

УДК 621.3:519.876.5:621.745.56
DOI [https://doi.org/10.15589/znп2025.2\(500\).29](https://doi.org/10.15589/znп2025.2(500).29)

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION FEATURES IN THE MELT DURING ITS CONDUCTIVE ELECTRIC CURRENT PROCESSING USING EQUIVALENT ELECTRIC CIRCUITS

МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЯ У РОЗПЛАВІ ПРИ ЙОГО КОНДУКЦІЙНІЙ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ ОБРОБЦІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

Mykola V. Chestnykh
mykola.chestnykh@gmail.com
ORCID: 0000-0001-5553-8076
Artem V. Ivanov
artiomsan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3247-6121

М. В. Честних^{1,2},
аспірант, молодший науковий співробітник
А. В. Іванов²,
канд. техн. наук, старший науковий співробітник

¹*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

²*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*

¹*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

²*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

Abstract. The manufacture of metal products by foundry involves processing the melt by introducing certain reagents or exposing it to external physical fields to improve the characteristics of the casting. Physical or, as they are also called, energy methods include passing an electric current through the metal melt. The multi-parameter and multi-factor nature of the processes occurring in the melt when an electric current is applied significantly complicates the determination of effective processing modes. The basis of such processes is the primary electromagnetic field that arises when a current or currents are passed through the melt, and their analysis is primarily based on numerical modelling. However, the calculation of the spatial distribution of the electromagnetic magnetic field in a melt during its electric current treatment is a rather complex task. Therefore, the search for and development of relatively simple engineering methods that allow obtaining reliable and physically adequate calculation results for such fields is an important scientific and technical problem. The *purpose* of the work is to develop computational algorithms for modelling the electromagnetic field in a metal melt using electrical equivalent circuits. *Methodology.* The study was conducted using equivalent electric circuits to simulate the spatial distribution of the electromagnetic field in the melt, and finite element simulation to estimate the results. *Results.* It is shown that the developed approach with the use of equivalent electric circuits allows determining the electromagnetic field distribution in the melt with sufficient accuracy when an electric current is applied. *Practical significance.* The proposed approach allows for studying the electromagnetic fields in the melt during its electric current treatment with less time spent compared to the finite element method. This makes it possible to evaluate the modes of processing aluminum alloy melts and determine the most effective combinations in the system ‘shape of the container with the melt-types of currents-types of electrode systems’.

Key words: conductive electric current treatment; melt; electromagnetic field; modeling; electrical equivalent circuits; aluminum alloys.

Анотація. Виготовлення металевих виробів методами лиття передбачає обробку розплаву введенням певних реагентів або впливом зовнішніх фізичних полів для підвищення характеристик виливка. До фізичних, або, як їх ще називають, енергетичних методів, належить і пропускання через металевий розплав електричного струму. Багатопараметричність та багатофакторність процесів, що відбуваються у розплаві при пропусканні електричного струму значно ускладнюють визначення ефективних режимів обробки. Основою таких процесів є первинне електромагнітне поле, яке виникає при протіканні струму або струмів крізь розплави, а їх дослідження виконують, переважно, методами чисельного моделювання. Однак, розрахунок просторового розподілу електромагнітного магнітного поля у розплаві при його обробці електричним струмом є досить складним завданням. Тому пошук та розробка відносно простих інженерних методів, які при цьому дають змогу отримувати надійні та фізично адекватні процесам, що відбуваються, результати розрахунку таких полів, є актуальною науково-

технічною задачею. *Мета роботи* – розробка розрахункових алгоритмів для моделювання електромагнітного поля у металевому розплаві із застосуванням електричних схем заміщення. *Методика*. Дослідження виконано із застосуванням еквівалентних електричних кіл заміщення для моделювання просторового розподілу електромагнітного поля у розплаві, а також, імітаційне моделювання із застосуванням методу скінчених елементів для оцінки отриманих результатів. *Результати*. показано, що розроблений підхід із застосування еквівалентних електричних кіл дає змогу із достатньою точністю визначати розподіл електромагнітного поля у розплаві при пропусканні електричного струму. *Практична значимість*. Запропонований підхід дозволяє проводити дослідження електромагнітних полів у розплаві при його обробці електричним струмом при менших витратах часу, у порівнянні з методом скінчених елементів. Це дає змогу здійснювати оцінку режимів обробки розплавів алюмінієвих сплавів та визначати найбільш ефективні комбінації у системі «форма ємності з розплавом-типи струмів-типи електродних систем».

Ключові слова: кондукційна електрострумова обробка; розплав; електромагнітне поле; моделювання; електричні схеми заміщення; алюмінієві сплави.

