

ЕЛЕКТРИЧНІ ПРОЦЕСИ, ЩО ПРОТІКАЮТЬ У СТРУМОПРОВІДНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ КВАДРАТНОГО ПЕРЕРІЗУ

Ю.М. Кусков, І.П. Лентюгов, А.В. Нетяга

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

Проведено дослідні електрошлакові наплавлення в струмопровідних кристалізаторах квадратного поперечного перерізу розміром 200×200 і 250×250 мм з наявністю або відсутністю захисної графітової футеровки на робочій поверхні струмопровідної секції кристалізатора. Встановлено, що наплавлення в кристалізаторі малого перерізу можна здійснювати без використання футерування в разі проходження через секцію струму з щільністю менше 0,01 А/см². При цьому досягається висока опірність металу секції електроерозійному зношуванню. Наплавлення в кристалізаторі великого перерізу з частково захищеною робочою поверхнею супроводжується проявом електроерозійних процесів тільки на графітовому футеруванні, найбільшою мірою в його торцевій частині, що підтверджує проходження в цій зоні робочого струму максимальної величини. Бібліогр. 7, рис. 3.

Ключові слова: електрошлакове наплавлення, струмопровідний кристалізатор, квадратний переріз, струмопровідна секція, графітове футерування, електроерозія

Вступ. Серед відомих способів електрошлакового наплавлення (ЕШН) знайшов своє застосування розроблений в ІЕЗ ім. Є.О. Патона відносно новий спосіб — ЕШН у струмопровідному кристалізаторі (СПК) [1]. СПК являє собою багатосекційний водоохолоджуваний електромагнітний пристрій, до складу якого обов'язково мають входити дві секції. Перша виконує функцію невитратного електрода, до якого підведена робоча напруга від джерела живлення, що додатково поєднує функцію одновиткового індуктора. Друга секція призначена для формування наплавленого металу та зазвичай має форму поперечного перерізу своєї внутрішньої порожнини у вигляді кола, квадрата або прямокутника. У низці технологій функцію цієї секції виконує сама наплавлювана заготовка, на робочій поверхні якої розташовуються отвори відповідної форми.

У більшості публікацій, присвячених практичному застосуванню цього способу наплавлення, здебільшого розглядалися різні технологічні питання: вибір оптимального складу шлаку, розміри і масова швидкість подачі дискретної присадки, застосування для наплавлення різних видів струму, управління проплавленням основного металу тощо. При цьому особливості протікання в шлаковій ванні електричного струму, довговічності експлуатації такого типу кристалізатора майже не обговорювалися. Хоча, наприклад, розв'язання задачі довговічності було основним стримуючим фактором ширшого використання ЕШН у СПК. Лише в роботі [2] виконано оцінку працездатно-

сті СПК круглого перерізу діаметром 70...180 мм у разі виключення з конструкції СПК футерування, що захищає робочу стінку струмопровідної секції від ерозії.

З практичного погляду СПК є таким самим пристроєм, як звичайні кристалізатори, що застосовуються в технології електрошлакового перепау (ЕШП) і призначені для формування злитків або наплавлених шарів. Але під час експлуатації навіть такого типу кристалізаторів, у яких під час ЕШП на їхні стінки зазвичай може проходити лише не більше 30 % робочого струму, підвищення їхньої довговічності є важливим резервом зниження собівартості продукції, що випускається. Наприклад, за даними роботи [3] підвищення частки струму, що йде на кристалізатор, приблизно до 20 % призвело до того, що товщина стінки в окремих частинах кристалізатора знизилася після 1000 плавок на 5...6 мм (за орієнтовної щільності струму в зоні руйнування ~ 2 А/см²). Але процес ерозії може протікати і більш активно [4]. Стійкість нових рухомих під час перепау кристалізаторів у середньому становила 250 плавок, але коливалася в межах 150...350 плавок за середньої тривалості плавки 2,5 год. Коли глибина ерозії досягала 18...20 мм, кристалізатори відправляли в ремонт.

Метою даної роботи є оцінювання шляхів проходження струму від мідної стінки струмопровідної секції до шлакової ванни і характеру формування ерозійних зон під час експлуатації СПК квадратного поперечного перерізу за наявності або відсутності захисного футерування цієї секції.

