

## Устройство электромагнитного рафинирования с кондукционным возбуждением тока в жидком металле

ВИНТЕР Э.Р., ТИМОФЕЕВ В.Н., ПЕРВУХИН М.В., СЕРГЕЕВ Н.В.  
СФУ, Красноярск, Россия

Проводится численное моделирование электромагнитных процессов в установке электромагнитного рафинирования алюминиевого расплава с кондукционным возбуждением тока в расплаве. Численный расчет проводится с помощью конечно-элементного программного комплекса Maxwell. На основе численных расчетов определены параметры схемы замещения установки и основные электромагнитные характеристики. Из распределения объемных электромагнитных сил в расплаве получены значения предельных скоростей миграции частиц различного диаметра. Таким образом, рабочие напряжения в зависимости от значений тока и контактного сопротивления лежат в диапазоне от 0,1 до 6 В. Подогрев металла в желобе посредством кондукционного подвода электрической энергии в исследуемой системе может быть использован только совместно с другим видом нагрева. При рабочих токах во вторичной цепи, больших 2000 А, предельные скорости миграции частиц с диаметром 30–50 мкм составляют 1–4 мм/с. Значит, в исследуемой установке можно добиться эффективного удаления примесей диаметром 30 мкм и выше. При токе во вторичной цепи меньше 1500 А направление миграции частицы определяется силой всплытия, которая также определяет процесс естественной седиментации частиц (малоэффективной).

Ключевые слова: электрометаллургия, электромагнитное рафинирование, численное моделирование, рафинирование расплавов, параметры схемы замещения, электромагнитные характеристики

Область применения металлургической продукции интенсивно расширяется за счет развития авиастроения, автомобилестроения и аддитивных технологий [1]. Вместе с тем повышаются и требования к качеству и свойствам металлургической продукции.

Одной из важнейших операций в металлургическом производстве является процесс рафинирования, при котором из расплавов удаляются неметаллические включения. При этом перспективным способом очистки расплава от неметаллических включений является электромагнитное рафинирование [2], в физической основе которого лежит вытеснение инородной частицы из объема расплава под действием объемной электромагнитной силы.

Электромагнитное рафинирование основано на принципе электромагнитной сепарации, который теоретически был изложен в [3]. Все последующие исследования основаны на этой работе.

Принцип электромагнитной сепарации инородной частицы в проводящей жидкости показан на рис. 1. При протекании в расплаве однородного тока  $J$ , в магнитном поле  $B$  на расплав действует электромагнитная сила  $F = J \times B$ , в результате возникает градиент давления. При помещении в расплав непроводящей частицы на нее будет действо-

вать нескомпенсированная сила градиента давления обратного направления  $F_p$ . На основе этого принципа появляется спектр применений данного явления, одним из которых является очистка расплава от нежелательных включений.

По сравнению с другими методами рафинирования электромагнитный способ имеет следующие преимущества:

эффективность очистки зависит только от разницы проводимостей металла и примеси и не зависит от плотности, химического состава и фазового состояния примеси;

экологичность, так как не требуется вводить в расплав активные компоненты;

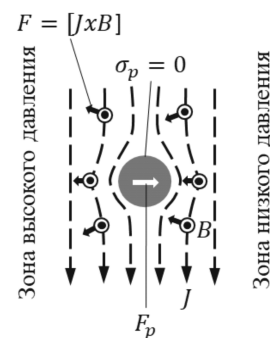


Рис. 1. Принцип электромагнитной сепарации

Fig. 1. The principle of electromagnetic separation

исключение загрязнения расплава частицами рабочего органа;

простота управления, так как направление и значение выталкивающей силы можно контролировать, изменяя направление и амплитуду электрического и магнитного полей.

Как и другие электротехнологические устройства, установки электромагнитного рафинирования можно классифицировать по методу подвода тока на кондукционные и индукционные. К настоящему времени был исследован и разработан спектр устройств для индукционного рафинирования различных сплавов [1, 4]. Метод кондукционного возбуждения тока в расплаве при электромагнитном рафинировании не апробирован в металлургической практике. Также не имеется общих рекомендаций и стандартных конструкций для узла токоподвода (короткая сеть). С энергетической же точки зрения кондукционный способ может быть эффективнее, так как при его применении уменьшается потребление реактивной мощности и, более того, появляется возможность применения постоянного тока, что вовсе исключает потребление установкой реактивной мощности. Необходимо также отметить простоту встраивания участка кондиционного рафинирования в литейную линию по сравнению с индукционным методом рафинирования, при котором необходимо размещать катушку в литейной линии, что не всегда возможно.

