

УДК 519.876.5:621.3.014.1:536.3

DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).14](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).14)

INVESTIGATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD CHARACTERISTICS BY SIMULATION MODELLING IN MULTI-ELECTRODE SYSTEMS USING CURRENT SUPERPOSITION IN MELT TREATMENT

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ МЕТОДАМИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ У БАГАТОЕЛЕКТРОДНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ СУПЕРПОЗИЦІЇ СТРУМІВ ПРИ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВІВ

Artem V. Ivanov¹

artiomsan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3247-6121

Andrii V. Obrubov²

andrii.obrubov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9667-1703

Marina V. Turty²

turtymarina3@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3442-9679

Iryna L. Vinnychenko²

i.l.vinnychenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3768-1060

Volodymyr M. Ryabenkiy²

optron2@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6998-746X

Oleksandr O. Ushkarenko²

oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3159-330X

Eugen M. Vereshchago²

venmkua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4370-7706

А. В. Іванов¹,

канд. техн. наук, ст. наук. співр.

А. В. Обрубов²,

д-р техн. наук, доцент

М. В. Турти²,

канд. техн. наук, доцент

І. Л. Вінніченко²,

канд. техн. наук, доцент

В. М. Рябенський²,

д-р техн. наук, професор

О. О. Ушкаренко²,

д-р техн. наук, професор

Є. М. Верещаго²,

канд. техн. наук, доцент

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies The National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*¹*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв*²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. To improve the quality of cast metal in foundry technologies use various electrotechnological methods of the melt treatment. One of them is the method of conductive electric current treatment (CECT) with different types of currents simultaneously. This approach allows to significantly expand the functionality of melt treatment with electric current. But, in this case, there is a problem of taking into account various modifications of the parameters of the system «types of currents-types of electrode systems». Methods of simulation modeling of the CECT processes by different types of currents simultaneously allow to initially determine the most effective options for their combination. Taking into account the complexity of the CECT processes, it is logical to apply simplified modeling approaches at the first stage to determine possible scenarios of their development. The following research objective is relevant. By the methods of mathematical modeling in the azimuthal 2D formulation, to determine the features of the electromagnetic field distribution and characteristics of the force effect in the melt of a hypoeutectic aluminum-silicon alloy when it is treated by a superposition of electric currents with using multi-electrode systems. The application for simultaneous processing of three types of currents was investigated: AC, DC, and their superposition (S) with two types of electrode systems. Two pairs of electrodes located at the same distance almost in the center of the molten metal container, and spaced pairs of electrodes. The Maxwell and Navier-Stokes systems of equations were used for modeling. The obtained results showed a significant qualitative difference for the case of a four-electrode system in the formation of both the

basic electric and magnetic fields and the field of action of the electromagnetic force. In all cases, the fields observed are essentially non-potential. Changing only the type of electrode system makes it possible to significantly change the spatial configuration of the electromagnetic field, and thus the field of forces and, consequently, the flows, without additional energy expenditure. A quantitative analysis of the electromagnetic field characteristics showed that when AC and DC are used simultaneously, in contrast to DC and DC, regardless of the type of electrode system, an oscillatory mode with signs of resonance for the magnetic field strength is formed in the center of the tank due to out-of-phase different-frequency currents. For S and DC, the impulse current (IS) reduces the low-frequency oscillations of DC, increasing the amplitude of the magnetic field strength. Thus, for practical use can be recommended the AC and DC, as well as S and DC currents combinations. In the experimental work [9], these types of currents showed a significant increase in the properties of the casting.

Key words: electric current treatment; aluminum-silicon alloys; metal melt; simulation modeling; electromagnetic field topology; types of electrode systems.

