

УДК 519.876.5:621.3.014.1:536.3
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2026.2\(505\).17](https://doi.org/10.15589/znp2026.2(505).17)

MODELING THE DISTRIBUTION FEATURES AND CHARACTERISTICS OF THE HYDRODYNAMIC FIELD DURING CONDUCTIVE ELECTRIC CURRENT TREATMENT OF MELTS USING PARALLEL ELECTRODES

МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РОЗПОДІЛУ ТА ХАРАКТЕРИСТИК ГІДРОДИНАМІЧНОГО ПОЛЯ ПРИ КОНДУКЦІЙНІЙ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ ЕЛЕКТРОДІВ

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

А. В. Іванов,
канд. техн. наук., ст. наук. співр.
М. В. Честних,
доктор філософії, наук. співр

Institute of Pulse Processes and Technologies, The National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv
Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв

Abstract. The purpose of this work is to investigate, through three-dimensional mathematical modeling, the distribution of the hydrodynamic field and its characteristics during conductive electric current treatment of a melt using parallel electrodes

Methodology – The study was conducted using mathematical modeling of Maxwell's equations in a quasi-steady-state formulation for harmonic currents and the Navier–Stokes equations for steady-state conditions, with the corresponding initial and boundary conditions. The calculations were performed under the non-inductive approximation using the finite element method.

Results – using mathematical modeling based on the criteria proposed by the authors, the features of the distribution of the volumetric electromagnetic force, the hydrodynamic field, and their characteristics in molten metal during its electric current treatment were investigated for a set of electrode systems. This approach made it possible to identify local regions characterized by increased energy dissipation, which leads to more intensive destruction of interphase boundaries and eutectic constituents, and affects the structural characteristics and service properties of the cast material. Employing the criteria proposed by the authors, it was established that under the action of electromagnetic forces in an aluminum-based alloy melt, even in laminar flow regimes, local recirculation zones arise in the flow structures. The analysis conducted made it possible to determine the potential capabilities of electrode systems as a source for generating spatial force effects and electrodynamic disturbances.

Scientific novelty – A methodological approach to the quantitative assessment of energy effects on liquid metal systems in relation to conductive electric current treatment of melts has been further developed.

Practical significance – the principles for the quantitative assessment of energy effects on a liquid metal system during conduction electric current treatment have been proposed. Their application allows for expanding the technological capabilities of the method and predicting the quality of the final product.

Key words: electric current treatment; melt; electrode system; hydrodynamic field; modelling.

Анотація. Мета роботи – шляхом математичного моделювання у тривимірній постановці дослідити особливості розподілу гідродинамічного поля та його характеристик при кондукційній електрострумовій обробці розплаву з використанням паралельних електродів.

Методика – дослідження проведено із застосуванням математичного моделювання системи рівнянь Максвела у квазістаціонарній постановці для гармонійних струмів та Нав'є–Стокса для стаціонарного режиму з відповідними початковими та граничними умовами. Розрахунки виконано за умови безіндукційного наближення із застосуванням методу скінченних елементів.

Результати – за допомогою математичного моделювання із використанням запропонованих авторами критеріїв проведено дослідження особливостей розподілу об'ємної електромагнітної сили, гідродинамічного поля та їх характеристик в металевому розплаві при його електрострумовій обробці для комплексу електродних систем. Даний підхід дозволив виявити локальні області, які характеризуються підвищеною дисипацією енергії, що

призводить до більш інтенсивного руйнування міжфазних границь і складових евтектики та впливає на показники структури та службові властивості литого матеріалу. За допомогою запропонованих авторами критеріїв, встановлено, що під дією електромагнітних сил у розплаві сплаву на основі алюмінію, навіть у ламінарних режимах руху рідини, в структурах течій виникають локальні рециркуляційні зони. Проведений аналіз дав змогу визначити потенційні можливості електродних систем в якості джерела формування просторової силової дії та електродинамічних збурень.

Наукова новизна – подальшого наукового розвитку набув методичний підхід до кількісної оцінки енергетичних впливів на рідкометалеві системи стосовно процесів кондукційної електрострумової обробки розплаву.

Практична значимість – запропоновано засади кількісної оцінки енергетичних впливів на рідкометалеву систему при кондукційній електрострумній обробці. Їх використання дозволяє розширити технологічні можливості методу та здійснювати прогнозування якості кінцевого продукту.

Ключові слова: електрострумова обробка; розплав; електродна система; гідродинамічне поле; моделювання.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

На теперішній час накопичилось досить багато публікацій щодо результатів різнотипних методів кондукційної електрострумової обробки (КЕСО) розплавів. Суттю якої є обробка розплаву металу безпосередньо електричним струмом, який вводиться у об'єкт обробки за допомогою електродів струмопідводів, для отримання виливків з покращеними структурними показниками та властивостями. Втім, фактично не існує узагальненої методики практичного (інженерного) розрахунку конструктивних і режимних параметрів устаткування для КЕСО та енергетичних характеристик процесу обробки для широкого спектру модифікацій електродних систем для КЕСО. Створення та використання такої методики дасть змогу розширити діапазон прогнозування результатів та вдосконалити можливість оптимізації режимів обробки, засади для чого вже закладено в роботах [1–8]. Найбільш доцільним для реалізації такого підходу є використання математичного моделювання задля зниження кількості експериментальних досліджень та економії матеріальних ресурсів. Однак, слід зазначити, що дослідження електромагнітних, теплових та гідродинамічних полів методами математичного моделювання при КЕСО є складною задачею [8–10]. Пов'язано це зі складністю дослідження мультифізичних та багатомасштабних процесів, інтерпретацією результатів та оцінки їх потенціального ефекту на результат кристалізації. Тому дослідження особливостей розподілу та розробка узагальнених критеріїв для оцінки потенційної ефективності впливу фізичних полів при КЕСО є актуальною науково-практичною задачею.