Таким образом, исследование устройств электромагнитного рафинирования с кондукционным возбуждением тока следует считать перспективным направлением, а разработку конструкции узла токоподвода, удовлетворяющей требованиям надежности и эксплуатационным требованиям, – актуальной задачей. Цель данной работы – анализ энергетических параметров и эффективности удаления примесей установкой электромагнитного рафинирования с кондукционным возбуждением тока в

расплаве с применением численного моделирования.

**Опытно-промышленная установка электромагнитного рафинирования алюминиевого расплава.** Для проверки технологии электромагнитного рафинирования с кондукционным возбуждением тока была предложена опытно-промышленная установка литейной линии для получения продукции из алюминиевых сплавов [5], эскиз ее показан на рис. 2. Установка включает два раздаточных миксера, литейный желоб со встроенным узлом для кондукционного возбуждения тока и литейную машину. Система токоподвода состоит из понижающего трансформатора, к вторичной обмотке которого подключается контактный блок (короткая сеть).

Установка работает на промышленной частоте (50 Гц). Следует отметить, что ток промышленной частоты в данном случае имеет преимущество по сравнению с постоянным током, так как выпрямитель и сглаживающий фильтр на высокие значения тока (1–3 кА), несомненно, усложняют и удорожают установку. Более того, поперечные размеры желоба соизмеримы с глубиной проникновения тока в жидкий металл на промышленной частоте. Следовательно, применение постоянного тока не приведет к значительному повышению эффективности рафинирования.

Наиболее ответственной частью установки является токоподводящий блок, который устанавливается в футеровку литейной линии. Конструкция токоподводящего блока показана на рис. 3. Токоподвод представляет собой сборку, которая состоит из углеграфитового блока 1 и стального блюмса 2. Контакт между графитом и блюмсом обеспечивается посредством чугунной заливки 3. Углеграфитовый блок контактирует непосредственно с жидким металлом 4, обеспечивая протекание электрического тока. Подобное решение используется в электролизном производстве, в котором для обеспече-

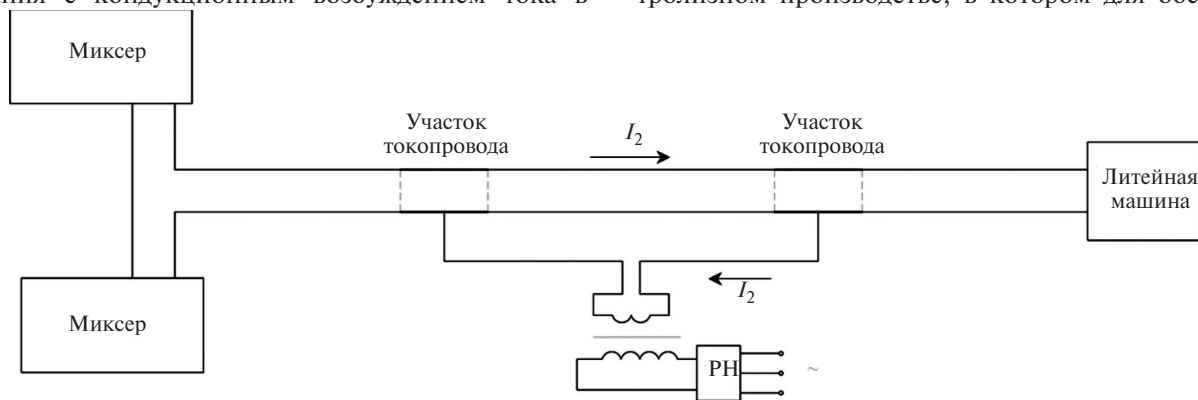


Рис. 2. Схема опытно-промышленной установки с узлом кондукционного электромагнитного рафинирования

Fig. 2. Scheme of a pilot plant with a conduction electromagnetic refining unit

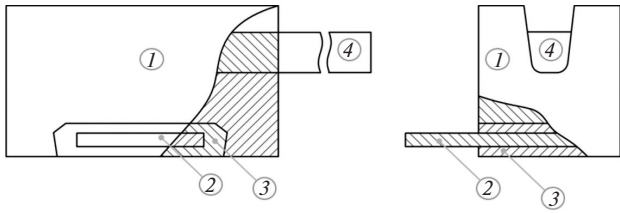


Рис. 3. Эскиз конструкции токоподвода для опытно-промышленной установки кондукционного рафинирования

Fig. 3. Sketch of the structure of the current lead for the pilot plant for conduction refining

ния контакта между графитовым блоком и подводящим блоком используется чугунная заливка [6].

**Численное моделирование процесса электромагнитного рафинирования при кондукционном возбуждении тока. Уравнения электромагнитного поля.** Электромагнитное поле в расчетной области описывается уравнением векторного потенциала, записанного в кулоновской калибровке без учета токов смещения:

$$\nabla^2 \dot{\mathbf{A}} = -\mu_a \dot{\delta}; \quad \Delta \dot{\delta} = 0; \quad \dot{\delta} = -\sigma j \omega \dot{\mathbf{A}},$$

где  $\dot{\mathbf{A}}$  – векторный потенциал;  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость;  $\delta$  – вектор плотности тока;  $\sigma$  – удельная электрическая проводимость;  $\omega$  – циклическая частота переменного тока.

