

**ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

УДК 621.313.5

[https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63)Христинич Р.М.<sup>1</sup>, Христинич Е.В.<sup>1</sup>, Христинич А.Р.<sup>2</sup><sup>1</sup>Красноярский государственный аграрный университет<sup>2</sup>Красноярский институт железнодорожного транспорта (филиал Иркутского государственного университета путей сообщения)

**МОДЕЛЬ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПЛЕКСА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО  
ПЕРЕМЕШИВАНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В ТРАНСПОРТНОМ КОВШЕ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ  
СЛОЖНОКОМПОНЕНТНЫХ СПЛАВОВ В ANSYS**

Приготовление сложнокомпонентных алюминиевых сплавов с использованием свинца требует интенсивного объемного перемешивания алюминиевого сплава. В настоящее время приготовление сплавов алюминий-свинец осуществляется в индукционных тигельных печах. Однако свинец загрязняет футеровку индукционной тигельной печи, что требует проведения капитального ремонта по её замене при переходе на приготовление других алюминиевых сплавов. Более прогрессивным в настоящее время является применение комплекса для электромагнитного перемешивания алюминиевого сплава в транспортном ковше. Целью работы является создание численной математической модели с использованием ANSYS для исследования параметров комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше. Математическая модель позволяет комплексно исследовать влияние электромагнитных параметров индуктора на скорость, траекторию движения, распределение легирующих компонентов и температуры алюминиевого расплава в транспортном ковше. При разработке математической модели использован базовый программный пакет ANSYS для решения электромагнитной задачи и пакет ANSYS CFX для решения гидродинамической и тепловой задач. Разработана численная математическая модель системы «электромагнитный индуктор - транспортный ковш - алюминиевый расплав» для анализа эффективности работы комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава с целью получения сложнокомпонентных алюминиевых сплавов на основе свинца и магния. Представлены комплексные решения, включающие электромагнитную, гидродинамическую и термодинамическую задачи применительно к перемешиванию и распределению свинца и магния в высокотемпературном алюминиевом расплаве. Проведен сравнительный анализ результатов математического моделирования и экспериментальных исследований для достижения максимальной эффективности распределения свинца или магния с использованием комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше. Математическая модель, реализованная в программном комплексе ANSYS, включающая совместные решения электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач может быть использована при разработке комплексов электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше для приготовления сложнокомпонентных алюминиевых сплавов на основе свинца. Результаты математического моделирования и экспериментальных исследований электромагнитного перемешивания расплава алюминий-свинец в транспортном ковше рекомендуется использовать на алюминиевых и металлургических заводах при приготовлении сложнокомпонентных сплавов.

**Ключевые слова:** комплекс, электромагнитное перемешивание, алюминиевый расплав, лигатура свинца, электромагнитный индуктор, транспортный ковш, трехмерная численная математическая модель, электромагнитная задача, гидродинамическая задача, термодинамическая задача.

**ВВЕДЕНИЕ**

Электромагнитное перемешивание электропроводных расплавов в миксерах, печах и транспортных ковшах широко применяется во всем мире [1-3]. Электромагнитное воздействие является бесконтактным воздействием, что не вносит дополнительных включений в расплав [4]. Эффективное электромагнитное перемешивание алюминиевых расплавов, в основном, применяется для рафинирования, очистки алюминиевых расплавов от щелочных и щелочноземельных металлов, криолита [5].

Применение электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортных ковшах является новой технологией приготовления сложнокомпонентных сплавов с минимальными затратами [6]. Такая технология является перспективной технологией по отношению к технологии приготовления алюминиевых сплавов в тигельных печах. После использования в качестве лигатуры свинца футеровка тигельной печи пропитывается им, и при переходе на другой сплав требуется замена футеровки. Это требует больших ка-

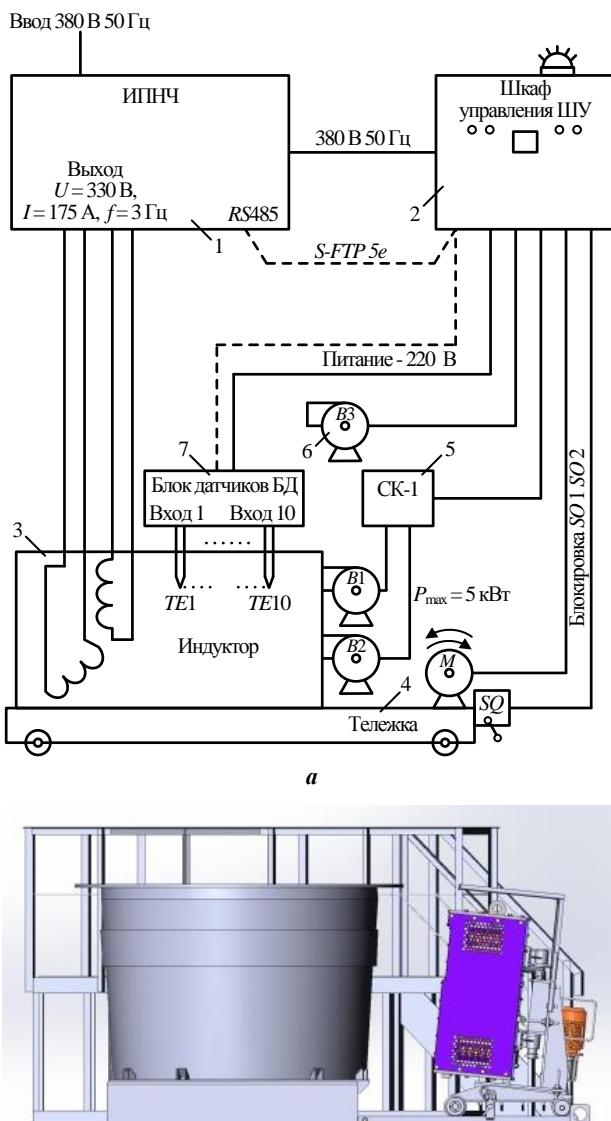
питальных и финансовых затрат.

Использование электромагнитного индуктора [7-9] для приготовления сплавов «алюминиевый расплав - свинец» в транспортных ковшах требует значительно меньших энергетических затрат, чем использование индукционной тигельной печи и ускоряет введение транспортного ковша в повторную эксплуатацию после замены футеровки.

Эффективность приготовления таких сплавов с использованием комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава является эффективной технологией и практически не уступает по качеству приготовления алюминиевых сплавов в тигельных печах.

**ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОСНОВНЫЕ ДОПУЩЕНИЯ**

Качество производимого алюминиевого полуфабриката с применением свинцовых, цинковых, магниевых легирующих зависит от многих факторов и требует интенсивного внешнего воздействия на расплав при его приготовлении. Такой алюминиевый сплав можно приготовить в транспортном ковше с использованием внешних источников интенсификации тепломассообмена алюминиевого расплава, например комплекса электромагнитного перемешивания (рис. 1).