ВСТУП

Енергетичний метод обробки розплаву, який засновано на безпосередньому пропусканні електричного струму через електроди-струмопідводи, є одним із сучасних методів покращення якості литих металовиробів у технологіях ливарного виробництва. У наш час, роботи у цьому напрямі активно ведуть дослідники з Китаю [1, 2], України [3], Німеччини [4], США [5], Південної Кореї [6] та інші [7, 8]. Проте такий метод кондукційної електрострумової обробки (КЕСО) ще не досяг стадії активного (широкого) впровадження у промисловість. Це обумовлено складнощами визначення значущих характеристик та факторів впливу, пошуку найдоцільніших енергетичних режимів обробки, масштабування та тиражування технології за умов отримання постійного (або стабільного) ефекту обробки через наявність багатомасштабних, взаємопов'язаних процесів, які відбуваються при проходженні струму через розплав. Як було зазначено в роботі [9], варіантів КЕСО розплаву може бути велика кількість. Тому, що для такої обробки можуть бути застосовані різні типи струмів (постійний, змінний, імпульсний) або їх комбінації при одночасній обробці різними типами струмів, різні типи електродних систем та різні геометричні форми ємностей з розплавом.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

Експериментальні дослідження багатьох можливих варіантів потребують значних витрат, тому дослідники застосовують різні методи моделювання процесів КЕСО для пошуку ефективних режимів електрострумової обробки розплаву. Основою мультифізичних процесів, що відбуваються при електрострумовій обробці є первинне електромагнітне поле, яке виникає при протіканні струму або струмів крізь розплав. Спираючись на характеристики електромагнітного поля, отримані при моделюванні можна прогнозувати, оцінювати та розраховувати вторинні (акустичні, теплові, гідродинамічні та ін.) поля, що генеруються та процеси (коливань, перемішування, нагріву і т.д.), що відбуваються при КЕСО.

Розрахунок просторового розподілу електромагнітного поля у розплаві при його обробці електричним струмом є досить складним та нетривіальним завданням [10, 11]. Тому пошук та розробка відносно простих інженерних методів, які при цьому дають змогу отримувати надійні та фізично адекватні процесам, що відбуваються, результати розрахунку таких полів, є актуальною науково-технічною задачею.

Мета роботи – розробка розрахункових алгоритмів для моделювання електромагнітного поля у металевому розплаві із застосуванням електричних схем заміщення

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для досягнення поставленої мети у роботі пропонується наступний підхід, який можна поділити на два етапи. Перший – «фізичний» етап, за яким область, що досліджується, розбивається на скінчену кількість комірок, які у свою чергу заміщуються електричними еквівалентними колами [12, 13]. Елементний склад і числові параметри таких схеми визначаються з урахуванням властивостей середовища. Далі для отриманої схеми для моделювання обробки електричним струмом у відповідні вузли підключаються джерела струмів. Після цього відбуваються розрахунок розподілу потенціалів та струмів у розплаві. На другому «польовому» етапі за допомогою отриманих розподілів розраховуються електричне та магнітне поля з використанням вже диференціальних та інтегральних числових методів. Для постійного струму електричне поле описується рівнянням:

$$E = -\nabla \cdot \varphi. \quad (1)$$

При застосуванні електричних схем заміщення воно може бути розраховане через потенціали вузлів за різницевиими формулами. Для розрахунку E_x та E_y складових поля на границях ємності застосовуються формули різниці вправо:

$$E_x = -\frac{\varphi_{x+1} - \varphi_x}{\Delta x}; \quad (2)$$

$$E_y = -\frac{\varphi_{y+1} - \varphi_y}{\Delta y}. \quad (3)$$

Для всіх інших застосовується центральна різниця, а саме

$$E_x = -\frac{\Phi_{x+1} - \Phi_{x-1}}{2\Delta x}; \quad (4)$$

$$E_y = -\frac{\Phi_{y+1} - \Phi_{y-1}}{2\Delta y}. \quad (5)$$

Визначати розподіл магнітного поля у розплаві пропонується наступним чином. Гілки схеми заміщення об'єднуються у прямокутні рамки зі струмом. Для кожної з таких рамок розраховується магнітне поле у їх центрах із застосування закону Біо-Савара.

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \times \hat{r}}{r^2}, \quad (6)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; dl – вектор довжини сегменту зі струмом; $\hat{r}$ – одиничний вектор, спрямований від сегмента струму до точки спостереження

Таким чином, застосування закону Біо-Савара, а також принципу суперпозиції дає можливість визначати магнітне поле в таких комірках.