На границе расчетной области соблюдаются условия Дирихле для нормальной составляющей векторного потенциала и Неймана для тангенциальной составляющей:

$$\dot{\mathbf{A}}_n = 0; \quad \frac{\partial \dot{\mathbf{A}}_t}{\partial n} = 0.$$

**Настройки вычислительной процедуры и расчетная область.** Учитывая, что геометрия конструк-

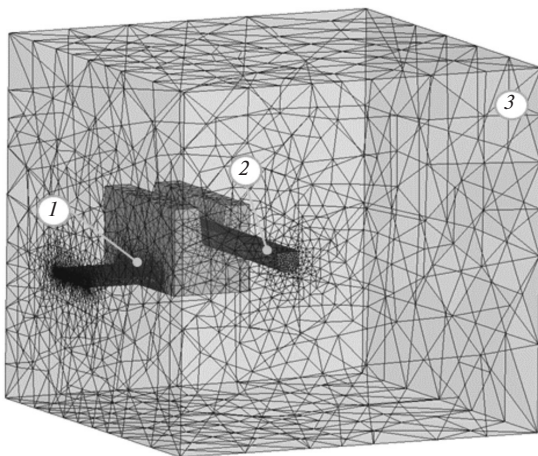


Рис. 4. Сетка конечных элементов

Fig. 4. Mesh of finite elements

ции узла электромагнитного рафинирования имеет зеркальную симметрию, для снижения вычислительной нагрузки можно ограничить область решения 1/2 частью геометрии конструкции. Сетка конечных элементов расчетной области показана на рис. 4. Таким образом, расчетная область электромагнитной задачи включает элементы конструкции токоподвода 1, расплав 2 и окружающее пространство (воздух) 3.

Построение сетки конечных элементов осуществляется автоматически средствами Maxwell на основе адаптивных алгоритмов [7]. Общее число элементов сетки 719160.

Основные геометрические параметры: высота расплава в желобе  $h_{melt} = 25 \div 30$  мм, длина литейной линии 1 м, длина участка электромагнитного рафинирования 0,56 м.

Параметры расплава алюминия: проводимость  $\sigma_m = 36 \cdot 10^6$  См/м; плотность  $\rho_m = 2370$  кг/м<sup>3</sup>; динамическая вязкость  $\mu = 1,29 \cdot 10^{-3}$  Пас.

Электрофизические свойства материалов (чугун, сталь, графит) элементов конструкции токоподводящего блока задаются согласно [8].

**Результаты численного расчета. Электромагнитные параметры и схема замещения.** Для анализа электрических параметров системы можно воспользоваться схемой замещения (рис. 5), которая в данном случае соответствует схеме для электроконтактного нагрева [9]. На схеме:  $x_{cb}$ ,  $r_{cb}$  – реактивное и активное сопротивления токоподводящего блока;  $x_m$ ,  $r_m$  – реактивное и активное сопротивления расплава;  $r_c$  – активное контактное сопротивление;  $U_2$  – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;  $I_2$  – ток во вторичной цепи.

Следует отметить, что значительное влияние на энергетические параметры кондукционной системы может оказывать значение контактного сопротивления, которое зависит от таких факторов, как механическое усилие контактного зажима, площадь контактирования, материал контактной пары и состояние поверхности контактов [9]. С достаточной степенью точности определить значение контактного сопротивления посредством математического

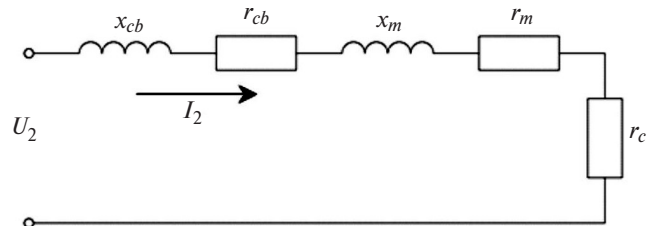


Рис. 5. Схема замещения устройства кондукционного электромагнитного рафинирования

Fig. 5. Equivalent circuit of the conduction electromagnetic refining device

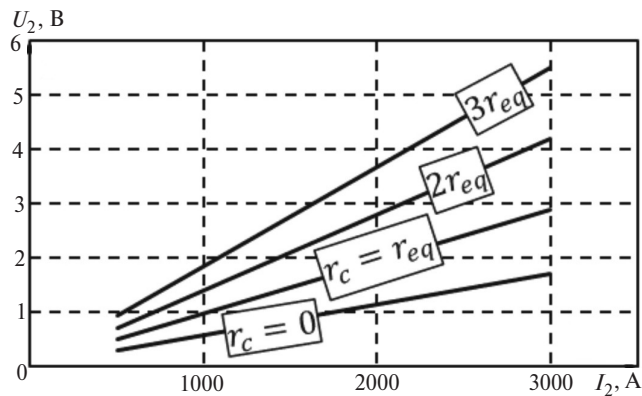


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика устройства

Fig. 6. Current-voltage characteristic of the device

аппарата не представляется возможным, и в численной модели данный параметр не учитывался. Однако учесть влияние контактного сопротивления можно с помощью анализа схемы замещения [10].

