

УДК 669.1.004.86

DOI 10.17223/19988621/73/11

И.В. Чуманов, И.М. Ячиков, М.И. Ячиков, М.А. Матвеева, Д.В. Сергеев**ВЛИЯНИЕ ВРАЩЕНИЯ РАСХОДУЕМОГО ЭЛЕКТРОДА
ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ
НА ГИДРОДИНАМИКУ ШЛАКОВОЙ ВАННЫ¹**

Предложена математическая модель для оценки влияния вращения расходуемого электрода на гидродинамику шлаковой ванны в процессе электрошлакового переплава. Определена критическая скорость вращения электрода в зависимости от его диаметра для перехода ламинарного в турбулентное течение для флюса марки АНФ-6. Представлена зависимость скорости флюса в шлаковой ванне от скорости вращения электрода. Предложено выражение для оценки времени обновления шлаковой ванны. Получена оценка соотношения центробежной и электромагнитной сил, определяющая характер течения жидкого шлака и условия, при которых гидродинамика шлаковой ванны будет определяться центробежными силами.

Ключевые слова: *электрошлаковый переплав, вращающийся переплавной электрод, гидродинамика шлаковой ванны, характер течения, центробежная сила, электромагнитная сила.*

Процесс электрошлакового переплава (ЭШП) – типичный пирометаллургический процесс. Металлургические и теплофизические его особенности изучены довольно хорошо, чтобы иметь представление о природе и закономерностях гидродинамических и тепловых процессов, происходящих в шлаковой и металлической ванне. Значительно меньше разработаны вопросы, касающиеся гидродинамики и теплофизики электрошлакового процесса с применением технологии вращения расходуемого электрода [1–5].

Вращение электрода при ЭШП приводит к положительному изменению ряда технологических параметров – росту производительности процесса при снижении энергетических затрат, росту рафинирующей способности, повышению качества формируемой заготовки [6, 7] и требует более глубокого изучения данного технологического процесса.

Шлаковый расплав является токонесущей средой, в которой имеют место интенсивные течения под действием гравитационных и электромагнитных сил. Вращение электрода приводит к изменению гидродинамических процессов в шлаковой и металлической ванне установки электрошлакового переплава, что связано, прежде всего, с появлением центробежной силы. Характер образующегося в шлаковой ванне течения за счет ее действия будет отличен от течения шлака без вращения электрода. Так, при реализации классической технологии ЭШП без вращения электрода, шлаковый расплав в вертикальной плоскости движется нисходящим потоком – вниз, вдоль оси электрода, далее – вдоль горизонтальной поверхности металлической ванны к стенке кристаллизатора и затем возвращается в

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90081.

подэлектродную зону. В случае вращения электрода характер течения жидкого флюса – восходящий от стенки кристаллизатора по горизонтальной поверхности металлической ванны вверх, вдоль оси электрода [8].

Чтобы установить характер течения жидкой токонесущей ванны важно оценить влияние центробежной и электромагнитной сил, целесообразно оценить их соотношение, прибегнув к математическому моделированию.

Целью работы является определение влияния вращения электрода при электрошлаковом переплаве на гидродинамику шлаковой ванны и оценка соотношения центробежной и электромагнитной сил, определяющего характер образующихся течений жидкости.

Гидродинамика жидкого флюса под действием центробежной силы, возникающей при вращении расходуемого электрода

Реализация вращения расходуемого электрода в установке ЭШП приводит к изменению гидродинамики течения расплавленного флюса. Характер течения жидкого шлака определяется соотношением центробежной и электромагнитной сил. Рассмотрим ситуацию, когда решающее значение имеют центробежные силы. В этом случае характер движения флюса в области, близкой к электроду, определяется числом Рейнольдса. С некоторого значения $Re_{кр}$, течение шлакового расплава перестанет быть ламинарным и при числах, больших $Re_{кр}$, становится турбулентным [9, 10]:

$$Re = \frac{V \cdot R}{\nu} = \frac{\omega_0 \cdot R^2}{\nu} = \frac{\pi \omega \cdot R^2}{30 \cdot \nu} > Re_{кр} = 3 \cdot 10^5, \quad (1)$$

где $V = \omega_0 R$ – окружная линейная скорость электрода, м/с; $R = D/2$ – радиус электрода, м; ν – кинематическая вязкость шлака, м²/с; ω_0, ω – скорость вращения электрода в рад/с и об/мин соответственно.