ВІДОКРЕМЛЕННЯ НЕВИРІШЕНИХ РАНІШЕ ЧАСТИН ЗАГАЛЬНОЇ ПРОБЛЕМИ

Сили, що виникають у металевому розплаві при його взаємодії з електромагнітним полем (ЕМП) струму, що проходить крізь нього при КЕСО, є одним із ключових факторів при формуванні гідродинамічного поля [8; 9; 11]. Основний фізичний механізм руху базується на взаємодії струму, який проходить крізь

електропровідну рідину з власним магнітним полем. Внаслідок чого у розплаві виникає об'ємна електромагнітна сила (F_{em}), напрям і величина якої визначає характер та інтенсивність течій. Ця сила завжди орієнтована перпендикулярно до вектору густини струму та магнітної індукції. Це обумовлює утворення структур течій в залежності від геометрії електродної системи та режиму пропускання струму. Таким чином, електромагнітна дія є однією з основних первинних рушійних сил, що генерує зародження та розвиток руху рідкого металу. Особливістю таких течій є їх об'ємний характер, тому що на відміну від класичних механічних збурень, електромагнітна сила діє безпосередньо в об'ємі, а не лише на межових ділянках. Це сприяє розвитку складних 3D-потоків і формуванню великих вихрових утворень, здатних суттєво змінювати тепло- та масоперенесення у розплаві. Ці течії є ключовими для перемішування розплаву, вирівнювання температурного поля та запобігання локальним перегрівам та покращує умови кристалізації при подальшому охолодженні. Водночас надмірно інтенсивний потік може спричинити ерозію стінок тигля або нестабільність поверхні розплаву, зумовлюючи небажані технологічні ефекти, зокрема захоплення газових включень. Тому контроль просторової структури об'ємної електромагнітної сили та поля течій, які при цьому генеруються, є критично важливим для оптимізації технологічного процесу КЕСО [12] через вплив на всі ключові процеси перемішування, теплоперенесення, масоперенесення та, як підсумок, на результат кристалізації. Отже саме детальний аналіз характеристик електромагнітних сил та гідродинамічного поля, а також чисельне моделювання їх розподілу, є невід'ємними складовими досліджень, спрямованих на пошук найдоцільніших схем та режимів електрострумової обробки розплаву, покращення його кристалізаційної здатності та якості кінцевого металевого продукту.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

У цій роботі автори ставили за мету шляхом математичного моделювання у тривимірній постановці дослідити особливості розподілу гідродинамічного

поля та його характеристик при кондукційній електрострумовій обробці розплаву з використанням паралельних електродів.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Постановку задачі зроблено аналогічно як в роботах [8–12]. Це циліндрична ємність заповнена розплавом алюмінієвого сплаву з непровідними стінками та дном (див. рис. 1) і має висоту (H), діаметр (D). В неї занурюються електроди 1 і 2, які розташовані паралельно один до одного та знаходяться на відстані (L_e) між центрами електродів. У якості об'єкта, що подавався електрострумовій обробці, був взятий поширений у ливарному виробництві сплав А356 в рідкому стані. Електроди титанові, діаметром (d_{el}) та занурені в розплав на глибину (h). Електроізоляція бічної поверхні електродів, діаметром (d_{is}), виконувалася за допомогою трубок з кварцового скла, які кріпилися на електроди на термостійку обмазку.

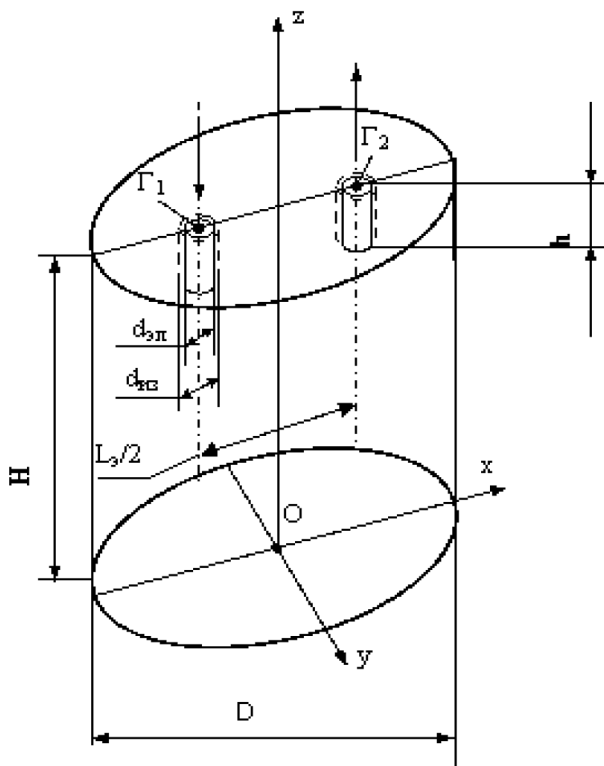


Рис. 1. Геометрична модель задачі

Не знижуючи загальності задачі приймемо наступні геометричні розміри: $H = 100$ мм; $D = 100$ мм; $L_e/2 = 50$ мм; $d_{el} = 5$ мм; $d_{is} = 6$ мм. Величина h варіювалася від 10 до 90 мм для кожного електрода, струм проходить через розплав за напрямком від перетину Γ_1 до перетину Γ_2 .

На даному етапі досліджень розглянемо квазістаціонарне гармонійне електромагнітне поле у рідкометалевому струмопровідному середовищі, для якого система рівнянь записується в такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \tilde{H} &= \tilde{J} = \sigma(\tilde{E} + \mathbf{v} \times \tilde{B}) + \tilde{J}^e, \\ \nabla \times \tilde{E} &= -i\omega \tilde{B}, \\ \nabla \cdot \tilde{B} &= 0, \\ \nabla \cdot \tilde{J} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де ∇ – оператор набла; $\tilde{H}$ – комплексна амплітуда напруженості магнітного поля у розплаві, А/м; $\tilde{J}$ – комплексна амплітуда густини струму, А/м²; σ – питома електрична провідність, См/м; $\tilde{E}$ – комплексна амплітуда напруженості електричного поля, В/м; $\mathbf{v}$ – швидкість розплаву, м/с; $\tilde{B}$ – комплексна амплітуда індукції магнітного поля, Тл; $\tilde{J}^e$ – комплексна амплітуда густини струмів, А/м².

Об'ємна електромагнітна сила визначається як

$$F_{em} = \frac{1}{2} \cdot \Re(\tilde{J} \times \tilde{B}^*). \quad (2)$$

Гідродинамічні поля в рідкому металевому провіднику досліджувались шляхом розв'язку рівняння Нав'є-Стокса для в'язкої нестисливої рідини при $\nabla \cdot \mathbf{v} = 0$ [7; 10]

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \gamma \Delta \mathbf{v} - \frac{1}{\rho} \nabla P_m + \frac{F_{em}}{\rho}, \quad (3)$$

де F_{em} – об'ємна електромагнітна сила, Н/м³; Δ – оператор Лапласа; γ – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с; ρ – густина розплаву, кг/м³; P – тиск, Па.