Анотація. Для поліпшення якості литого металу у технологіях ливарного виробництва виконують обробку розплаву різними електротехнологічними методами. Одним із них є метод кондукційної електрострумової обробки одночасно різними типами струмів (М-С). Такий підхід дозволяє суттєво розширити функціональні можливості обробки розплаву електричним струмом. Але, у цьому випадку виникає проблема врахування різних модифікацій параметрів системи «типи струмів – типи електродних систем». Методи імітаційного моделювання процесів для М-С дозволяють первинно визначити найбільш ефективні варіанти їх сполучення. Враховуючи складність процесів при М-С, для визначення можливих сценаріїв їх розвитку, на першому етапі логічно застосовувати спрощені підходи до моделювання. Актуальною, при цьому, постає наступна **мета** досліджень. Методами математичного моделювання в азимутальній 2D постановці визначити особливості розподілу електромагнітного поля та характеристик силового впливу в розплаві ливарного доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву при обробці його суперпозицією електричних струмів при використанні багатоелектродних систем. Досліджувалось застосування для одночасної обробки трьох типів струмів: AC, DC та їх суперпозиція (S) при двох типах електродних систем. Дві пари електродів, розташованих на однаковій відстані практично у центрі ємності з розплавом, та різнорознесені пари електродів. Для моделювання використовували систему рівнянь Максвелла та Нав'є – Стокса. Отримані результати показали суттєву якісну різницю для випадку чотириелектродної системи у процесі формування як базових електричного і магнітного поля, так і поля дії електромагнітної сили. В усіх випадках спостерігаються суттєво непотенціальні поля. Зміна тільки типу електродної системи дає змогу без додаткових енерговитрат суттєво змінювати просторову конфігурацію електромагнітного поля, а, значить, поля сил та, відповідно, течій. Кількісний аналіз характеристик електромагнітного поля показав, що при одночасному застосуванні AC та DC, на відміну від DC та DC, незалежно від типу електродної системи, у центрі ємності формується коливальний режим з ознаками резонансу для напруженості магнітного поля за рахунок не синфазних різночастотних струмів. Для S та DC імпульсний струм (I_S) згладжує низькочастотні коливання DC, збільшуючи амплітуду напруженості магнітного поля. Таким чином, для практичного використання можна рекомендувати застосування струмів AC та DC, а також S та DC. У експериментальній роботі [9] саме ці типи струмів показали суттєве підвищення властивостей виливка.

Ключові слова: електрострумова обробка; алюмінієво-кремнієві сплави; металевий розплав; імітаційне моделювання; топологія електромагнітного поля; типи електродних систем.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Для поліпшення якості структури та властивостей литого металу у технологіях ливарного виробництва виконують обробку розплаву із застосуванням різних електротехнологічних методів [1]. Одним із них є метод кондукційної електрострумової обробки різними типами струмів у рідкому стані або під час кристалізації [1–4]. Сферою початкового впливу на розплав з фізичної точки зору є первинне електромагнітне поле (ЕМП), яке є завжди неоднорідним та має неоднорідну топологію і генерується безпосередньо за допомогою різних типів електродів. Його дія на розплав спричиняє термічний, гідродинамічний та акустичний впливи, крім того, утворюються течії рідкого металу. Одночасне врахування комплексу таких

впливів на розплав може бути зроблено тільки в рамках мультифізичного моделювання [5]. Для цього на цей час активно використовують імітаційне моделювання – чисельний експеримент, але за умов певного спрощення постановки задач [6, 7].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Аналіз існуючих публікацій показав, що переважна більшість робіт присвячена обробці одним типом струму за допомогою пари паралельних електродів. Результат такої обробки залежить від типу струму [7] та типу і геометрії електродної системи [8] Застосування ж для обробки розплаву методу кондукційної електрострумової обробки розплаву одночасно різними типами струмів (М-С) із використанням різних

типів електродних систем може забезпечити більш високі показники якості литого металу без додаткових енерговитрат [9]. Тому актуальним є дослідження обробки розплаву сплаву на основі алюмінію одночасно декількома струмами із застосуванням чотириелектродних систем різної геометрії.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Мета роботи: методами математичного моделювання в азимутальній 2D постановці визначити особливості розподілу електромагнітного поля та характеристик силового впливу в розплаві ливарного доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву при обробці його суперпозицією електричних струмів при використанні багатоелектродних систем.

