

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ПОЛЯ ТЕЧІЙ У МЕТАЛЕВОМУ РОЗПЛАВІ ПРИ ЙОГО ОДНОЧАСНІЙ ОБРОБЦІ РІЗНИМИ ТИПАМИ СТРУМІВ

Артем Іванов

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, просп. Богоявленський, 43А, Миколаїв, Україна, 54018, artiomsan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3247-6121

Ірина Вінніченко

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, i.l.vinnychenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3768-1060

Андрій Обрубів

доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри судових електроенергетичних систем

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, andrii.obrubov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9667-1703

Марина Турти

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних технологій та інформаційної безпеки

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, turtymarina3@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3442-9679

Олександр Ушкаренко

доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3159-330X

Володимир Рябенський

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, optron2@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6998-746X

Євген Верещаго

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри морського приладобудування

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, просп. Героїв України, 9, Миколаїв, Україна, 54007, venmkua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4370-7706

У ливарному виробництві використовують різні методи при підготовці розплаву для розливання з метою забезпечити високі показники якості виливка. Для цього використовують, у тому числі, енергетичні методи, серед яких останніми роками пропонується застосовувати кондукційну електроструміву обробку розплаву (КЕСО). Її дія є багатофункціональною та багатоцільовою. При цьому генерується комплекс фізичних полів (електромагнітне, температурне, акустичне та поле течій). Їх інтегральна дія впливає на позитивну зміну термодинамічного стану

розплаву. Роль течій полягає у тому, щоб забезпечити активне перемішування розплаву. Традиційно для КЕСО з одним типом струму використовують пару електродів. У випадку застосування одночасної обробки різних типів струму та типів електродних систем виникає проблема визначення розподілу полів у розплаві та їх інтенсивностей. Тому актуальною постає задача з наступною **метою** – визначити умови та фактори, за яких досягається при одночасній обробці розплаву різними типами струмів розосереджування зон підвищеної інтенсивності по всьому об'єму рідкофазного об'єкту обробки та суттєве збільшення швидкості течій. **Методологія.** Для розв'язування задачі використовували імітаційне моделювання за допомогою рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої рідини, та систему рівнянь Максвелла у квазістационарній постановці. Розрахунки виконувались для рідкого алюмінієво-кремнієвого сплаву типу АК7. Застосовано для аналізу два варіанти електродних систем. В одному – пари електродів розташовано практично у центрі циліндричної ємності, у другому – різнорознесені. Для розрахунків обрано змінний струм (АС), випрямлений (ДС) з частотами відповідно 50 Гц та 100 Гц, а також суперпозицію струмів АС+ДС. Отримані **результати** показали, що в залежності від різних варіантів складових системи «типи струмів – типи електродних систем» можливо отримати принципово різну якісну та кількісну топологію поля течій. Найбільш вигідними для реалізації прискорення поля течій показала себе комбінація суперпозиції струмів та ДС. А також комбінація АС та ДС. Також варіант рознесених пар електродів показав, що при цьому поле течій може займати практично весь об'єм розплаву. Отримані результати дозволяють прогнозувати оптимальний час обробки з урахуванням ефективного змішування обробленого та необробленого розплавів.

Ключові слова: електрострумова обробка, розплав, алюмінієво-кремнієві сплави, імітаційне моделювання, електромагнітне поле, поле течій.

Актуальність роботи. У технологіях ливарного виробництва використовують різні методи при підготовці розплаву для розливання та кристалізації. Їх задача – забезпечити високі показники якості виливка: дрібнену однорідну зеренну структуру, відсутність пор та неметалевих включень, задані експлуатаційні характеристики виробку. Такі методи можна характеризувати як реагентні та енергетичні. У першому випадку у розплав вводять малі дози (<1%) хімічних елементів. Їх дія вибіркова і виконує, як правило, одну функцію. У другому випадку розплав обробляють енергетичними полями різної фізичної природи. Їх дія багатофункціональна та багатоцільова. Але, слід відмітити, що універсального методу не існує. Це пояснюється складністю металургійного перероблення у системі «Шихта-розплав-випуск», багатфакторністю та багатопараметричністю відповідних технологічних процесів [1–4].