На даному етапі, не знижуючи загальності задачі досліджень, обмежимося розв'язанням рівнянь Максвелла у квазістаціонарній постановці для гармонійних струмів (частота 50 Гц) та Нав'є-Стокса для стаціонарного режиму з відповідними початковими та граничними умовами [4; 9; 10]. Також буде використовуватись умова безіндукційного приближення та рух розплаву буде виникати тільки під дією електромагнітної сили. Розрахунки проводились методом скінчених елементів [13].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Типи двохелектродних систем, які запропоновано для досліджень схематично зображено на (рис. 2). Такі електродні системи, є найпростішими та такими, що найбільш часто використовуються при КЕСО [2–4; 8; 11]. Звісно, вони не охоплюють весь спектр доступних електродних систем, але це дасть нам змогу встановити потенційні функціональні можливості кожної з використаних систем та оцінити працездатність запропонованих нами критеріїв для подальших теоретичних та практичних досліджень.

Отримані результати дадуть змогу визначити особливості розподілу поля течій в залежності від типу електродної системи, максимальні та інтегральні значення швидкості течій. На базі цих результатів введемо наступні критерії (коефіцієнти) для оцінки

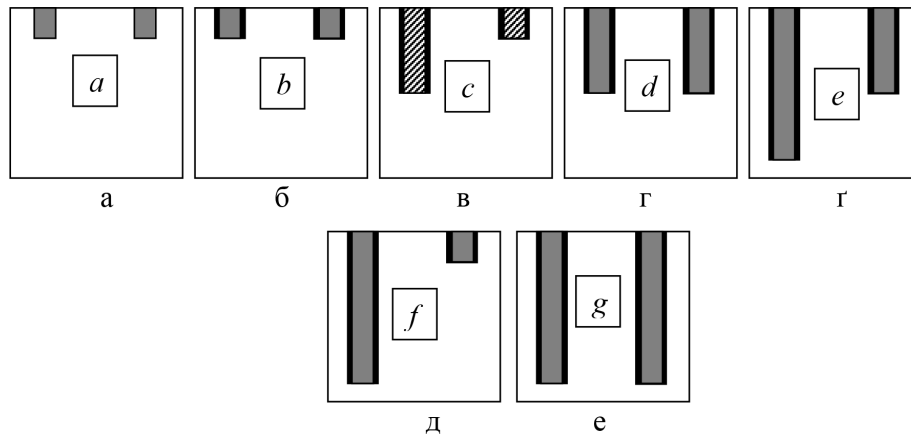


Рис. 2. Типи електродних систем: а – система з неізолюваними електродами, заглибленими на 10 мм; б – система з електродами з ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 10 мм; в – система з електродами з ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 50 мм і 10 мм; г – система з електродами з ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм і 50 мм; д – система з електродами з ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм і 10 мм; е – система з електродами з ізолюваною бічною поверхнею, заглибленими на 90 мм

функціональних можливостей кожної з електродних систем.

Для кількісного аналізу структури електромагнітного поля та його впливу на динаміку розплаву доцільно використовувати нормовані інтегральні критерії, що є сучасною тенденцією для різних видів енергетичної обробки розплавів [14–16], які характеризують просторові особливості розподілу електромагнітних сил. Для дослідження характеристик силового впливу було запроваджено три показники:

1. Коефіцієнт середньої електромагнітної сили ($\bar{F}$). Цей показник характеризує, наскільки рівномірно електромагнітне поле збуджує розплав. Значення, близьке до 1, свідчить про те, що електромагнітна сила в більшості точок об'єму незначно відрізняється від максимального значення, тобто поле є практично рівномірним. Низькі значення коефіцієнта вказують на те, що значна частина об'єму знаходиться в зоні слабого електромагнітного збудження, а основний вплив поля зосереджений у периферійних або локалізованих ділянках. Коефіцієнт середньої електромагнітної сили визначається як середнє нормоване значення електромагнітної сили в об'ємі розплаву:

$$\bar{F} = \frac{\iiint_V |F_{em}| dV}{F_{max} \cdot V}, \quad (4)$$

де F_{em} – локальне значення електромагнітної сили, Н/м³; F_{max} – максимальне значення електромагнітної сили в розглянутому об'ємі, Н/м³; V – об'єм розплаву, м³.

2. Середньоквадратична електромагнітна сила (F_{rms}).

Середньоквадратична електромагнітна сила визначається як нормована величина, що описує сумарну інтенсивність електромагнітного впливу в межах усього об'єму розплаву. Цей коефіцієнт дає

змогу оцінити, наскільки значними є локальні піки сили порівняно із середнім рівнем. Оскільки використовується квадрат модуля сили, особливий внесок у значення коефіцієнта роблять саме області з підвищеною інтенсивністю поля. Таким чином, F_{rms} є чутливим показником просторової неоднорідності, який дозволяє виявити концентровані зони електромагнітного збудження. Вона обчислюється за формулою:

$$F_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{V} \iiint_V |F_{em}|^2 dV}}{F_{max}}, \quad (5)$$

де F_{em} – локальне значення електромагнітної сили, Н/м³; F_{max} – максимальне значення електромагнітної сили в розглянутому об'ємі, Н/м³; V – об'єм розплаву, м³.

3. Відносний коефіцієнт інтенсивності електромагнітних сил (F_{rms_var}).

Відносний коефіцієнт інтенсивності електромагнітних сил є інтегральним показником ступеня контрастності розподілу електромагнітних сил. Він порівнює середньоквадратичне та середнє значення сили, дозволяючи оцінити, наскільки рівномірним є поле з точки зору поєднання локальних піків та середнього рівня інтенсивності. Таким чином, F_{rms_var} може бути використаний як критерій для порівняння геометрії електродів, частотно-струмових режимів, що обумовлює різні конфігурації електромагнітного впливу. Він визначається як

$$F_{var} = F_{rms} / \bar{F}. \quad (6)$$

Для кількісної оцінки рівномірності, інтенсивності та контрастності течій доцільно запровадити низку інтегральних коефіцієнтів, що характеризують розподіл швидкостей у всьому об'ємі рідкого металу. Кожен із цих коефіцієнтів має специфічне фізичне

значення та дозволяє оцінити характеристику течії з різних сторін, від загальної інтенсивності руху до рівномірності розподілу швидкості та наявності локальних зон прискорення.

