

УДК 621.3:519.876.5:621.745.56

DOI [https://doi.org/10.15589/znп2024.4\(497\).16](https://doi.org/10.15589/znп2024.4(497).16)

SIMULATION MODELING OF ELECTROMAGNETIC AND ENERGY CHARACTERISTICS OF CONDUCTIVE ELECTRIC CURRENT MELT TREATMENT

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНДУКЦІЙНОЇ ЕЛЕКТРОСТРУМОВОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ

Serhii V. Petrychenko¹
petrichsergey@gmail.com
ORCID: 0009-0000-1506-5219

Artem V. Ivanov¹
artiomsan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3247-6121

Oleksiy S. Sadovoy²
sadvuyos@mnau.edu.ua
ORCID: 0000-0002-7369-0714

С. В. Петриченко¹,
канд. техн. наук, пров. наук. співр.

А. В. Іванов¹,
канд. техн. наук., ст. наук. співр.

О. С. Садовий²,
канд. техн. наук, доцент

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*

²*Mykolayiv National Agrarian University, Mykolaiv*

¹*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

²*Миколаївський національний аграрний університет, м. Миколаїв*

Abstract. In foundry production, to ensure the effective crystallization ability of the melt, its preparation is carried out by various technological methods. One of these methods is conductive electric current treatment. When it is used, we have a situation where the thermal force impact is realized by the integrated effect of the generated physical fields: electromagnetic, thermal, acoustic, and current fields. For conductive electric current treatment, it has been previously shown that each modification of the current source and electrode system type has different functional capabilities due to the variable distribution of these fields, and, therefore, a different thermal force impact – a positive effect on the crystallization ability of the melt in the liquid state. However, the previously obtained information is not productive enough to determine technological recommendations for the effective use of electric current treatment. In our opinion, an important aspect of thermal force impact requires additional study in this regard – the dependence of the topology and characteristics of the primary (base) electromagnetic field on the type of current and the type of electrode system. Therefore, this issue is relevant.

The *purpose* of the work is to find adequate values of the distribution of energy characteristics of the electromagnetic field generated in a rare-metal system using the methods of simulation modeling in 3D format.

Method. The study was performed by simulation of the Maxwell's system of equations for the quasi-stationary approximation and the Fourier equation using the finite element method.

Results. It has been shown that the thermo-force effect on the melt during conductive electric current treatment is affected by a significantly heterogeneous topology of electric, magnetic, force, and thermal fields. The density of their characteristics is greatest near a pair of widely spaced electrodes with an insulated side surface. It has been established that the use of two currents AC+DC or DC+PC for CESO simultaneously makes it possible to significantly activate the thermal power load of the melt to improve its crystallization ability in comparison with AC or DC.

Key words: conductive electric current treatment; aluminum-silicon alloy melt; electromagnetic field; simulation modeling.

Анотація. У ливарному виробництві для забезпечення ефективної кристалізаційної здатності розплаву проводиться його підготовка різними технологічними методами. Одним із таких методів є кондукційна електрострумova обробка. При її застосуванні маємо ситуацію, коли термосиловий вплив реалізується інтегральною дією фізичних полів, які генеруються: електромагнітного, теплового, акустичного та поля течій. Для кондукційної електрострумovoї обробки раніше було показано, що кожна модифікація співставлення джерела струму та типу електродної сис-

теми має різні функціональні можливості за рахунок різноваріантного розподілу вказаних полів, а значить і різний термосиловий ефект – позитивно впливати на кристалізаційну здатність розплаву в рідкому стані. Але отримана раніше інформація не є достатньо продуктивною щоб визначити технологічні рекомендації для ефективного застосування кондукційної електрострумової обробки. На наш погляд, з цього приводу потребує додаткового вивчення важливий аспект термосилового впливу – залежність топології та характеристик первинного (базового) електромагнітного поля від типу струму та типу електродної системи. Тому така проблематика є актуальною.

Мета роботи – методами імітаційного моделювання у 3D форматі знайти адекватні значення розподілу енергетичних характеристик електромагнітного поля, що генерується у рідкометалевій системі при застосуванні кондукційної електрострумової обробки.

Методика. Дослідження виконано імітаційним моделюванням системи рівнянь Максвелла для квазістаціонарного наближення та рівняння Фур'є із застосуванням методу скінчених елементів.

