УДК 537.612:621.791.92 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2026.04.080

ГІДРОДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ШЛАКОВІЙ ВАННІ СТРУМОПІДВІДНОГО КРИСТАЛІЗАТОРА ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЇ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

О.І. Бондар[1*], канд. техн. наук, **Ю.М. Гориславець**[1**], докт. техн. наук,
Ю.М. Кусков[2***], докт. техн. наук, **А.В. Нетяга**[2****], канд. техн. наук
[1] **Інститут електродинаміки НАН України,**
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: bondar_o_i@ukr.net.
[2] **Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,**
вул. К. Малевича, 11, Київ, 03150, Україна, e-mail: netyaga.av@gmail.com.

Проведено аналіз сучасного стану та перспектив розвитку технології електрошлакового наплавлення металу в струмопідвідному кристалізаторі, обґрунтовано доцільність виконання досліджень зазначеного процесу. Описано характер досліджуваного процесу та роль шлакової ванни в електрошлакових технологіях. З метою більш глибокого розуміння особливостей електромагнітного впливу на гідродинамічні процеси у ванні рідкого шлаку запропоновано математичну модель, яка описує взаємодію електромагнітного поля струмопідвідної секції кристалізатора для електрошлакового наплавлення з рідким шлаком в 3D постановці з урахуванням деформації вільної поверхні. Із застосуванням сучасних методів чисельного моделювання проведено дослідження електромагнітних та гідродинамічних процесів на прикладі секційного кристалізатора діаметром 180 мм, що містить захисне графітове футерування верхньої секції. На основі отриманих результатів моделювання проведено аналіз розподілу електричного струму в об'ємі шлакової ванни, досліджено характер руху рідкого шлаку, встановлено залежність середньої швидкості рідкого шлаку та отримано форму вільної поверхні для різних положень клеми живлення струмопідвідної секції. Виявлено зони максимальних тепловиділень, показано розподіли густини струму у верхній секції та шлаковій ванні, визначено профілі азимутальної швидкості шлаку на вільній поверхні і на границі, що контактує з шаром металу, що наплавляється. Встановлено, що переміщення по азимуту струмопідводу верхньої секції дає можливість ефективно керувати інтенсивністю циркуляції рідкого шлаку у ванні кристалізатора. Бібл. 13, рис. 6, табл. 1.

Ключові слова: струмопідвідний кристалізатор, електрошлакове наплавлення, гідродинамічні процеси, чисельне моделювання.

Вступ. Серед технологій спеціальної металургії особлива увага останнім часом приділяється дослідженням процесів електрошлакового наплавлення (ЕШН) в секційних струмопідвідних кристалізаторах (СПК). Значущість і актуальність цієї технології визначається тим, що вона втілює у собі сучасні досягнення в області керованого електромагнітного впливу на теплофізичні, фізико-хімічні й металургійні процеси одержання біметалевих виробів високої якості та стійкості до абразивного зношування та ударних навантажень. Характерними особливостями процесу ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі є можливість застосування неплавких електродів, що дає змогу використання сипучих (дискретних) матеріалів і є найбільш перспективним способом впливу на процес кристалізації металу, що наплавляється, а також дає можливість наплавлення за один прохід шарів в широкому діапазоні їхньої товщини (від кількох міліметрів до десятків сантиметрів) [1, 2].

Шлакова ванна є невід'ємною складовою електрошлакових технологій. Особлива роль для шлакової ванни відводиться під час електрошлакового наплавлення в секційному кристалізаторі з верхньою струмопідвідною секцією, основне призначення якої – забезпечити необхідну кількість теплової енергії для плавлення присадного матеріалу та поверхні, на яку він наплавляється. Проте така ванна слугує не тільки джерелом теплової енергії внаслідок протікання крізь неї електричного струму, а й забезпечує за рахунок зовнішнього впливу на неї електромагнітним способом

© Бондар О.І., Гориславець Ю.М., Кусков Ю.М., Нетяга А.В., 2026
ORCID: * https://orcid.org/0000-0002-1678-8862; ** https://orcid.org/0000-0003-1668-4972;
*** https://orcid.org/0000-0002-8091-2274; **** https://orcid.org/0000-0002-0576-8006
© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2026
Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk

усереднення температури по об'єму та по периметру струмопідвідної секції внаслідок обертального руху шлаку; інтенсифікує обмінні реакції між шлаком, присадним металом та атмосферою; прискорює стабілізацію електрошлакового процесу; запобігає ерозії або зменшує локальне зношування неплавкого електроду [1, 2]. Зважаючи на це, дослідження особливостей електромагнітного впливу на рідкий шлак під час ЕШН некомпактними (дискретними) матеріалами в секційному кристалізаторі з верхньою струмопідвідною секцією є важливими та актуальними.

