УДК 537.612:621.791.92

DOI: https://doi.org/10.15407/techned2022.04.064

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СЕКЦІЙНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ

**Ю.М. Гориславець**<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, **О.І. Бондар**<sup>1\*\*</sup>, канд. техн. наук, **В.М. Проскудін**<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд. техн. наук, **Ю.М. Кусков**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, **С.В. Римар**<sup>2\*\*\*\*\*</sup>, докт. техн. наук, **А.В. Нетяга**<sup>2\*\*\*\*\*\*</sup> <sup>1</sup>Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, е-mail: <u>vugoris@ukr.net</u>. <sup>2</sup>Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, вул. К. Малевича, 11, Київ, 03150, Україна, е-mail: <u>elmag@paton.kiev.ua</u>.

Представлено тривимірну математичну модель для дослідження електромагнітних процесів, що протікають в секційному струмопідвідному кристалізаторі за електрошлакового наплавлення металу. Виконано чисельне моделювання електромагнітного поля в такій системі, отримано розподіли густини електричного струму, об'ємних тепловиділень в елементах системи, а також розподіл електромагнітних сил в рідкому шлаку. Проведено порівняння розрахункових і експериментальних значень інтегральних параметрів зазначеної системи. Бібл. 8, рис. 5, табл. 2.

Ключові слова: електромагнітне поле, моделювання, секційний кристалізатор, електрошлакове наплавлення металу.

Вступ. Електрошлакове наплавлення (ЕШН) – це технологія нанесення розплавленого металу на робочу поверхню металевого виробу, за якої оплавлення основного та розплавлення присадного металів відбувається шляхом передачі теплоти, що виділяється у шлаковій ванні під час проходження через неї електричного струму. ЕШН грунтується на технології електрошлакового переплаву металу, яку вперше було розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України [1, 2]. ЕШН застосовується в металургійному виробництві для наплавлення прокатних валків, у виробництві заготовок із біметалу, у машинобудуванні для наплавлення штампів тощо [3].

Один із способів формування наплавленого металу в процесі ЕШН полягає у використанні спеціальних формувальних пристроїв – водоохолоджуваних кристалізаторів, виготовлених, переважно, із міді. Їхні поверхні, що контактують з розплавами шлаку, захищають графітом або іншими матеріалами, оберігаючи їх від електрохімічної ерозії. Функціонально кристалізатори можуть бути електрично нейтральними, коли електрична напруга від джерела живлення подається на електрод, занурений у шлакову ванну [2], або струмопідвідними, коли напруга подається на кристалізатор [3-5].

Сутність ЕШН полягає у наступному. Електричний струм, проходячи через рідкий шлак, попередньо розплавлений, наприклад, електричною дугою, підтримує в ньому високу температуру, достатню для розплавлення присадного матеріалу, який подається у шлакову ванну, та оплавлення поверхні виробу (заготовки). Розплавлений метал у вигляді крапель піддається металургійній обробці та очищається від шкідливих домішок. Опускаючись на дно шлакової ванни, він кристалізується, утворюючи наплавлений шар металу, наприклад, металу підвищеної міцності та зносостійкості.

На рис. 1, *а* показано схематичне зображення однієї із систем електрошлакового наплавлення металу у вигляді двосекційного струмопідвідного кристалізатора. Верхня його секція *l* і є тією секцією, яка підводить струм до шлаку *2*. Вона має вертикальний розріз *3*, який перетворює її в одновитковий індуктор. Задля хімічного захисту внутрішню поверхню цієї секції покрито графітом *4*. Нижня секція *5*, яку називають формуючою, власне і виконує функцію кристалізатора. Вона встановлюється на металеву заготовку *6*, на яку наплавляється метал. Секції кристалізатора між собою розділені еле-

<sup>©</sup> Гориславець Ю.М., Бондар О.І., Проскудін В.М., Кусков Ю.М., Римар С.В., Нетяга А.В., 2022

ORCID ID: \* https://orcid.org/0000-0003-1668-4972, \*\* https://orcid.org/0000-0002-1678-8862,

<sup>\*\*\*&</sup>lt;u>https://orcid.org/0000-0002-2737-5983</u>, \*\*\*\*<u>https://orcid.org/0000-0002-8091-2274</u>, \*\*\*\*\*<u>https://orcid.org/0000-0003-0490-4608</u>, \*\*\*\*<u>https://orcid.org/0000-0002-0576-8006</u>

ктроізоляційною прокладкою із азбесту 7. Струмопідвід від джерела живлення здійснюється до заготовки через клему 8 та через одну із клем 9 верхньої розрізної секції.



На рис. 1, *б* зображено праву частину повздовжнього розрізу кристалізатора з його геометричними розмірами.