ОСНОВНИЙ МАТЕРІАЛ

Кондукційна електрострумова обробка розплаву (КЕСО) одним типом струму спіткається з певною кількістю проблем, які пов'язані з тим, що у цьому випадку потрібно досліджувати генерування багатопараметричних, багатфункціональних взаємопов'язаних мультифізичних процесів [5] у нерівноважному об'єкті обробки, який також має мультифізичні ознаки. Нажаль, на даний час складно визначити сильні та слабкі зв'язки між цими процесами, що є обов'язковим при розв'язуванні мультифізичних задач та системного підходу. У цьому випадку ми маємо поки що погано визначену та не структуровану певним чином систему [10]. Тому дослідники поки що для імітаційного моделювання використовують спрощені підходи, аналізуючи можливі сценарії розвитку процесів термосилового навантаження розплаву за умов його електрострумової обробки.

У випадку М-С в об'єкті обробки потенційно можливо утворювати декілька десятків ситуацій термосилового навантаження [9]. Тому на даному етапі логічно першими кроками показати на прикладі окремих варіантів системи «типи струмів – типи електродних систем» потенційні можливості досягати сприятливих умов та факторів такого застосування новаційного М-С. У цьому випадку, для процесів, які супроводжують М-С, отримуємо додаткову інформацію до результатів, що їх викладено у роботі [9]. Це надасть змогу визначити більш обґрунтовані практичні рекомендації стосовно М-С.

Для моделювання мультифізичних процесів, які виникають при проходженні електричного струму крізь рідкометалевий провідник, розв'язувалася система з рівнянь Максвелла та Нав'є-Стокса. Для дослідження топології електромагнітних полів у розплаві для випадку чотириелектродної системи застосуємо азимутальну постановку задачі.

Змінний струм формалізовано формулою: $I_{AC}=I_0 \cdot \sin(2\pi \cdot t/T)$, пульсуючий випрямлений: $I_{DC}=I_0 \cdot \sin^2(2\pi \cdot t/T)$. Струм, утворений суперпозицією струмів у випадку застосування пари електродів:

$I_s=(I_0/2) \cdot \sin(2\pi \cdot t/T_u)+(I_0/2) \cdot \sin^2(2\pi \cdot t/T_u)$. Варіювання періодом T_u фактично дасть нам у першому наближенні реалізувати послідовність імпульсів струму зі скважністю 50 % за умов, якщо частота АС дорівнює 50 Гц, а DC – 100 Гц. Прийнемо, що амплітудні значення струмів при моделюванні у всіх випадках будуть дорівнювати $I_0=20$ А, прийнемо, що період $T=0,02$ с, період $T_u=0,001$ с, час моделювання $t=0,04$ с, інтервал розбиття $\Delta t=10$ мкс. Розрахунки виконували для рідкого ливарного доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву типу АК7, для якого густина $\rho=2200$ кг/м³, питома електропровідність $\sigma=4,123 \cdot 10^6$ См/м.

На рис. 1, а представлено перший варіант геометрії електродної системи. Символ х позначає вхід струму, а символ ● – вихід. На рис. 1, б наведено інший варіант чотириелектродної системи, для порівняння проведено моделювання ситуації I_{AC} та I_{DC} .