Донині переважна більшість досліджень фізичних процесів, які відбуваються в об'ємі шлако-вої ванни під час ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі, проводилися в основному експеримен-тальними методами головним чином в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона (Київ). Проте, зважаючи на високі температури (≈ 2000 K), ресурсоємність та складність, а в деяких випадках і неможливість вимірювання локальних фізичних величин в об'ємі та на взаємодіючих поверхнях шлаку, аналіз фізичних процесів відбувається опосередковано та не дає змогу отримати повноцінну картину досліджуваних явищ. Тому з метою удосконалення технології, розширення її можливостей, підвищення ефективності та більш глибокого розуміння процесів, які відбуваються під час ЕШН в струмопідвідному кристалізаторі, є необхідним застосування сучасних методів математичного моделювання.

В роботі [3] запропоновано математичну модель процесу ЕШН в секційному кристалізаторі з водяним охолодженням на поверхню валка вальцювального стану. Розглянуто стаціонарне електромагнітне поле (постійний струм) і тепловий стан для двовимірного випадку. Гідродинамічні процеси не розглядалися, проте процес перенесення тепла за рахунок конвекції враховувався шляхом введення коефіцієнта ефективної анізотропної теплопровідності.

Комплексну розрахункову модель процесу електрошлакового переплавлювання металу неплавким електродом в струмопідвідному кристалізаторі, яка розглядає електромагнітні, гідродинамічні та теплові процеси в двовимірній постановці без врахування деформації вільної поверхні, було розглянуто в роботі [4]. Отримані результати розподілу температури показали задовільну узгодженість з експериментальними даними.

Раніше авторами цієї роботи окремо розглянуто електромагнітні процеси у струмопідвідній секції кристалізатора та шлаковій ванні під час електрошлакового наплавлення, в результаті чого визначено вплив положення клеми струмопідвідної секції кристалізатора для електрошлакового наплавлення на електромагнітну обстановку в шлаковій ванні [5]. На основі отриманого розподілу електромагнітних сил зроблено припущення про можливість керування інтенсивністю руху рідкого шлаку, не впливаючи суттєво при цьому на тепловий стан системи.

Ретельний огляд досліджень, що стосуються електрошлакового переплаву, наведено в роботі [6], де висвітлено основні досягнення та складнощі в моделюванні такого процесу. Показано, що значна кількість робіт присвячена дослідженню процесів, які відбуваються у шлаковій ванні, адже саме вони визначають профіль фронту кристалізації злитку та впливають на його якість.

Важливим питанням під час моделювання електрошлакових процесів у мідних кристалізаторах є врахування деформації вільної поверхні шлакової ванни, адже її форма, а, відповідно, і площа контакту шлаку з струмопідвідною секцією, впливає на енергетичні параметри системи. Тому, враховуючи, що для технології ЕШН в СПК недостатньо уваги, на наш погляд, приділено дослідженню впливу електромагнітного поля та параметрів його живлення на структуру та характер руху рідкого шлаку, деформації вільної поверхні шлакової ванни, впливу положення клеми струмопідвідної секції на фізичні процеси в кристалізаторі, пропонується розглянути їх у цій роботі шляхом виконання математичного моделювання таких процесів.

Отже **метою** цієї роботи є дослідження гідродинамічних процесів в струмопідвідному кристалізаторі для електрошлакового наплавлення металу методом скінченних елементів з врахуванням деформації вільної поверхні в залежності від положення струмопідводу відносно вертикального розрізу струмопідвідної секції кристалізатора.