Для розрахунку магнітного поля необхідно виконати наступні обчислювальні дії.

1. Спочатку кожна гілка кожної комірки розбивається на обрану кількість сегментів. Коли провідник розбивається на сегменти, то для кожного сегмента визначається координати його кінців.

Координати початку сегменту визначаються за формулами:

$$x_1(k) = x_1 + k \frac{x_2 - x_1}{N}; \quad (7)$$

$$y_1(k) = y_1 + k \frac{y_2 - y_1}{N}. \quad (8)$$

Координати кінця сегменту розраховуються наступним чином:

$$x_2(k) = x_2 + (k+1) \frac{x_2 - x_1}{N}; \quad (9)$$

$$y_2(k) = y_2 + (k+1) \frac{y_2 - y_1}{N}, \quad (10)$$

де k – індекс сегменту, N – кількість сегментів.

Наступним кроком є визначення векторів $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$, що направлені від початку та кінця сегмента до точки спостереження, а їх модулі дорівнюють відповідним відстаням.

$$\vec{r}_1 = (x_c - x_1(k), y_c - y_{s1}), \quad \vec{r}_2 = (x_c - x_1(k), y_c - y_{s1}). \quad (11)$$

Потім виконується нормування векторів $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$:

$$\hat{r}_1 = \frac{\vec{r}_1}{|\vec{r}_1|}, \quad \hat{r}_2 = \frac{\vec{r}_2}{|\vec{r}_2|}. \quad (12)$$

Вектор сегмента визначається за формулою:

$$\vec{l} = (x_{s2} - x_{s1}, y_{s2} - y_{s1}) \quad (13)$$

Тоді косинуси кутів між вектором сегмента та $\vec{r}_1$, $\vec{r}_2$ визначаються за формулами:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\vec{l} \cdot \vec{r}_1}{|\vec{l}| \cdot |\vec{r}_1|}, \quad \cos \alpha_2 = \frac{\vec{l} \cdot \vec{r}_2}{|\vec{l}| \cdot |\vec{r}_2|} \quad (14)$$

2. Для спрощення розрахунку, пропонується виконувати розрахунок вкладу кожного сегменту у поле лише в центрі обраної комірки. Коли знайдені всі необхідні складові, відбувається розрахунок магнітного поля від сегмента у точці спостереження.

$$dB_i = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2). \quad (15)$$

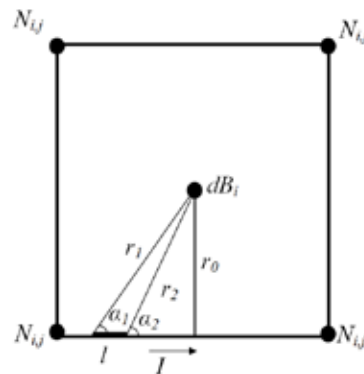


Рис. 1. Прямокутна комірка для розрахунку магнітного поля

N_{ij} – вузли схеми заміщення, l – сегмент провідника рамки зі струмом уздовж осі x , або y , r_1 – відстань від початку сегмента до точки спостереження, r_2 – відстань від кінця сегмента до точки спостереження, α_1 кут між r_1 та l , α_2 кут між r_2 та l , dB_i – вклад у магнітне поле в центрі рамки від сегменту зі струмом

3. Згідно з принципом суперпозиції, магнітне поле від одного провідника комірки визначається як сума вкладів всіх сегментів

$$B = \sum dB_i. \quad (16)$$

Поле від всіх гілок відповідної комірки визначається як сума їх вкладів з урахуванням напрямів струмів. Таким чином розраховуються магнітні поля в центрах кожної рамки;

Для оцінки необхідної кількості сегментів, на яку потрібно розбивати кожний провідник рамки зі струмом було проведено розрахунок величини магнітного поля у центрі рамки від одного провідника за різної кількості сегментів. Таким чином, поле розраховувалося у центрі квадрату зі стороною 2,5 мм від провідника по якому тече струм 10 А. Для розрахунку було застосовано розбиття провідника на 10, 15, 20, 25, 40, 50, 100, 1000 та 10 000 сегментів. Результати розрахунків наведено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що збільшення кількості сегментів більше ста не призводить до помітних змін у результуючому магнітному полі, а отже й немає необхідності у подальшому підвищенні кількості сегментів.