Таке конструктивне рішення спричиняє складне тривимірне розтікання електричного струму в системі, що, як показує практика, окрім нагрівання створює вихровий (зокрема обертовий) рух рідкого шлаку в струмопідвідному кристалізаторі [3, 4].

Постановка задачі дослідження. Задача дослідження полягає у визначенні основних закономірностей електромагнітних процесів, що протікають в такій

системі, які є першопричиною інших фізичних процесів: теплових, гідродинамічних, технологічних тощо. Відомі праці, в яких досліджувалося електромагнітне поле подібних систем. Так, наприклад, в роботі [6] на основі проведених розрахунків у двовимірній постановці отримано розподіли густини струму в окремих елементах системи ЕШН. У випадку системи, зображеної на рис. 1, достовірна картина розподілу електромагнітного поля може бути отримана тільки у тривимірній постановці, яку доцільно виконати шляхом чисельного математичного моделювання.

Мета роботи – сформулювати тривимірну математичну модель для дослідження електромагнітних процесів, що протікають під час електрошлакового наплавлення в секційному кристалізаторі у разі підключення його до джерела синусоїдної напруги, та на її основі якісно оцінити силовий та тепловий вплив електромагнітного поля на рідкий шлак, що є передумовою для створення його ефективної циркуляції, яка відіграє ключову роль в отриманні якісних металевих виробів.

Під час побудови математичної моделі були прийняті такі **спрощення** та **припущення**. Залежністю фізичних характеристик матеріалів від температури та електромагнітного поля нехтувалося. Прийнято, що метал, який наплавляється, та метал заготовки – один і той же феромагнітний матеріал. При цьому вважалося, що температура першого із них вище температури Кюрі, а другого – нижче. Рідка фаза металу, що наплавляється, (верхня його частина) і тверда мають однакові електрофізичні характеристики. Рух рідкої фази металу не враховувався. Структура шлаку приймалася однорідною, а його фізичні характеристики по всьому об'єму вважалися незмінними (наявністю крапель рідкого металу та різноманітних неметалевих включень 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.

Результати досліджень. Дослідження електромагнітних процесів під час ЕШН в секційному струмопідвідному кристалізаторі потребує використання значень скалярного електричного потенціалу на границях розрахункової області як граничних умов першого роду задля моделювання ситуації підключення установки до напруги промислової частоти. Тому рівняння електромагнітного поля повинні бути сформульовані такими, що містять скалярний електричний потенціал як незалежну змінну. Це можна забезпечити виразивши закон Ампера – Максвела та рівняння неперервності електричного струму в термінах векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів. Для розрахунку поля, що змінюється за гармонічним законом, система рівнянь, яка описує електромагнітні процеси в системі з секційним кристалізатором, з врахуванням зазначених вимог приймає наступний вигляд:

$$\nabla \times \frac{\nabla \times \mathbf{A}}{\mu} + (\sigma + i\omega\varepsilon)\nabla V + (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\mathbf{A} = 0; \qquad \nabla \cdot \left[-(\sigma + i\omega\varepsilon)\nabla V - (i\omega\sigma + \omega^2\varepsilon)\mathbf{A}\right] = 0,$$

де **A**, V – комплексні амплітудні значення векторного магнітного та скалярного електричного потенціалів;  $\mu = \mu_0 \mu_r$ ,  $\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$  – магнітна та діелектрична проникність середовища;  $\mu_0$ ,  $\varepsilon_0$  – магнітна та діелектрична проникність вакууму;  $\mu_r$ ,  $\varepsilon_r$  – відносні діелектрична та магнітна проникність середовища;  $\sigma$  – питома електропровідність;  $i = \sqrt{-1}$ ;  $\omega = 2\pi v$  – кутова частота, де v – частота напруги живлення.

Представлена система диференціальних рівнянь розв'язувалася за таких граничних умов: на зовнішніх границях розрахункової області (за винятком границь з прикладеним електричним потенціалом) – електрична ізоляція ( $\mathbf{n} \cdot \mathbf{j} = 0$ ); на всіх зовнішніх границях – магнітна ізоляція ( $\mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0$ ); на зовнішній границі провідника, приєднаного до заготовки – нульовий потенціал ( $V = V_0 = 0$ ); на зовнішній границі провідника, приєднаного до верхньої секції кристалізатора – електричний потенціал, що відповідає напрузі джерела живлення ( $V = V_s$ ); на контактних поверхнях «мідь – графіт», «графіт – рідкий шлак» – контактний імпеданс між цими поверхнями

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_1 = \left(\frac{1}{\rho_{s12}} + i\omega C_s\right) (V_1 - V_2); \qquad \mathbf{n} \cdot \mathbf{j}_2 = \left(\frac{1}{\rho_{s12}} + i\omega C_s\right) (V_2 - V_1),$$

де **n** – одиничний нормальний вектор;  $\rho_{s12}$  – питомий контактний опір, Ом·м<sup>2</sup>;  $C_s$  – питома ємність контактної поверхні (на промисловій частоті можна знехтувати).