**Рис. 1. Комплекс электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше:**  
а – структурная схема комплекса;  
б – индуктор возле транспортного ковша

Комплекс электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше включает следующие основные узлы и системы (рис. 1, а): систему электропитания, включающую источник питания низкой частоты 1 и шкаф управления и контроля температуры 2; электромагнитный индуктор 3 с тележкой перемещения 4; систему охлаждения индуктора 5, включающую приточные вентиляторы индуктора  $B_1$  и  $B_2$ ; систему газоудаления с вытяжным вентилятором 6; блок датчиков 7 контроля температуры индуктора. Исполнительным устройством комплекса электромагнитного перемешивания является электромагнитный индуктор [7-9], расположенный вдоль вертикальной образующей транспортного ковша с алюминиевым расплавом (рис. 1, б). Основной частью комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава, где реализуются функции электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава, является система «индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом». Численная математическая модель для

определения параметров системы «индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом» комплекса электромагнитного перемешивания для интенсификации тепломассообменных процессов в алюминиевом расплаве может быть реализована в программном комплексе ANSYS [10] и включает в себя следующие связанные задачи – электромагнитную, гидродинамическую и термодинамическую.

Основные допущения и свойства материалов при решении численной математической задачи принимаются следующими: поверхность алюминиевого расплава в транспортном ковше принимается в расчетах горизонтальной; плотность  $\rho$  и динамическая вязкость  $\eta$  расплава принимаются изотропными и не зависящими от температуры в рабочем диапазоне; скорость расплава в пограничном слое с футеровкой принимается равной нулю; удельное электрическое сопротивление алюминиевого расплава  $\rho_a = 2,7 \cdot 10^{-7}$  Ом·м; относительная магнитная проницаемость алюминиевого расплава  $\mu_r = 1$ ; удельное электрическое сопротивление магнитопровода индуктора вдоль шихтовки  $\rho_b = 10^{-6}$  Ом·м и поперек шихтовки  $\rho_h = \infty$ ; относительная магнитная проницаемость стали магнитопровода и металлокаркаса транспортного ковша  $\mu_r = 300$ ; удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость меди обмоток индуктора равны соответственно  $\rho_{ob} = 1,8 \cdot 10^{-6}$  Ом·м,  $\mu_r = 1$ ; удельное электрическое сопротивление внешнего пространства расчетной области  $\rho_{bh} = 10^{12}$  Ом·м; относительная магнитная проницаемость окружающей среды  $\mu_r = 1$ ; плотность алюминиевого расплава и шлака  $\rho_{Al} = 2356$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость алюминиевого расплава  $\eta_{Al} = 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с; кинематическая вязкость алюминиевого расплава  $\nu = 91 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с; теплопроводность и теплоемкость алюминиевого расплава и шлака равны соответственно  $\lambda_{Al} = 110$  Вт/(м·°C),  $c_{Al} = 1250$  Дж/(кг·°C); коэффициент черноты поверхности алюминиевого расплава, покрытого окисной пленкой  $\varepsilon = 0,3$ ; коэффициент температуропроводности алюминиевого расплава  $a = 122 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с.

#### КОМПЛЕКСНОЕ РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ, ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧ СИСТЕМЫ «ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ИНДУКТОР – ТРАНСПОРТНЫЙ КОВШ – АЛЮМИНИЕВЫЙ РАСПЛАВ»

Для расчетов электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в ковше принят электромагнитный перемешиватель со следующими параметрами двухфазного индуктора: габаритные размеры 1200×300×300 мм; частота тока, питающего индуктор 1,0-3,0 Гц; ток индуктора 200 А (регулируемый); линейная токовая нагрузка 160000 А/м; охлаждение индуктора воздушное. Объем алюминиевого расплава в транспортном ковше составляет 4,2 т.

В расчетах принята толщина зазора между активной поверхностью магнитопровода индуктора и алюминиевым расплавом равная 85 мм. Это расстояние включает: оgneупорный слой бетона стенки ковша 65 мм; стальной металлокаркас ковша 8 мм; технологический зазор между индуктором и металлокаркасом ковша 12 мм; стальной пояс ковша толщиной 20 мм.

Электромагнитное поле индуктора, расположенного вдоль вертикальной образующей ковша (рис. 2), в расчетной области создается токами, зависящими не только от координат, но и от времени, которое описывается системой уравнений Максвелла [11].

Токовые нагрузки катушек обмотки индуктора определены в виде компонент вектора плотности тока, изменяющихся по синусоидальному закону:

$$\dot{\vec{J}} = \vec{J}_a \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

Решение электромагнитной задачи в ANSYS [7] осуществляется при помощи уравнений Максвелла [11], представленных в виде системы уравнений для векторного магнитного потенциала:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} &= \frac{1}{\mu_a \gamma} \operatorname{div}(\operatorname{grad} \vec{A}) - \nabla \phi + (\vec{V} \times \operatorname{rot} \vec{A}); \\ \operatorname{div} \left( \gamma \left[ -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi + (\vec{V} \times \operatorname{rot} \vec{A}) \right] \right) &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

которая посредством метода конечных элементов сводится к решению уравнений для нестационарного процесса [12].

Так как в системе «индуктор – ковш» присутствуют различные составляющие элементы: магнитопровод индуктора, катушки обмотки индуктора, металлокаркас ковша, стальной пояс ковша, футеровка ковша, расплав алюминия в ковше, то используются различные формы конечных элементов: для расчета индуктора используются элементы типа «гексаэдр» в количестве 70 тыс. единиц; для расчета ковша и его составных частей используются элементы типа «тетраэдр» в количестве 100 тыс. единиц. Суммарное количество единичных элементов в расчетной области системы «индуктор – ковш с алюминиевым расплавом-воздушная среда расчетной области» достигает 770 тыс.

Использование гексаэдров в конечно-элементном разбиении индуктора обусловлено необходимостью более точного расчета при наличии большого количества различных частей индуктора (секции обмоток, листы магнитопровода, воздушные зазоры). Наличие гексаэдров позволяет вести расчет с меньшими затратами расчетного времени, но создает трудности при осуществлении процесса конечно-элементного разбиения.