Результати. Показано, що термосиловий вплив на розплав при кондукційній електрострумовій обробці позначається суттєво неоднорідною топологією електричного, магнітного, силового та теплового полів. Густина характеристик яких найбільша біля пари різнорознесених електродів з ізолюваною бічною поверхнею. Встановлено, що застосування для кондукційної електрострумової обробки одночасно двох струмів AC+DC або DC+PC надає можливості суттєво активізувати термосилове навантаження розплаву задля покращення його кристалізаційної здатності у зрівнянні з AC або DC.

Ключові слова: кондукційна електрострумова обробка; розплав алюмінієво-кремнієвого сплаву; електромагнітне поле; імітаційне моделювання.

ВСТУП

Система ливарного виробництва є багатостадійною, багатофакторною та різноструктурованою, з урахуванням конкретних виробництв. Тому, єдиної її теорії не існує, а загально прийняті технологічні методи, що їх традиційно використовували на різних стадіях металургійного перероблення у системі «шихта-розплав-випуск», здебільшого визначалися за допомогою фізичного експерименту та методу «спроб та помилок».

Останні роки активно використовують методи математичної формалізації щодо імітаційного моделювання фізичних процесів і явищ, що відбуваються у згаданій системі. З одного боку, вони суттєво доповнюють результати фізичного експерименту, а з іншого – дозволяють прогнозувати можливі сценарії процесів, які відбуваються при застосуванні технологічних засобів обробки матеріалів. Крім того, за допомогою імітаційного моделювання проводиться активний пошук резервів, за яких можливо підвищити продуктивність виробництва та покращити показники якості кінцевого продукту (випуск). При цьому основна увага дослідників приділяється середній ланці тріади «шихта-розплав-випуск», бо саме тут різними технологічними методами проводиться підготовка розплавленого металу до кристалізації та твердіння, забезпечуючи йому ефективну кристалізаційну здатність. Одним із таких методів є метод кондукційної електрострумової обробки (КЕСО), який передбачає безпосереднє пропускання електричного струму через розплав від джерела струму за допомогою пари електродів, або одночасно декількох джерел струму і різних типів електродів [1–3].

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ

При застосуванні енергетичних методів обробки розплаву, у тому числі КЕСО, маємо ситуацію, коли термосиловий вплив (ТСВ) відбувається інтегральною дією фізичних полів, які генеруються: електромагнітного, теплового, акустичного та поля течій.

Для КЕСО раніше було показано, що кожна модифікація співставлення джерела струму та типу електродної системи має різні функціональні можливості за рахунок різноваріантного розподілу вказаних полів, а, значить, і різний термосиловий ефект – позитивно впливати на кристалізаційну здатність розплаву в рідкому стані [3]. Але отримана раніше інформація не є достатньо продуктивною, щоб визначити технологічні рекомендації для ефективного застосування КЕСО. На наш погляд, з цього приводу потребує додаткового вивчення важливий аспект ТСВ – залежність топології та характеристик первинного (базового) електромагнітного поля (ЕМП) від типу струму та типу електродної системи. Тому така проблематика є актуальною.

Мета роботи – методами імітаційного моделювання у 3D форматі знайти адекватні значення розподілу енергетичних характеристик ЕМП, що генерується у рідкометалевій системі (РМС) при застосуванні КЕСО.

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Слід зазначити, що різниця між математичним та імітаційним моделюванням полягає у тому, що у другому принципі замість явного математичного опису взаємин між вхідними параметрами та вихідними характеристиками, система, що досліджується, розбивається на елементи (модулі), які розрізняються функціональними можливостями [4]. Матеріальне втілення цього для нашої задачі можна окреслити наступними елементами.

Просторова модель системи КЕСО відображається ємністю з металоагрускою та електродним блоком, що занурений у ємність. **Фізична модель** КЕСО надає опис фізичних явищ, які відбуваються при КЕСО та які досліджуються у роботі. **Енергетична модель** визначає просторовий розподіл енергетичних потоків, які продукуються фізичними явищами та параметрами локалізованого впливу на РМС, що задаються для дослідження.

Зробимо деякі пояснення. У такій системі з трьох модулів потрібно враховувати те, що розподіл густини струму по об'єму розплаву є суттєво неоднорідним, тому маса розплаву не може розглядатися як суцільне зосереджене навантаження для системи струмів, які подаються на електроди, особливо в разі використання струмів високої частоти чи серій імпульсів, або різних типів струмів [1, 3, 4]. У зазначених умовах має розв'язуватись тривимірна задача теорії поля, яка в загальному випадку не має осової симетрії. Через це побудова строгої математичної моделі розподілу електромагнітних полів для неї є доволі складною задачею. Тому на даному етапі потрібно застосовувати деякі спрощення у її постановці.

