

УДК 621.74:537.84

МОДЕЛЮВАННЯ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПІЧНОМУ АГРЕГАТІ  
З ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ПЕРЕМІШУВАННЯМ РІДКОГО МЕТАЛУ

О.І. Бондар, О.І. Глухенький, канд.техн.наук, Ю.М. Гориславець, докт.техн.наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна. E-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)

Виконано мультифізичне 3D моделювання електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів у відбивній печі для алюмінію з комбінованим електромагнітним перемішувачем рідкого металу, який в залежності від роду живлення (трифазного чи однофазного) відповідно створює біжуче або пульсуюче магнітні поля. Досліджено чотири режими роботи такого перемішувача, за якими перемішування металу у ванні печі здійснюється під дією окремо біжучого і окремо пульсуючого магнітного поля, в режимі почергової дії цих полів, а також при реверсному чергуванні у часі біжучого магнітного поля. Моделювалася ситуація, за якої рідкий метал у печі нагрівався зверху без перемішування протягом певного часу, а потім одночасно вмикався нагрів і вмикався перемішувач, що призводило до вирівнювання температури металу у ванні печі. Встановлено, що використання режимів перемішування з перемиканням магнітних полів дозволяє суттєво підвищити ефективність перемішування розплаву металу у ванні печі. Бібл. 4, рис. 3.

**Ключові слова:** мультифізичне моделювання, відбивна піч, електромагнітний перемішувач, пульсуюче і біжуче магнітні поля, нагрівання металевого розплаву.

**Вступ.** Перемішування рідкого металу – важлива технологічна операція, яка виконується, зокрема, при плавленні металів і приготуванні сплавів з метою інтенсифікації технологічних процесів і поліпшення якості литих заготовок. Таку операцію здійснюють в основному за допомогою багатофазних електромагнітних перемішувачів, які створюють біжуче або обертове магнітні поля. Особливо гостра потреба в перемішуванні металевого розплаву, як відомо, виникає у відбивних печах і міксерях, джерело нагрівання металу в яких розташоване зверху (над його поверхнею) [2]. Часто в цих випадках використовують електромагнітний перемішувач біжучого магнітного поля, який пристиковується до бічної стінки ванни печі, за рахунок чого в ній створюється одноконтурна (в плані) вихрова течія рідкого металу [4]. Така течія втягує у рух в основному периферійні (пристінні) шари металу. У центральній частині ванни утворюється застійна зона, де метал недостатньо перемішується. Поліпшити ситуацію можна за рахунок використання електромагнітного перемішувача з пульсуючим магнітним полем. Такий перемішувач на відміну від перемішувача з біжучим полем створює у ванні двоконтурну вихрову течію, яка ефективно перемішує метал саме у центральній зоні ванни печі.

З метою подальшого підвищення ефективності перемішування розплаву у ванні печі запропоновано використати почергову силову дію на рідкий метал біжучого та пульсуючого магнітних полів [3]. Періодичне чергування одноконтурної і двоконтурної вихрових течій дозволяє більш якісно перемішувати рідкий метал у всьому об'ємі ванни печі. Застійні зони, що виникають при одному режимі роботи, ефективно перемішуються при іншому. В роботі [3] проведено аналіз електромагнітних і гідродинамічних процесів для двох конструктивних рішень комбінованого перемішувача рідкого металу, побудованих на основі електромагнітних систем (індукторів), які в залежності від роду живлення (багатофазного чи однофазного) відповідно створюють переважно біжуче або пульсуюче магнітні поля.

**Мета** цієї роботи – на основі комп'ютерного 3D моделювання електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів у системі "комбінований перемішувач – ванна з рідким металом" визначити найбільш ефективні режими перемішування рідкого металу.