Опис досліджуваної конструкції. Задля дослідження гідродинаміки шлакової ванни в процесі ЕШН розглядалася двосекційна конструкція струмопідвідного кристалізатора, яка має графітову футеровку між шлаком та струмопідвідною секцією. Така конструкція СПК переважно використовується для наплавлення дискретним присадним матеріалом, який рівномірно вводиться через верхню відкриту поверхню флюсу (на відміну від наплавлення рідким металом або плавким електродом). З огляду на відсутність осьової симетрії полів досліджуваних величин моделювання проводилися у тривимірній постановці (3D). Геометричну модель досліджуваної конструкції представлено на рис. 1, де *1* – струмопідвідна мідна секція, *2* – графітове футерування, *3* –

формувальна секція, *4* – піддон, *5* – заготовка, *6* – шлакова ванна, *7* – вертикальний розріз струмопідвідної секції, *8* – електрична ізоляція між секціями кристалізатора, піддоном та заготовкою.

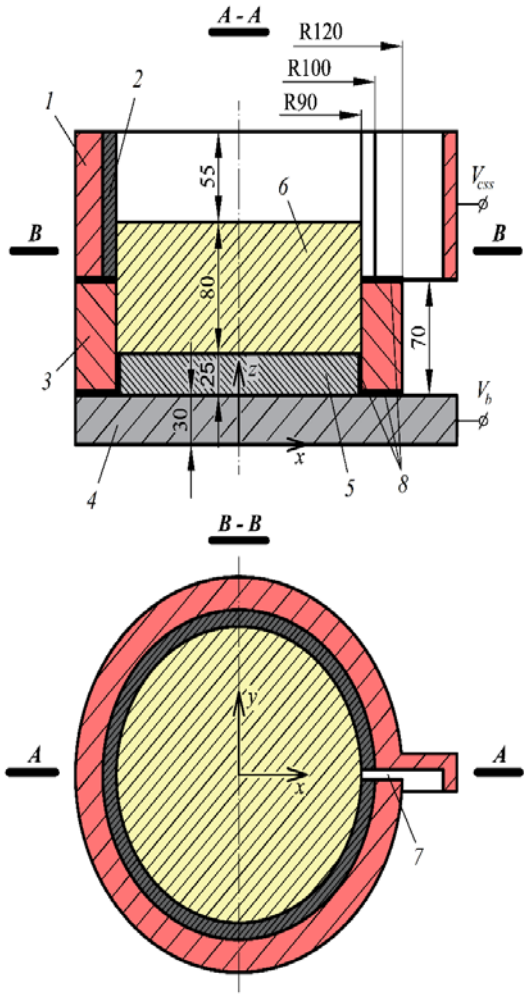


Рис. 1

Математична модель формулювалася з врахуванням наступних **спрощень** та **припущень:** залежністю фізичних характеристик матеріалів від температури, напруженостей електричного та магнітного полів, частоти напруги живлення нехтувалося. Структура шлаку приймалася однорідною, а його фізичні характеристики по всьому об'єму вважалися незмінними (наявністю крапель рідкого металу та різноманітних неметалевих включень нехтувалося). Рух рідкого шлаку вважався турбулентним (Re ≈ 4400 [7, 8]), впливом наявності шлакового гарнісажу на характер руху в об'ємі шлакової ванни нехтувалося. Електричний контакт в межах однієї контактної поверхні приймався однорідним, залежність контактного опору від густини струму, напруженості електричного поля та об'ємних тепловиділень не враховувалася. Нелінійністю характеристик контактної пари "рідкий шлак – мідний кристалізатор з водяним охолодженням" за рахунок виникнення електрорушійної сили певної полярності, що спричинена дифузією носіїв електричного заряду через наявність градієнта температури в середовищі з іонною провідністю (як зазначено в роботі [9]), нехтувалося. Індукована за рахунок руху шлаку в магнітному полі складова електричного поля ($\mathbf{u}\times\mathbf{B}$) не враховувалася (магнітне число Рейнольдса $R_m \ll 1$). Явищем гравітаційної конвекції та ефектом Марангоні нехтувалося.

Математична модель досліджуваних процесів. Вплив електромагнітного поля на ЕШН з врахуванням вищезазначених спрощень та припущень можна оцінити за допомогою рівнянь, які описують електромагнітне поле для гармонічного випадку, та усереднених Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса для нестискувального руху рідини з використанням *k*-ε моделі турбулентності