Представлену модель було реалізовано в програмному пакеті *Comsol Multiphysics* [7]. Слід зазначити, що часто дослідження електромагнітних процесів не потребує розгляду скалярного електричного та векторного магнітного потенціалів. В такому випадку є можливість спростити розрахункові рівняння електромагнітного поля, зменшивши при цьому кількість невідомих. Така процедура більш відома під назвою калібрувальне перетворення потенціалів і реалізована за замовчуванням у цьому програмному пакеті для фізичного інтерфейсу *Electric and Magnetic fields*. Щоб забезпечити унікальність електричного та магнітного потенціалів під час дослідження зазначених процесів в представленій постановці, слід фіктивну змінну  $\Omega_0 = -iV/\omega$  прирівняти до константи (наприклад,  $\Omega_0 = 1$ ) шляхом додавання до моделі вузла *Gauge Fixing for A-field* [7].

Фізичні характеристики матеріалів, що були використані в даному дослідженні, представлено в табл. 1. Вони вибиралися у відповідності до значень, наведених у [8].

На рис. 2 показано розрахункову сітку метода скінчених елементів системи, що використовувалася під час моделювання (зовнішня область системи на рисунку умовно не показана).

Гаолиця Г			
Матеріал	Електрична провідність, См/м	$\mu_r$	€ <sub>r</sub>
Графіт	$6,25 \cdot 10^4$	1	1
Рідкий шлак	140	1	1
Метал, що наплавляється	$1,67 \cdot 10^{6}$	1	1
Заготовка	$1,67 \cdot 10^{6}$	100	1
Мідь	$6,45 \cdot 10^7$	1	1
Вода, азбест, повітря	0	1	1



**Результати моделювання електромагнітних процесів.** Моделювання виконувалося за таких вихідних даних: напруга живлення системи  $U = V_s - V_0 = 40$  В, частота живлення v = 50 Гц.

Результати моделювання частково представлено на рис. 3. На рис. 3, *а* наведено розподіл густини струму *j* у верхній секції (міді) кристалізатора та розподіл питомих електромагнітних сил  $\mathbf{f} = 0, 5(\mathbf{j} \times \mathbf{B})$  (позначено стрілками), які виникають у рідкому шлаку. На рис. 3, *б* окрім зазначених сил також представлено розподіл густини струму у шлаковій ванні. Аналіз розподілу електромагнітних сил показує, що серед трьох компонент в основному превалює тангенціальна (окружна) компонента (фкомпонента) сил, яка і викликає обертовий рух рідкого шлаку в кристалізаторі. Представлені на рис. 3 дані наведено для середнього по висоті поперечного перерізу шлакової ванни (на глибині 30 мм).

Оцінити ефективність електромагнітних сил, що визивають обертовий рух шлаку, по висоті шлакової ванни можна за допомогою усередненої електромагнітної сили

$$f_{av} = \frac{1}{S_b} \int_{S_b} f_{\varphi} dS ,$$

- -

де  $S_b$  – поперечний (горизонтальний) переріз ванни, розподіл якої по координаті z представлено на рис. 4. Видно, що максимальні значення цієї сили виникають в середній по висоті частині шлакової ванни.



Рис. 5 демонструє розподіл об'ємних тепловиділень в системі в результаті протікання електричного струму. Максимальні їхні значення виникають у шлаковій ванні біля стінок верхньої секції кристалізатора, особливо в зоні стику її з нижньою секцією.

Таблиця 2		
Параметр	Розрахунок	Експеримент
$U, \mathbf{B}$	40	3545
<i>I</i> , кА	2,33	1,62,2
$P_{slag}$ , к $B$ т	88,4	
$P_{cs}$ , BT	1760	
$P_{gr}$ , Вт	193	

В табл. 2 наведено розрахункові та експериментальні значення параметрів живлення, а також розраховані значення інтегральних тепловиділень в окремих елементах системи електрошлакового наплавлення металу, що досліджувалася в роботі. В ній: U та I – напруга та струм джерела живлення (ефективні значення);  $P_{slag}$  – тепловиділення в об'ємі рідкого шлаку;  $P_{cs}$  – тепловиділення в

струмопідвідній секції;  $P_{gr}$  – тепловиділення в графітовій футеровці. Тепловиділення в металі, що наплавляється, та в металі заготовки із-за їхньої відносної малості в таблиці не наведено. Як видно, основною складовою в загальному тепловиділенні системи є тепловиділення в рідкому шлаку. Інші складові мізерно малі.