За аналогією з коефіцієнтами для електромагнітних сил доцільно використовувати:

1. Коефіцієнт середньої швидкості ($\bar{U}$)

Коефіцієнт середньої швидкості описує середнє нормоване значення швидкості у всьому об'ємі розплаву. Цей коефіцієнт є показником того, наскільки «рівномірно активним» є об'єм розплаву з точки зору руху. Тобто можна прогнозувати, наскільки значна частина об'єму бере участь у русі зі швидкостями, близькими до максимальних. Наприклад, коли коефіцієнт має високі значення то рівномірний рух є практично в усьому об'ємі розплаву. Низькі значення вказують на те, що рух сконцентрований у локальних зонах, наприклад, поблизу стінок тигля, у центральному потоці або в окремих вихрових структурах. Це може призводити до генерації дисипативних течій, руйнування фаз, евтектики, неметалевих включень, дендритів, тощо.

$$\bar{U} = \frac{\int_V |U| dV}{U_{\max} \cdot V}, \quad (7)$$

де U – локальне значення швидкості, м/с; $U_{\max}$ – максимальне значення швидкості у об'ємі, м/с; V – об'єм розплаву, м³.

2. Середньоквадратична швидкість (U_{rms})

Середньоквадратична швидкість визначається як нормована величина, що характеризує інтегральну інтенсивність руху розплаву:

$$U_{rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{V} \int_V |U|^2 dV}}{U_{\max}}, \quad (8)$$

де U – локальне значення швидкості, м/с; $U_{\max}$ – максимальне значення швидкості у об'ємі, м/с; V – об'єм розплаву, м³.

Цей коефіцієнт дозволяє кількісно оцінити сумарний «енергетичний» рівень течії, оскільки квадрат швидкості прямо пов'язаний із кінетичною енергією потоку. Значення U_{rms} є особливо чутливим до локальних зон прискорення, оскільки включення квадрата швидкості підсилює внесок найбільш динамічних ділянок. Таким чином, цей коефіцієнт використовується для оцінки того, наскільки загальний характер течії визначається локальними струменями, примежовими зонами або інтенсивними вихровими структурами. Високе його значення свідчить про добре розвинену, інтенсивну циркуляцію, що забезпечує ефективне теплоперенесення та гомогенізацію розплаву.

3. Відносний коефіцієнт інтенсивності швидкостей (U_{var})

Відносний коефіцієнт визначається як

$$U_{var} = U_{rms} / \bar{U}. \quad (9)$$

Він слугує інтегральною мірою неоднорідності швидкісного поля. Він дозволяє визначити, чи є течія переважно рівномірною, чи її структура формується за рахунок «пікових» зон підвищеної швидкості. А також вказує на наявність течій, де домінують локальні струменеві потоки або зони прискорення, які суттєво відрізняються від середнього рівня швидкості. У технологічних процесах це може слугувати показником покращеної ефективності перемішування.

ОБГОВОРЕННЯ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Оскільки авторами вже було проведено моделювання ЕМП у 3D-постановці для електродних систем a, b, f, g (див. рис. 2) в роботі [9], наведемо цей результат (див. рис. 3) як приклад, який демонструє особливості їх розподілу.

З отриманих на рис. 3 розподілів електромагнітного поля видно, що навіть при частоті струму 50 Гц, без вираженого скін-ефекту ми отримуємо суттєво різні за топологією електромагнітні поля. Так, для електродних систем a, b, g (див. рис. 3 а, б, г) характерне більш рівномірне ЕМП, хоча кожна з них має свою виражену індивідуальну зону впливу та приводити до гомогенізації та рафінування розплаву. Для системи f (див. рис. 3 в) характерне найбільш нерівномірне ЕМП, це, потенційно, повинно призводити до створення більш непотенційного силового впливу та здатності змінювати структуру металу, що обробляється. Ці особливості частково було підтверджено експериментально [8; 10; 11].

На рисунку 4 представлено розподіл гідродинамічного поля у розплаві, які відображено за допомогою кольорових слайсів (перерізів) та ліній потоку течій.

На рисунку 5 наведено графіки відносних значень максимальної електромагнітної сили ($F_{\max}^*$) та відносних максимальних швидкості течій ($U_{\max}^*$) для електродних систем $a-g$ (див. рис. 1).

З представлених на рисунку 4 розподілів поля течій для електродних систем $a-g$ (див. рис. 2) можна заключити, що навіть у рамках стаціонарної ламінарної моделі можна досліджувати складні рециркуляційні структури гідродинамічного поля, що виникають при КЕСО. Так візуально можна спостерігати, що за умов використання електродних систем с рівнозаглибленими електродами a, b, d, g (див. рис. 4 а, б, г, е) характерні рівномірні тороїдальні лінії потоку, що потенційно характеризуються сприятливими умовами для дегазації, гомогенізації. Електродні системи c, e, f (див. рис. 4 в, д, е) повинні дають змогу реалізовувати локальні зони з більш неоднорідним розподілом швидкостей та структурою течій.