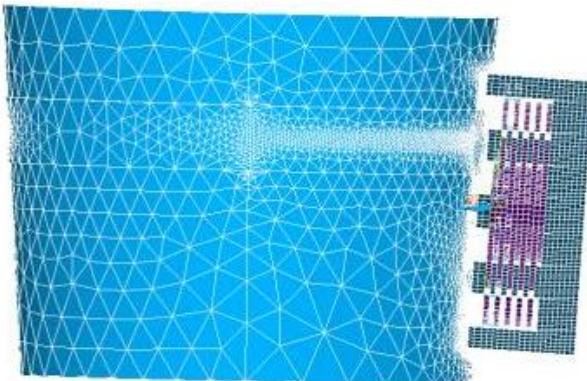


Рис. 2. Модель системы «индуктор – транспортный ковш» в ANSYS

Использование тетраэдров оправдано при расчетах более пространственных систем, например, транспортный ковш с алюминиевым расплавом. Особенностью разбиения в виде тетраэдров является более быстрое конечно-элементное разбиение, меньшая точность расчетов. Последнее компенсируется большими объемами однородной среды – алюминиевого расплава в транспортном ковше.

При увеличении тока в обмотке индуктора с 60 до 200 А (рис. 3) максимальное значение сил Лоренца увеличивается с 43 до 475 единиц. Частота при этом оставалась неизменной и равнялась 1,0 Гц. Таким образом, можно констатировать, что тяговое усилие при увеличении тока более чем в 3 раза увеличивается до 10 раз.

Задача расчета нестационарного движения алюминиевого расплава в ковше выполняется в среде ANSYS CFX [13].

Нестационарное гидродинамическое поле в области алюминиевого расплава описывается системой уравнений, которая включает уравнение неразрывности

$$\rho \operatorname{div}(u) = 0, \quad (3)$$

а также уравнения для турбулентного движения среды

$$\rho \frac{\partial(U)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(Uu) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \eta \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}(U)) + \left[ -\rho \frac{\partial(u'^2)}{\partial x} - \rho \frac{\partial(u'v')}{\partial y} - \rho \frac{\partial(u'w')}{\partial z} \right] + F_{Lx}, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность расплава,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $U$  –  $x$  компонента скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $u$  – вектор скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $P$  – давление,  $\text{Па}$ ;  $\eta$  – динамическая вязкость,  $\text{Па}\cdot\text{с}$ ;  $u'$  – возмущения  $x$  компоненты скорости;  $F_{Lx}$  – силы Лоренца по  $x$  координатам,  $\text{Н}$ .

Аналогичные уравнения будут по осям  $y$  и  $z$ . Для взаимосвязи системы уравнений (3) – (4) применяется  $k$ - $\epsilon$  модель турбулентности, представленная уравнениями

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(k)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(ku) &= \\ = \operatorname{div} \left[ \frac{\eta_t}{\sigma_k} \operatorname{grad}(k) \right] + 2\eta_t (E_{ij})^2 - \rho\epsilon; \end{aligned} \quad (5)$$

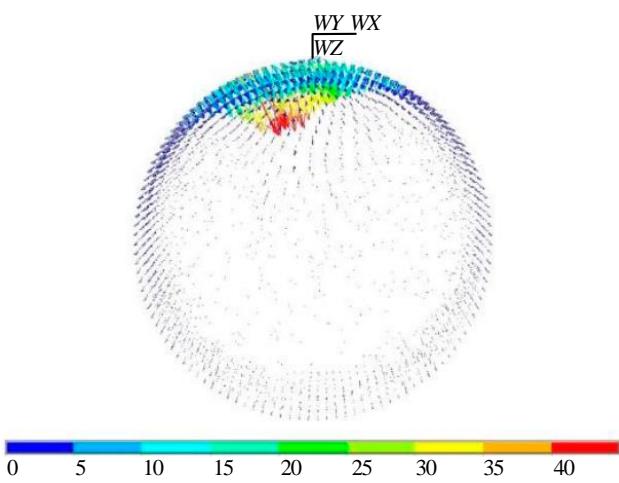
$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial(\epsilon)}{\partial t} + \rho \cdot \operatorname{div}(\epsilon u) &= \\ = \operatorname{div} \left[ \frac{\eta_t}{\sigma_\epsilon} \operatorname{grad}(\epsilon) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\eta_t (E_{ij})^2 - C_{2\epsilon} \frac{\epsilon^2}{k}. \end{aligned} \quad (6)$$

где  $k$  – энергия турбулентных пульсаций;  $\eta_t$  – турбулентная вязкость;  $\epsilon$  – энергия диссипации;  $E_{ij}$  – деформация объема;  $\sigma_k = 1,00$ ;  $\sigma_\epsilon = 1,30$ ;  $C_{1\epsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\epsilon} = 1,92$ .

Турбулентная вязкость определяется исходя из отношения  $k$  и  $\epsilon$ :

$$\eta_t = C_\mu \rho \vartheta l = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \quad (7)$$

где  $\vartheta = k^{1/2}$  – масштаб скорости;  $l = \frac{k^{3/2}}{\epsilon}$  – масштаб длины.



**Рис. 3. Распределение сил Лоренца в алюминиевом расплаве транспортного ковша при токе индуктора 200 А**

Для областей, занятых воздухом, шлаком и расплавом, задаются скорости для первой итерации стационарного решения:

$$V_{ijk}^1 = 0. \quad (8)$$

Для области, занятой алюминиевым расплавом, задаются начальные условия для сторонних сил:

$$\vec{F}_{ijk}^s = 0. \quad (9)$$

Для инициализации движения алюминиевого расплава в ковше силы Лоренца, полученные в электромагнитном расчете и расположенные в узлах конечноэлементной сетки, передаются в ANSYS CFX. Количество единичных элементов, используемое для расчета движения алюминиевого расплава, равно около 600 тыс.

Нестационарное тепловое поле в расчетной трехмерной области алюминиевого расплава в транспортном ковше рассчитывается в ANSYS CFX [13, 14] и описывается уравнением, которое с учетом внутренних (сторонних) источников теплоты имеет вид

$$\rho c \frac{\partial(T)}{\partial t} + \rho c T \operatorname{div}(U) = \lambda \cdot \operatorname{div}(\operatorname{grad}T) + Q, \quad (10)$$

где  $\rho$  – плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – удельная теплоёмкость,  $\text{Дж}/\text{кг} \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $T$  – температура,  $^\circ\text{C}$ ;  $U$  – вектор скорости,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\lambda$  – теплопроводность,  $(\text{Вт}/\text{м} \cdot \text{°C})$ ;  $Q$  – сторонние источники теплоты,  $\text{Вт}$ .

Последнее уравнение будет зависеть от физических параметров среды, ее плотности  $\rho$  и вязкости  $\mu$ , от ускорения свободного падения  $g$  и давления  $p$  на поверхности среды и, например, для жидкости реализуется уравнением Навье-Стокса:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial W_x}{\partial t} + \rho \left( W_x \frac{\partial W_x}{\partial x} + W_y \frac{\partial W_y}{\partial y} + W_z \frac{\partial W_z}{\partial z} \right) = \\ = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 W_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_x}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \quad (11)$$

Аналогичными будут уравнения, представленные по осям  $y$  и  $z$ .