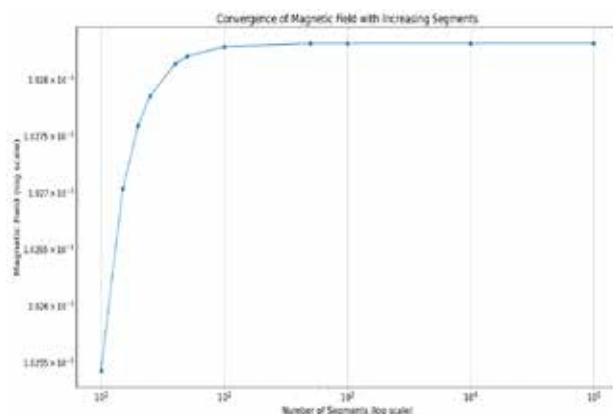


Рис. 2. Залежність магнітного поля у центрі рамки зі струмом від кількості сегментів, на які розбивається провідник

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

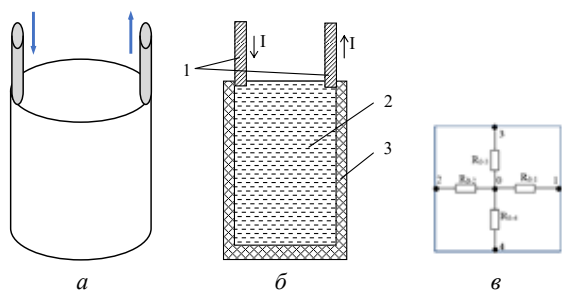


Рис. 3. Геометрична модель задачі: а – циліндрична ємність з розплавом; б – переріз у площині підведення електродів; в – електрична схема заміщення однієї комірки; 1 – електроди; 2 – розплав; 3 – тигель із матеріалу з високим питомим опором

Для аналізу обрано переріз циліндричної форми із розплавом в площині підведення електродів (рис. 3,б) за умови використання двохелектродної системи. Площина розбивалась на 400 комірок, вид яких наведено на рис. 3,в. Для аналізу електромагнітного поля постійного струму застосовано схему, що містить тільки резистивні елементи. Числові значення опорів схеми заміщення визначалось за формулами 9, 10.

$$R_x = \rho_{Al} \cdot (a/(b \cdot c)) \quad (17)$$

$$R_y = \rho_{Al} \cdot (b/(a \cdot c)) \quad (18)$$

де a, b, c – розміри комірки, м, ρ_{Al} – питомий опір алюмінію за температури 1000 °K.

Електричний постійний струм величиною 100 А підводився до верхніх вузлових точок схеми заміщення. Схема заміщення будувалась за допомогою алгоритму на мові python, блок-схему якого наведено на рис. 4. У даному випадку застосовувались лише резистивні елементи для схеми заміщення. Результатом роботи алгоритму є лист з'єднань для програмного продукту LtSpice, в якому відбувалось моделювання електричної схеми. Наступним кроком було використання отриманих у LtSpice розподілів струмів

і потенціалів для розрахунку електричного і магнітного полів описаним раніше підходом.



Рис. 4. Блок-схема алгоритму, який створює електричну схему заміщення у вигляді листа з'єднань для програми LtSpice

АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Результати розрахунків наведено на Рис. 6–10. На рис. 5 наведено кольорову гаму B_z складової магнітного поля у розплаві. Видно, що області найбільших значень вектору магнітної індукції знаходяться біля електродів і спадають з віддаленням від них. Розподіл магнітного поля симетричний.

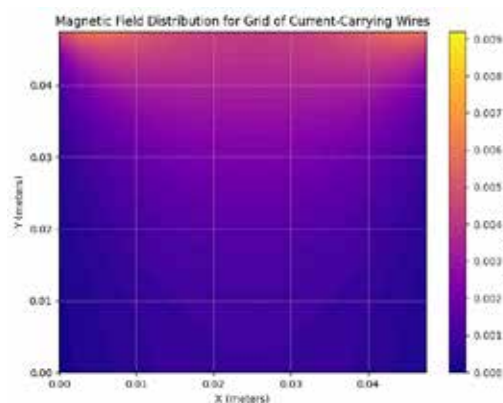
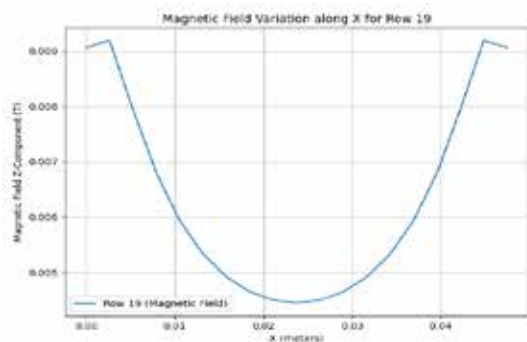
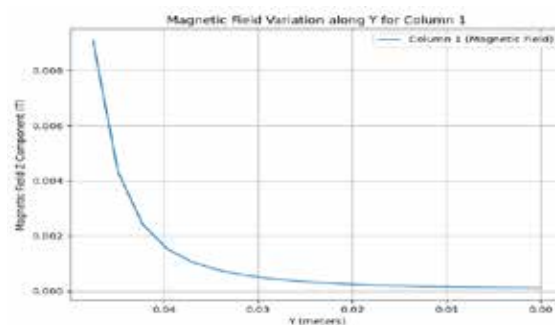