Ю.М. Кусков — <https://orcid.org/0000-0002-8091-2274>, І.П. Лентюгов — <https://orcid.org/0000-0001-8474-6819>, А.В. Нетяга — <https://orcid.org/0000-0002-0576-8006>

Методика виконання експериментів. Електрошлакові наплавлення виконували в стаціонарних двосекційних СПК квадратного перерізу — 200×200 і 250×250 мм. У кристалізаторі меншого перерізу захисне графітове футерування струмопровідної секції було відсутнє, у СПК перерізом 250×250 мм воно було наявне. Як наплавочні матеріали використовували пустотілі електроди з високохромистого чавуну (26...30 % Cr) із зовнішнім перетином 120×120 мм і товщиною стінки 15 мм. Основний метал — сталь Ст3. Товщина наплавлюваного шару ~ 10...25 мм. Робочий флюс — АНФ-29. Наведення шлакової ванни в ТПК 200×200 мм на твердому старті (усередині кристалізатора) за допомогою графітового електрода, для кристалізатора перерізом 250×250 мм використовували рідкий старт, тобто розплавлення флюсу в окремому графітовому тиглі і подальша заливка розплавленого шлаку в робочий простір кристалізатора. Оцінка спостережуваних явищ візуальна. Для точнішого визначення шляхів проходження електричного струму в нижній частині струмопровідної секції ТПК перерізом 250×250 мм було виконано накатку з висотою виступів до 1,5 мм. У низці виконання наплавлення торець графітового футерування піднімали від нижнього рівня секції до 10 мм.

Результати досліджень. ЕШН у ТПК перетином 200×200 мм, захисне графітове футерування відсутнє. Загальний чистий час (без часу наведення шлакової ванни) виконання наплавлення склав ~ 15 год. При цьому після перших 7 год наплавлення на робочій поверхні струмопровідної секції сліди електроерозії не спостерігалися. Під час продовження наплавлювальних робіт поверхня секції почала поступово еродювати. Візуально ці процеси виявлялися у вигляді появи в нижній частині струмопровідної секції гладкої смуги завширшки ~ 45 мм яскраво мідного кольору (рис. 1). Причому товщина зносу мідної стінки секції настільки мала, що її неможливо заміряти інструментально.

Максимальний робочий струм наплавлення становив приблизно 2,5 кА. Це відповідає щільності струму на робочій поверхні секції ~ 0,007 А/см².

Таким чином, під час електрошлакового наплавлення, коли одним з основних завдань технології є забезпечення мінімального проплавлення основного металу завдяки використанню відносно малих робочих струмів (у разі збереження стабільності процесу наплавлення) та з огляду на здебільшого невелику тривалість наплавлення (не більше ніж 20 хв), можна стверджувати про відсутність активного протікання на поверхні секції електроерозійних процесів.

Це дає змогу при виконанні наплавлювальних робіт спростити конструкцію СПК, виключивши з неї захисне футерування струмопровідної секції.

ЕШН у ТПК перерізом 250×250 мм, захисне графітове футерування входить до складу секції, у нижній частині якої виконано накатку зубонарізним інструментом. Насамперед під час виконання дослідних наплавочок було виявлено, що в місці відколу частини футерування (висота відколотої частини 30...40 мм за ширини 20...30 мм) біля її нижнього торця в результаті очищення поверхні від шлакової кірки жодних слідів ерозійних процесів не спостерігалось. Можна припустити, що більша частина струму проходила через торцеву частину футерування, а менша через торцеву частину секції. У цьому разі на торці охолоджуваної секції можливе утворення гарнісажу, що є діелектриком. Однак згідно з роботою [5] у такого типу діелектриках



Рис. 1. Струмопровідний кристалізатор поперечного перерізу 200×200 мм до початку експлуатації (а) і робоча поверхня його струмопровідної секції після 10 год експлуатації (б)



Рис. 2. Поверхня мідної стінки струмопровідної секції СПК з поперечним перерізом 250×250 мм у зоні накатки після експлуатації протягом 15 год

формується зони з різним фазовим станом, що дає змогу струму все ж таки проходити через цей електричний опір. Крім того, фторидні флюси являють собою рідкісний клас систем, які у твердому стані мають аніонну провідність [6]. Проте, за наявності струму малої величини, він не чинить значного впливу на ерозійні процеси. Що стосується торця футерування, то помітна зміна розмірів (віддалення торця футерування від торця секції) і утворення гладкої овальної поверхні не викликає сумніву, що через нього проходить струм великої величини.