Уравнения Навье-Стокса необходимо дополнить дифференциальным уравнением непрерывности для сжимаемых и несжимаемых сред соответственно:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho W_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho W_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho W_z)}{\partial z} = 0; \\ \frac{\partial W_x}{\partial x} + \frac{\partial W_y}{\partial y} + \frac{\partial W_z}{\partial z} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Расчет нестационарного теплового поля в алюминиевом расплаве также выполняется в ANSYS CFX. Для всей расчетной области задается начальное распределение температур, участвующих в первой итерации стационарного решения.

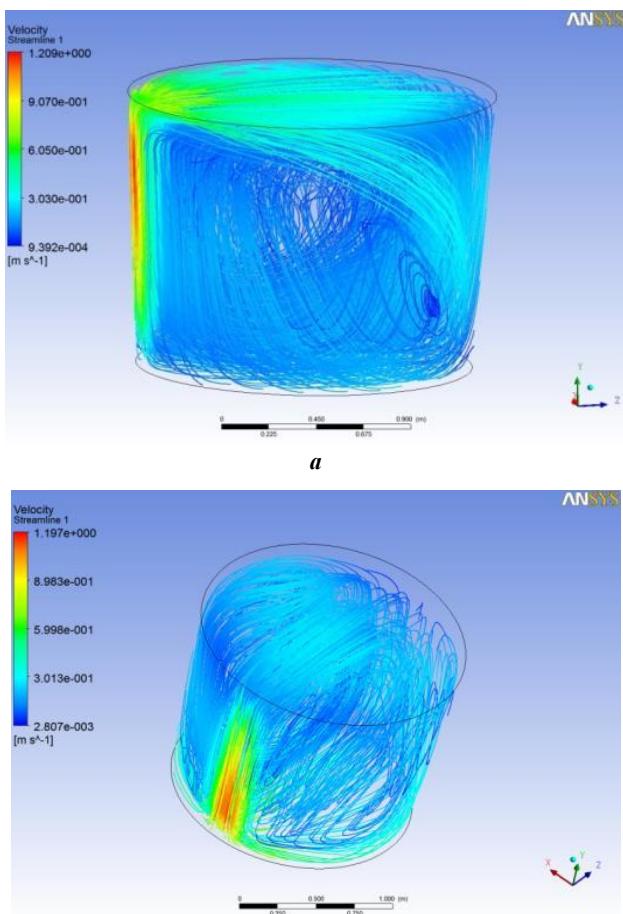
Отличительной особенностью численной математической модели комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше, реализованной в программном комплексе ANSYS, является совместное решение трехмерных электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач системы «электромагнитный индуктор – транспортный ковш с алюминиевым расплавом», решаемых в динамике на едином временном интервале. Разработанная модель позволяет варьировать и изучать зависимости эффективности перемешивания алюминиевого расплава в объеме транспортного ковша от следующих факторов: механических, электрических и магнитных параметров индуктора; физических свойств элементов транспортного ковша; гидродинамических и тепловых характеристик алюминиевого расплава и твердой лигатуры.

#### ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПРОЦЕССОВ ДВИЖЕНИЯ АЛЮМИНИЕВОГО РАСПЛАВА В ТРАНСПОРТНОМ КОВШЕ

При исследовании движения алюминиевого расплава в транспортном ковше индуктор располагался вдоль вертикальной образующей ковша [15]. Здесь возможны два варианта движения электромагнитного поля индуктора и алюминиевого расплава в транспортном ковше: вверх к зеркалу алюминиевого расплава (рис. 4, а), вниз ко дну транспортного ковша (рис. 4, б).

В пристенной области ковша со стороны индуктора с током в катушках 200 А максимальное значение скорости алюминиевого расплава достигает значений 0,8–1,0 м/с (см. рис. 4). При таком движении ширина потока алюминиевого расплава у зеркала металла и дна ковша составляет не менее 0,8 м/с. При удалении расплава от индуктора происходит его растекание по объему транспортного ковша, что предопределяет некоторое снижение скорости до 0,25–0,4 м/с. Ширина активного потока расплава у зеркала металла и дна ковша составляет не менее 2/3 диаметра ковша.

Когда индуктор расположен вдоль вертикальной образующей транспортного ковша, то при движении алюминиевого расплава вверх и вниз наблюдаются области с минимальными значениями скоростей движения алюминиевого расплава, которые разнесены в пространстве. При промышленной эксплуатации такой установки в процессе перемешивания алюминиевого расплава необходимо выполнять реверс бегущего электромагнитного поля индуктора для более полной проработки всего объема алюминиевого расплава в транспортном ковше.



**Рис. 4. Поле скоростей и траектории движения алюминиевого расплава в транспортном ковше: при движении электромагнитного поля индуктора вверх ковша (а) и вниз ковша (б)**

#### АНАЛИЗ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ СВИНЦА ПРИ ИХ РАСПОЛОЖЕНИИ НА ДНЕ ТРАНСПОРТНОГО КОВША

При введении в алюминиевый расплав транспортного ковша свинцовой лигатуры частицы свинца опускаются на дно ковша. Под действием гидродинамических сил должно происходить вовлечение частиц свинца в поток алюминиевого расплава и их транспортировка во все точки объема жидкого алюминия в транспортном ковше.

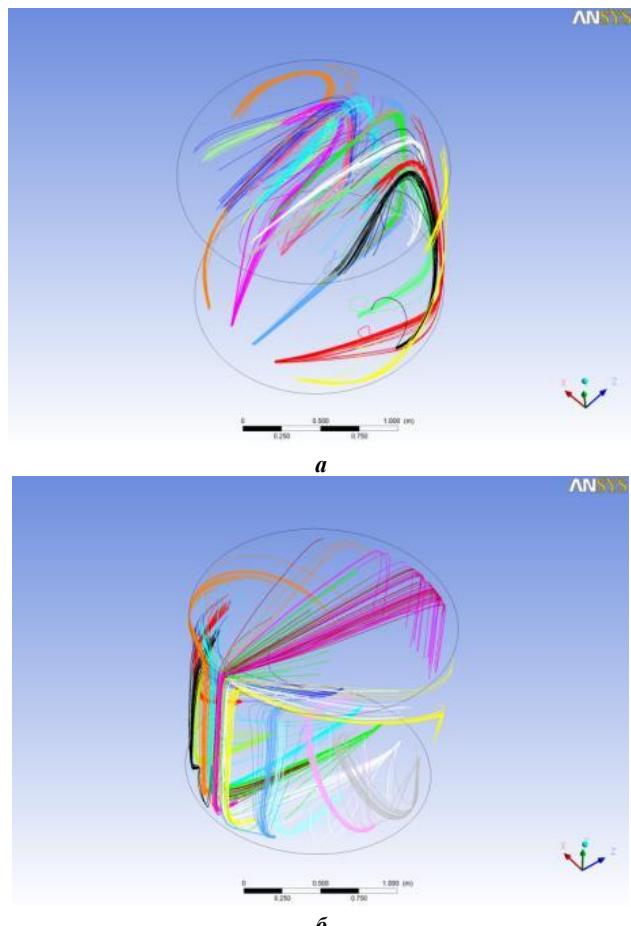
Рассмотрим два варианта исследования траекторий движения частиц свинца, расположенных на дне транспортного ковша в потоке жидкого алюминия: движение бегущего электромагнитного поля индуктора направлено вниз ковша; движение бегущего электромагнитного поля индуктора направлено вверх ковша.