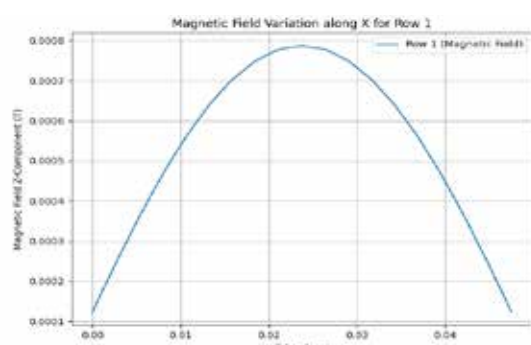
Рис. 5. Кольорова гама магнітного поля у розплаві у площині підведення електродів



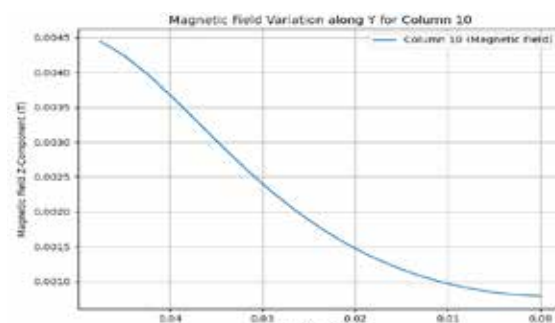
а



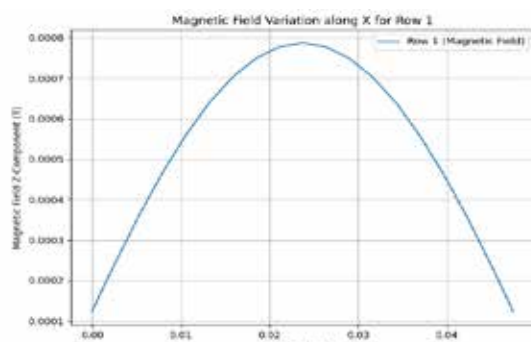
а



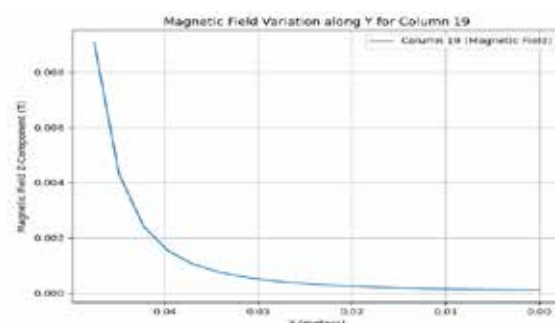
б



б



в



в

Рис. 6. Розподіл B_z -складової вектору магнітної індукції уздовж осі x :

а – на поверхні, б – в середині ємності, в – на дні

Рисунок 6 відображає розподіл B_z складової уздовж осі x на поверхні ємності з розплавом (а), в центрі ємності (б) та на дні (в). Видно, що вже у центрі ємності поле спадає майже у 5 разів, а на дні вже на порядок порівняно з поверхнею, де протікає найбільший струм. Схожа картина і уздовж осі y (рис. 7).

На рис. 8 показано розподіл E_x складової електричного поля, – рис. 9. E_y , а на рис. 10 – векторний розподіл електричного поля. Видно, що максимальні значення E_x відповідають місцям підведення електродів, і поле значно зменшується з віддаленням від них. Так уздовж осі x для поверхні розплаву у центрі ємності поле спадає у 4,5 рази. Для центру та дна ємності мінімальні значення спостерігаються біля стінок форми і поле зростає ближче до центру.