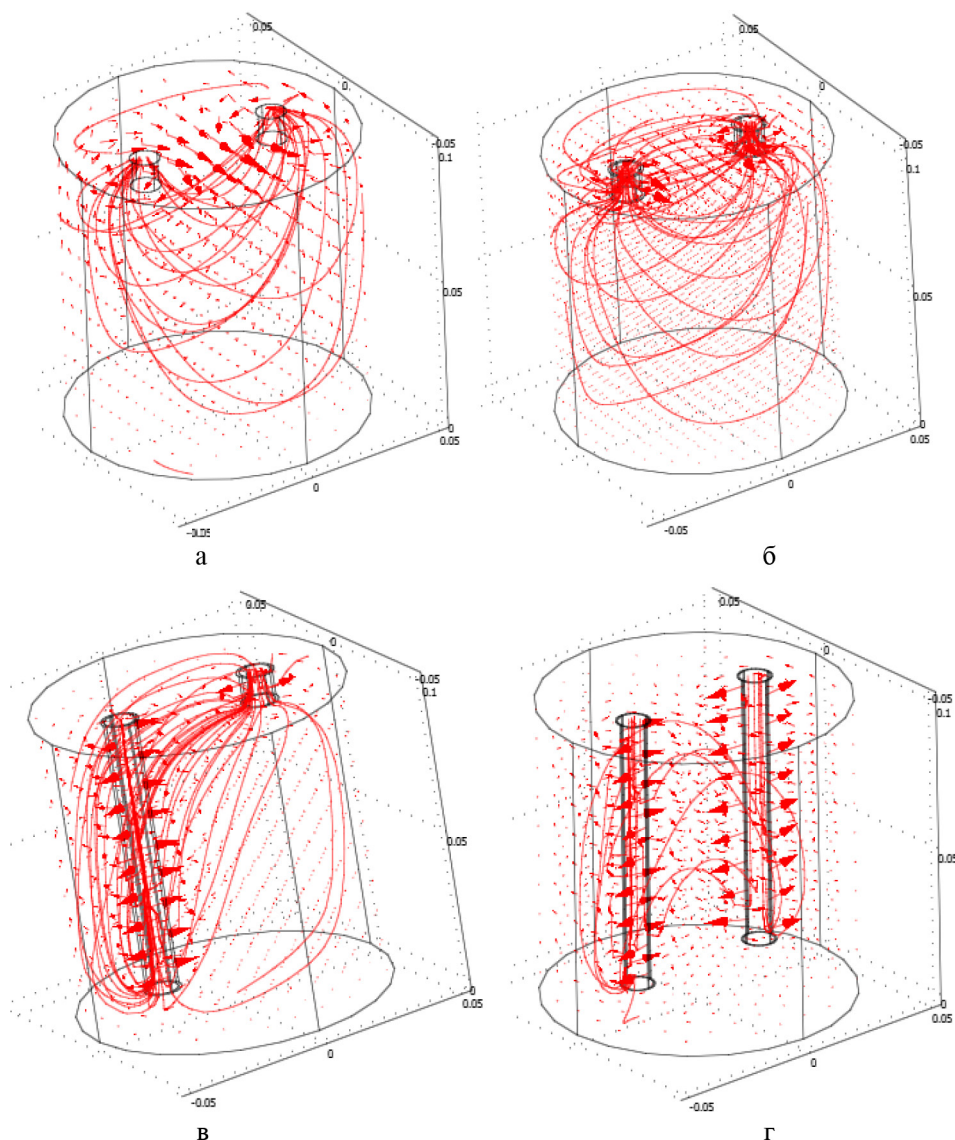


Рис. 3. Розподіл електричного та магнітного поля в електродних системах різних типів при частоті струму 50 Гц (стрілки – магнітне поле, лінії – електричне поле): а) електродна система *a*; б) електродна система *b*; в) електродна система *f*; г) електродна система *g*

Представлені графіки відносних значень $F_{\max}$ та $U_{\max}$ (див. рис. 5) для типів електродних систем *a–g* демонструють важливу, але не завжди очевидну закономірність, що висока електромагнітна сила не гарантує найбільшої гідродинамічної реакції потоку. Наприклад, режими *b*, *c*, *d*, *e*, *f* мають відносні значення $F_{\max}$ від 0,8 до 1, але лише режими *b*, *e* та *f* показують відповідно високі швидкості $U_{\max}$. Це доводить, що ефективність перетворення енергії електромагнітного поля в енергію руху залежить від просторового розподілу ЕМП, а значить та просторової конфігурації електромагнітної сили, а не тільки від її локального максимуму. Таким чином, показники $F_{\max}$ та $U_{\max}$ треба аналізувати комплексно, можливо навіть у якості співвідношення $U_{\max}/F_{\max}$, що може давати нам первісну інформацію щодо інтенсивності перемішування та ефективності перетворення енергії ЕМП

в енергію руху. Однак них не достатньо для дослідження відмінностей у структурі вихорів течій та зон дисипації.

Якщо б електродні системи були осесиметричними, то такий візуальний аналіз у площині центральної вісі, а також кількісний аналіз числових значень для двовірного поля був би достатнім. Однак ми маємо складну несиметричне непотенційне об'ємне ЕМП та поле швидкостей течій, тому доповнимо результати моделювання кількісними показниками за допомогою запроваджених критеріїв.

На рисунку 6 та рисунку 7 представлено графіки відносних значень для запропонованих нами критеріїв для різних типів електродних систем.

Дані, які приведено на рис. 6 та рис. 7 дали змогу дослідити функціональні можливості кожної з наведених електродних систем з точки зору формування

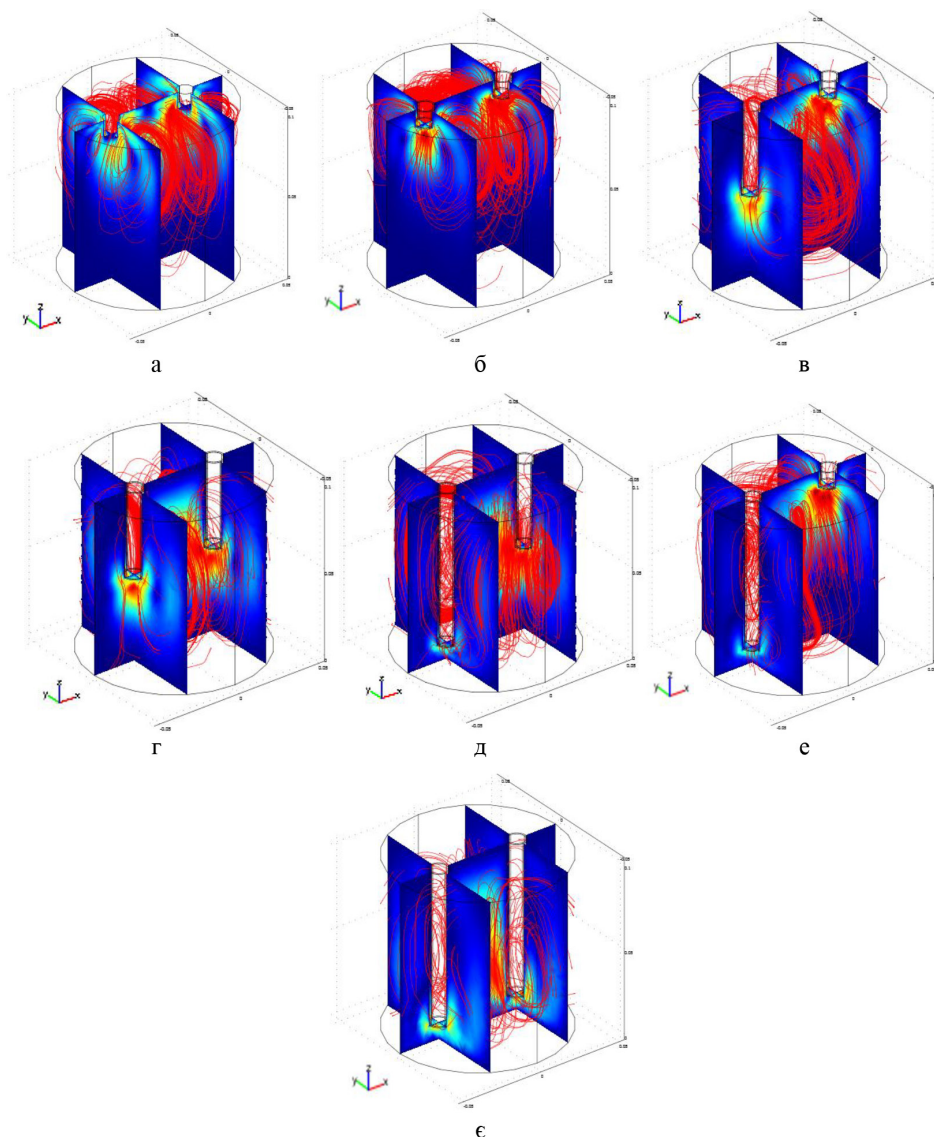


Рис. 4. Розподіл гідродинамічного поля (кольорова гама) та ліній потоку течій розплаву (лінії) для електродних систем *a–g* (див. рис. 2) а) електродна система *a*; б) електродна система *b*; в) електродна система *c*; г) електродна система *d*; е) електродна система *b*