В рассматриваемой модели частицы свинца расположены на дне ковша, так как это положение частиц свинца является наиболее трудным для их вовлечения в алюминиевый расплав. Количество точек для исследования траекторий движения частиц свинца в алюминиевом расплаве принимается равным 15 единиц: 5 точек у индуктора; 5 точек в средней части дна ковша; 5 точек у дальней части дна ковша. Плотность частиц свинца принята равной плотности свинца и составляет  $11340 \text{ кг}/\text{м}^3$ , что в 5 раз превышает плотность алюминиевого расплава.

Движение алюминиевого расплава в транспортном ковше осуществляется под действием сил Лоренца, генерируемых бегущим электромагнитным полем, направленным вниз или вверх соответственно. Скорость движения алюминиевого расплава у дна ковша со стороны индуктора составляет 0,8–1,0 м/с при токе в обмотках индуктора 200 А и снижается при удалении от индуктора. Траектория движения каждой частицы свинца отмечена своим цветом, что упрощает анализ их пути.

На рис. 5, а представлены траектории движения частиц свинца, поднятых со дна ковша, при движении электромагнитного поля индуктора вниз по истечении 30 с работы индуктора. Как видно из рисунка, все частицы свинца активно вовлекаются расплавом алюминия в движение, хотя скорость расплава в области дна транспортного ковша для удаленных от индуктора частиц свинца составляет около 0,5–0,65 м/с. На рис. 5, б представлены траектории движения частиц свинца, поднятых со дна транспортного ковша, при движении электромагнитного поля индуктора вверх на протяжении 210 с работы индуктора.

При расположении частиц свинца на дне транспортного ковша и движении алюминиевого расплава вверх в области индуктора свинец распределяется практически по всему объему алюминиевого расплава в транспортном ковше и дальше снова вовлекается в интенсивный поток алюминиевого расплава, генерируемый индуктором для более полного распределения по объему транспортного ковша.



**Рис. 5. Траектории движения частиц свинца в алюминиевом расплаве при движении бегущего электромагнитного поля индуктора вниз (а) и вверх (б)**

## ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ЛИГАТУРЫ СВИНЦА В РАСПЛАВЕ АЛЮМИНИЯ В ТРАНСПОРТНОМ КОВШЕ

Лигатура свинца загружается посредством вбрассывания брикетов в алюминиевый расплав транспортного ковша суммарным весом 80 кг.

Важным этапом оценки эффективности перемешивания лигатуры свинца в алюминиевом расплаве транспортного ковша является определение интенсивности тепломассообмена при воздействии электромагнитных сил в алюминиевом расплаве, генерируемых электромагнитным полем индуктора.

Основные допущения и постановка задачи: алюминиевый расплав в транспортном ковше и лигатура свинца разбиты на две области и в каждой области задана единая температура; лигатура свинца представлена единым объемом, расположенным на дне транспортного ковша; температура алюминиевого расплава в транспортном ковше в начальный момент принята 800°C; лигатура свинца представлена в виде цилиндрических брикетов «алюминий-свинец» диаметром 100 мм и высотой 50 мм; состав лигатуры свинца: 50% – алюминий, 45% – свинец, 5% – медь; усредненная плотность лигатуры свинца составляет 6700 кг/м<sup>3</sup>; температура лигатуры свинца перед загрузкой составляет 20 °C.

Загрузка лигатуры свинца в количестве 80 кг образует на дне транспортного ковша цилиндрическую низкотемпературную подложку высотой 30-35 мм. Температура лигатуры свинца после расплавления принимается 330 °C.

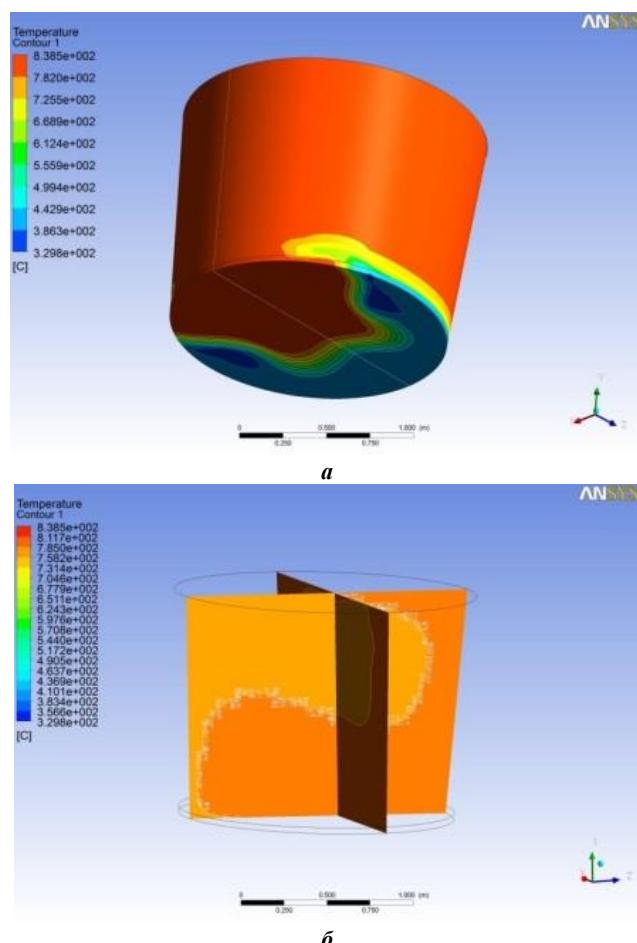
Требуется определить: скорость прогрева лигатуры свинца до температуры алюминиевого расплава при интенсивном движении алюминиевого расплава в ковше под действием электромагнитного поля индуктора; изменение температуры алюминиевого расплава после расплавления лигатуры свинца.

### ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛИГАТУРЫ СВИНЦА И ДВИЖЕНИИ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВНИЗ

При движении алюминиевого расплава под действием электромагнитных сил вниз транспортного ковша картина распределения температуры будет иметь вид, представленный на **рис. 6**.