Починаючи з другої половини ХХ ст. активно досліджується такий метод енергетичного впливу, як кондукційна електрострумова обробка (КЕСО). Отримані результати однозначно свідчать про його ефективність [4–7]. Для реалізації КЕСО традиційно використовують одне джерело струму та пару електродів. Але певні перспективи для розширення функціональних можливостей та цілей електрострумового впливу на розплав показав принцип реалізації методу КЕСО одночасною обробкою розплаву різними типами струму [8]. У цьому випадку використовують в одному технологічному модулі одночасно різні типи джерел струму та відповідні пари електродів. Як відомо, при КЕСО у розплаві генерується первинне електромагнітне поле, потім вторинне,

акустичні та температурні поля, а також поле течій, які у сукупності виконують інтегральний вплив на об'єкт обробки задля отримання комплексу високих показників якості виливка. Роль поля течій дуже важлива. Як показали результати попередніх досліджень [4], інтегральна дія цих полів є неоднорідною в об'єкті обробки. При цьому у локальних зонах генерується найвища інтенсивність термосилового впливу, який потенційно здатний суттєво позитивно змінювати термодинамічні показники розплаву. За допомогою поля течій за час обробки відбувається перемішування «достатньо обробленого розплаву» з таким, що не в повній мірі відповідає таким ознакам.

Тому актуальною постає задача з наступною **метою**. Визначити умови та фактори, за яких досягається при одночасній обробці розплаву різними типами струмів розосереджування зон підвищеної інтенсивності по всьому об'єму рідкофазного об'єкту обробки та суттєве збільшення швидкості течій.

Як було раніше показано [4, 9] у випадку КЕСО одним типом струму, поле течій якісно і кількісно суттєво залежить від типу електродної системи, типу струму та конфігурації ємності з розплавом. У випадку застосування одночасної обробки різними струмами ми маємо поліваріантну ситуацію [8], яка ще потребує свого ретельного дослідження при застосуванні різних варіантів елементів системи «типи струму-типи електродних систем». Тому автори на даному етапі мали намір тільки показати, що КЕСО з одночасним впливом на розплав різних типів струмів може суттєво прискорювати поле течій та по різному розосереджувати зони підвищеної інтенсивності по всьому об'єму

рідкофазного об'єкту обробки тільки з використанням одного типу електродних систем.

Матеріал і результати досліджень. Прийmemo, що рух рідкого металу виникає тільки під впливом об'ємної електромагнітної сили, тоді гідродинамічні процеси в рідкому металевому провіднику розглянемо шляхом числового розв'язування рівняння Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої рідини, [10]:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} + \gamma \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P_{EM} + \frac{\vec{F}_{EM}}{\rho} \quad (1)$$

де $\vec{F}_{EM}$ – електромагнітна сила, Н/м³;

$\vec{v}$ – швидкість течій, м/с;

∇ – оператор Гамільтона;

Δ – оператор Лапласа;

γ – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;

P_{EM} – магнітний тиск, Па;

ρ – густина розплаву, кг/м³;

t – час, с.

Вектор об'ємної електромагнітної сили, що виникає при цьому, визначається з виразу:

$$\vec{F}_{EM} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (2)$$

де $\vec{j}$ – густина струму, А/м²;

$\vec{B}$ – вектор магнітної індукції, Тл.

Величину магнітного тиску P_{cm} визначимо з виразу:

$$P_{EM} = \int_0^r \vec{F}_{EM} dr \quad (3)$$

де r – координата, м.

Електромагнітне поле, яке характеризується розподілом векторів $\vec{j}$ та $\vec{B}$ збуджується електричним струмом, що протікає у розплаві. Його характеристики логічно визначити із застосуванням системи рівнянь Максвелла у квазістаціонарному наближенні.