Рівняння електромагнітного поля:

$$\nabla\times\frac{\nabla\times\dot{\mathbf{A}}}{\mu_0\mu_r}=(\varepsilon_0\varepsilon_r\omega^2-i\omega\sigma)\dot{\mathbf{A}}-(\sigma+i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r)\nabla\dot{V}\,; \tag{1}$$

$$\nabla\cdot\left((\varepsilon_0\varepsilon_r\omega^2-i\omega\sigma)\dot{\mathbf{A}}-(\sigma+i\omega\varepsilon_0\varepsilon_r)\nabla\dot{V}\right)=0\,; \tag{2}$$

$$\nabla\cdot\dot{\mathbf{A}}=0\,. \tag{3}$$

Усереднені Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса для нестискувального руху:

$$\rho\frac{\partial\mathbf{u}}{\partial t}+\rho(\mathbf{u}\cdot\nabla)\mathbf{u}+\nabla\cdot\left(\frac{2}{3}\rho k+\mu_T\left(\nabla\mathbf{u}+(\mathbf{u})^T\right)\right)=-\nabla p+\nabla\cdot\left(\mu\left(\nabla\mathbf{u}+(\mathbf{u})^T\right)\right)+\frac{1}{2}\mathrm{Re}\left(\dot{\mathbf{J}}\times\overset{*}{\mathbf{B}}\right)+\rho\mathbf{g}\,; \tag{4}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{u}=0\,. \tag{5}$$

Рівняння k-ε моделі турбулентності:

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\rho\mathbf{u}\cdot\nabla k=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right)+P_k-\rho\varepsilon\,; \tag{6}$$

$$P_k=\mu_T\left(\nabla\cdot\mathbf{u}:\left(\nabla\cdot\mathbf{u}+(\nabla\cdot\mathbf{u})^T\right)-\frac{2}{3}(\nabla\cdot\mathbf{u})^2\right)-\frac{2}{3}\rho k\nabla\cdot\mathbf{u}\,; \tag{7}$$

$$\rho\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}+\rho\mathbf{u}\cdot\nabla\varepsilon=\nabla\cdot\left(\left(\mu+\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla\varepsilon\right)+C_{\varepsilon1}\frac{\varepsilon}{k}P_k-C_{\varepsilon2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (8)$$

де $\mathbf{A}$ – векторний магнітний потенціал; V – скалярний електричний потенціал; σ – питома електропровідність; ε_0, μ_0 – діелектрична та магнітна проникності вакууму відповідно; ε_r, μ_r – відносні діелектрична та магнітна проникності середовища відповідно; $\omega=2\pi f$; f = 50 Гц – частота струму живлення; $\mathbf{u}$ – усереднена в часі швидкість; ρ – густина; k – кінетична енергія турбулентності; ε – швидкість дисипації турбулентної кінетичної енергії; p – усереднене в часі значення тиску; μ – коефіцієнт динамічної в'язкості; $\mathbf{J}$ – густина струму; $\mathbf{B}$ – магнітна індукція; $\mu_T=\rho C_\mu k^2/\varepsilon$ – турбулентна динамічна в'язкість; константи k-ε моделі турбулентності приймалися наступними [10]: C_μ=0.09, $C_{\varepsilon1}$=1.43, $C_{\varepsilon2}$=1.92, σ_k=1.00, σ_ε=1.30.

Для розрахунку електромагнітного поля розрахункова область включала в себе (окрім підобластей, позначених на рис. 1) також з'єднувальні провідники (частково) та навколишнє середовище (повітря). На всіх зовнішніх границях розрахункової області застосовувалися умови магнітної $\mathbf{n}\cdot\dot{\mathbf{A}}=0$ та електричної $\mathbf{n}\cdot\dot{\mathbf{J}}=0$ ізоляції, окрім границь, де задавалося комплексне амплітудне значення синусоїдної напруги джерела живлення частотою f = 50 Гц ($\dot{V}_{css}=40\cdot\sqrt{2}$ – до зовнішньої границі провідника живлення струмопідвідної секції кристалізатора, $\dot{V}_b=0$ – до зовнішньої границі провідника живлення піддону).

Розрахункова область гідродинамічної задачі включала в себе лише шлакову ванну. Розглядалися два види границь для досліджуваної області – непроникні стінки та вільна поверхня. Граничні умови для швидкості, турбулентної кінетичної енергії та її дисипації на непроникних стінках з врахуванням логарифмічного профілю швидкості для приграничного шару застосовувалися у відповідності з математичною моделлю, запропонованою в роботі [11]. Тиск навколишнього середовища на вільній поверхні описувався співвідношенням

$$\left(-p\mathbf{I}+\left(\mu+\mu_T\right)\left(\nabla\mathbf{u}+\left(\nabla\mathbf{u}\right)^T\right)\right)\cdot\mathbf{n}=-p_{atm}\cdot\mathbf{n}, \quad (9)$$

де p_{atm} =101325 Па. Деформація вільної поверхні рідкого металу визначалася ALE методом рухомої сітки, при цьому нормальна складова швидкості руху вузлів сітки вільної поверхні задавалася наступним чином [12]:

$$\left(\mathbf{u}_{mesh}-\mathbf{u}\right)\cdot\mathbf{n}=0, \quad (10)$$

де $\mathbf{u}_{mesh}$ – швидкість руху вузлів сітки.