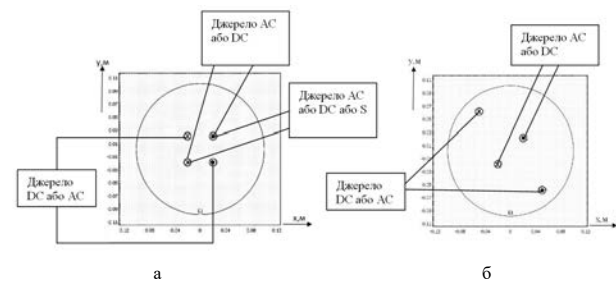
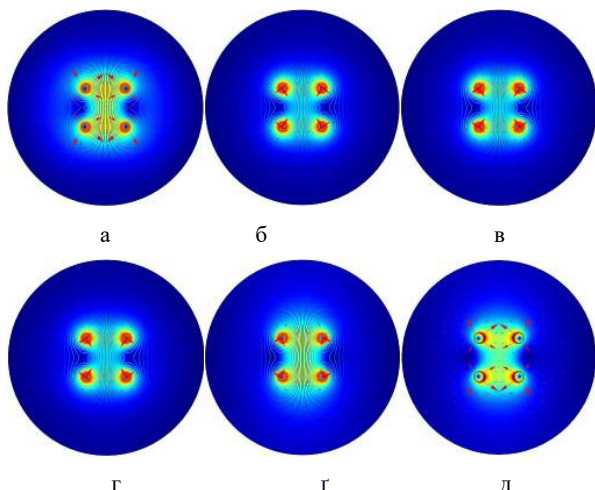


Рис. 1. Геометрична модель задачі

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

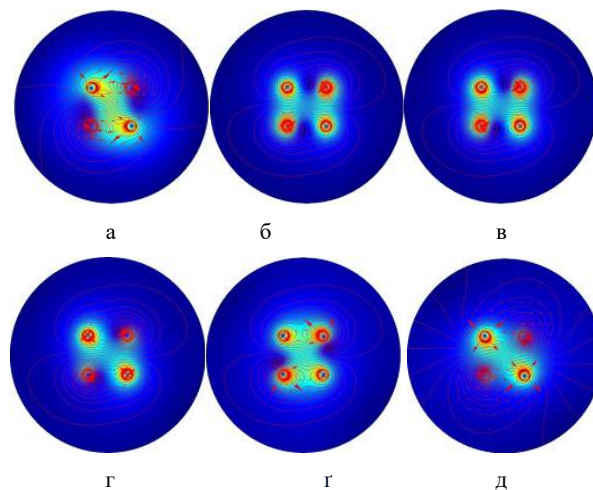
На рис. 2 – рис. 4 репрезентовано загальний розподіл характеристик базового електричного та магнітного полів, а також електромагнітної сили на площині перерізу, що охоплює електроди. Розрахунки виконувались для комбінацій струмів I_{DC} та I_{AC} , I_{AC} та I_{DC} , I_s та I_{DC} та розташуванні електродної системи рис. 1 (а). На рис. 5 представлено такі ж характеристики для комбінацій струмів I_{AC} та I_{DC} і електродної системи рис. 1 (б).

Із даних, наведених на рис. 2 – рис. 5, можна бачити суттєву якісну різницю для випадку чотириелектродної системи у процесі формування як базових електричного і магнітного поля, так і поля дії електромагнітної сили. В усіх випадках одночасного застосування різних струмів спостерігаються суттєво не потенціальні поля. Варіювання тільки електродною системою дає змогу без додаткових енерговитрат змінювати просторову конфігурацію електромагнітного поля, а, значить, поля сил та, відповідно, течій. Також якісні дані на рис. 2 – рис. 5, дозволяють припустити у разі чотириелектродної системи, що результуюче електромагнітне поле, а також результат його взаємодії із середовищем не є результатом дії алгебраїчної суми струмів, а визначається суперпозицією полів, які генеруються в розплаві кожним із струмів для кожної пари електродів.