**Постановка задачі.** Процеси досліджувалися на прикладі електромагнітного перемішувача, побудованого

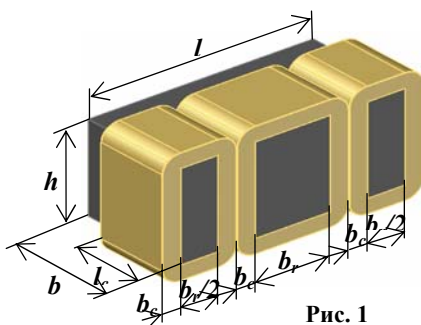


Рис. 1

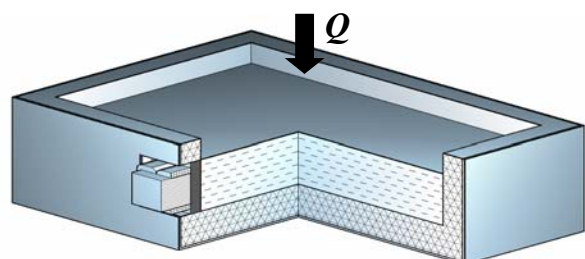


Рис. 2

на основі тристрижневого індуктора з електричними котушками на кожному стрижні (рис. 1). При живленні такого індуктора трифазним струмом він створює біжуче магнітне поле, а у випадку однофазного живлення – пульсуюче. Індуктор пристикований до бічної стінки ванни відбивної печі для алюмінію (рис. 2). Розглядалася робота перемішувача в наступних режимах: 1) пульсуючого магнітного поля, 2) біжучого поля, 3) при почерговій дії пульсуючого і біжучого магнітних полів, а також 4) при реверсному чергуванні у часі біжучого поля.

Моделювалася наступна ситуація. Рідкий метал заданого об'єму нагрівався у ванні печі через верхню поверхню тепловим потоком  $Q$  у відсутності перемішування. Через заданий проміжок часу  $\Delta t$  нагрівання металу припинялося і водночас вмикався перемішувач в одному із зазначених режимів. Оцінка ефективності кожного режиму роботи перемішувача здійснювалася шляхом визначення у часі різниці  $\Delta T$  між максимальною і мінімальною температурою рідкого металу. Кращим (більш ефективним) режимом вважався той, який забезпечував досягнення різниці  $\Delta T$  допустимої неоднорідності температури (наприклад, 50 К) за менший проміжок часу.

Дослідження зазначеної ситуації проводилося на основі числового розв'язання трьох тривимірних задач: стаціонарної задачі розрахунку електромагнітного поля та нестационарних гідродинамічної і теплової задач. У першій задачі визначалися об'ємні електромагнітні сили в рідкому металі, у другій – параметри його руху, а в третій – розподіл температури металу в часі з врахуванням теплопередачі за рахунок масопереносу. Процеси вважалися слабкозв'язаними [1], що дозволило розв'язувати задачі послідовно.

Розрахунок електромагнітного поля проводився шляхом числового рішення диференціального рівняння щодо комплексних амплітуд векторного магнітного  $\dot{\mathbf{A}}$  та скалярного електричного  $\dot{\phi}$  потенціалів

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega\epsilon_0 \epsilon_r) \nabla \dot{\phi} = \dot{\mathbf{J}}_e,$$

де  $\mu_0$  і  $\epsilon_0$  – магнітна і діелектрична проникності вакууму,  $\mu_r$  і  $\epsilon_r$  – відносні магнітна і діелектрична проникності,  $\sigma$  – питома електропровідність,  $\omega$  – кутова частота,  $\dot{\mathbf{J}}_e$  – комплексна амплітуда густини струму зовнішніх джерел із заданим розподілом.

Швидкість металевого розплаву визначалася за допомогою числового рішення диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса для в'язкої турбулентної течії

$$\rho_m \partial \mathbf{u} / \partial t + \rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0,$$

де  $\mathbf{u}$  – швидкість руху рідкого металу,  $\rho_m$  – густина металу,  $p$  – тиск,  $\eta_{\text{eff}}$  – коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості металу, який визначається за допомогою k-ε моделі турбулентності,  $\mathbf{f}$  – питома електромагнітні сили в рідкому металі, обчислені в результаті розв'язання електромагнітної задачі.

Для моделювання теплових процесів у печі з врахуванням руху рідкого металу використовувалося нестационарне рівняння теплопровідності

$$\rho_m C \partial T / \partial t + \rho_m C \mathbf{u} \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + q,$$

де  $C$  – питома теплоємність,  $T$  – абсолютна температура,  $k$  – коефіцієнт теплопровідності,  $q$  – внутрішні джерела тепла. Початковий розподіл температури стінок печі визначався шляхом попереднього розв'язання стаціонарної теплової задачі з заданою температурою внутрішніх поверхонь стінок, що дорівнює початковій температурі розплаву.