Рис. 7. Розподіл B_z складової вектору магнітної індукції поля уздовж осі y на відстані мм від стінки ємності з розплавом:

а – біля лівої стінки ємності, б – у центрі, в – біля правої стінки ємності

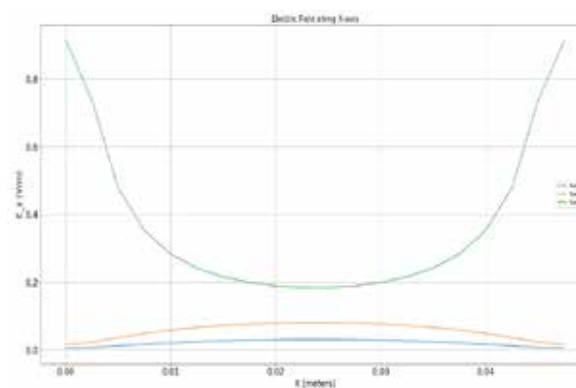


Рис. 8. E_x складова електричного поля на поверхні, в центрі та на дні площини перетину

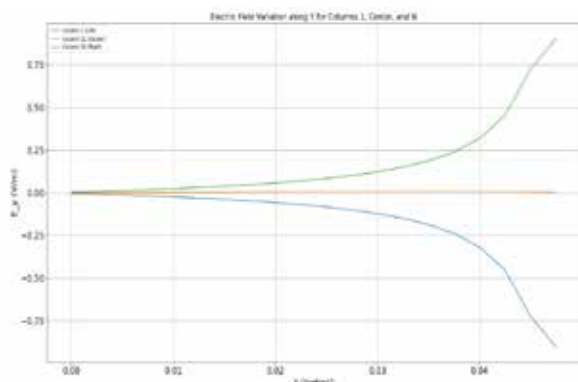


Рис. 9. E_y складова електричного поля на поверхні, в центрі та на дні площини перетину

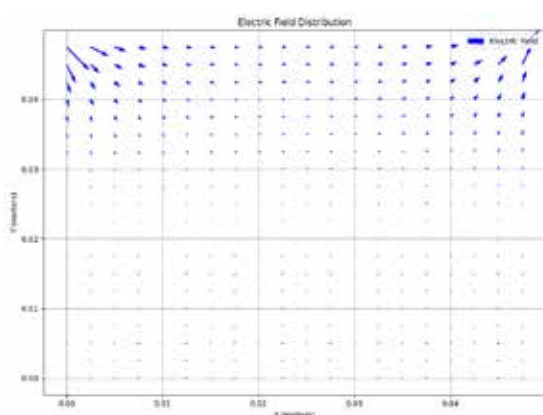


Рис. 10. Розподіл векторного поля

Для якісної та кількісної оцінки результатів розрахунків характеристик розподілу електромагнітного поля отриманих із застосуванням електричних схем заміщення проведемо моделювання еквівалентної геометричної моделі із застосуванням методу скінчених елементів (МСЕ). У якості початкових умов у такому випадку візьмемо значення потенціалів, які отримано із електричної схеми для місць підведення електродів.

Результати розрахунків представлено на рис. 11–13.

Як можна побачити просторові картини розподілу характеристик електромагнітного поля та їх числові значення співпадають у межах допустимих похибок. Тому можна стверджувати, що запропоновані розрахункові алгоритми для застосування еквівалентних електричних кіл можна використовувати як для власних розрахунків числових та просторових характеристик електромагнітних полів, так і комбінувати з іншими методами, наприклад МСЕ. В роботі наведено результати тільки для 2D задачі, проте такий підхід може бути розширеним і на 3D без значних ускладнень. Моделювання процесів КЕСО розплаву із застосуванням як еквівалентних електричних кіл, так і МСЕ дає змогу підвищити точність отриманих результатів, а також уникнути деяких недоліків, що притаманні кожному із методів. Подальші

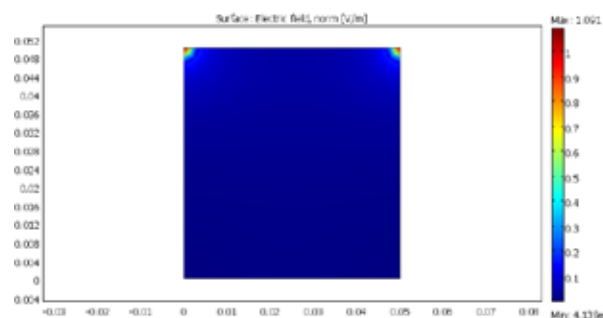


Рис. 11. Кольорова гамма електричного поля у розплаві, отримана із застосуванням МСЕ