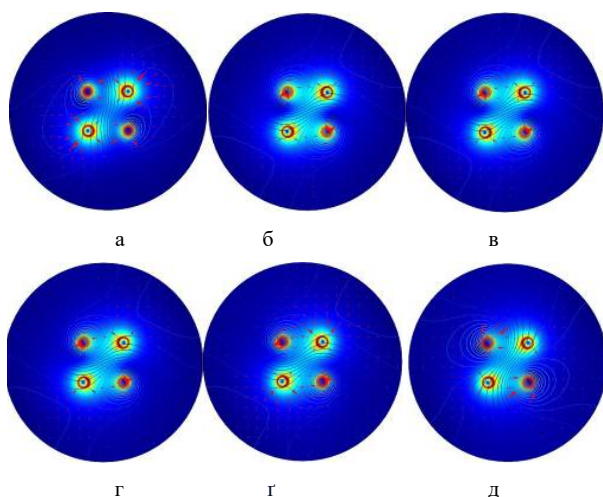
а – $t=0,005$ с; б – $t=0,01$ с; в – $t=0,011$ с; г – $t=0,0125$ с;
г – $t=0,015$ с; д – $t=0,02$ с

Рис. 2. Результати моделювання напруженості магнітного поля (кольорова гама (H)) та електромагнітної сили (стрілки ($\vec{F}_{EM}$)) для комбінацій струмів I_{DC} та I_{DC} , (розташування № 1)



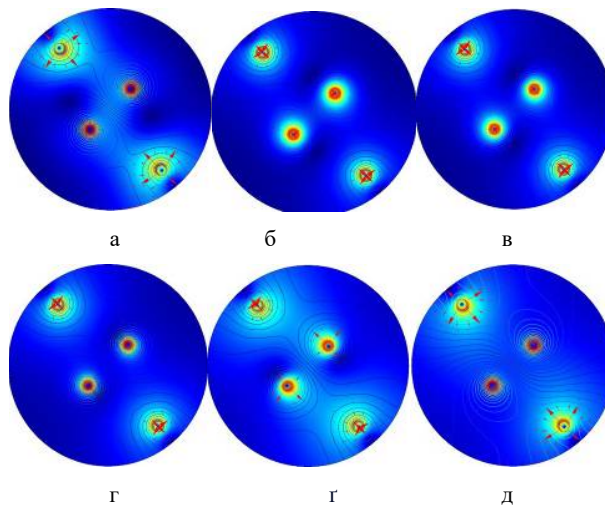
а – $t=0,005$ с; б – $t=0,01$ с; в – $t=0,011$ с; г – $t=0,0125$ с;
г – $t=0,015$ с; д – $t=0,02$ с

Рис. 3. Напруженості магнітного поля (кольорова гама (H)) та електромагнітної сили (стрілки ($\vec{F}_{EM}$)) для комбінацій струмів I_{AC} та I_{DC} , (розташування № 1)



а – $t=0,005$ с; б – $t=0,01$ с; в – $t=0,011$ с; г – $t=0,0125$ с;
г – $t=0,015$ с; д – $t=0,02$ с

Рис. 4. Результати моделювання напруженості магнітного поля (кольорова гама (H)) та електромагнітної сили (стрілки ($\vec{F}_{EM}$)) для комбінацій струмів I_S та I_{DC} (розташування № 1)



