

УДК 621.74: 537.84

**ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПЕРЕМЕШИВАТЕЛЬ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА С ПООЧЕРЕДНЫМ ДЕЙСТВИЕМ БЕГУЩЕГО И ПУЛЬСИРУЮЩЕГО МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ**

**А.И.Глухенький**, канд.техн.наук, **Ю.М.Гориславец**, докт.техн.наук, **В.Ю.Максименко**  
**Институт электродинамики НАН Украины,**  
**пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина**  
**e-mail: [ugoris@ied.org.ua](mailto:ugoris@ied.org.ua)**

*Представлена электромагнитная система для перемешивания жидкого металла в плавильных печах и миксерах, способная поочередно создавать бегущее и пульсирующее магнитные поля. Проведено компьютерное 3D моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов для такого комбинированного перемешивателя. Электромагнитные расчеты выполнялись при заданных напряжениях на катушках системы. Гидродинамические расчеты проводились как для стационарного, так и нестационарного режимов. Показано, что периодическое чередование бегущего и пульсирующего магнитных полей позволяет реализовать эффективное перемешивание металла во всем объеме ванны печи. Получены электромагнитные и гидродинамические характеристики перемешивателя. Библ. 3, табл. 1, рис. 2.*

**Ключевые слова:** электромагнитный перемешиватель, жидкий металл, компьютерное моделирование, электромагнитное поле, гидродинамическое течение.

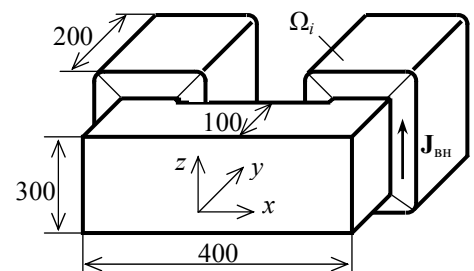
Перемешивание жидкого металла в процессе плавки и приготовления металлических сплавов позволяет выровнять температуру и химический состав в объеме расплава, ускорить растворение легирующих и модифицирующих добавок и, в конечном итоге, повысить качество выплавляемого металла. Такое перемешивание зачастую осуществляется с помощью электромагнитных перемешивателей, которые используют бегущее магнитное поле, созданное многофазными (двух- и трехфазными) индукторами. Особенно острая необходимость в перемешивании расплава, как известно, возникает в отражательных печах и миксерах, нагрев металла в которых осуществляется сверху. Электромагнитный перемешиватель в этом случае обычно пристыковывается к боковой стенке ванны печи, за счет чего в ней создается одноконтурное (в плане) вихревое течение жидкого металла. Недостатком такого течения является то, что в центральной части ванны печи образуется застойная зона, в которой металл недостаточно перемешивается. Улучшить ситуацию можно за счет использования перемешивателя с пульсирующим магнитным полем [2]. Такой перемешиватель в отличие от перемешивателя с бегущим магнитным полем создает в ванне двухконтурное вихревое течение, эффективно перемешивающее именно центральную зону.

Для существенного улучшения перемешивания металла во всем объеме ванны печи нами было предложено периодически чередовать указанные вихревые структуры, т.е. чередовать между собой одноконтурное и двухконтурное вихревые течения. Целью данной работы является исследование электромагнитных и гидродинамических характеристик электромагнитного перемешивателя, способного создавать указанные структуры течений за счет поочередного (периодического) действия на металл бегущего и пульсирующего магнитных полей.

На рис. 1 показана электромагнитная система (индуктор) одного из простейших в конструктивном плане перемешивателей, способных поочередно создавать такие поля. Она состоит из шихтованного ферромагнитного сердечника П-образной формы и двух катушек, одетых на стержни сердечника. При подключении этих катушек на однофазное напряжение такая система создает в жидком металле пульсирующее магнитное поле, а при подаче на них напряжений, сдвинутых между собой на 60 эл. град., – бегущее поле.