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= J = \sigma(E + v \times B) + J^e, \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \cdot B &= 0, \\ \nabla \cdot D &= 0, \\ \nabla \cdot J &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

H – напруженість магнітного поля в розплаві, А/м;

J – густина струму, А/м²;

σ – питома електрична провідність, См/м;

E – напруженість електричного поля, В/м;

B – індукція магнітного поля в розплаві, Тл;

J^e – густина наведених (сторонніх) струмів, А/м²;

D – електрична індукція, Кл/м.

В роботі будемо використовувати наступні типи струмів: змінний (AC), пульсуючий (DC), утворений суперпозицією (S).

Для реалізації електрострумового навантаження при КЕСО у циліндричній формі розглянемо два варіанти розташування електродів (Рис. 1). Варіант на рис. 1 (а) реалізує схрещені струми з електродами, що розташовані на однакових відстанях у далені від стінки ємності. У варіанті на рис 2 (б) аналізується ситуація також зі схрещеними струмами, але пари електродів є різно-рознесеними.

Для розрахунків змінний струм формалізовано формулою $I_{AC} = I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T)$, пульсуючий випрямлений $I_{DC} = I_0 \cdot \sin^2(2 \cdot \pi \cdot t / T_u)$. Струм, утворений суперпозицією струмів $I_S = (I_0/2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T_u) + (I_0/2) \cdot \sin^2(2 \cdot \pi \cdot t / T_u)$, де I_0 – амплітуда струму, А; T – період струму, с; t – час, с. Формулу для визначення I_S можливо застосовувати тільки у випадку, коли два джерела струму об'єднані однією парою електродів. У цьому випадку два джерела струму мають одне навантаження. Якщо окреме джерело струму має своє навантаження, то суперпозицію струмів потрібно визначати з суперпозиції електромагнітних полів. Варіювання періодом T_u фактично дасть нам у першому наближенні реалізувати послідовність імпульсів струму зі скважністю 50% за умов, що частота складає 50 Гц для АС та 100 Гц для DC. Прийmemo, що амплітудні значення струмів (I_0) при моделюванні у всіх випадках будуть дорівнювати $I_0 = 20$ А, період (T) прийmemo рівним 0,02 с. Ці два показники відповідають реальним значенням, які застосовано у фізичному експерименті [8], де показано позитивний результат. Період (T_u) прийmemo рівним 0,001 с, проміжок часу моделювання t прийmemo 0,04 с (інтервал розбиття $\Delta t = 10$ мкс). Розрахунки виконувались для комбінацій струмів I_{DC} та I_{DC} , I_{AC} та I_{DC} , I_S та I_{DC} . Обрано розташування електродних систем, яке показано на рис. 1.

На рис. 1 (а) представлено перший варіант чотириелектродної системи. Символ $\times$ позначає вхід струму, а символ $\bullet$ – вихід. На рис. 1 (б) наведено другий варіант чотириелектродної системи, для якого проведено моделювання ситуації $I_{AC} + I_{DC} = I_S$.

Розрахунки виконували для рідкого ливарного доєвтектичного алюмінієво-кремнієвого сплаву типу АК7, для якого $\rho = 2200$ кг/м³, $\sigma = 4,123 \cdot 10^6$ См/м.

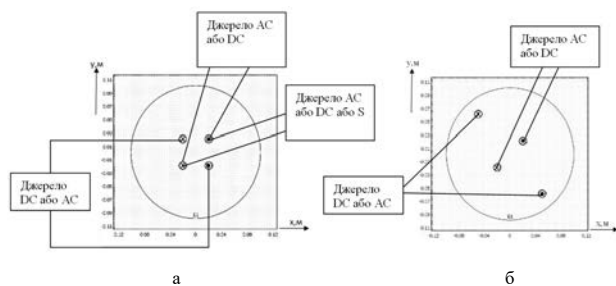


Рис. 1. Геометрична модель задачі

Результати моделювання в інтервалі часу 0,04 с наведено на рис. 2.