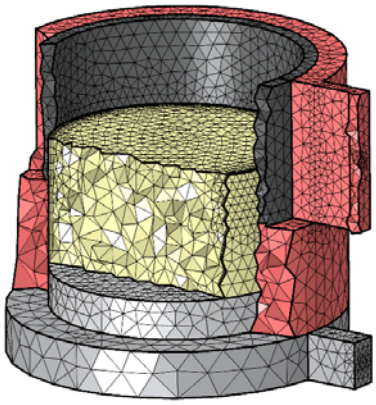


Рис. 2

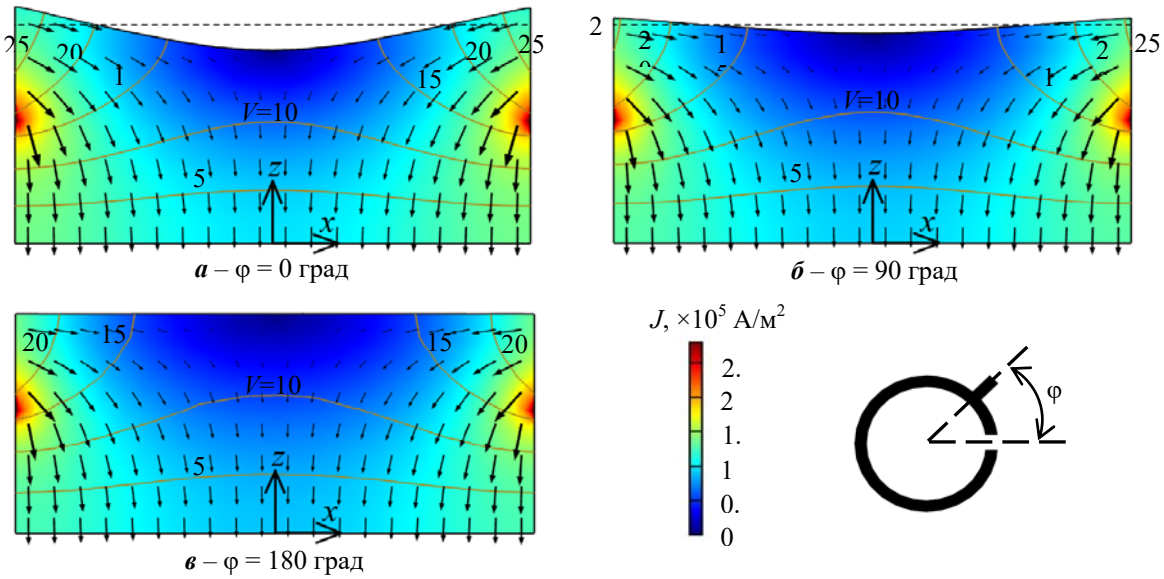
Приклад розрахункової сітки, яка використовувалася під час моделюваня, показано на рис. 2 (навколишня область повітря та частково підобласті мідних секцій, графітового футерування та шлаку є прихованими).

Фізичні характеристики матеріалів задавалися у відповідності з даними, наведеними в [6, 13], їхні значення наведено у таблиці.

	μ_r, 1	ε_r, 1	σ, См/м	η, Па·с	ρ, кг/м^3
Рідкий шлак (АНФ-29)	1	1	400	0.05	2950
Секції кристалізатора	1	1	$5.8\cdot10^7$	–	–
Графітове футерування	1	1	$13.3\cdot10^4$	–	–
Заготовка та піддон	100	1	$1.7\cdot10^6$	–	–