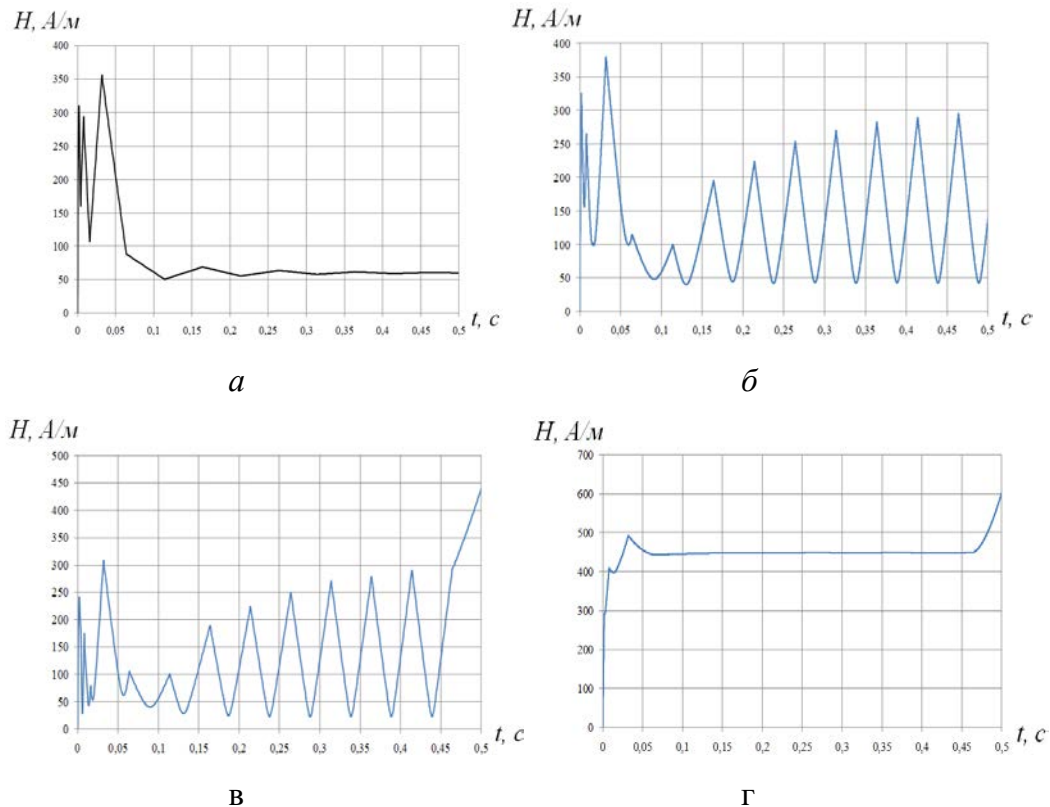
а – $t=0,005$ с; б – $t=0,01$ с; в – $t=0,011$ с; г – $t=0,0125$ с;
г – $t=0,015$ с; д – $t=0,02$ с

Рис. 5. Результати моделювання напруженості магнітного поля (кольорова гама (H)) та електромагнітної сили (стрілки ($\vec{F}_{EM}$)) для комбінації струмів I_{AC} та I_{DC} (розташування № 2)

Для кількісної оцінки характеристик які виникають у розплаві полів у випадку застосування чотириелектродної системи наведемо часові залежності магнітного поля у точці з координатами (0,0) за проміжок часу від 0 до 0,5 с. Результати представлено відповідно на рис. 6.

У випадку застосування AC та DC, на відміну від DC та DC, незалежно від типу електродної системи, у центрі ємності формується коливальний режим

з ознаками резонансу для $H(t)$ за рахунок не синфазних різночастотних струмів. У випадку застосування S та DC імпульсний струм (I_S) згладжує низькочастотні коливання DC, збільшуючи амплітуду $H(t)$. Таким чином для практичного використання можна рекомендувати застосування струмів AC та DC, а також S та DC. У експериментальній роботі [9] саме ці типи струмів показали суттєве підвищення властивостей виливка.



$a - I_{DC}$ та I_{DC} , розташування № 1, $б - I_{AC}$ та I_{DC} , розташування № 1 в $-I_{AC}$ та I_{DC} , розташування № 2, $г - I_S$ та I_{DC} , розташування № 1

Рис. 6. Часові залежності магнітного поля у точці з координатами (0,0)

ВИСНОВКИ

1. Чисельним моделюванням в азимутальній 2D постановці визначено особливості розподілу електричного та магнітного полів та характеристик силового впливу у розплаві ливарного доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву при його одночасній обробці різними типами струму з використанням чотириелектродних систем різних типів.

2. Висунуто гіпотезу про те, що при використанні багатоелектродних систем результуюче електромагнітне поле не є результатом дії алгебраїчної суми

струмів, які вводяться в розплав, а результатом суперпозиції їх полів.

3. Розрахунки характеристик електромагнітного поля показали, що для практичного використання можна рекомендувати застосування струмів AC та DC, а також S та DC. У експериментальній роботі [9] саме ці типи струмів показали суттєве підвищення властивостей виливка.