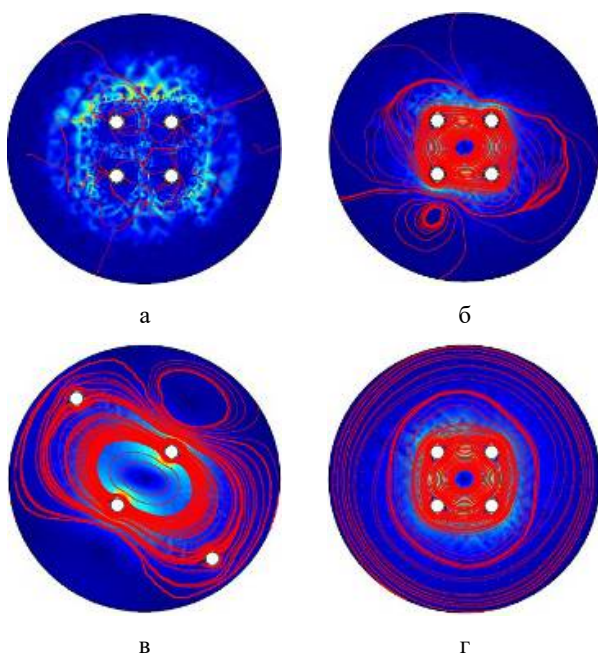


Рис. 2. Якісний розподіл поля течій у розплаві: а) IDC та IDC, геометрія № 1; б) IAC та IDC, геометрія № 1; в) IAC та IDC, геометрія № 2; г) IS та IDC, геометрія № 1

Із даних, наведених на рис. 2, можна бачити суттєву якісну різницю у процесі формування течій для випадку чотириелектродної системи. Так, різно-рознесені електроди дозволяють охопити течіями практично весь об'єм розплаву. Але кількісні оцінки швидкості поля течій показали, що найефективніше прискорення течій формується для варіанта I_s та I_{DC} (Рис. 2 (г)).

Для кількісної оцінки характеристик полів течій, які виникають у розплаві у випадку застосування чотириелектродної системи, наведемо максимальні значення швидкостей течій у точці з координатами (0,0) при $t = 0,04$ с. Результати представлено відповідно на рис. 3.

Найбільш вигідними з точки зору реалізації прискорення поля течій показали себе комбінація

суперпозиції струмів (I_s) та пульсуючого струму (I_{DC}) (геометрія № 1) – підвищення швидкості течій до 6,5 разів відносно комбінації I_{DC} та I_{DC} . А також розташування електродів у ємності з розплавом № 2. При комбінації I_{AC} та I_{DC} – підвищення швидкості течій у 3,3 рази.

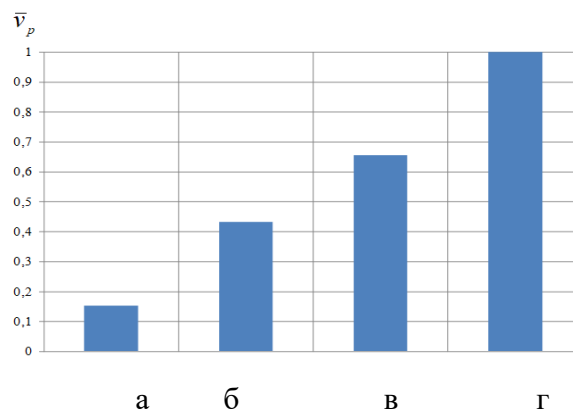


Рис. 3. Максимальні відносні швидкості течій у розплаві: а) IDC та IDC, геометрія № 1; б) IAC та IDC, геометрія № 1; в) IAC та IDC, геометрія № 2; г) IS та IDC, геометрія № 1

Моделювання характеристик течій у розплаві при КЕСО в обраній постановці показало суттєву різницю у розподілі поля течій та їх швидкостей в залежності від варіантів співставлення елементів системи «типи струмів – типи електродних систем».

Тому вибір відповідного технологічного модуля КЕСО для конкретних умов ливарних процесів спікається з розв'язуванням задачі визначення оптимального паритету між такими показниками поля течій, як його розподіл та швидкості. Але ця задача потребує окремого дослідження.

Висновки. 1. Методами числового моделювання в 2D-постановці було встановлено особливості розподілу поля течій у розплаві ливарного доевтектичного силуміну при його одночасній обробці різними типами струму з використанням багатеелектродних систем різних типів.