Результати моделювання. На рис. 3 представлено результати розв'язку пов'язаної електромагнітної задачі, на якому показано суміщену картину розподілу амплітудного значення скалярного електричного потенціалу V (еквіпотенціальні лінії з кроком ΔV = 5 В) та модуля густини струму (кольорова картина) в площині xz, що проходить через вісь симетрії кристалізатора (y = 0) для шлакової ванни з деформованою верхньою поверхнею. Ці дані наведено для трьох значень кута φ між клемою живлення та вертикальним розрізом секції кристалізатора. Видно, що електричний струм розподіляється по об'єму шлакової ванни суттєво нерівномірно, максимальні значення його густини зосереджені поблизу ниж-

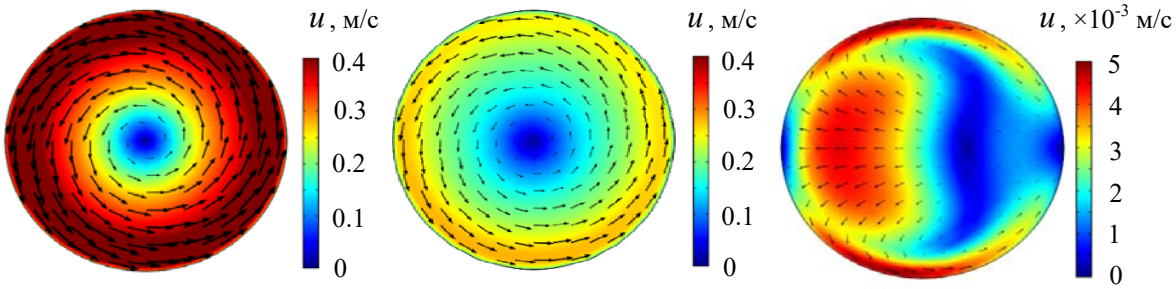
нього краю струмопідвідної секції. Варто зазначити, що саме ця зона і є областю підвищеної електрохімічної ерозії, яка призводить до поступового руйнування струмопідвідної секції кристалізатора.



а – φ = 0 град ***б*** – φ = 90 град ***в*** – φ = 180 град

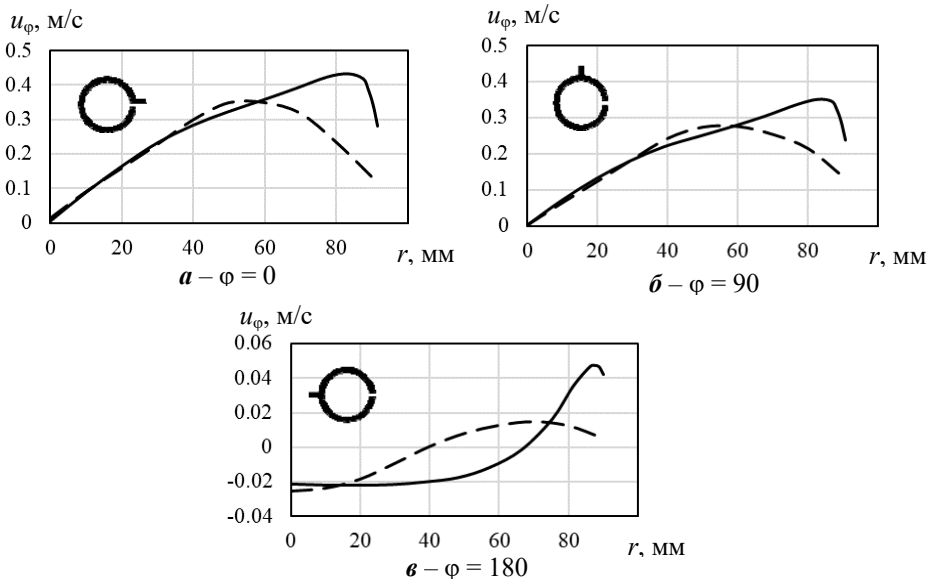
Рис. 3

На рис. 4 представлено характер руху шлаку на поверхні ванни, спричинений електромагнітними силами, для різних положень верхньої клеми.



а – φ = 0 град ***б*** – φ = 90 град ***в*** – φ = 180 град

Рис. 4



а – φ = 0 ***б*** – φ = 90 ***в*** – φ = 180

Рис. 5

У разі зміщення по азимуту цієї клеми від вертикального розрізу струмопідвідної секції інтенсивність циркуляції рідкого шлаку спадає, характер його руху є одноконтурним. Зазначений характер зберігається практично у всьому діапазоні значень кута φ за винятком значень, близьких до φ = 180°, за яких відбувається перебудова течії з одноконтурної на двоконтурну.