При застосуванні фізичної моделі слід враховувати мультифізичні аспекти задачі [5], через які моделювання потребує декомпозиції сукупності взаємозв'язаних фізичних явищ на окремі складові з дотриманням принципу причинно-наслідкової наступності:

- а) підведення до електродів заданих потенціалів від відповідних джерел струму і розподіл потенціалів при їх розтіканні струму вздовж електродів;
- б) формування в об'ємі розплаву первинного електричного поля і розтікання струму по об'єму розплаву та вздовж стінок ємності;
- в) формування в об'ємі розплаву магнітного поля, що генерується струмами;
- г) виникнення індукованої напруженості електричного поля (вторинного поля), яка накладається на первинне поле, внаслідок чого утворюється єдине діюче електромагнітне поле;
- д) виникнення взаємодії носіїв електричного струму з магнітним полем у провідному середовищі розплаву, яке призводить до появи розподілених в об'ємі пондеромоторних зусиль;
- е) внаслідок впливу зазначених зусиль у мікрооб'ємах утворюється силове поле, яке ініціює спрямований рух або коливання (осциляцію) мікрочастинок розплаву;
- ж) протікання струму в провідному середовищі викликає його неоднорідне нагрівання (джоулева теплота), перерозподіл теплового поля.

Енергетична модель має передбачити можливість відображати характеристики просторово-часового розподілу густини енергії окремо для активної та реактивної складових. А також – характеристик силового та теплового полів.

Раніше було висунуто припущення про те, що саме інтегральна термосилова «дія» енергетичного силового та теплового полів тим чи іншим чином впливає на структурні перетворення речовини розплаву [3, 6]. Тому характеристики саме цих полів визначимо як об'єкт наших досліджень.

ОБЧИСЛЮВАЛЬНІ АЛГОРИТМИ СКЛАДОВИХ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ

У даній роботі проаналізуємо ситуацію, яка передбачає застосування методу КЕСО одночасно двома струмами із такого набору: змінний (АС), випрямлений (DC) та імпульсний (РС). При цьому

застосуємо тільки одну пару електродів, на які будемо подавати струм від відповідних джерел живлення. Для генерування РС потрібно використовувати два джерела АС+DC. Оберемо наступний опис обраних струмів. Змінний струм формалізовано формулою $I_{AC}=I_0 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t/T)$, пульсуючий випрямлений $I_{DC}=I_0 \cdot \sin^2(2 \cdot \pi \cdot t/T)$. Імпульсний струм, який утворено суперпозицією АС+DC у випадку застосування пари електродів, $I_s=(I_0/2) \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot t/T_u)+(I_0/2) \cdot \sin^2(2 \cdot \pi \cdot t/T_u)$. 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. Приймемо, що амплітудні значення струмів при моделюванні у всіх випадках будуть дорівнювати $I_0=20$ А, період $T=0,02$ с, період $T_u=0,001$ с, час моделювання $t=0,04$ с, інтервал розбиття $\Delta t=10$ мкс. Обрані параметри джерел струму відповідають реальним показникам промислової частоти, тому ці джерела є найбільш простими при застосуванні.

Для просторової моделі оберемо апроксимацію її конфігурації геометричними примітивами (рис. 1). Де представлено циліндричну ємність з розплавом висотою (H_k), діаметром (D), з зануреними в розплав і паралельно розташованими електродами 1 і 2. Відстань від вісі симетрії ємності з розплавом до центрів електродів $L_e/2$. Як об'єкт впливу розглядався найбільш поширений в ливарному виробництві сплав АК7 (А357) в рідкому стані при температурі 740 °С, для якого густина $\rho=2200$ кг/м³, питома електропровідність $\sigma=4,123 \cdot 10^6$ См/м. Електроди діаметром d_{el} занурені в розплав на глибину h . Бічна поверхня електродів є електроізолюваною з зовнішнім діаметром ізоляції d_{is} , матеріал електродів – титан. Не знижуючи загальності задачі, виконаємо розрахунки при наступних геометричних параметрах: $H=90$ мм; $D=80$ мм; $L_e=56$ мм; $d_{el}=4$ мм; $d_{is}=5$ мм. Величина h для кожного з електродів була різною та становила: 80 мм – для позитивного електрода, 10 мм – для негативного електрода. Різниця потенціалів підводилася до Γ_1 і Γ_2 .