2. Встановлено, що найбільш вигідними з точки зору реалізації прискорення поля течій показали себе комбінація суперпозиції струмів та пульсуючого струму (розташування № 1), підвищення швидкості течій до 6,5 разів та комбінація змінного і пульсуючого струмів (розташування № 2), підвищення швидкості течій у 3,3 рази. Різноморнесені електроди дозволяють сформувати поле течій практично у всьому об'ємі розплаву.

3. Вибір відповідного технологічного модуля КЕСО для конкретних умов ливарних процесів спікається з розв'язуванням задачі визначення

оптимального паритету між розподілом та швидкостями поля течій. Але ця задача потребує окремого дослідження.

ЛІТЕРАТУРА

1. Dmitry G. Eskin, Mi Jiawei. Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. Springer Series in Materials Science. 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3>.
2. Liang C.-L., Lin K.-L. The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review. *Material Characterization*. 2018. Vol. 145, pp. 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>.
3. Balasubramani N., Venezuela J., StJohn D., Wang G., Dargusch M. A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current, and ultrasonic treatments. *Journal of Materials Science & Technology*. Vol. 144. 2023. P.243–265, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.067>.
4. Zaporozhets Yu. M., Ivanov A. V., Kondratenko Yu. P., Tsurkin V. M. The Features of Controlled Conductive Electric Current Treatment of Liquid Metals. *Advances in Engineering Research*. New-York: Nova Science Publishers, 2021, 44, P. 1–114.
5. Prigunova A.G., Koshelev M.V., Borisov A.G. 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. 2022 P. 246–253. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2037059>.
6. Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, et al., Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum. *J. Mater. Res. Technol.* 2021. Vol. 12, p. 818–830. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.03.040>.
7. Xiliang Liao, Qijie Zhai, Jun Luo, Wenjie Chen, Yongyong Gong. Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum. *Acta Materialia*. Vol. 55, Issue 9, 2007, P. 3103–3109, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.01.014>.
8. Tsurkin V. N., Ivanov A. V., Zaporozhets Yu.M., Zhdanov A.A., Chestnykh N.V. Multivariant Method of Conductive Electric Current Treatment of Molten Metal. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2024. Vol. 60, Issue 1. P. 31–41.
9. Zhang Y.H., Xu Y.Y, et al., Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8, P. 32–42. doi:10.1038/s41598-018-21709-y.
10. Kolesnichenko A. F., Podoltsev A. D., Kucheryavaya I. N., Action of Pulse Magnetic Field on Molten Metal. *ISIJ International*. 1994. Vol. 34, Issue 9, P. 715–721, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.71>

PECULIARITIES OF THE FLOW FIELD DISTRIBUTION IN A METAL MELT DURING ITS SIMULTANEOUS TREATMENT WITH DIFFERENT TYPES OF CURRENTS

Artem Ivanov

Candidate of Technical Science, Senior Researcher

Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine of Ukraine, 43A Bohoyavlensky ave., Mykolayiv, Ukraine, 54018, artiomsan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3247-6121

Iryna Vinnichenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Computerized Control Systems

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, i.l.vinnichenko@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3768-1060

Andrii Obrubov

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Ships Electrical Power Systems

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, andrii.obrubov@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0001-9667-1703

Marina Turty

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computer Technologies and Information Security

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, turtymarina3@gmail.com

ORCID: 0000-0002-3442-9679

Oleksandr Ushkarenko

Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Programmable Electronics, Electrical Engineering and Telecommunications

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua

ORCID: 0000-0002-3159-330X

Volodymyr Ryabenkiy

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Programmable Electronics, Electrical Engineering and Telecommunications

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, optron2@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6998-746X

Eugen Vereshchago

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Marine Instrument

Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Heroiv Ukrainy ave., 9, Mykolaiv, Ukraine, 54007, venmkua@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4370-7706

