool free surface. Ref. 6, Fig. 4.

Key words: electroslag remelting; longitudinal magnetic field; pulsed field; slag pool; melting current; electric modes

Надійшла до редакції 11.05.2021