На рис. 6 представлена вольт-амперная характеристика устройства при различных значениях контактного сопротивления ( $r_{eq} = r_{cb} + r_m$ ). Таким образом, в зависимости от значений тока в желобе и контактного сопротивления следует ожидать значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора от 0,1 до 6 В.

Помимо указанных выше преимуществ следует упомянуть, что в процессе электромагнитного рафинирования проявляется и тепловое действие тока – нагрев металла. Этот эффект может быть особенно полезен, так как перед процессом литья необходимо нагреть металл до заданной температуры. Эффективность процесса нагрева током выражается через электрический КПД системы. На рис. 7 показана зависимость электрического КПД системы от контактного сопротивления. Видно, что в зависимости от высоты расплава в желобе при минимальном значении контактного сопротивления можно добиться КПД системы только в диапазоне от 40 до 55%. Однако следует помнить, что элек-

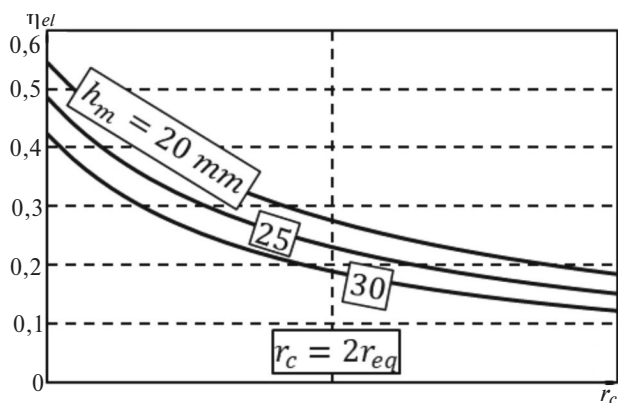


Рис. 7. Зависимость электрического КПД от контактного сопротивления

Fig. 7. Dependence of electrical efficiency on contact resistance

трический КПД никак не связан с эффективностью процесса очистки от примесей, а характеризует лишь процесс преобразования электрической энергии в тепловую.

Согласно основам теплотехники [11] потребную мощность для нагрева можно рассчитать по формуле

$$W_{\text{потр}} = \frac{c\Delta T}{t_{\text{heat}}},$$

где  $c$  – теплоемкость;  $\Delta T$  – температура, до которой необходимо нагреть тело;  $G$  – масса тела;  $t_{\text{heat}}$  – время нагрева.

На рис. 8 показан график зависимости КПД от контактного сопротивления потребной мощности в зависимости от перепада температуры на входе и выходе из зоны рафинирования. В целом в зависимости от марки сплава требуется различная температура литья слитков, которая может варьироваться от 700 до 950 °С. Так, для наиболее распространенных сплавов необходимо обеспечить нагрев на 50–80 °С металла, поступающего с миксера в литейную машину через транспортный желоб. На рис. 9 дана зависимость тепловой мощности в расплаве от значения тока. Видно, что при определенных условиях мощность электрического нагрева удовлетворяет потребной мощности. Однако помимо потребной мощности для нагрева также необходима мощность для компенсации тепловых потерь (примерно 20% полной мощности), при этом, как правило, нужно иметь запас по мощности с коэффициентом от 2 до 10. Таким образом, нагрев только электрическим током в данной системе недостаточен. С другой стороны, есть возможность совмещать нагрев электрическим током с радиационным или газовым нагревом.

Очевидный путь увеличения электрической мощности нагрева – повышение плотности тока в