Профілі азимутальної складової швидкості руху рідкого шлаку

вздовж радіусу r (по лініям в площині yz за $x = 0$ та $y > 0$) на вільній поверхні та на границі "шлак – метал, що наплавляється", зображено на рис. 5. Як видно з рисунку, розподіл швидкості на розглянутих поверхнях відрізняється один від одного. Максимальні значення швидкості на вільній поверхні зосереджені ближче до периферії, в той час як максимальні значення швидкості руху на поверхні шлаку, яка контактує з ванною рідкого металу, що наплавляється, знаходяться приблизно рівновіддалено від осі симетрії та стінок кристалізатора для випадку кутів між клемою живлення і вертикальним розрізом струмопідвідної секції кристалізатора, які реалізують одноконтурний рух рідкого шлаку.

На рис. 6 показано розрахункові залежності основних характерних параметрів, отриманих в результаті проведеного моделювання. В залежності від положення верхньої клеми живлення системи наведено значення середнього модуля швидкості рідкого шлаку $u_{av} = \frac{1}{V_{slag}} \int_V |\mathbf{u}| dv$, де V_{slag} – об'єм шлакової ванни; площі контакту шлаку з струмо-підвідною секцією кристалізатора $A_{contact}$ та деформації вільної поверхні Δd_z (різниці між максимальною і мінімальною координатами деформованої вільної поверхні). Звідсіля випливає, що зі збільшенням кута φ всі ці параметри зменшуються. Особливо це стосується усередненої швидкості руху шлаку u_{av} і параметра деформації верхньої поверхні рідкого шлаку Δd_z.

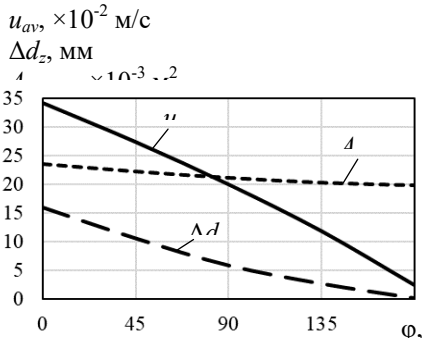


Рис. 6

Висновки.

1. Суттєва нерівномірність розподілу густини електричного струму в об'ємі шлакової ванни призводить до концентрації тепловиділень в області нижнього краю струмопідвідної секції кристалізатора. Як відомо, ця область є зоною посиленої згубної дії електроерозійних процесів.

2. Взаємодія результуючого магнітного поля зі струмом, що протікає в об'ємі шлаку, призводить до інтенсивної циркуляції розплавленого шлаку та деформації вільної поверхні шлакової ванни, які залежать від кута приєднання клеми живлення до верхньої секції кристалізатора. Можна припустити, що переміщення по азимуту верхнього струмопідводу секційного кристалізатора відносно його вертикального розрізу дає змогу керувати технологічними процесами в системі електрошлакового наплавлення металу.

3. В міру наближення до шару металу, що наплавляється, інтенсивність руху рідкого шлаку спадає, а зона максимальних значень швидкості зміщується в напрямку осі симетрії кристалізатора.

Роботу виконано за держбюджетною темою «Розробка теорії електротехнологічних процесів та створення ефективних систем електричного плавлення та електричного заряджання з керованим електромагнітним впливом» (шифр «Елтех»).

1. Ksendzyk G.V. Current-supplying mould providing slag pool rotation. *Spetsialnaia elektrometallurgiia.* 1975. Vup. 27. Pp. 32–40. (Rus)

2. Kuskov Yu.M., Solovjev V.G., Lentyugov I.P., Zhdanov V.A. Role of slag pool in process of surfacing in current-carrying mould. *Sovremennaia metellurgiia*. 2018. No 2. (131). Pp. 41–44. DOI: https://doi.org/10.15407/sem2018.02.05. (Rus)

3. Palti A.M., Yurchenko D.D. Computer simulation of electroslag surfacing in a water-cooled mould. *Svarochnoe proizvodstvo.* 2006. No 9. Pp. 12–15. (Rus)

4. Liu F., Zang X., Jiang Z., Geng X., Yao M. Comprehensive model for a slag bath in electroslag remelting process with a current-conductive mould. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials.* 2012. Vol. 19. Pp. 303–311. DOI: https://doi.org/10.1007/s12613-012-0555-9.