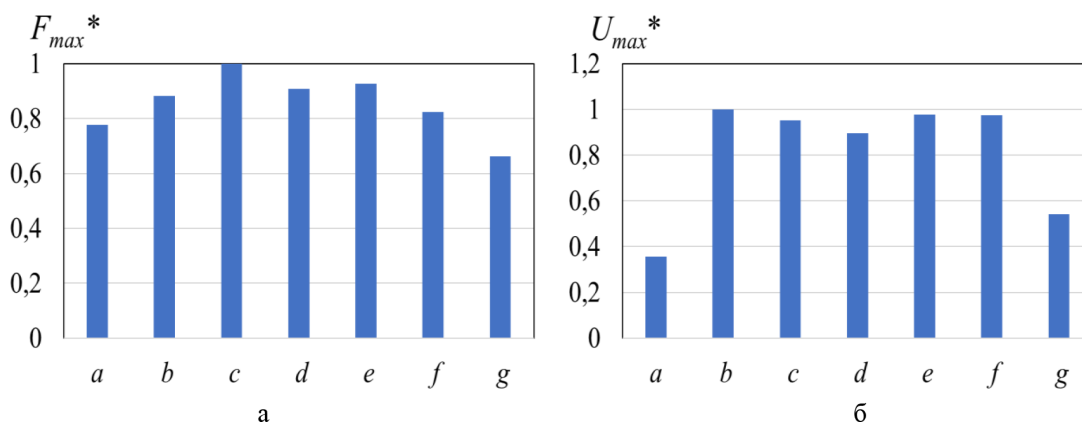


Рис. 5. Графіки для відносних максимальних значень електромагнітної сили (*f*) та швидкості течій розплаву (*б*) для електродних систем *a–g* (див. рис. 2)

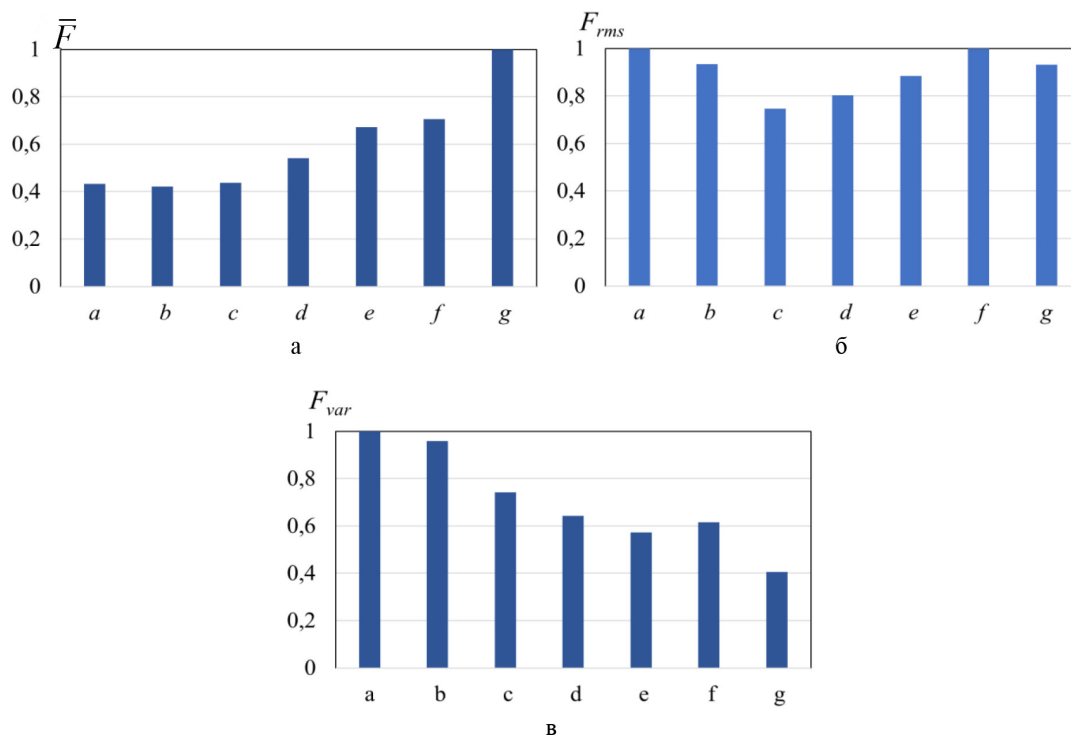


Рис. 6. Графіки для відносних значень інтегральних критеріїв силового впливу в об'ємі розплаву при КЕСО для електродних систем *a–g* (див. рис. 2)