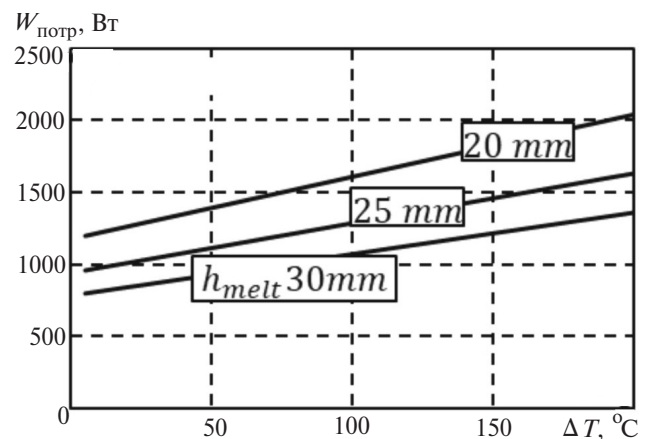


Рис. 8. График зависимости потребной мощности для нагрева

Fig. 8. The graph of the dependence of the required power for heating

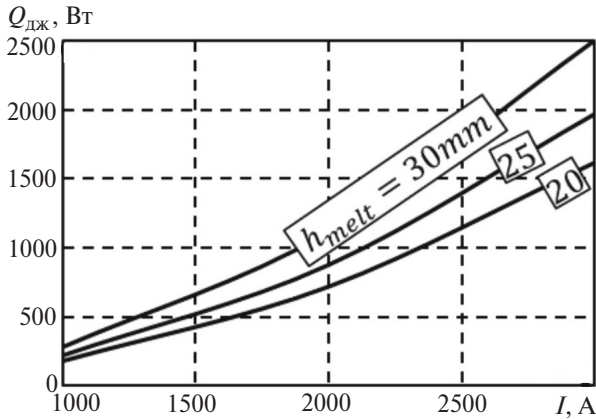


Рис. 9. График зависимости электрической мощности в расплаве от тока

Fig. 9. Diagram of the dependence of the electric power in the melt on the current

расплаве – во-первых, за счет снижения уровня металла в желобе, во-вторых, за счет увеличения интегрального тока в расплаве. Оба варианта приводят к ограничивающему барьеру, что проявляется в снижении гидростатического давления при уменьшении уровня расплава, с одной стороны, и увеличении электромагнитного давления при увеличении плотности тока, с другой стороны. В результате происходит образование мениска поверхности металла, высота которого может быть критической для целостности окисной пленки.

**Электромагнитные силы в расплаве.** Вектор объемной электромагнитной силы, действующей на расплав,

$$f_{em} = \frac{1}{2} \text{Re} \{ \dot{\delta} \times \dot{\mathbf{B}}^* \},$$

где  $\dot{\mathbf{B}}^*$  – комплексно-сопряженный вектор магнитной индукции;  $\text{Re}$  – выражает реальную часть комплексного числа.

На рис. 10 показано векторное распределение электромагнитных сил в продольном сечении расплава. В области токоподвода распределение электромагнитных сил неравномерно вдоль длины расплава, что позволяет ожидать возникновения вихревых течений в продольной плоскости.



Рис. 10. Распределение электромагнитных сил в расплаве

Fig. 10. Distribution of electromagnetic forces in the melt

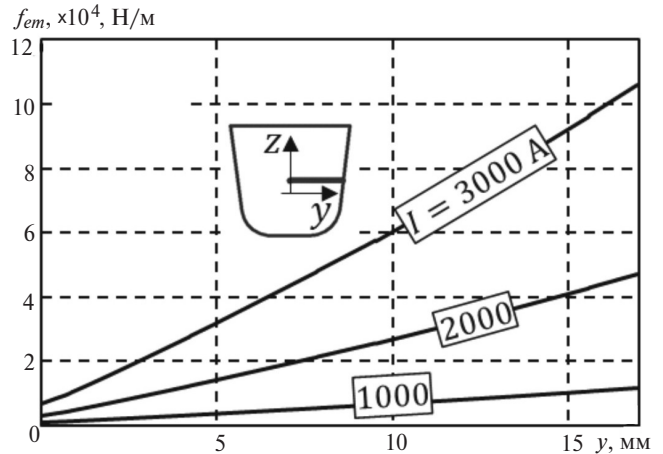


Рис. 11. Распределение электромагнитных сил вдоль линии в поперечной плоскости

Fig. 11. Distribution of electromagnetic forces along a line in the transverse plane

Рабочим участком электромагнитного рафинирования является область расплава с отсутствием градиента электромагнитных сил по длине желоба. Из распределения электромагнитных сил в сечении А–А видно, что вектор электромагнитной силы направлен от периферийной зоны в центральную. В области рафинирования в продольной плоскости будут отсутствовать интенсивные вихревые течения, однако в поперечной плоскости из-за сложного сечения следует ожидать образования вращающихся потоков.

На рис. 11 показано распределение электромагнитной силы вдоль горизонтальной линии в поперечной плоскости зоны рафинирования. Так как распределение сил неравномерно в поперечном сечении, то образование потоков в этой плоскости может играть положительную роль, которая заключается в выносе частиц из внутренней области к периферийной зоне с высокими значениями плотности электромагнитных сил.