**Результати моделювання.** Моделювання електромагнітних, гідродинамічних і теплових процесів у відбивній печі з комбінованим електромагнітним перемішувачем рідкого металу проводилося при наступних вихідних даних. Об'єм рідкого металу (алюмінію), що знаходиться у ванні печі, становить  $(3 \times 2 \times 0,5) \text{ м}^3$ . Комбінований індуктор розташований біля більшої бокової стінки ванни печі симетрично щодо металу як по довжині, так і по висоті. Між індуктором і розплавом металу розташована неелектропровідна ізоляційна перегородка товщиною 0,1 м. Основні геометричні розміри індуктора, які позначені на рис. 1, склали: довжина осердя  $l=0,6$  м, ширина  $b=0,3$  м, його висота  $h=0,3$  м, ширина центрального стрижня –  $b_r=0,2$  м. Довжина котушок дорівнює довжині стрижнів  $l_c = l_r = 0,2$  м, а ширина їхнього поперечного перерізу становить  $b_c = 0,05$  м.

Розрахунки виконувалися при живленні індуктора струмом промислової частоти ( $\omega = 2\pi \times 50$  1/с). Було прийнято, що ефективне значення ампервитків кожної котушки складає 20 кА, а фазовий кут між струмами сусідніх котушок при трифазному живленні дорівнює 60 ел. град., а при однофазному – 180 ел. град. Тепловий потік у режимі нагрівання рідкого металу прийнято рівним  $Q = 600$  кВт, а час нагрівання (без перемішування)

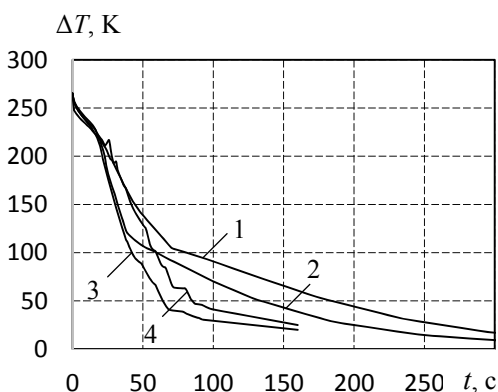


Рис. 3

$\Delta t = 20$  хв. За початкову температуру розплаву прийнято температуру плавлення алюмінію, тобто 933 К. За 20 хв. нагрівання різниці  $\Delta T$  між максимальною (на поверхні) і мінімальною (на дні ванни) температурою рідкого металу становила 265 К.

У результаті проведеного моделювання для кожного режиму перемішування отримано розподіл електромагнітних сил у рідкому металі, вихрові течії розплаву у ванні печі, а також розподіл температури металу з плином часу. На рис. 3 показано залежності різниці  $\Delta T$  між максимальним і мінімальним значеннями температури рідкого металу для різних режимів перемішування. Крива 1 на цьому рисунку відповідає роботі перемішувача в режимі біжучого магнітного поля, крива 2 – в режимі пульсуючого поля, крива 3 отримана в режимі по-

чергової дії біжучого і пульсуючого магнітних полів, а крива 4 – при реверсному чергуванні у часі біжучого поля. Перемикання магнітних полів в останніх двох випадках здійснювалося з інтервалом у 40 с, що забезпечувало перемішування металу в режимі нестационарного гідродинамічного руху.

Аналізуючи наведені дані, можна дійти наступного висновку. Якщо порівнювати між собою перші два режими, перевагу слід віддати роботі комбінованого перемішувача в режимі пульсуючого магнітного поля. Незважаючи на дещо нижчий рівень швидкості металу в порівнянні з режимом біжучого поля, двоконтурна структура руху в цьому випадку призводить до скорішого усереднення температури в об'ємі розплавленого металу. Що стосується режимів роботи перемішувача з перемиканням у часі магнітних полів, то обидва вони переважають за ефективністю перші два режими. Особливо це стосується режиму з почерговою дією пульсуючого і біжучого магнітних полів, що дозволяє рекомендувати його для практичного використання.