**Висновки.** Проведене співставлення результатів тривимірного моделювання секційного струмопідвідного кристалізатора для електрошлакового наплавлення металу з експериментальними даними дає змогу стверджувати про адекватність представленої математичної моделі для дослідження електромагнітних процесів в такій системі.

Отримані результати моделювання можуть бути використані як основа для подальшого тривимірного дослідження теплових, гідродинамічних, технологічних та інших процесів під час електрошлакового наплавлення металів. Роботу виконано за держбюджетною темою «Розвиток теорії електротехнологічних процесів та розроблення ефективних електроплавильних і електрозарядних систем з керованим електромагнітним впливом» (шифр - "Елтех"), КПКВК 6541030.

1. Патон Б.Е., Медовар Б.И., Латаш Ю.В. Электрошлаковый переплав сталей и сплавов в медном водоохлаждаемом кристаллизаторе. Автоматическая сварка. 1958. № 11. С. 5-15.

2. Латаш Ю.В., Медовар Б.И. Электрошлаковый переплав. М.: Металлургия, 1970. 240 с.

3. Кусков Ю.М., Скороходов В.Н., Рябцев И.А., Сарычев И.А. Электрошлаковая наплавка. М.: Наука и технологии, 2001. 180 с.

4. Ксендзык Г.В. Токоподводящий кристаллизатор, обеспечивающий вращение шлаковой ванны. *Специальная электрометаллургия.* 1975. Вып. 27. С. 32-40.

5. Соколов Г.Н., Михеев А.Н., Павлов А.А. Электрошлаковая наплавка в секционном кристаллизаторе оправок трубопрошивного стана. *Сварочное производство*. 2002. № 6. С. 31-34.

6. Пальти А.М., Юрченко Д.Д. Компьютерное моделирование электрошлаковой наплавки в водоохлаждаемом кристаллизаторе. *Сварочное производство*. 2006. № 9. С. 12-15.

7. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <u>https://www.comsol.com/comsol-multiphysics</u> (дата доступу 26.04.2022)

8. 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. 1700100. 20 p. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.201700100

## MODELING OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN A SECTIONAL CRYSTALIZER FOR ELECTROSLAG SURFACING OF METAL

Yu.M. Goryslavets<sup>1</sup>, O.I. Bondar<sup>1</sup>, V.M. Proskudin<sup>2</sup>, Yu.M. Kuskov<sup>2</sup>, S.V. Rymar<sup>2</sup>, A.V. Netyaha<sup>2</sup> <sup>1</sup>Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 56, Peremohy ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: <u>yugoris@ukr.net</u>.

<sup>2</sup>E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine, 11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine, e-mail: <u>elmag@paton.kiev.ua</u>.

A three-dimensional mathematical model for the study of electromagnetic processes occurring in a sectional currentsupply crystallizer during electroslag surfacing of metal is presented. Numerical simulations of the electromagnetic field in such system were performed, the distributions of electric current density, volumetric heat emissions in the system elements, as well as the distribution of electromagnetic forces in liquid slag were obtained. The comparison of calculated and experimental values of the integral parameters of the specified system is carried out. References 8, figures 5, tables 2.

Keywords: electromagnetic field, modeling, sectional crystallizer, electroslag surfacing of metal.

1. Paton B.E., Medovar B.I., Latash Yu.V. Electroslag remelting of steels and alloys in a copper water-cooled mold. *Avtomaticheskaia svarka*. 1958. No 11. Pp. 5-15. (Rus)

2. Latash Yu.V., Medovar B.I. Electroslag remelting. Moskva: Metallurgiia, 1970. 240 p. (Rus)

3. Kuskov Yu.M., Skorokhodov V.N., Ryabtsev I.A., Sarychev I.A. Electroslag welding. Moskva: Nauka i tekhnologii, 2001. 180 p. (Rus)

4. Ksendzyk G.V. Current-carrying crystallizer, which ensures the rotation of the slag bath. *Spetsialnaya elek-trometallurgiia*. 1975. Vyp. 27. Pp. 32-40. (Rus)

5. Sokolov G.N., Mikheev A.N., Pavlov A.A. Electroslag surfacing in a sectional mold of mandrels of a pipepiercing mill. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2002. No 6. Pp. 31-34. (Rus)

6. Palti A.M., Yurchenko D.D. Computer simulation of electroslag surfacing in a water-cooled mold. *Svarochnoye proizvodstvo*. 2006. No 9. Pp. 12-15. (Ukr)

7. COMSOL Multiphysics. Simulation Software. URL: <u>https://www.comsol.com/comsol-multiphysics</u> (accessed at 26.04.2022).

8. 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. 1700100. 20 p. DOI: https://doi.org/10.1002/srin.201700100

Надійшла 30.04.2022 Остаточний варіант 28.05.2022