**Предельные скорости миграции примесей.** Зная показанное на рисунке распределение электромагнитных сил, частицы, поступаая в литейный желоб под действием массового расхода, будут вовлекаться в область образования вихревых течений. При дальнейшей миграции по длине желоба под действием массового расхода или вихревых течений частицы попадают в область действия пинч-эффекта. В данной области на частицу будет действовать электромагнитная сила [3]:

$$F_{em_i}^p = -\frac{3 \pi d_p^3}{4 \cdot 6} f_{em_i},$$

где  $d_p$  – диаметр частицы;  $f_{em_i}$  –  $i$ -я компонента объемной электромагнитной силы Лоренца.

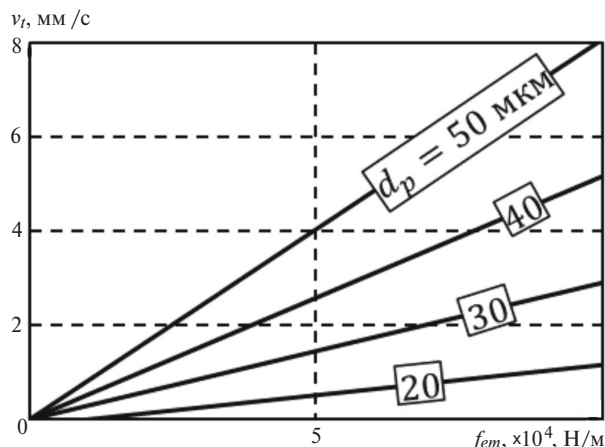


Рис. 12. Зависимость предельной скорости миграции частиц от электромагнитной силы

Fig. 12. Dependence of the limiting particle migration rate on the electromagnetic force

Таким образом, при достаточном значении электромагнитных сил дальнейшая миграция частиц будет происходить в направлении периферийной зоны металла. Для оценки скорости миграции примесей воспользуемся формулой Стокса для расчета предельной скорости частицы. В предположении о малых числах Рейнольдса и с учетом силы тяжести [12]:

$$v_{i,x,y} = -\frac{d_p^2}{18\mu} 0,75 f_{em,x,y};$$

$$v_{i,z} = -\frac{d_p^2}{18\mu} [(\rho_p - \rho_{fl})g + 0,75 f_{em,z}],$$

где  $v_{i,i}$  – предельная скорость миграции частицы вдоль координаты  $i$ ;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкого металла;  $\rho_p, \rho_{fl}$  – плотности жидкого металла и частицы; член  $(\rho_p - \rho_{fl})g$  определяет так называемую силу всплытия, которая выражается законом Архимеда [13].

На рис. 12 дан график зависимости предельной скорости миграции частицы от объемной электромагнитной силы. Видно, что частицы крупной фракции ( $> 50$  мкм) достаточно эффективно удаляются при значении объемной электромагнитной силы  $> 20 \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup>, что соответствует току во вторичной цепи  $> 1500$  А. Миграция частиц мелкой фракции ( $< 30$  мкм) происходит значительно менее интенсивно, поэтому следует ожидать, что они будут вовлекаться в поток металла даже невысокой интенсивности. В соответствии со значением рабочего тока в исследуемой установке значение объемной электромагнитной силы находится в диапазоне  $(15 \div 60) \cdot 10^4$  Н/м<sup>3</sup> (рис. 11). Таким образом, можно ожидать, что частицы размером 30 мкм и более бу-

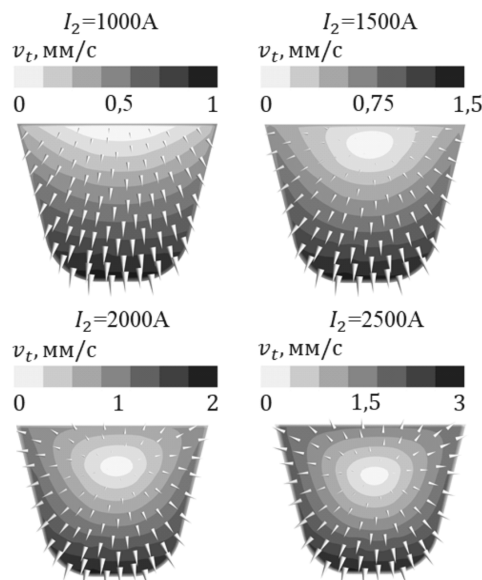


Рис. 13. Цветовая и векторная карты скорости миграции частицы диаметром 30 мкм в поперечном сечении расплава

Fig. 13. Color and vector map of the migration rate of a particle with a diameter of 30 microns in the cross section of the melt

дут активно мигрировать под действием влияния электромагнитных сил в зону периферии расплава.

На рис. 13 показана карта предельных скоростей миграции частицы диаметром 30 мкм при различном токе во вторичной цепи. Видно, что при величине тока 1000 А сила всплытия превагирует над электромагнитной силой и направление миграции определяется членом  $(\rho_p - \rho_{fl})g$ , а скорости миграции при этом не столь велики. С ростом тока электромагнитная сила растет в квадратичной зависимости, и при величине 2000 А направление миграции частицы определяется векторным распределением электромагнитной силы.