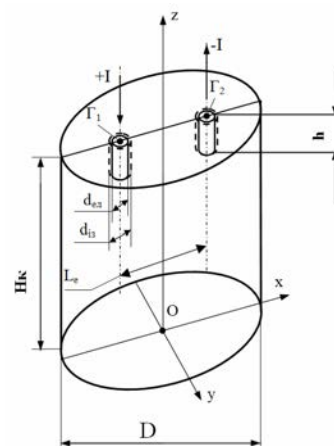


Рис. 1. Геометрична модель задачі у 3D постановці

Фізичну модель та енергетичну досліджували методом скінчених елементів у 3D форматі, використовуючи розв'язування системи рівнянь Максвелла у квазістационарній постановці та Фур'є [5, 7, 8]. При цьому в ході роботи розраховувалися: розподіл в об'ємі розплаву електричного потенціалу і густини струму, на їх базі визначалися розподіли напруженостей електричного та магнітного полів та питома потужність тепловиділення.

У загальному випадку для квазістационарного електромагнітного поля система рівнянь записується в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times H &= J = \sigma \frac{x-\mu}{\sigma} (E + v \times B) + J_e \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \nabla \cdot B &= 0, \\ \nabla \cdot J &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де ∇ – оператор набла;

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

J – густина струму, А/м²;

σ – питома електрична провідність, См/м;

E – напруженість електричного поля у розплаві, В/м;

v – швидкість розплаву, м/с;

B – індукція магнітного поля у розплаві, Тл;

J_e – густина наведених струмів, А/м²;

Виникаюча при цьому об'ємна електромагнітна сила визначається з виразу:

$$\vec{F}_{em} = \vec{J} \times \vec{B}. \quad (2)$$

Граничні та початкові умови для електромагнітного поля визначено за допомогою розбиття провідника на елементарні комірки [7].

Значення інтегралів електромагнітної сили (F_{int}), електромагнітної енергії (W_{em}) в об'ємі розплаву (V) та питома теплова потужність (Q) визначалися за виразами:

$$F_{int} = \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_V |\vec{F}_{em}(x, y, z)| dV \right) dt,$$

$$Q = \int_{t_0}^{t_1} \left(\int_V |\vec{j}(x, y, z)|^2 \cdot \sigma^{-1} dV \right) dt,$$

де $\vec{j}$ – густина струму, А/м²;

$$W_{em} = \int_{t_0}^{t_1} \left(0,5 \int_V B(x, y, z) \cdot H(x, y, z) dV \right) dt,$$

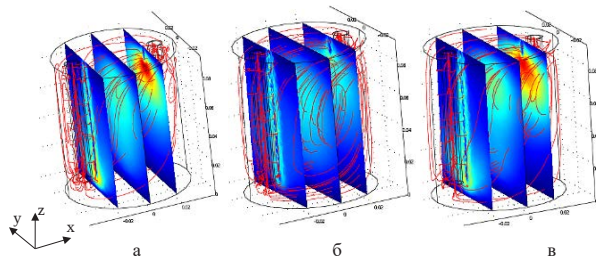
де t_0 – початковий час інтегрування, с; t_1 – кінцевий час інтегрування, с.

$$W_{em} = \int_{t_0}^{t_1} \left(0,5 \int_V B(x, y, z) \cdot H(x, y, z) dV \right) dt,$$

де t_0 – початковий час інтегрування, с; t_1 – кінцевий час інтегрування, с.

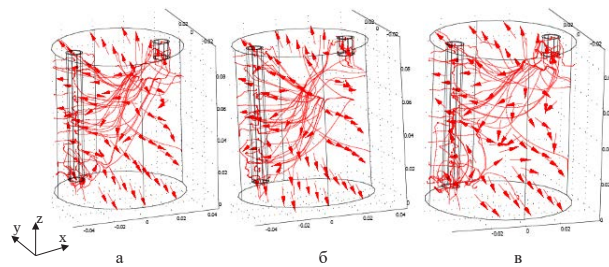
Результати моделювання

Із представлених на рис. 2–4 даних 3D моделювання можна зробити висновок про те, що топологія електричного, магнітного та силового полів, які генеруються у об'ємі розплаву різними типами струмів, є суттєво неоднорідною. Навіть ці якісні репрезентативні результати вказують на те, що при цьому потенційно може збуджуватись суттєво нерівноважний термосиловий вплив на розплав.