1. Подольцев А.Д., Кучерявая И.Н. Мультифизическое моделирование электротехнических устройств // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 2. – С. 3-15.

2. Тир Л.Л., Столов М.Я. Электромагнитные устройства для управления циркуляцией расплава в электропечах. – М.: Металлургия, 1991. – 280 с.

3. Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – Pp. 605-608.

4. Non ferrous casting. – Equipment MHD Technology. – Riga: Krāsainie lējumi, 2004.

УДК 621.74:537.84

#### МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПЕЧНОМ АГРЕГАТЕ С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА

А.И. Бондарь, А.И. Глухенький, канд. техн. наук, Ю.М. Гориславец, докт. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины,

пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

Е-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)

*Выполнено мультифизическое 3D моделирование электромагнитных, гидродинамических и тепловых процессов в отражательной печи для алюминия с комбинированным электромагнитным перемешивателем жидкого металла, который в зависимости от рода питания (трехфазного или однофазного) соответственно создает бегущее или пульсирующее магнитные поля. Исследованы четыре режима работы такого перемешивателя, при которых перемешивание металла в ванне печи осуществляется под действием отдельно бегущего и отдельно пульсирующего магнитного поля, в режиме поочередного действия этих полей, а также при реверсном чередовании во времени бегущего магнитного поля. Моделировалась ситуация, при которой жидкий металл в печи нагревался сверху без перемешивания в течение определенного времени, а затем одновременно выключался нагрев и включался перемешиватель, что приводило к выравниванию температуры металла в ванне печи. Установлено, что использование режимов перемешивания с переключением магнитных полей позволяет существенно повысить эффективность перемешивания расплава металла в ванне печи. Библиограф. 4, рис. 3.*

**Ключевые слова:** мультифизическое моделирование, отражательная печь, электромагнитный перемешиватель, пульсирующее и бегущее магнитные поля, нагрев металлического расплава.

#### MODELING OF PHYSICAL PROCESSES IN THE FURNACE UNIT WITH ELECTROMAGNETIC STIRRING OF LIQUID METAL

O.I. Bondar, O.I. Glukhenkyi, Yu.M. Gorislavets

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine,

pr. Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

Е-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)

*Multiphysical 3D modeling of electromagnetic, hydrodynamic and heating processes in reverberatory furnace for aluminum with combined electromagnetic stirrer of liquid metal, which creates traveling or pulsating magnetic fields depending on power type (multiphase or single phase power supply respectively) was performed. Four regimes of work of this stirrer, by which stirring of metal in furnace tank is carried out under the influence of separately traveling and separately pulsating magnetic field, in the regime of sequential action of these fields, and in case of reverse alternation in time of traveling magnetic field were investigated. The situation was modeled, according to which liquid metal in furnace was heated from above without stirrer over a period of time, after that heating was disabled and the stirrer was enabled simultaneously, which brought eventually to temperature equalization of metal in furnace tank. Established that using of regimes of stirrer with switching of magnetic fields allows a significant increase the effectiveness of stirring of melt in furnace tank. References 4, figures 3.*

**Key words:** multiphysical modeling, reverberatory furnace, electromagnetic stirrer, traveling and pulsating magnetic fields, heating of melt.

1. Podoltsev A.D., Kucheriava I.N. Multiphysics modeling of electrotechnical devices // Tekhnichna Elektrodynamika. – 2015. – No 2. – Pp. 3-15. (Rus)

2. Tir L.L., Stolor M.Ya. Electromagnetic devices to control the circulation of the melt in electric furnaces. – Moskva: Metallurgiya, 1991. – 280 p. (Rus)

3. Dubodelov V.I., Gorislavets Yu.M., Glukhenkyi A.I., Fikssen V.M. Electromagnetic stirrer of liquid metal with alternate action of traveling and pulsating magnetic fields // Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Conference on Electromagnetic Processing of Materials EPM2015. – October 12-16, 2015. – Cannes, France. – Pp. 605-608.

4. Non ferrous casting. – Equipment MHD Technology. – Riga: Krāsainie lējumi, 2004.

Надійшла 29.01.2016  
Остаточний варіант 07.04.2016