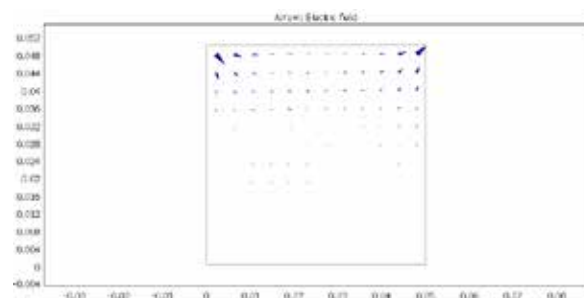


Рис. 12. Розподіл векторного електричного поля у площині підведенні електродів, отриманий із застосуванням МСЕ

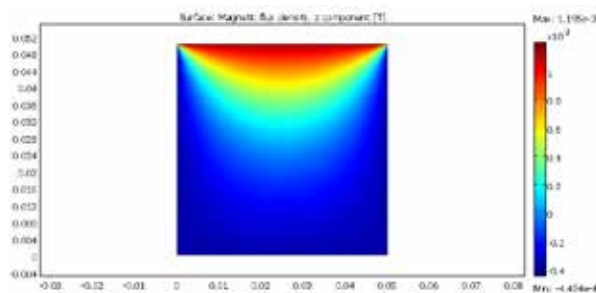


Рис. 13. Кольорова гамма магнітного поля у розплаві, отримана із застосуванням МСЕ

дослідження, на думку авторів, слід направити на створення і розвиток гібридних моделей із одночасним застосуванням еквівалентних електричних кіл та МСЕ для дослідження мультифізичних процесів, що виникають при КЕСО розплавів різними типами струмів (як окремо, так і одночасно).

ВИСНОВКИ

1. У роботі розроблено розрахункові алгоритми для моделювання електромагнітного поля у металевому розплаві при його обробці електричним струмом із застосуванням електричних схем заміщення.

2. Результати розрахунків за даним алгоритмом було протестовано шляхом порівняння з результатами, отриманими методом скінчених елементів. Показано, що просторові картини розподілу характеристик електромагнітного поля та їх числові значення співпадають у межах допустимих похибок.

3. Запропонований інженерний підхід, заснований на комбінуванні методів еквівалентних електричних кіл та інтегральних рівнянь дає змогу визначати розподіл електромагнітного поля у розплаві при менших витратах часу у порівнянні з чисельними методами. Його використання має допомогти пошуку та визначенню найдоцільніших режимів обробки.

4. Комбінування з методами, заснованими на рішенні задач у часткових похідних, як, наприклад, метод скінчених різниць, при моделюванні

електромагнітних та інших полів, що генеруються при КЕСО, дасть змогу підвищити точність отриманих результатів, а також уникнути деяких недоліків, що притаманні кожному із методів.

5. Подальший розвиток запропонованого підходу полягає у створенні гібридних моделей із одночасним застосуванням методів еквівалентних електричних кіл, інтегральних рівнянь та скінчених елементів для дослідження мультифізичних процесів, що виникають у рідкому металі при його електрострумовій обробці.