4. Просторова конфігурація електродних систем при незмінних типах струмів надає змогу активно керувати розподілом характеристик електромагнітного поля у розплаві, яке визначає характеристики його термосилового навантаження.

REFERENCES

- [1] 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*, 73, 3873–3882 <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [2] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Materials Science and Technology*, 38(4), 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [3] Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, Soong-Keun Hyun, Moon-Jo Kim (2021). Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum. *Journal of materials research and technology*, 12, 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.040>
- [4] Yanyi Xu, Yunhu Zhang, Tianqing Zheng, Yongyong Gong, Changjiang Song, Hongxing Zheng and Qijie Zhai. (2021). Evolution of melt convection in a liquid metal driven by a pulsed electric current. *Chinese Phys. B*, 30 (3) <http://doi.org/10.1088/1674-1056/ac0a6c>

- [5] Podoltsev A.D., Kucheryavaya I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences.
- [6] Tsurkin V.M., Ivanov A.V. (2018). Peculiarities of Redistribution of Electric and Thermal Fields at the Interface When Passing the Electric Current through the Melt *Surf. Eng. Appl. Electrochem.* Vol. 54, №6. pp. 577–584.
- [7] Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M., The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. In: *Advances in Engineering Research*, Petrova V.M., Ed., 44, 2021. New York: Nova Science Publishers, 1–114.
- [8] Jianhong Ma, Jie Li, Yulai Gao, Qijie Zhai. (2009). Grain refinement of pure Al with different electric current pulse modes. *Materials Letters*, 63(1), 142–144. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.036>
- [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*, 60(1), 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>.
- [10] Starish O.H. (2005). *Sistemolohiia* [Sytemology]. Kyiv [in Ukrainian].

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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. P.3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [2] Prigunova, A. G., Koshelev, M. V., & Borisov, A. G. (2022). Effect of unipolar pulsed electric current treatment of the melt of Al – 8 wt-% Si – 0.7 wt-% Fe alloy on iron-containing phases formation and mechanical properties of castings. *Materials Science and Technology*. Vol.38. №4. P. 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>
- [3] Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, Soong-Keun Hyun, Moon-Jo Kim. (2021). Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum. *Journal of materials research and technology*. Vol. 12. P. 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.040>
- [4] Yanyi Xu, Yunhu Zhang, Tianqing Zheng, Yongyong Gong, Changjiang Song, Hongxing Zheng and Qijie Zhai (2021). Evolution of melt convection in a liquid metal driven by a pulsed electric current. *Chinese Phys. B*. Vol.30, № 3. <http://doi.org/10.1088/1674-1056/ac0a6c>
- [5] Подольцев О.Д., Кучерява І.М. (2015). Мультифізичне моделювання в електротехніці. Київ: Інститут електродинаміки НАНУ. 304 с.
- [6] Tsurkin, V.M., Ivanov A.V. (2018). Peculiarities of Redistribution of Electric and Thermal Fields at the Interface When Passing the Electric Current through the Melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. Vol. 54, № 6. P. 577–584. <https://doi.org/10.3103/S1068375518060133>
- [7] Zaporozhets, Yu.M., Ivanov, A.V., Kondratenko, Yu.P. and Tsurkin, V.M. (2021). The features of controlled conductive electric current treatment of liquid metals. *Advances in Engineering Research*. New York: Nova Science Publishers. vol. 44. P. 1–114.
- [8] Jianhong Ma, Jie Li, Yulai Gao, Qijie Zhai. (2009). Grain refinement of pure Al with different electric current pulse modes. *Materials Letters*. Vol. 63, №.1, P. 142–144. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.09.036>
- [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. P. 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>
- [10] Старіш О. Г. (2005). Системологія. Київ: Центр навчальної літератури. 232 с.

© Іванов А. В., Обрубов А. В., Турти М. В., Вінніченко І. Л.,
Рябенський В. М., Ушкаренко О. О., Верещаго Є. М.
Дата надходження статті до редакції: 21.10.2024
Дата затвердження статті до друку: 30.10.2024