Various methods are used in foundries to prepare the melt for casting in order to ensure high quality of the casting. For this purpose, energy methods are used, among which, in recent years, it has been proposed to use conductive electric current treatment of the melt (CECT). Its effect is multifunctional and multi-purpose. In this case, a complex of physical fields is generated (electromagnetic, temperature, acoustic, and flow fields). Their integrated effect leads to a positive change in the thermodynamic state of the melt. The role of the flows is to ensure active mixing of the melt. The role of the flows is to ensure active mixing of the melt. Traditionally, a pair of electrodes is used for CECT with one type of current. In the case of simultaneous processing of different types of current and types of electrode systems, the problem of determining the distribution of fields in the melt and their intensities arises. Therefore, the **purpose** of this paper is to determine the conditions and factors under which, during the simultaneous treatment of the melt with currents of different types, the dispersion of zones of increased intensity throughout the volume of the liquid-phase object of treatment and a significant increase in the flow rate are achieved. **Methodology.** To solve the problem, a simulation modeling was employed, utilizing the Navier-Stokes equations for a viscous incompressible fluid and the system of Maxwell's equations in a quasi-stationary formulation. The calculations were performed for a liquid aluminum-silicon alloy of the AK7 type. Two variants of electrode systems were used for the analysis. In one, the pairs of electrodes are located almost in the center of the cylindrical tank, and in the other, they are spaced apart. For the calculations, alternating current (AC), direct current (DC) with frequencies of 50 Hz and 100 Hz, respectively, and the superposition of AC+DC currents were chosen. The **results** obtained showed that, depending on different variants of the components of the system «types of currents – types of electrode systems», it is possible to obtain a fundamentally different qualitative and quantitative topology of the flow field. The combination of superposition of currents and DC proved to be the most advantageous for realizing the acceleration of the flow field. As well as a combination of AC and DC. Also, the variant of spaced electrode pairs showed that the flow field can cover almost the entire melt bulk. **Practical value.** The results allow us to predict the optimal processing time, taking into account the effective mixing of treated and untreated melts.

Key words: electric current treatment, melt, aluminum-silicon alloys, simulation modeling, electromagnetic field, flow field.

REFERENCES

1. Dmitry, G. Eskin, & Mi, Jiawei (2018). *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Springer Series in Materials Science <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3/>
2. Liang, C.-L., & Lin, K.-L. (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review. *Material Characterization*, 145, 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>.
3. Balasubramani, N., Venezuela, J., StJohn, D., Wang, G., & Dargusch, M. (2023). A review of the origin of equiaxed grains during solidification under mechanical stirring, vibration, electromagnetic, electric-current, and ultrasonic treatments, *Journal of Materials Science & Technology*, 144, 243–265, <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.09.067>.
4. Zaporozhets, Yu. M., Ivanov, A. V., Kondratenko, Yu. P., & Tsurkin, V. M. (2021). The Features of Controlled Conductive Electric Current Treatment of Liquid Metals. *Advances in Engineering Research*. New-York: Nova Science Publishers, 44, 1–114.
5. Prigunova, A. & Koshelev, M. & Borisov, A. (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. 1–8. DOI: 10.1080/02670836.2022.2037059.
6. Jee Seok Choi, Moonwoo La, DongEung Kim, Kyeong-Hwan Choe, et al., (2021). Effect of electric current on the microstructural refinement of pure aluminum. *J. Mater. Res. Technol.*, 12, 818–830.
7. Xiliang, Liao, Qijie, Zhai, Jun, Luo, Wenjie, Chen, & Yongyong, Gong. (2007). Refining mechanism of the electric current pulse on the solidification structure of pure aluminum. *Acta Materialia*, 55(9), 3103–3109, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.01.014>.
8. Tsurkin, V. N., Ivanov, A. V., Zaporozhets, Yu.M., Zhdanov, A. A., & Chestnykh, N.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>.
9. Zhang, Y.H., & Xu, Y.Y., et al. (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*. 8, 32–42. doi: 10.1038/s41598-018-21709-y.
10. Kolesnichenko, A. F., Podoltsev, A. D., & Kucheryavaya, I. N. (1994). Action of Pulse Magnetic Field on Molten Metal. *ISIJ International*, 1994, 34, (9), 715–721, <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.715>.

Стаття надійшла 19.10.2024