Анализ **рис. 6** доказывает, что индуктор, установленный с боковой стороны транспортного ковша и генерирующий бегущее электромагнитное поле вниз, позволяет эффективно перемешивать лигатуру свинца в алюминиевом расплаве во всем объеме.

Градиент температур в алюминиевом расплаве транспортного ковша через 360 с работы электромагнитного перемешивателя, установленного с боковой стороны ковша, не превышает 27° C (максимальное значение температуры 758 °C; минимальное значение температуры -731° C). Дальнейшее электромагнитное перемешивание алюминиевого расплава приведет к более равномерному распределению лигатуры свинца во всем объеме алюминиевого расплава и позволит снизить градиент температуры в алюминиевом расплаве до 3-5°C.



**Рис. 6. Распределение температуры при электромагнитном перемешивании алюминиевого расплава: а – через 180 с; б – через 360 с**

### ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В АЛЮМИНИЕВОМ РАСПЛАВЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛИГАТУРЫ СВИНЦА И ДВИЖЕНИИ БЕГУЩЕГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВВЕРХ

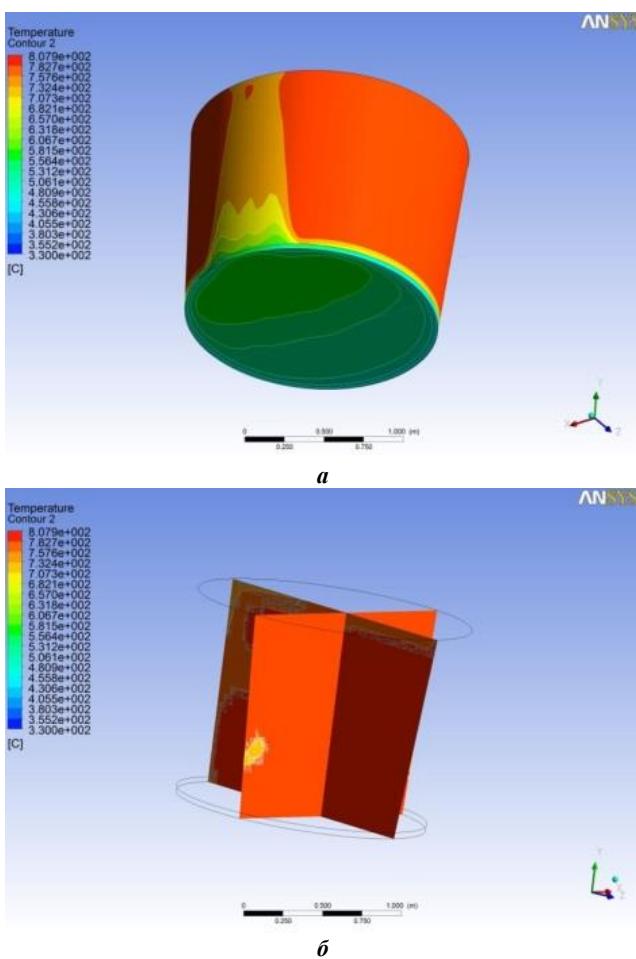
При движении алюминиевого расплава под действием электромагнитных сил вверх транспортного ковша к зеркалу расплава картина распределения температуры будет иметь вид, представленный на **рис. 7**.

При движении бегущего электромагнитного поля индуктора вверх интенсивность тепломассообмена между лигатурой свинца и алюминиевым расплавом также является эффективной. Градиент изменения температуры алюминиевого расплава по объему транспортного ковша не превышает 27 °C через 360 с его перемешивания.

В таблице представлены результаты распределения свинца в алюминиевом расплаве транспортного ковша при электромагнитном перемешивании.

Масса алюминиевого расплава в транспортном ковше 3500 кг; начальная и конечная температура алюминиевого расплава 775 и 745°C соответственно; количество свинца загружаемого в алюминиевый расплав 40 кг при температуре 20°C.

Электрические параметры индуктора электромагнитного перемешивания в процессе проведения опытов следующие: величина тока в обмотке индуктора 230 А; частота питающего напряжения 1,5 Гц; время работы индуктора 30 мин; движение алюминиевого расплава – 10 мин вниз, 10 мин вверх, 10 мин вниз.



**Рис. 7. Распределение температуры при электромагнитном перемешивании алюминиевого расплава: *а* – через 120 с; *б* – через 360 с**

#### Результаты распределения свинца в алюминиевом расплаве

| Легирующие элементы | Массовые доли легирующих элементов в алюминиевом расплаве при продолжительности перемешивания расплава Al-Pb, % |        |        |
|---------------------|---|--------|--------|
|                     | 10 мин  | 20 мин | 30 мин |
| Si                  | 0,44  | 0,44   | 0,43   |
| Fe                  | 0,60  | 0,60   | 0,59   |
| Cu                  | 3,52  | 3,46   | 3,45   |
| Mn                  | 0,42  | 0,42   | 0,42   |
| Mg                  | 0,66  | 0,66   | 0,65   |
| Cr                  | 0,042   | 0,042  | 0,041  |
| Ni                  | 0,17  | 0,17   | 0,17   |
| Zn                  | 0,30  | 0,30   | 0,30   |
| Ti                  | 0,045   | 0,046  | 0,046  |
| Pb                  | 1,46  | 1,48   | 1,51   |
| Bi                  | 0,044   | 0,044  | 0,044  |
| Sn                  | 0,012   | 0,012  | 0,011  |

Образцы алюминиевого расплава в процессе проведения эксперимента брались в следующем порядке: через 10 мин перемешивания; через 20 мин перемешивания; через 30 мин перемешивания от начала эксперимента. Как показывают результаты, приведенные в таблице, через 10 мин работы комплекса электромаг-

нитного перемешивания и движении алюминиевого расплава в области индуктора вниз массовая доля свинца в алюминиевом расплаве составляет 1,46%; через 30 мин электромагнитного перемешивания массовая доля свинца составляет 1,48%. Это подтверждает, что для эффективного распределения свинца по объему алюминиевого расплава достаточное время работы комплекса электромагнитного перемешивания может быть ограничено 10 мин.

При сливе алюминиевого расплава Al-Pb из транспортного ковша брались пробы в начале слива, в середине слива и в конце слива – разница в массовой доле свинца в пробах не превысила 5%. Это подтверждает удовлетворительное распределение свинца по всему объему алюминиевого расплава в транспортном ковше после его электромагнитного перемешивания.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана численная математическая модель включающая совместное решение электромагнитной, гидродинамической и термодинамической задач для расчета параметров системы «индуктор – транспортный ковш – алюминиевый расплав – лигатура свинца».