Для такой системы выполнено компьютерное 3D моделирование электромагнитного поля и гидродинамики жидкого металла применительно к отражательной печи для алюминия. Считается, что между жидким металлом и индуктором находится электроизоляционная плита, стойкая в среде жидкого алюминия. Для упрощения задания источников электромагнитного поля каждая катушка разбивалась на подобласти с одинаковым пространственным направлением плотности тока, совпадающим с одним из направлений декартовых координат. Методика численного трехмерного моделирования электромагнитного поля при заданных плотностях тока в катушках перемешивателя представлена в [1].

В данной работе моделирование электромагнитного поля осуществлялось при заданных напряжениях на катушках перемешивателя, что обеспечивает учет реальных углов сдвига фаз между токами в катушках при



**Рис. 1**

питании их от промышленной сети. Это потребовало решения цепи-полевой задачи, представляющей собой систему интегро-дифференциальных уравнений для векторного магнитного  $\mathbf{A}$  и скалярного электрического  $\phi$  потенциалов, а также уравнений баланса напряжений для каждой катушки перемешивателя

$$\nabla \times (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \nabla \times \dot{\mathbf{A}}) + (j\omega\sigma - \omega^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r) \dot{\mathbf{A}} + (\sigma + j\omega\varepsilon_0 \varepsilon_r) \nabla \phi = \mathbf{j}_{\text{вн}}, \quad (1)$$

$$\dot{U} = \dot{I}R + j\omega w \dot{\Phi}_{\text{мб}} = \dot{I}R + j\omega w \sum_{i=1}^n \frac{1}{S_k} \int_{\Omega_i} \pm \dot{A}_j dV. \quad (2)$$

В этих уравнениях  $\mu_0$  и  $\varepsilon_0$  – магнитная и диэлектрическая проницаемости вакуума,  $\mu_r$  и  $\varepsilon_r$  – относительные магнитная и диэлектрическая проницаемости,  $\sigma$  – удельная электропроводность,  $\omega$  – угловая частота,  $\mathbf{j}_{\text{вн}}$  – внешняя плотность тока,  $\dot{U}$ ,  $\dot{I}$ ,  $R$ ,  $w$ ,  $S_k$  – напряжение, ток, активное сопротивление, количество витков и поперечное сечение катушки соответственно,  $\dot{\Phi}_{\text{мб}}$  – потокоцепление "массивного" витка с плотностью тока  $\dot{J}_{\text{вн}} = \dot{I}w/S_k$  (при  $\sigma_{\text{мб}} = 0$ ) [3],  $\dot{A}_j$  – декартова компонента векторного магнитного потенциала по направлению проводника с током в  $i$ -той подобласти ( $\Omega_i$ ) катушек. Для представления в уравнении (2) в соответствии с теоремой Стокса магнитного потока через векторный магнитный потенциал ( $\Phi = \oint \mathbf{A} d\mathbf{l}$ ) знак в подынтегральном выражении для каждой из подобластей определяется с учетом правила скалярного произведения векторов.

Распределение скорости  $\mathbf{u}$  жидкого металла в ванне находилось путем численного расчета уравнений Навье-Стокса для турбулентного течения с использованием  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, который выполнялся для стационарного ( $\partial \mathbf{u} / \partial t = 0$ ) и нестационарного ( $\partial \mathbf{u} / \partial t \neq 0$ ) режимов

$$\rho_m \partial \mathbf{u} / \partial t + \rho_m (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla \cdot (\eta_{\text{эф}} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{f}; \quad \nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3,4)$$

где  $\rho_m$  – плотность жидкого металла,  $p$  – давление,  $\eta_{\text{эф}}$  – коэффициент эффективной динамической вязкости металла,  $\mathbf{f}$  – объемные электромагнитные силы в жидком металле, вычисленные в результате решения цепи-полевой задачи.

Моделирование электромагнитных и гидродинамических процессов проводилось для печи, внутренние размеры ванны которой составляют  $(2 \times 3)$  м, а высота жидкого металла в ней – 0,5 м. Электромагнитная система с размерами, указанными на рис. 1, пристыкована к длинной стенке ванны печи и размещена на расстоянии 100 мм от жидкого металла. Сечение катушек  $S_k = (50 \times 200)$  мм<sup>2</sup>. Питание системы осуществлялось от промышленной сети.