Для отримання більш точного уявлення про проходження струму через незахищену нижню частину мідної стінки секції на ній було виконано накатку зубонарізним інструментом (висота зубів 1,5 мм), що дає змогу створити на мідній поверхні ділянки з різною щільністю струму. Як показав візуальний огляд цієї зони після низки наплавов, жодних змін у ній не відбулося (рис. 2). Тим самим було підтверджено або повне протікання струму тільки через футерування, або, щонайменше, його нерівномірний розподіл по футеруванню і стінці.

Завершальним етапом цих досліджень стало проведення експериментів, у яких торець футерування піднімали приблизно до 10 мм відносно нижнього торця секції. Жодних змін як на поверхні секції, так і на її накатаній частині не відбувалося.

Таким чином, можна вважати доведеним, що завдяки футеровці струм, який забезпечує формування найбільш нагрітої зони шлакової ванни в торцевій ділянці секції [7], надходить до шлакової ванни з поверхні графітової футеровки.

Поки що залишаються не до кінця дослідженими процеси розподілу струму по всій висоті футерування, враховуючи те, що шлакова ванна за даними має приблизно однакову температуру по всій її глибині. Можливо це досягається як завдяки обертанню шлакової ванни в горизонтальній площині, так і поки що не вивченим іншим гідродинамічним потоком шлаку.

Особливий інтерес представляє вплив струму та теплохімічного впливу шлакової ванни на зношування внутрішньої поверхні футерівки (в робочій зоні та не в ній).



Рис. 3. Робоча пластина графітового футерування струмопровідної секції СПК поперечного перерізу 250×250 мм, вилучена з секції після її експлуатації, з утворенням на її поверхні зон зношування: 1 — торцева; 2 — футерована; 3 — окислена

На рис. 3 показана одна з чотирьох пластин футерування після експлуатації, яка вилучена з СПК поперечного перерізу 250×250 мм. Як видно зносу піддається зона висотою ~ 30 мм, що відповідає рівню шлакової ванни, яка стикається з нею. Відмінною особливістю цих слідів зносу є те, що вони відсутні в прикутових ділянках (~ 30...40 мм по довжині кожної грані). Можливо це пов'язано з тим, що шлакова ванна, яка обертається під час наплавлення, чинить у цих ділянках менший механічний вплив, ніж у середніх частинах граней. Поверхня робочої зони гладка, ніби оплавлена, схожа на зношену поверхню торцевої поверхні, з якої проходить максимальний струм, але її зношування менше, ніж в торцевій зоні.

Вище робочої зони теж спостерігається зношування поверхні граней, але воно проявляється меншою мірою та відрізняється від робочої зони за зовнішнім виглядом. Характер такого зносу однозначно свідчить про окислювальні процеси в найбільш нагрітих місцях поверхні та проявляється у вигляді її розпушення. Хоча такого типу спрацьовування і не є визначальним для стійкості графітових пластин, все ж таки необхідно передбачати обмеження надходження повітря у внутрішній простір кристалізатора.

Висновки

1. Активність протікання електроерозійних процесів на робочій поверхні струмопровідної секції ТПК залежить від щільності струму, що проходить через неї. За щільності струму менше 0,01 А/см² довговічність секції достатня для її тривалої експлуатації без використання захисного футерування.

2. За наявності захисної футеровки струм максимальної величини проходить через її нижню торцеву частину, що призводить до поступового зношування торця футеровки та оголення торця стінки секції.

3. У процесі наплавлення робоча поверхня захисних графітових пластин СПК квадратного поперечного перерізу схильна до зношування в трьох зонах: торцевій; дотичної зі шлаковою ванною за її глибиною; зоною поза впливом шлаку. Перші

дві визначаються електроерозійними процесами, третя пов'язана з окисненням найбільш нагрітих частин поверхні пластин за рахунок надходження повітря з атмосфери.