REFERENCES

- [1] Li, Y., Jiang, H., Sun, H., Zhang, L., He, J., and Zhao, J. (2023). Microstructure Evolution of the Pb–Al Alloy Solidified Under the Effect of Electric Current Pulses. *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 54, № 5, 2564–2574. doi:10.1007/s11663-023-02857-7.
- [2] Guo, J., Wang, F., Zhang, S., Zhou, Y., & Zhu, L. (2024). Effect of High-Frequency Electric Pulse on the Solidification Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al–Si Alloy. *Materials*, Vol. 17, № 2, 468. <https://doi.org/10.3390/ma17020468>
- [3] Prigunova, A.G., Koshelev, M.V., & Borisov, A. (2024). Primary silicon formation in hypereutectic alloy Al – 16.5% wt. Si treated in the liquid state by a changing unipolar pulsed electric current. *Materials Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/02670836241289037>
- [4] Rübiger, D. (2016). Experimental study on directional solidification of Al–Si alloys under the influence of electric currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 143(1), 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012021
- [5] Goettsch, J., Gladstein, A., Weiss, D., Shahani, A., Taub, A. (2023). Secondary Phase Refinement in Molten Aluminum via Low Power Electric Current Processing. In: Broek, S. (eds) *Light Metals 2023*. TMS 2023. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_61
- [6] Choi, S.J., Kim, D., La, M. et al. (2023). Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification. *Sci. Rep.* Vol. 13, 3382. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y>
- [7] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y. et al. (2021). Investigating the Grain Refinement Mechanisms of Pulsed Electric Current, Ultrasonic and Melt Stirring Solidification of Pure Aluminium. *JOM*. Vol. 73, 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [8] Gui Wang, Matthew Dargusch, Mark Easton, David StJohn (2018). *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Chapter 9 –Treatment by External Fields, 279–332.
- [9] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu. M., Zhdanov, O.O., Chestnykh, M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60, 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [10] Tsurkin, V.M., Petrychenko, S.V., Sadovoy, O. S. (2024). Problems of the methodology of research of processes and phenomena in the energy treatment of liquid metal system. *Collection of Scientific Papers of Admiral Makarov National University of Shipbuilding*. № 4, 123–130. [https://doi.org/10.15589/znп2024.4\(497\).18](https://doi.org/10.15589/znп2024.4(497).18) [in Ukrainian]
- [11] Zaporozhets, Y., Batechko, N., Shostak, S., Shkoda, N., & Dibrivna, E. (2020). Features of mathematical modeling of electromagnetic processing of bulk materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3, № 5, 49–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206705>
- [12] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences. 304 p.
- [13] Chestnykh, M.V., Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V. (2021). Simulation of the electric field distribution in a metal melt by the method of dividing a conductor into elemental cells. *Electromechanical and energy saving systems*. Vol. 56, № 4, 34–45. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.4.56.35-45 [in Ukrainian]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Li, Y., Jiang, H., Sun, H., Zhang, L., He, J., and Zhao, J. (2023). Microstructure Evolution of the Pb–Al Alloy Solidified Under the Effect of Electric Current Pulses. *Metallurgical and Materials Transactions B*. Vol. 54, № 5, pp. 2564–2574. doi:10.1007/s11663-023-02857-7
- [2] Guo, J., Wang, F., Zhang, S., Zhou, Y., & Zhu, L. (2024). Effect of High-Frequency Electric Pulse on the Solidification Microstructure and Properties of Hypoeutectic Al–Si Alloy. *Materials*. Vol. 17, № 2, 468. <https://doi.org/10.3390/ma17020468>
- [3] Prigunova, A.G., Koshelev, M.V., & Borisov, A. (2024). Primary silicon formation in hypereutectic alloy Al – 16.5% wt. Si treated in the liquid state by a changing unipolar pulsed electric current. *Materials Science and Technology*. <https://doi.org/10.1177/026708362412890>
- [4] Rübiger, D. (2016). Experimental study on directional solidification of Al–Si alloys under the influence of electric currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 143, № 1. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012021

- [5] Goettsch, J., Gladstein, A., Weiss, D., Shahani, A., Taub, A. (2023). Secondary Phase Refinement in Molten Aluminum via Low Power Electric Current Processing. In: Broek, S. (eds) *Light Metals 2023*. TMS 2023. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-22532-1_61
- [6] Choi, S.J., Kim, D., La, M. et al. (2023). Effect of cavity shape on microstructural evolution of pure aluminum in electrically-assisted solidification. *Sci. Rep.* 13, 3382. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-29522-y>
- [7] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y. et al. (2021). Investigating the Grain Refinement Mechanisms of Pulsed Electric Current, Ultrasonic and Melt Stirring Solidification of Pure Aluminium. *JOM*. Vol. 73. Pp. 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [8] Gui Wang, Matthew Dargusch, Mark Easton, David StJohn (2018). *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Chapter 9 –Treatment by External Fields. Pp. 279–332.
- [9] Tsurkin, V.M., Ivanov, A.V., Zaporozhets, Yu. M., Zhdanov, O.O., Chestnykh M.V. (2024). Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 60. Pp. 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [10] Цуркін, В.М., Петриченко, С.В., Садовий, О.С. (2024). Проблематика методології досліджень процесів і явищ при енергетичній обробці рідкометалевої системи. *Збірник наукових праць НУК*. № 4. С. 124–130. [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).18](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).18)
- [11] Zaporozhets, Y., Batechko, N., Shostak, S., Shkoda, N., & Dibrivna, E. (2020). Features of mathematical modeling of electromagnetic processing of bulk materials. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3. № 5, pp. 49–59. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206705>
- [12] Подольцев, О.Д., Кучерява, І.М. (2015). Мультифізичне моделювання в електротехніці. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. 305 с.
- [13] Честних, М.В., Цуркін, М.В., Іванов, А.В., Черно, О.О. (2021). Моделювання розподілу електричного поля в металевому розплаві методом розбиття провідника на елементарні комірки. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. № 4 (56). С. 35–45. DOI: 10.30929/2072-2052.2021.4.56.35-45

© Честних М. В., Іванов А. В.

Дата надходження статті до редакції: 31.03.2025

Дата затвердження статті до друку: 03.05.2025