На рис. 2 представлены расчетные установившиеся течения жидкого металла в горизонтальной плоскости (в среднем по высоте сечения) ванны печи при питании индуктора от системы напряжений, сдвинутых между собой на 60 эл. град. (рис. 2, а), и однофазном питании (рис. 2, б). Как и предполагалось, в первом случае образуется одноконтурное вихревое течение расплава, а во втором – двухконтурное. Чередование во времени таких течений позволяет эффективно перемешивать жидкий металл во всем объеме ванны печи. Застойные зоны, возникающие при одном режиме работы, эффективно перемешиваются при другом режиме.

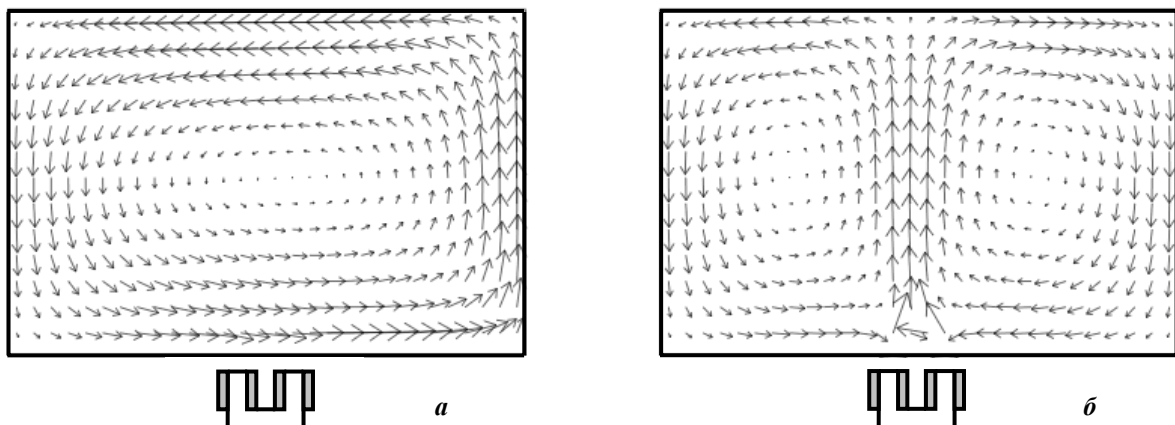


Рис. 2

В результате решения нестационарной задачи были определены длительности переходных гидродинамических процессов. При включении системы в однофазную сеть время установления двухконтурного течения металла в ванне с указанными выше размерами составило примерно 100 с, а при подключении системы на двухфазное напряжение время установления одноконтурного течения металла составило 150 с. При переключении системы с одного режима течения на другой время переходного процесса (время перехода от одного стационарного режима к другому) оказалось примерно равным 120 с.

Ниже в таблице представлены интегральные электромагнитные и гидродинамические характеристики исследуемого перемешивателя с числом витков в каждой катушке  $w=55$  при питании их в режиме бегущего

магнитного поля двухфазным напряжением 220 В со сдвигом фаз 60 эл. град, а в режиме пульсирующего поля – однофазным напряжением 380 В. Здесь  $B$  – среднее значение магнитной индукции в сердечнике (амплитудное значение),  $P$  – тепловыделения в жидком металле,  $S$  – полная мощность индуктора,  $V$  – средняя скорость движения металла в ванне печи,  $N$  – объемная производительность перемешивания.

Режим	$U$ , В	$I$ , А	$B$ , Тл	$P$ , кВт	$S$ , кВА	$V$ , м/с	$N$ , м <sup>3</sup> /час
Бегущее поле	220	356	0,51	3,06	152	0,105	180
Пульсирующее поле	380	325	1,02	6,83	247	0,072	176

Из таблицы следует, что питание катушек индуктора в режиме бегущего магнитного поля от двух сдвинутых на 60 эл. град. фазных напряжений сети, а в режиме пульсирующего поля от линейного напряжения обеспечивает примерно равные токовые нагрузки. Угол фазового сдвига между токами в катушках в первом случае составил 28,6 эл. град. Магнитная индукция в сердечнике не превышает допустимый уровень. Тепловыделения в металле и полная мощность перемешивателя существенно выше в режиме пульсирующего поля. Усредненная по всему объему ванны печи скорость жидкого металла выше в режиме бегущего поля, тем не менее массовая производительность (расход) металла, которую обеспечивает исследуемая система, примерно одинаковая в обоих режимах. Для заданного объема жидкого металла в печи (3 м<sup>3</sup>) она обеспечивает примерно 60-кратное перемешивание металла в ванне за один час.