2. На основе решения электромагнитной задачи выполнены расчеты электромагнитных параметров системы «индуктор – транспортный ковш»; получены значения магнитной индукции на границе «футеровка – алюминиевый расплав», равные 0,3-0,4 Тл.

3. Результаты математического моделирования на основе взаимосвязанных на одном временном интервале электромагнитной, гидродинамической и тепловой задач показали возможность повышения эффективности диспергирования свинца по сравнению с выплавкой сплава в индукционных тигельных печах, за счет периодического реверсирования направления бегущего магнитного поля при установленных скоростях жидкого алюминия в ковше, равные 0,8-1,0 м/с при токе в обмотках индуктора 200 А и частоте питающего напряжений 1,0 Гц.

4. Анализ картины распределения движения алюминиевого расплава в транспортном ковше показал, что все части объема алюминиевого расплава находятся в движении; реверс электромагнитного поля индуктора изменяет направление движения алюминиевого расплава на противоположное и позволяет исключить области со слабым перемешиванием.

5. Расчеты траекторий движения частиц свинца показывают, что при интенсивном движении алюминиевого расплава свинец эффективно распределяется по всему объему алюминиевого расплава транспортного ковша.

6. Выявлено, что полупериод движения частиц свинца со дна ковша составляет около 30 с. В дальнейшем частицы свинца вовлекаются в основной поток алюминиевого расплава, генерируемый электромагнитным полем индуктора.

7. Частицы свинца активно перемещаются в объеме алюминиевого расплава при направлении бегущего электромагнитного поля индуктора как вниз транспортного ковша, так и при изменении направления на противоположное – вверх ковша.

8. Решение термодинамической задачи показало, что загрузка лигатуры свинца в количестве 80 кг при

температуре 20°C и интенсивном электромагнитном перемешивании позволяет выровнять температуру литья свинца и алюминиевого расплава через 360 с.

9. В результате экспериментальных исследований подтверждено, что работа комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше позволяет эффективно достигать равномерного распределения свинца в алюминиевом расплаве в течение 5–15 мин работы индуктора.

10. На основе представленной в работе численной математической модели можно разрабатывать эффективные и экономически оптимальные способы и комплексы электромагнитного перемешивания электропроводных расплавов в различных металлургических устройствах и агрегатах – ковшах, печах, миксерах, дегазаторах, фильтр-боксах, литьевых машинах для получения высококачественных металлургических заготовок, в том числе с новыми физическими свойствами.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Окороков Н.В. Электромагнитное перемешивание металлов в дуговых сталеплавильных печах. М.: Металлургия, 1961. 176 с.
2. Гнучев С.М. Выплавка стали в дуговых печах с электромагнитным перемешиванием ванны // Сталь. 1961. № 6. С. 238-245.
3. Вольдек А.И. Индукционные магнитогидродинамические машины с жидкокометаллическим рабочим телом. Л.: Энергия, 1970. 272 с.
4. Христинич Р.М., Христинич А.Р. Повышение надежности электрического плавильно-литейного агрегата. Lap Lambert Academic Publishing. Germany, 2012. 174 с.
5. Электромагнитный перемешиватель для рафинирования алюминия в ковшах / В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, В.В. Ставицкая, А.М. Велентеенко // Вестник УГТУ-УПИ. Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы. 2003. №5(25). Ч.2. С. 167-170.
6. Бабкин В.Г., Чеглаков В.В., Христинич Р.М. Диспергирование свинца при выплавке алюминиевых сплавов системы Al-Cu-Mg с добавками Pb в условиях регулирования структурообразования // Металлург. 2019. №10. С 76-81.
7. Пат. 109615 Российская Федерация, МПК H02K41/025.
8. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Христинич Е.В., Христинич А.Р. №2011121478/07; заявл. 25.05.2011; опубл. 20.10.2011.
9. Пат. 118485 Российская Федерация, МПК H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. №2012107917/07; заявл. 01.03.2012; опубл. 20.07.2012.
10. Пат. 123602 Российская Федерация, МПК H02K41/025. Индуктор линейной индукционной машины / Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р.; заявитель Общество с ограниченной ответственностью НПО «Металлургэнергопром» № 2012117266/07; заявл. 26.04.2012; опубл. 27.12.2012.
11. Буль О.Б. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов. Программа ANSYS: учебное пособие для вузов по специальности «Электрические и электронные аппараты» направления «Электротехника, электромеханика и электротехнологии». М.: Академия, 2006. 288 с.
12. Zieniewich O.C. The finite element method. Volume 1/ O.C. Zieniewich, R.L. Taylor. Woburn: Butterworth - Heineman, 2000. 712 p.
13. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Фёдорова, С.А. Вальгер, М.Н. Данилов, Ю.В. Захарова. М.: ДМК Пресс, 2017. 210 с.
14. Проектирование электротехнологических установок. Термовой расчет: метод. указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов укрупненной группы направления подготовки специалистов 140000 – «Энергетика. Энергетическое машиностроение и электротехника» / сост.: А.Р. Христинич, Р.М. Христинич, Е.В. Христинич. Красноярск: Сиб. федер. ун-т; Политехн. ин-т, 2007. 51 с.
15. Разработка численно-математической модели диспергирования свинца в расплаве алюминия при обработке в транспортном ковше: отчет о НИР / ООО «НПО Металлургэнергопром»; по договору №2288/17 от 20 июля 2017 г., рук. работы Р.М. Христинич, Красноярск, 2017 г. 106 с.

Поступила в редакцию 28 сентября 2020 г.

**INFORMATION IN ENGLISH****NUMERICAL MATHEMATICAL MODEL OF COMPLEX ELECTROMAGNETIC STIRRING OF ALUMINUM MELT IN THE TRANSPORT LADLE IN THE PROCESS OF COMPLEX COMPONENT ALLOYS PRODUCTION IN ANSYS**

Roman M. Khristinich

D. Sc. (Engineering), Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail:rkhristinich@mail.ru

Elena V. Khristinich

Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Theoretical Foundations of Electrical Engineering, Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: ekhristinich@mail.ru

Aleksey R. Khristinich

Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Department of Systems for Ensuring the Movement of Trains, Irkutsk State Transport University, Krasnoyarsk, Russia. E-mail: lex\_0986@mail.ru