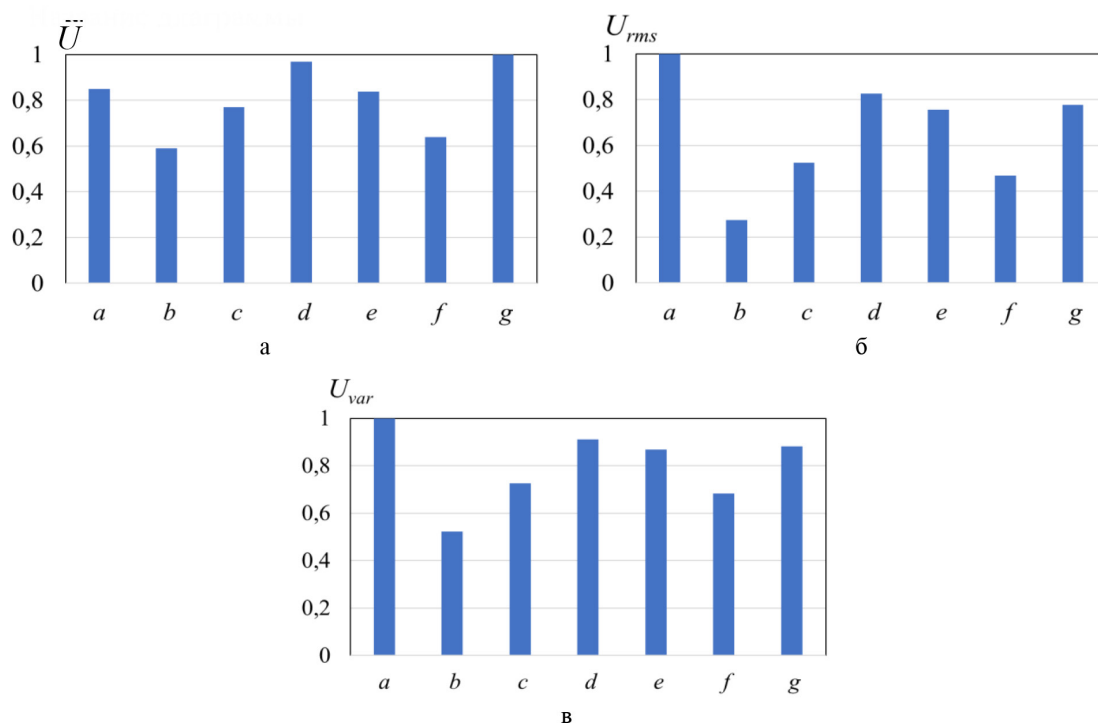


Рис. 7. Графіки для відносних значень інтегральних критеріїв гідродинамічних процесів в об'ємі розплаву при КЕСО для електродних систем *a–g* (див. рис. 2)

та характеру поля швидкості течій у об'ємі розплаву при КЕСО.

Електродна система *a* характеризується одним із найнижчих значень $F_{\max}$, що означає відносно слабкий піковий електромагнітний вплив. Проте значення F_{rms} та F_{var} , які дорівнюють одиниці демонструють майже практичну однорідність. Високі значення U_{rms} та U_{var} , що також дорівнюють одиниці свідчать про те, що потік працює у стабільному ламінарному режимі з повним охопленням об'єму. Але $U_{\max} = 0,36$ є найнижчими серед досліджуваних електродних систем.

Електродна система *b* демонструє найвищу відносну швидкість $U_{\max} = 1,0$ при $F_{\max} \approx 0,88$, що означає найкращий гідродинамічний ККД, коли відносно стандартна сила створює максимально можливу швидкість. Водночас невисоке значення $\bar{F}^*$ та водночас $F_{var} \approx 0,96$ вказують на високу, хоч і не ідеальну рівномірність силового поля. Швидкісні критерії показують низькі значення. Тобто потік має потужні вихрові складові, але охоплює лише частину об'єму у верхній частині ємності з розплавом.

Електродна система *c* має максимальне $F_{\max}$ серед електродних систем та $U_{\max} = 0,95$. Силове поле не надто рівномірне та має значення $F_{var} = 0,74$. Це означає, що просторовий розподіл швидкостей течій викликає значні нерівномірності. Швидкісні коефіцієнти $\bar{U} = 0,77$ та $U_{rms} \approx 0,5$ свідчать про те, що течія є змішаною, тобто частина об'єму інтенсивно перемішується, але присутні й великі «тихі» зони. Це режим частково вихрових коливань, які можуть бути корисні для локальної обробки, але не забезпечують повного перемішування.

Електродна система *d* характеризується середніми показниками $\bar{F}$ та F_{var} . Критерій $\bar{U}_{\max} = 0,97$, а $\bar{U}_{var}$ та U_{rms} дорівнюють приблизно 0,9. Це характеризує гідродинамічне поле як одне з найбільш рівномірних. Це збалансований режим, у якому об'єм активно перемішується з мінімальною локалізацією сили або швидкості. Ідеально придатний для вирівнювання температури чи концентрації без надмірних нелінійних навантажень.

Електродна система *e* має досить високе значення $\bar{F}$ при високому F_{rms} . Це свідчить, що об'єм рідкометалевої рідини збуджується більш рівномірно ніж у *c* або *d*, але не так рівномірно як у *a*. Швидкісні показники $\bar{U}^*$ та U_{rms} демонструють добре розвинену структуру вихорів та суттєве охоплення об'єму. Потік збалансований і здатний проникати у глибину розплаву. Режим добре підходить для гомогенізації та підготовки перед кристалізацією.

Електродна система *f* вирізняється найбільшим $F_{rms} = 1$ після нормування, що означає максимальні пікові коливання сили при високому середньому

навантаженні ($\bar{F} = 0,71$). Це створює складну, багатовихрову структуру потоку з великими градієнтами швидкості. Хоч $\bar{U}_{\max} = 0,974$ досить високе, у серед-

ньому швидкість нижча ($\bar{U} = 0,6$), а $U_{rms}/\bar{U} = 0,684$ вказує на значну нелінійність течії. Це найбільш дисипативний режим, і саме тому він ідеально підходить для обробки структури розплаву: руйнування дендритів, активації кристалізаційних центрів, дроблення евтектики.

Режим *g* має найнижчий $F_{\max} = 0,66$, при цьому середня сила максимальна ($\bar{F} = 1$), але відношення $F_{rms}/\bar{F} = 0,4$, тобто силове поле майже повністю вирівняне, але занадто слабе для створення суттєвого руху. Це підтверджується низьким $\bar{U}_{\max} = 0,541$. Потік є плавним, повільним, рівномірним, майже без вихрових зон. Режим гідралічно пасивний і не підходить для активної обробки розплаву.

ВИСНОВКИ

Шляхом математичного моделювання у тривимірній постановці досліджено функціональні можливості впливу на характеристики силової та гідродинамічної дії при різних типах геометрії двоелектродних систем з паралельними електродами.

За результатами розрахунків встановлено, що під дією електромагнітних сил у розплаві сплаву на основі алюмінію, навіть у ламінарних режимах руху рідини, в структурах течій виникають локальні рециркуляційні зони. Виявлення цих зон проводилося не лише якісно шляхом аналізу карт кольорових карт швидкостей течій та векторів потоку, а й за допомогою запропонованих авторами критеріїв, що дають змогу кількісно оцінювати рівномірності розподілу швидкостей та величини діючих сил.

Дослідження розглянутого комплексу електродних систем для кондукційної електрострумової обробки дозволило виявляти локальні області, які характеризуються підвищеною дисипацією енергії, що обумовлює більш інтенсивне руйнування міжфазних границь і складових евтектики, що впливає на показники структури матеріалу. Навпроти, регіони з більш рівномірним рухом розплаву є сприятливими для гомогенізації розплаву після збурень. Такий аналіз дав змогу визначити потенційні можливості електродних систем в якості джерела формування просторової силової дії та електродинамічних збурень.