При токе 2000 А и условии отсутствия интенсивных вихревых течений на данных скоростях миграции частица достигнет поверхности примерно за 5–10 с. Для частиц малого диаметра относительно невысокие скорости миграции компенсируются протяженностью активной зоны электромагнитного рафинирования ( $> 0,5$  м). Очевидно, более крупные примеси будут мигрировать интенсивнее, так как предельная скорость находится в квадратичной зависимости от диаметра частицы.

В целом полученные соотношения и найденные закономерности можно считать справедливыми и для различных марок алюминиевых сплавов. Значения их физических свойств находятся в одном диапазоне со свойствами чистого алюминия, которые использовались в данной работе. Для других металлов закономерности процесса рафинирования могут значительно отличаться как по количественным, так и по качественным показателям.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90137.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Усынина Г.П., Тимофеев В.Н., Конкевич В.Ю., Мотков М.М., Сергеев Н.В., Гудков И.С. Алюминиевая проволока ООО «НПЦ магнитной гидродинамики» для аддитивных технологий. – Технология легких сплавов, 2019, № 2, с. 29–34.
2. Zhang L., Lv X., Torgerson A., Long M. Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum. – Journal Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2011, 32 (3), pp. 150–228.
3. Lennox D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magnetohydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles. – Journal of Chemical Physics, 1954, vol. 22, No. 4, pp. 683–689.
4. Wang S. et al. Separation of non-metallic inclusions from molten steel using high frequency electromagnetic fields. – Metallurgical and Materials Transactions B, 2014, vol. 45, No. 5, pp. 1915–1935.
5. Пат. РФ № 192356 U1. Транспортный желоб литейного комплекса разливки жидкого металла / В.Н. Тимофеев, Н.В. Тимофеев, М.Ю. Хацаюк, П.А. Хоменков. – БИ, 2018, № 26.
6. Тимофеев В.Н., Темеров А.А., Михайлов Д.А. Установка предварительного нагрева катодных секций электролизёров. – Цветные металлы и минералы, 2016, с. 82–83.
7. Ansys Maxwell 15.0 User's Guide 3D.
8. Альтгаузен А.П., Смелянский М.Я., Шевцов М.С. Электротермическое оборудование: Справочник. М.: Энергия, 1967.
9. Романов Д.И. Электроконтактный нагрев металлов. М.: Машиностроение, 1981, т. 168.
10. Lupi S. Fundamentals of Electroheat. – Electrical Technologies for Process Heating. Springer. Switzerland, 2017.
11. Чердниченко В.С., Бородачев А.С., Артемьев В.Д. Электрические печи сопротивления. Теплопередача и расчеты элект-

тропечей сопротивления: монография / Под ред. В. С. Чердниченко. Новосибирск: НГТУ, 2006, т. 1, 624 с.

12. Taniguchi S., Brimacombe J.K. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel. – ISIJ international, 1994, vol. 34, №. 9, pp. 722–731.

13. Бояревич В.В. и др. Электровихревые течения/Под ред. ЭВ Щербинина. Рига: Зинатие, 1985.

14. Вепре Л.А. МГД-технология в производстве черных металлов. – Metallurgia, 1990, сс. 6–9.

[03.06.2020]



**А в т о р ы:** **Винтер Эдуард Робертович** – ассистент кафедры «Электротехнология и электротехника» Политехнического института Сибирского федерального университета (СФУ).



**Тимофеев Виктор Николаевич** – доктор техн. наук, заведующий кафедрой «Электротехнологии и электротехника» Политехнического института (СФУ).



**Первухин Михаил Викторович** – доктор техн. наук, профессор кафедры «Электротехнологии и электротехника» Политехнического института СФУ.



**Сергеев Николай Вячеславович** – кандидат техн. наук, доцент кафедры «Электротехнологии и электротехника» Политехнического института СФУ.

*Elektrichestvo*, 2021, No. 3, pp. 65–72

DOI:10.24160/0013-5380-2021-3-65-72

## An Electromagnetic Refining Apparatus with Conductive Excitation of Current in Liquid Metal

**VINTER Eduard R.** – (Siberian Federal University (SFU), Krasnoyarsk, Russia) – Assistant of Electrotechnology and Electrical Engineering Dept.)

**TIMOFEEV Viktor N.** – (SFU, Krasnoyarsk, Russia) – Head of Electrotechnology and Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.)

**PERVUKHIN Mikhail V.** – (SFU, Krasnoyarsk, Russia) – Professor of Electrotechnology and Electrical Engineering Dept., Dr. Sci. (Eng.)

**SERGEEV Nikolay V.** – (SFU, Krasnoyarsk, Russia) – Associate Professor of Electrotechnology and Electrical Engineering Dept. Cand. Sci. (Eng.)