The preparation of complex-component aluminum alloys using lead requires intensive volumetric mixing of the aluminum alloy. Currently, the preparation of aluminum-lead alloys is

carried out in induction crucible furnaces. However, lead contaminates the lining of the induction crucible furnace, which requires a major overhaul to replace it when switching to the

preparation of other aluminum alloys. At present, it is more progressive to use a complex for electromagnetic stirring of an aluminum alloy in a transport bucket. The aim of the work is to create a numerical mathematical model using ANSYS to study the parameters of the complex for electromagnetic stirring of the aluminum melt in the transport ladle. The mathematical model makes it possible to comprehensively study the influence of electromagnetic parameters of the inductor on the speed, trajectory of movement, the distribution of alloying components and the temperature of the aluminum melt in the transport ladle. When developing a mathematical model, the basic software package ANSYS was used to solve the electromagnetic problem and the ANSYS CFX package was used to solve hydrodynamic and thermal problems. A numerical mathematical model of the system "electromagnetic inductor - transport ladle - aluminum melt" has been developed to analyze the efficiency of the complex for electromagnetic stirring of the aluminum melt in order to obtain complex-component aluminum alloys based on lead and magnesium. Complex solutions are presented including electromagnetic, hydrodynamic and thermodynamic problems as applied to mixing and distribution of lead and magnesium in a high-temperature aluminum melt. The comparative analysis of the results of mathematical modeling and experimental research was carried out to achieve the maximum efficiency of the distribution of lead or magnesium using the complex for electromagnetic stirring of an aluminum melt in the transport ladle. The mathematical model implemented in the ANSYS software package, including joint solutions of electromagnetic, hydrodynamic and thermal problems, can be used in the development of complexes for electromagnetic stirring of the aluminum melt in the transport ladle for the preparation of complex-component aluminum alloys based on lead. The results of mathematical modeling and experimental studies of electromagnetic stirring of the aluminum-lead melt in the transport ladle are recommended to be used at aluminum and metallurgical plants in the preparation of complex-component alloys.

**Keywords:** complex, electromagnetic stirring, aluminum melt, lead alloy, electromagnetic inductor, transport ladle, three-dimensional numerical mathematical model, electromagnetic problem, hydrodynamic problem, thermodynamic problem.

#### REFERENCES

1. Okorokov N.V. *Elektromagnitnoe peremeshivanie metallov v dugovyh staleplavilnyh pechah* [Electromagnetic stirring of metals in steel arc furnaces]. Moscow: Metallurgy, 1961. 176 p. (In Russian)
2. Gnuchev S.M. Smelting of steel in arc furnaces with electromagnetic mixing of the bath. *Stal* [Steel], 1961, no. 6, p. 238-245. (In Russian)
3. Voldek A. I. *Induktsionnye magnitogidrodinamicheskie mashiny s zhidkometallicheskim rabochim telom* [Induction magnetohydrodynamic machines with a liquid metal working fluid]. L.: Energiya, 1970. 272 p. (In Russian)
4. Khristinich R.M., Khristinich A.R. *Povyshenie nadezhnosti elektricheskogo plavilno-liteynogo agregata* [Improving the reliability of the electric smelting and casting machine]. Lap Lambert Academic Publishing, Germany, 2012. 174 p. (In Russian)
5. Timofeev V.N., Khristinich R.M., V.V. Stafievskaya, Veleneko A.M. Electromagnetic stirrer for aluminum refining

Христинич Р.М., Христинич Е.В., Христинич А.Р. Модель и результаты моделирования комплекса электромагнитного перемешивания алюминиевого расплава в транспортном ковше при получении сложно-компонентных сплавов в ANSYS // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 4(49). С. 55-63. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63)

- in ladles // *Vestnik UGTU-UPI. Elektromehanicheskiei elektromagnitnye preobrazovateli energii i upravlyaemye elektromehanicheskie sistemy* [Bulletin of USTU-UPI. Electromechanical and electromagnetic energy converters and controlled electromechanical systems. Yekaterinburg: GOU VPO USTU-UPI], 2003, no. 5(25), Part 2, pp. 167-170. (In Russian)
6. Babkin V.G., Cheglakov V.V. and Khristinich R.M. Lead dispersion in smelting of aluminum alloys of the Al-Cu-Mg system with Pb additives under conditions of the structure formation control. *Metallurg* [Metallurgist], 2019, no. 10, pp. 76-81. (In Russian)
  7. Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi induksionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no. 109615, 2011.
  8. Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi indukcionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no 118485, 2012.
  9. Khristinich E.V., Khristinich A.R. *Induktor lineinoi induksionnoi mashiny* [Linear Induction Machine Inductor]. Patent RF, no. 123602, 2012.
  10. Buhl O.B. *Metody rascheta magnitnyh system elektricheskikh apparatov. Programma ANSYS: uchebnoe posobie dlja vuzov po specialnosti "Elektricheskie i elektronnye apparaaty" napravlenija "Elektrotehnika, Elektromehanika i elektrotehnologii"*. [Methods for calculating the magnetic systems of electrical devices. ANSYS program: a textbook for universities in the specialty "Electrical and electronic devices" of the direction "Electrical engineering, electromechanics and electrotechnology"]. Moscow: Academy, 2006. 288 p. (In Russian)
  11. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. V 2 t. Tom 2. Elektromagnitnoe pole: ucheb. dlja vuzov. 12-e izd., ispr. i dop.* [Theoretical foundations of electrical engineering. In 2 volumes. Volume 2. Electromagnetic field: textbook for universities. 12th ed., Revised and enlarged edition]. Moscow: Yurayt, 2020. 389 p. (In Russian)
  12. Zieniewich O.C. The finite element method. Volume 1/ O.C. Zieniewich, R.L. Taylor. Woburn: Butterworth - Heineman, 2000. 712 p.
  13. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Y.V. *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. Moscow: DMK Press, 2017. 210 p. (In Russian)
  14. Khristinich R.M., Khristinich A.R., Khristinich E.V. *Proektirovanie elektrotehnologicheskikh ustrojstv*. Teplovoy raschet: metod. Uказания po kursovomu i diplomnomu proektirovaniyu dlja studentov ukrupnennoy gruppy napravlenija podgotovki specialistov 140000 – «Energetika. Energeticheskoe mashinostroenie i elektrotehnika». [Design of electrical installations. Thermal calculation: method. Instructions on the course and diploma design for students of the enlarged group of the direction of training of specialists 140000 - "Energy. Power engineering and electrical engineering"]. Krasnoyarsk: Siberian Federal University; Polytechnical Institute, 2007. 51 p. (In Russian)
  15. Research report «Development of a numerical and mathematical model of lead dispersion in aluminum melt during processing in a transport ladle» under contract No. 2288/17 dated July 20, 2017. Head of the Work R.M. Khristinich, «Research and production union Metallurgenergoprom» Ltd, Krasnoyarsk, 2017, 106 p.

Khristinich R.M., Khristinich E.V., Khristinich A.R. Numerical Mathematical Model of Complex Electromagnetic Stirring of Aluminum Melt in the Transport Ladle in the Process of Complex Component Alloys Production in Ansys. *Elektrotehnicheskie sistemy i kompleksy* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 4(49), pp. 55-63. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4\(49\)-55-63](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-4(49)-55-63)