Запропоновані засади кількісного оцінювання енергетичних впливів на рідкометалеву систему при кондукційній електрострумовій обробці показали себе важливим інструментом для розширення технологічних можливостей методу та прогнозування якості кінцевого продукту.

REFERENCES

- [1] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y., Zhai, Q., Wang, G., StJohn, D., & Dargusch, M. (2021). Investigating the grain refinement mechanisms of pulsed electric current, ultrasonic and melt stirring solidification of pure aluminium. *JOM*, 73(12), 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [2] Wang, G., Dargusch, M., Easton, M., & StJohn, D. (2018). Fundamentals of Aluminium Metallurgy. Chapter 9 – Treatment by External Fields, 279–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00009-6>
- [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] Eskin, D. G., & Jiawei, M. (2018). *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Springer Series in Materials Science <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3/>
- [5] Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A., Zubenina, N. F., & Sirenko, K. A. (2020). Research of possibility of control of the formation of crystal structure of Metal Alloys. *Science and Innovation*, 16(4), 67–73. <https://doi.org/10.15407/science16.04.067>
- [6] Choi, J. S., La, M., Kim, D., Choe, K.-H., Hyun, S.-K., & Kim, M.-J. (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>
- [7] Liang, C.-L., & Lin, K.-L. (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A Review. *Materials Characterization*, 145, 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>
- [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] Ivanov, A., & Chestnykh, M. (2024). Three-dimensional modeling of electromagnetic field distribution and force action characteristics during conductive electric current treatment of melts in frequency modes. *Electromechanical and Energy Saving Systems*, 65(2), 8–13. <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.1>
- [10] Zhang, Y. H., Xu, Y. Y., Ye, C. Y., Sheng, C., Sun, J., Wang, G., Miao, X. C., Song, C. J., & Zhai, Q. J. (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [11] Rübiger, D., Zhang, Y., Galindo, V., Franke, S., Willers, B., & Eckert, S. (2016). Experimental study on directional solidification of Al-Si alloys under the influence of electric currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 143, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/143/1/012021>
- [12] Ivanov, A. V., & Tsurkin, V. N. (2019). Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different modes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 55(1), 53–64. <https://doi.org/10.3103/s1068375519010101>
- [13] Meunier, G. (2008). *The finite element method for electromagnetic modeling*. London : ISTE Ltd.
- [14] Zielinska, M., Yang, H., Madej, L., & Malinowski, L. (2024). Development and validation of computational fluid dynamics model of ladle furnace with Electromagnetic Stirring System. *Materials*, 17(4), 960. <https://doi.org/10.3390/ma17040960>
- [15] Xu, G., Tan, R., Song, B., Liu, W., Yang, S., Zuo, X., & Huang, Y. (2023). Numerical simulation of the effect of solidified shell conductivity and billet sizes on the magnetic field with final electromagnetic stirring in continuous casting. *Materials*, 13, 4765. <https://doi.org/10.3390/ma16134765>
- [16] Jaime, R. F., Puga, H., Prokic, M., Söderhjelm, C., & Apelian, D. (2024). Fundamentals of ultrasonic treatment of aluminum alloys. *International Journal of Metalcasting*, 18(4), 2783–2807. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01253-w>

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y., Zhai, Q., Wang, G., StJohn, D., & Dargusch, M. (2021). Investigating the grain refinement mechanisms of pulsed electric current, ultrasonic and melt stirring solidification of pure aluminium. *JOM*, 73(12), 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [2] Wang, G., Dargusch, M., Easton, M., & StJohn, D. (2018). Fundamentals of Aluminium Metallurgy. Chapter 9 – Treatment by External Fields, 279–332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00009-6>
- [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] Eskin, D. G., & Jiawei, M. (2018). *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Springer Series in Materials Science <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3/>
- [5] Nuradinov, A. S., Nogovitsyn, A. V., Nuradinov, I. A., Zubenina, N. F., & Sirenko, K. A. (2020). Research of possibility of control of the formation of crystal structure of Metal Alloys. *Science and Innovation*, 16(4), 67–73. <https://doi.org/10.15407/science16.04.067>
- [6] Choi, J. S., La, M., Kim, D., Choe, K.-H., Hyun, S.-K., & Kim, M.-J. (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>

- [7] Liang, C.-L., & Lin, K.-L. (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A Review. *Materials Characterization*, 145, 545–555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>
- [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] Ivanov, A., & Chestnykh, M. (2024). Three-dimensional modeling of electromagnetic field distribution and force action characteristics during conductive electric current treatment of melts in frequency modes. *Electromechanical and Energy Saving Systems*, 65(2), 8–13. <https://doi.org/10.32782/2072-2052.2024.2.65.1>
- [10] Zhang, Y. H., Xu, Y. Y., Ye, C. Y., Sheng, C., Sun, J., Wang, G., Miao, X. C., Song, C. J., & Zhai, Q. J. (2018). Relevance of electrical current distribution to the forced flow and grain refinement in solidified Al-Si hypoeutectic alloy. *Scientific Reports*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-018-21709-y>
- [11] Rübiger, D., Zhang, Y., Galindo, V., Franke, S., Willers, B., & Eckert, S. (2016). Experimental study on directional solidification of Al-Si alloys under the influence of electric currents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 143, 012021. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/143/1/012021>
- [12] Ivanov, A. V., & Tsurkin, V. N. (2019). Peculiarities of distribution of electromagnetic and hydrodynamic fields for conductive electric current treatment of melts in different modes. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 55(1), 53–64. <https://doi.org/10.3103/s1068375519010101>
- [13] Meunier, G. (2008). *The finite element method for electromagnetic modeling*. London : ISTE Ltd.
- [14] Zielinska, M., Yang, H., Madej, L., & Malinowski, L. (2024). Development and validation of computational fluid dynamics model of ladle furnace with Electromagnetic Stirring System. *Materials*, 17(4), 960. <https://doi.org/10.3390/ma17040960>
- [15] Xu, G., Tan, R., Song, B., Liu, W., Yang, S., Zuo, X., & Huang, Y. (2023). Numerical simulation of the effect of solidified shell conductivity and billet sizes on the magnetic field with final electromagnetic stirring in continuous casting. *Materials*, 13, 4765. <https://doi.org/10.3390/ma16134765>
- [16] Jaime, R. F., Puga, H., Prokic, M., Söderhjelm, C., & Apelian, D. (2024). Fundamentals of ultrasonic treatment of aluminum alloys. *International Journal of Metalcasting*, 18(4), 2783–2807. <https://doi.org/10.1007/s40962-023-01253-w>

© Іванов А. В., Честних М. В.

Дата першого надходження статті до видання: 18.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.05.2026



Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)