The electromagnetic processes in an apparatus for electromagnetically refining aluminum melt with conduction excitation of current in the melt are simulated. The numerical calculation is carried out using the Maxwell finite element software package. Based on numerical calculations, the equivalent circuit parameters and the main electromagnetic characteristics of the apparatus are determined. From the distribution of bulk electromagnetic forces in the melt, the terminal velocities for particles of different diameters are obtained. It is shown that the operating voltages are in the range from 0.1 to 6.0 V depending on the current and contact resistance values. The preheating of metal in the trough by conductive supply of electricity in the system under study can only be used jointly with another kind of heating. With the operating currents in the secondary circuit higher than 2000 A, the terminal velocities of particles 30–50 μm in diameter are in the range 1–4 mm/s. This means that efficient removal of impurity particles with a diameter of 30 μm or larger can be achieved in the apparatus under study. With the secondary circuit current less than 1500 A, the particle migration direction is governed by the buoyancy force, which also governs the (inefficient) natural particle sedimentation process.

*Key words: electrometallurgy, electromagnetic refining, numerical simulation, melt refining, equivalent circuit parameters, electromagnetic characteristics*

## REFERENCES

1. Usynina G.P., Timofeyev V.N., Konkevich V.Yu., Motkov M.M., Sergeyev N.V., Gudkov I.S. *Alyuminiyevaya provoloka OOO «NPTs magnitnoy gidrodinamiki» dlya additivnykh tekhnologiy. – Tekhnologiya legkikh splavov* (Aluminum wire of LLC «Scientific Research Center of Magnetic Hydrodynamics» for additive technologies. – Light alloy technology), 2019, No. 2, pp. 29–34.
2. Zhang L., Lv X., Torgerson A., Long M. Removal of Impurity Elements from Molten Aluminum. – *Journal Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2011, 32 (3), pp. 150–228.
3. Lennov D., Kolin A. Theory of electromagnetophoresis. I. Magneto-hydrodynamic forces experienced by spherical and symmetrically oriented cylindrical particles. – *Journal of Chemical Physics*, 1954, vol. 22, No. 4, pp. 683–689.
4. Wang S. et al. Separation of non-metallic inclusions from molten steel using high frequency electromagnetic fields. – *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2014, vol. 45, No. 5, pp. 1915–1935.
5. Pat. RF № 192356 U1. *Transportnyy zhelob liteynogo kompleksa razlivki zhidkogo metalla/V.N. Timofeyev, N.V. Timofeyev, M.YU. Khatsyuk, P.A. Khomenkov* (Transport chute of the casting complex for casting liquid metal / V.N. Timofeev, N.V. Timofeev, M. Yu. Khatsyuk, P.A. Khomenkov), 2018, byul. No. 26.
6. Timofeyev V.N., Temerov A.A., Mikhaylov D.A. *Ustanovka predvaritel'nogo nagreva katodnykh seksiy elektrolizorov. – Tsvetnyye metally i mineral* (Installation of preheating of cathode sections for electrolyzer – Nonferrous metals and minerals), 2016, pp. 82–83.
7. *Ansys Maxwell 15.0 User's Guide 3D*.
8. Al'tgauzen A.P., Smel'yanskiy M.Ya., Shevtsov M.S. *Elektrotermicheskoye oborudovaniye: Spravochnik* (Electrothermal equipment: a reference book). M.: Energiya, 1967.
9. Romanov D.I. *Elektrokontaktnyy nagrev metallov* (Electrocontact heating of metals). M.: Mashinostroyeniye, 1981, vol. 168.
10. Lupi S. *Fundamentals of Electroheat. – Electrical Technologies for Process Heating*. Springer. Switzerland, 2017.
11. Cherednichenko V.S., Borodachev A.S., Artem'yev V.D. *Elektricheskiye pechi soprotivleniya. Teplootdacha i raschet elektropечи soprotivleniya: monografiya / Pod. red. V.S. Cherednichenko* (Electric resistance furnaces. Heat transfer and calculations of resistance electric furnaces: monograph Ed. V.S. Cherednichenko). Novosibirsk: NGTU, 2006, vol. 1, 624 p.
12. Taniguchi S., Brimacombe J.K. Application of pinch force to the separation of inclusion particles from liquid steel. – *ISIJ international*, 1994, vol. 34, No. 9, pp. 722–731.
13. Boyarevich V.V. i dr. *Elektrovikhrevyye techeniya/Pod red. E.V. Shcherbinina* (Electrovortex flows / Ed. E.V. Shcherbinin). Riga: Zinatiye, 1985.
14. Verte L.A. *MGD-tekhnologiya v proizvodstve chernykh metallov* (MHD technology in the production of ferrous metals). Metallurgiya, 1990, pp. 6–9.

[03.06.2020]