1. Глухенький А.И., Гориславец Ю.М., Токаревский А.В. Трехмерное моделирование однофазного электромагнитного перемешивателя жидких металлов // Технічна електродинаміка. – 2013. – №5. – С. 77–84.
2. Дубоделов В.И., Фиксен В.Н., Глухенький А.И., Гориславец Ю.М. МГД перемешиватели алюминиевых сплавов с пульсирующим магнитным полем // Технічна електродинаміка. – 2009. – №1. – С. 61–66.
3. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.

УДК 621.74:537.84

## ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ ПЕРЕМІШУВАЧ РІДКОГО МЕТАЛУ З ПОЧЕРГОВОЮ ДІЄЮ БІЖУЧОГО І ПУЛЬСУЮЧОГО МАГНІТНИХ ПОЛІВ

О.І.Глухенький, канд.техн.наук, Ю.М.Гориславец, докт.техн.наук, В.Ю.Максименко

Інститут електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна.

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

*Представлено електромагнітну систему для перемішування рідкого металу в плавильних печах і міксерях, яка здатна по черзі створювати біжуче і пульсуюче магнітні поля. Проведено комп'ютерне 3D моделювання електромагнітних і гідродинамічних процесів для такого комбінованого перемішувача. Електромагнітні розрахунки виконувалися при заданих напругах на котушках системи. Гідродинамічні розрахунки проводилися як для стаціонарного, так і нестаціонарного режимів. Показано, що періодичне чергування біжучого і пульсуючого магнітних полів дозволяє реалізувати ефективно перемішування металу у всьому об'ємі ванни печі. Отримано електромагнітні та гідродинамічні характеристики перемішувача. Бібл. 3, табл. 1, рис. 2.*

**Ключові слова:** електромагнітний перемішувач, рідкий метал, комп'ютерне моделювання, електромагнітне поле, гідродинамічна течія.

## ELECTROMAGNETIC STIRRER OF LIQUID METAL WITH ALTERNATE ACTION OF TRAVELING AND PULSATING MAGNETIC FIELDS

A.I.Glukhenkyi, Yu.M.Gorislavets, V.Yu.Maksimenko

Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine,

Pr. Peremogy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

*Electromagnetic system for liquid metal stirring in melting furnaces and mixers which creates alternately travelling and pulsating magnetic fields is presented. For such combined stirrer the 3D computer modelling of electromagnetic and hydrodynamic processes is carried out. The electromagnetic computations were performed at given coils voltages in the system. The hydrodynamic computations were made for both stationary and non-stationary conditions. As shown, the periodic alternation of travelling and pulsating magnetic fields allows realize effective metal stirring in all space of furnace bath. The electromagnetic and hydrodynamic characteristics of the stirrer are obtained. References 3, tables 1, figures 2.*

**Keywords:** electromagnetic stirrer, liquid metal, computer simulation, electromagnetic field, hydrodynamic flow.

1. Glykhenkyi O.I., Goryslavets Yu.M., Tokarevs'kyi A.V. Three-dimensional simulation of single-phase electromagnetic stirrer // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – No.5. – Pp.77-84. (Rus)

2. Dubodelov V.I., Fiksen V.N., Glykhen'kyi O.I., Goryslavets Yu.M. MHD stirrer of aluminium alloys with pulsed magnetic field // Tekhnichna elektrodynamika. – 2009. – No.1. – Pp.61-66. (Rus)

3. Kalantarov P.L., Zeitlin L.A. Inductance Calculation: Handbook. – L.: Energoatomizdat, 1986. – 488 p. (Rus).

Надійшла 07.02.2014