Список літератури

1. Kuskov Yu.M., Proskudin V.M., Zhdanov V.A., Okopyuk L.L. (2022) Current-supplying mould in electroslag technologies. *The Paton Welding J.*, 7, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.07.06>
2. Кусков Ю.М., Проскудін В.М., Нетяга А.В. (2024) Підвищення ресурсу секцій струмопідвідного кристалізатора при електрошлаковому наплавленні чавуну. *Автоматичне зварювання*, 5, 60–62. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.05.08>
3. Артамонов В.Л., Медовар Б.И., Мартын В.М., Гисер Е.М. (1972) К вопросу об анодном разрушении в шлаке при ЭШП токоподводящих металлических элементов. *Специальная электрометаллургия*, вып. 17, 3–10.
4. Артамонов В.Л., Каменский Ю.М., Толстев В.И. и др. (1981) Электрическая эрозия кристаллизаторов при ЭШП и восстановление их наплавкой. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 45, 52–55.
5. (1986) *Металлургия электрошлакового процесса*. Патон Б.Е., Медовар Б.И. (ред.). Киев, Наукова думка.
6. Агеев П.А., Калмыков В.А., Свешников Ю.В. (1970) Диэлектрическая проницаемость и удельное сопротивление флюсов для ЭШП. *Проблемы специальной электрометаллургии*, 7, 26–29.

7. Пальти А.М., Юрченко Д.Д. (2006) Компьютерное моделирование электрошлаковой наплавки в водоохлаждаемом кристаллизаторе. *Сварочное производство*, 9, 12–15.

References

1. Kuskov, Yu.M., Proskudin, V.M., Zhdanov, V.A., Okopyuk, L.L. (2022) Current-supplying mould in electroslag technologies. *The Paton Welding J.*, 7, 35–38. DOI: <https://doi.org/10.37434/tpwj2022.07.06>
2. Kuskov, Yu.M., Proskudin, V.M., Netyaga, A.V. (2024) Increasing the resource of current-supplying mould at electroslag melting of cast iron. *Avtomatychne Zvaryuvannya*, 5, 60–62 [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.37434/as2024.05.08>
3. Artamonov, V.L., Medovar, B.I., Martyn, V.M., Giser, E.M. (1972) To the question of anodic destruction in slag during ESR of current-supporting metallic elements. *Spetsialnaya Elektrometallurgiya*, 17, 3–10 [in Russian].
4. Artamonov, V.L., Kamensky, Y.M., Tolstev, V.I. et al. (1981) Electrical erosion of molds at ESR and their restoration by cladding. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 45, 52–55 [in Russian].
5. (1986) *Metallurgy of electroslag process*. Ed. by B.E. Paton, B.I. Medovar. Kyiv, Naukova Dumka [in Russian].
6. Ageev, P.A., Kalmykov, V.A., Sveshnikov, Y.V. (1970) Dielectric permeability and specific resistance of fluxes for ESR. *Problemy Spets. Elektrometallurgii*, 7, 26–29 [in Russian].
7. Palti, A.M., Yurchenko, D.D. (2006) Computer modeling of electroslag surfacing in a water-cooled mold. *Svarochnoe Proizvodstvo*, 9, 12–15 [in Russian].

ELECTRICAL PROCESSES IN A CURRENT-CARRYING CRYSTALLIZER WITH A SQUARE CROSS-SECTION

Yu.M. Kuskov, I.P. Lentiugov, A.V. Netyaga

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

11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine. E-mail: netyaga_av@ukr.net

Experimental electroslag surfacing was carried out in current-carrying crystallizers of square cross-sectional dimensions of 200×200 and 250×250 mm with or without a protective graphite lining on the working surface of the current-carrying section of the crystallizer. It has been established that surfacing in a small cross-section crystallizer can be carried out without the use of a lining in the case of a current with a density of less than 0.01 A/cm² passing through the section. This results in a high resistance of the section metal to electrical erosion wear. Surfacing in a large cross-section crystallizer with a partially protected working surface is accompanied by the manifestation of electrical erosion processes only on the graphite lining, mostly in its end part, which confirms the passage of the maximum operating current in this zone. 3 Ref., 3 Fig.

Keywords: electroslag surfacing, current-carrying crystalliser of square cross-section, current-carrying section, graphite lining, electroerosion

Отримано 17.03.2025

Отримано у переглянутому вигляді 30.04.2025

Прийнято 29.05.2025



УКРАЇНСЬКЕ МАТЕРІАЛОЗНАВЧЕ ТОВАРИСТВО ім. І.М. ФРАНЦЕВИЧА

Українське матеріалознавче товариство (УМТ) є громадською організацією, яка об'єднує матеріалознавців України для сприяння розвитку матеріалознавчої галузі в Україні. УМТ (засноване у 2004 році) активно працює над покращенням координації діяльності матеріалознавців, створенням умов для взаємодії науковців з виробничим сектором, залученням молоді до матеріалознавчої науки та інших спільних дій, спрямованих на науковий та виробничий розвиток матеріалознавства в Україні.

www.umrs.org.ua