а) АС (50 Гц); б) DC (100 Гц); в) АС+DC (50 Гц+100 Гц)

Рис. 2. Якісна картина розподілу напруженості магнітного поля (кольорові слайси) та ліній потоку вектору напруженості електричного поля (лінії) у 3D

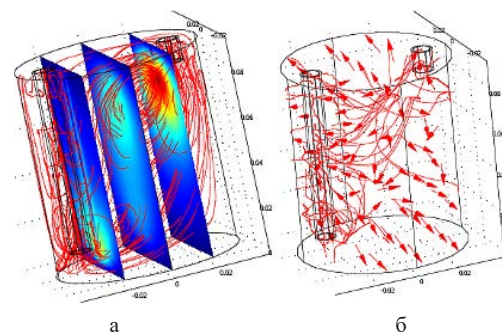


а) АС (50 Гц); б) DC (100 Гц); в) АС+DC (50 Гц+100 Гц)

Рис. 3. Якісна картина розподілу вектору об'ємної електромагнітної сили (стрілки та лінії потоку вектору) у 3D

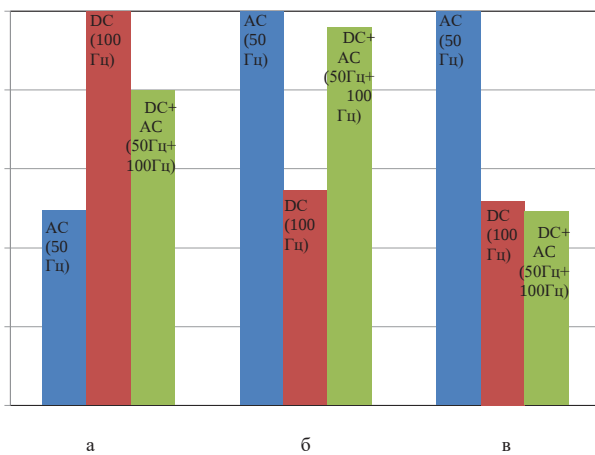
Із наведених результатів бачимо, що найбільша густина характеристик термосилових полів спостерігається біля електродів. Таким чином, саме там може відбуватись ТСВ найбільшої інтенсивності, який потенційно спроможний більш ефективно впливати на зміну термодинамічного стану розплаву. З цього приводу виникає проблема аналізу умов та факторів, за яких в об'ємі розплаву будуть генеруватись найбільш ефективні течії. Така задача потребує окремого ретельного дослідження.

На рис. 5, 6 представлено інтегральні показники досліджуваних характеристик у безрозмірному вигляді. Нормування виконано за таким принципом. Значення кожної характеристики зрівнювалось з максимальним, яке відповідало тому чи іншому типу струму.



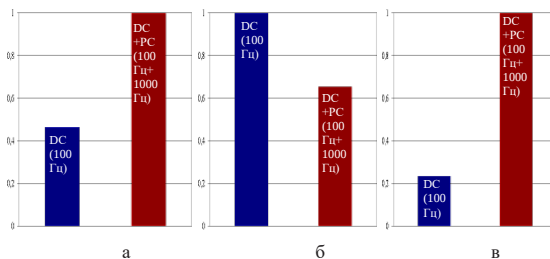
а) напруженість магнітного (кольорові слайси) та електричного (лінії вектору потоку) полів; б) розподіл вектору об'ємної електромагнітної сили (стрілки та лінії потоку вектору)

Рис. 4. Якісна картина розподілу напруженості магнітного та електричного полів і електромагнітної сили у 3D для струму DC+PC (100 Гц+1000 Гц)



а) F_{em} ; б) Q ; в) W_{em}

Рис. 5. Відносні значення інтегралів електромагнітної сили F_{em} , питомої теплової потужності (Q), густини електромагнітної енергії (W_{em}) для різних типів струмів



а) F_{em} ; б) Q ; в) W_{em}

Рис. 6. Відносні значення інтегралів електромагнітної сили F_{em} , питомої теплової потужності (Q), густини електромагнітної енергії (W_{em}) для різних типів струмів

Приведені на рис. 5, 6 дані показують, що однозначної кореляції амплітудних показників силового поля (F_{em}) та теплової потужності (Q) зі значеннями величини густини електромагнітної енергії (W_{em}) не спостерігається для варіанту AC та DC (рис. 5). Хоча, для DC та PC однозначно показана однакова залежність F_{em}

від W_{em} . Ці дані не дозволяють однозначно стверджувати про ефективність того чи іншого принципу ТСВ. Більш інформативними, з цього приводу, є якісні розподіли характеристик, що досліджувались (рис. 2–4). Таким чином, можна припустити, що для активізації ТСВ ключову роль відіграють неоднорідні, нелінійні характеристики термосилових полів. Застосування ж для КЕСО одночасно двох струмів AC+DC або DC+PC надає можливості суттєво активізувати термосилове навантаження розплаву задля покращення його кристалізаційної здатності у зрівнянні з AC або DC. Певним чином такий висновок було зроблено на підставі експериментальних даних [8].

