

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В СЕКЦІЙНОМУ КРИСТАЛІЗАТОРІ
ДЛЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ МЕТАЛУ

Ю.М. Гориславець^{1*}, докт. техн. наук, О.І. Бондар^{1**}, канд. техн. наук,
В.М. Проскудін^{2***}, канд. техн. наук, Ю.М. Кусков^{2****}, докт. техн. наук,
С.В. Римар^{2*****}, докт. техн. наук, А.В. Нетяга^{2*****}

¹Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, e-mail: yugoris@ukr.net.

²Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України,

вул. К. Малевича, 11, Київ, 03150, Україна, e-mail: elmag@paton.kiev.ua.

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 ґрунтується 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 1 і є тією секцією, яка підводить струм до шлаку 2. Вона має вертикальний розріз 3, який перетворює її в однофазовий 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-

© 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>,

*** <https://orcid.org/0000-0002-2737-5983>, **** <https://orcid.org/0000-0002-8091-2274>,

***** <https://orcid.org/0000-0003-0490-4608>, ***** <https://orcid.org/0000-0002-0576-8006>

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

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

де \mathbf{n} – одиничний нормальний вектор; ρ_{s12} – питомий контактний опір, Ом·м²; 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 використовувався під час моделювання (зовнішня область системи на рисунку умовно не показана).

Таблиця 1

Матеріал	Електрична провідність, См/м	μ_r	ϵ_r
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

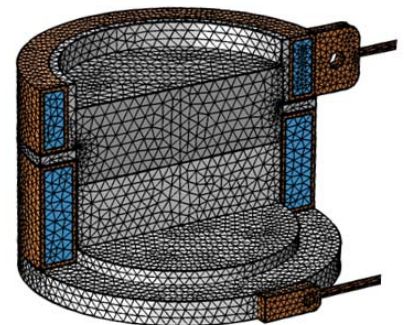


Рис. 2

Результати моделювання електромагнітних процесів. Моделювання виконувалося за таких вихідних даних: напруга живлення системи $U = V_s - V_0 = 40$ В, частота живлення $\nu = 50$ 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 (φ -компонента) 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.

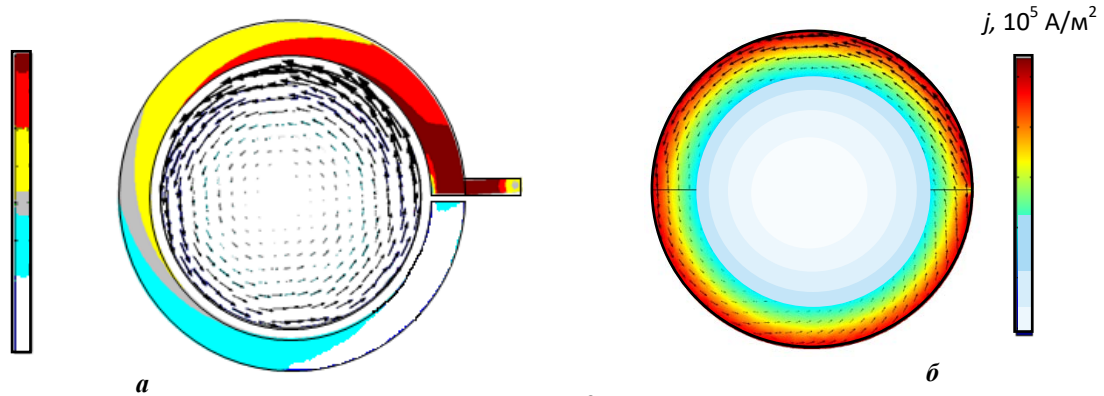


Рис. 3

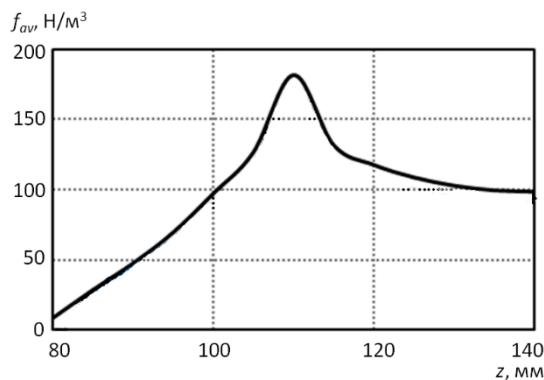


Рис. 4

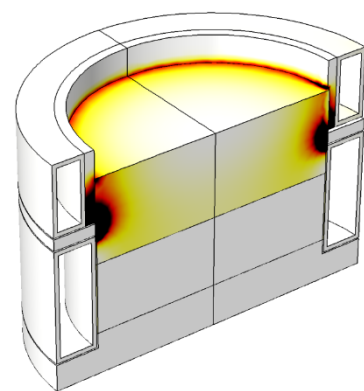


Рис. 5

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 , В	40	35...45
I , кА	2,33	1,6...2,2
P_{slag} , кВт	88,4	
P_{cs} , Вт	17...60	
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.: Metallurgiya, 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: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (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. Goryslavets¹, O.I. Bondar¹, V.M. Proskudin², Yu.M. Kuskov², S.V. Rymar², A.V. Netyaha²

¹Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,
56, Peremohy ave., Kyiv, 03057, Ukraine,

e-mail: yugoris@ukr.net.

²E.O. Paton Electric Welding Institute National Academy of Sciences of Ukraine,
11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine,

e-mail: elmag@paton.kiev.ua.

A three-dimensional mathematical model for the study of electromagnetic processes occurring in a sectional current-supply 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. *Avtomaticheskaja svarka*. 1958. No 11. Pp. 5-15. (Rus)
2. Latash Yu.V., Medovar B.I. Electroslag remelting. Moskva: Metallurgija, 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 elektrometallurgija*. 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 pipe-piercing 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: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (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