5. Goryslavets Yu.M., Bondar O.I., Proskudin V.M., Kuskov Yu.M., Rymar S.V., Netyaha A.V. Influence of electrical current terminals on electromagnetic processes in a mould for electroslag surfacing of metal. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy.* 2022. No 62. Pp. 19–24. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2022.62.019. (Ukr)

6. Kharicha A., Karimi-Sibaki E., Wu M., Ludwig A., Bohacek J. Review on Modeling and Simulation of Electroslag Remelting. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. No 1. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.201700100.

7. Kamensky Yu.M., Afanasyev Yu.I., Sukhotyn B.N., Wegman E.F., Yavoisky V.I., Safronova L.A. Thermal stability of a slag pool and the structure of its boundary layer. *Spetsialnaia elektrometallurgiia*. 1972. No 1. Pp. 24–33. (Rus)

8. Jardy A., Ablitzer D., Wadier J.F. Magnetohydronamic and thermal behavior of electroslag remelting slags. *Metall Trans.* 1991. Vol. 22. Pp. 111–120. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02672532.

9. Myronchenko V.L., Statsenko A.G., Chernov V.T. Investigation of the characteristics of electrical contact between copper and liquid slag. *Spetsialnye voprosy elektrotermii.* 1979. No 8. Pp. 47-54. (Rus)

10. Launder B.E., Spalding D.B. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering.* 1974. Vol. 3. Issue 2. Pp. 269-289. DOI: https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2.

11. Kuzmin D., Mierka O., Turek S. On the implementation of the *k-ε* turbulence model in incompressible flow solvers based on a finite element discretisation. *Int. J. Computing Science and Mathematics*. 2007. Vol. 1. No 2, 3, 4. Pp. 193–206. DOI: https://doi.org/10.1504/IJCSM.2007.016531.

12. Braess H., Wriggers P., Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2000. Vol. 190. Issue 1–2. Pp. 95–109. DOI: https://doi.org/10.1016/S0045-7825(99)00416-8.

13. Kuskov Yu.M. Influence of flux composition on the process of electroslag surfacing of end faces with discrete feeding of filler material. *Avtomaticheskaya Svarka.* 2018. No 12. Pp. 44–49. DOI: https://doi.org/10.15407/as2018.01.07. (Rus)

HYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE SLAG BATH OF A CURRENT-CONDUCTING MOULD FOR ELECTROSLAG METAL SURFACING CONSIDERING FREE-SURFACE DEFORMATION

O.I. Bondar[1], **Yu.M. Goryslavets**[1], **Yu.M. Kuskov**[2], **A.V. Netyaha**[2]
[1] Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: bondar_o_i@ukr.net.
[2] E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine,
11, Kazymyr Malevych st., Kyiv, 03150, Ukraine, e-mail: netyaga.av@gmail.com.

Analysis of current state and perspectives of electroslag metal surfacing technology development in current-supplying mould has been performed, the feasibility of conducted research on the specified process is justified. The nature of the studied process and the role of the slag pool in electroslag technologies are described. For a deeper understanding of the features of the electromagnetic influence on hydrodynamic processes in a liquid slag pool, a three-dimensional mathematical model that describes the interaction of the electromagnetic field of the current-supplying section of the mould for electroslag surfacing with liquid slag has been formulated taking into account the deformation of the free surface. Using modern numerical modeling methods, a study of electromagnetic and hydrodynamic processes has been conducted having as an example a sectional mould with a diameter of 180 mm, containing a protective graphite lining of the upper section. Based on the obtained modeling results, for different positions of the power terminal of the current-supplying section of the mould an analysis of the distribution of electric current in the volume of the slag pool has been carried out, the nature of the movement of liquid slag has been investigated, the dependence of the average velocity of liquid slag has been established, and the shape of the free surface has been obtained. Zones of maximum heat release have been identified, current density distributions in the upper section of the mould and the slag pool have been shown, and profiles of the azimuthal velocity of slag on the free surface and on the boundary in contact with the deposited metal layer have been determined. It has been established that the azimuthal displacement of the upper section current terminal allows to control effectively the liquid slag circulation intensity in the mould. References 13, figures 6, table 1.

Keywords: current-supplying mould, electroslag metal surfacing, numerical modeling, slag, electromagnetic influence.

Надійшла 30.10.2025
Прийнято 13.12.2025