ВИСНОВКИ

Отримані результати у 3D форматі навіть у спрощеній постановці дозволили окреслити наступні висновки.

1. Термосиловий вплив на розплав при КЕСО позначається суттєво неоднорідною топологією електричного, магнітного, силового та теплового полів. Густина характеристик яких найбільша біля пари різнорознесених електродів з ізолюваною бічною поверхнею.

2. Застосування для КЕСО двох струмів AC+DC або DC+PC, які вводяться у розплав одночасно парою різнорознесених електродів, надають можливість суттєво активізувати термосилове навантаження розплаву задля покращення його кристалізаційної здатності у зрівнянні з AC або DC. Якщо густина енергії кожного з трьох варіантів КЕСО однакова.

3. Амплітудні показники силового та теплового поля не корелюють з амплітудними показниками електромагнітної енергії. Вочевидь на інтенсивність та продуктивність ТСВ відіграють нелінійні аспекти топології полів, за рахунок яких ключова роль для цього належить явищам збільшення флуктуацій енергії, що впливає на ефекти самоорганізації рідкометалевої системи.

REFERENCES

- [1] 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
- [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] Zaporozhets, Yu.M. (2021). The features of controlled conduction electric current treatment of liquid metals. *Advances in Engineering Research. Nova Science Publishers: New-York, USA*, 1–114.
- [4] Zaporozhets, Y., Ivanov, A., Kondratenko, Yu. (2019). Geometrical Platform of Big Database Computing for Modeling of Complex Physical Current Treatment of Liquid Metals. *Data*, 4 (4), 1–18. <https://doi.org/10.3390/data4040136>.
- [5] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences. 304 p.
- [6] Zaporozhets, Yu. Ivanov, A., Kondratenko, Yu. Tsurkin, V., Batechko, N. (2022). Innovative system of computer modeling of multiphysics processes for controlled electrocurrent treatment of melts. *Science and Innovation*, 18(4), 85–105. <https://doi.org/10.15407/scine18.04.085>
- [7] Chestnykh, N.V., Ivanov, A.V. (2024). Simulation Modeling of the Characteristics of the Primary Electric Field at the Boundaries of a Liquid Metal Object Treated by Passing an Electric Current. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Electrochemistry*, 60(4), 626–632. <https://doi.org/10.3103/S1068375524700224>

- [8] 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, 31–41. <https://doi.org/10.3103/S1068375524010150>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] 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. P. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/143/1/012021
- [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] Zaporozhets, Yu.M. (2021). The features of controlled conduction electric current treatment of liquid metals. *Advances in Engineering Research*. Nova Science Publishers: New-York, USA. P. 1–114.
- [4] Zaporozhets, Y., Ivanov, A., Kondratenko, Yu. (2019). Geometrical Platform of Big Database Computing for Modeling of Complex Physical Current Treatment of Liquid Metals. *Data*. Vol. 4, № 4. P. 1–18. <https://doi.org/10.3390/data4040136>.
- [5] Podoltsev, A.D., Kucheryavaya, I.N. (2015). *Multiphysics modeling in electrical engineering*. Kyiv: Institute of electrodynamics Ukrainian national academy of sciences. 304 p.
- [6] Zaporozhets, Yu. Ivanov, A., Kondratenko, Yu. Tsurkin, V., Batechko, N. (2022). Innovative system of computer modeling of multiphysics processes for controlled electrocurrent treatment of melts. *Science and Innovation*. Vol. 18, № 4. P. 85–105. <https://doi.org/10.15407/scine18.04.085>
- [7] Chestnykh, N.V., Ivanov, A.V. (2024). Simulation Modeling of the Characteristics of the Primary Electric Field at the Boundaries of a Liquid Metal Object Treated by Passing an Electric Current. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry, Electrochemistry*, Vol. 60, No. 4, pp. 626–632. <https://doi.org/10.3103/S1068375524700224>
- [8] 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>

© Петриченко С. В., Іванов А. В., Садовий О. С.
Дата надходження статті до редакції: 05.11.2024
Дата затвердження статті до друку: 17.11.2024