Из (1) можно получить выражение для критической скорости вращения электрода, перехода ламинарного к турбулентному течению:

$$\omega_{кр} = \frac{120 \cdot Re_{кр} \nu}{\pi \cdot D^2}. \quad (2)$$

На рис. 1 показана зависимость критической угловой скорости вращения электрода в шлаковой ванне от его диаметра. В качестве шлака взят флюс АНФ-6. Зависимость его плотности и динамической вязкости от температуры взята из работ [11, 12]:

$$\rho(t) = 2680 - 0.6(t - 1450), \text{ кг/м}^3;$$

$$\lg(\eta) = -7,91 + 13 \cdot (t + 273)^{-1} \cdot 10^3 - 0,722 \cdot (t + 273)^{-2} \cdot 10^6, \text{ Па}\cdot\text{с},$$

кинематическая вязкость определялась как $\nu(t) = \eta(t) / \rho(t)$. Из рисунка видно, что при диаметрах электрода менее 200 мм и при используемых на практике скоростях вращения электрода $\omega \leq 200$ об/мин движение в шлаковой ванне имеет ламинарный характер.

Вследствие трения слой жидкости, непосредственно прилегающий к торцу электрода, увлекается последним под действием центробежной силы и отбрасывается наружу от центра электрода (диска). Взамен отброшенной жидкости к электроду притекает в осевом направлении новая жидкость, которая также увле-

кается диском и опять отбрасывается наружу. Создается трехмерное течение. Скорость имеет три составляющие: в радиальном направлении – u , в азимутальном – v и осевом – w .

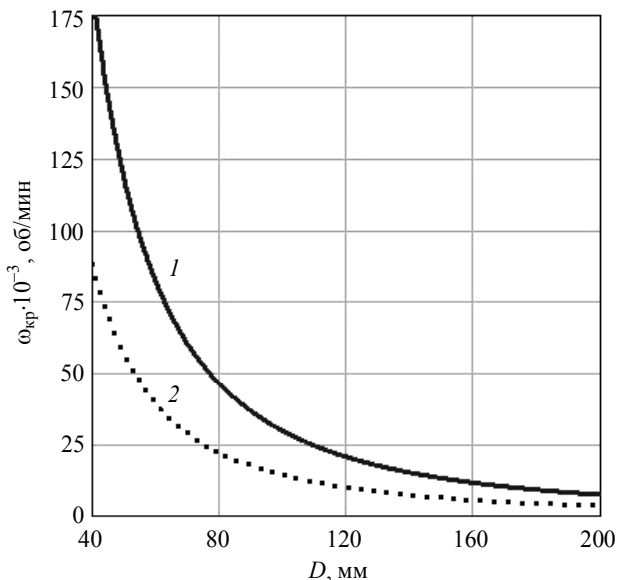


Рис. 1. Зависимость критической скорости вращения электрода от его диаметра при разной температуре шлака АНФ-6: 1 – $t = 1600$ °С, 2 – $t = 1700$ °С

Fig. 1. Critical speed of rotation of an electrode as a function of its diameter at different temperatures of the slag ANF-6: $t = (1) 1600$ and $(2) 1700$ °С

В работе [13] рассмотрена задача ламинарного течения жидкости вблизи вращающегося диска. При этом полагалось, что жидкость вдали от диска неподвижна. Рассмотрено решение уравнений Навье – Стокса и неразрывности в цилиндрических координатах Orz с учетом осевой симметрии:

$$\begin{cases} u \frac{\partial u}{\partial r} - \frac{v^2}{r} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \cdot \nabla^2 u, \\ u \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{u \cdot v}{r} + w \frac{\partial v}{\partial z} = \nu \cdot \nabla^2 v, \\ u \frac{\partial w}{\partial r} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \cdot \nabla^2 w, \\ \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{u}{r} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (3)$$

В качестве граничных условий выбрано прилипание жидкости к вращающейся плоскости и нулевые скорости вдали от нее:

$$\text{при } z = 0, u = 0; v = r\omega_0; w = 0;$$

$$\text{при } z = \infty, u = 0; v = 0, w = 0.$$

Для решения задачи пограничного слоя вводилось безразмерное расстояние $\zeta = z\sqrt{\omega_0/\nu}$, проекции скоростей и давление определялись как

$$u = r \cdot \omega_0 F(\zeta), \quad v = r \cdot \omega_0 G(\zeta), \quad w = \sqrt{\nu \cdot \omega_0} H(\zeta), \quad p = \rho \cdot \nu \cdot \omega_0 P(\zeta).$$

После подстановки этих выражений в уравнения (3) имеем систему обыкновенных дифференциальных уравнений для определения четырех неизвестных функций $F(\zeta)$, $G(\zeta)$, $H(\zeta)$ и $P(\zeta)$

$$\begin{cases} 2F + H' = 0, \\ F^2 + F'H - G^2 - F'' = 0, \\ 2FG + HG' - G'' = 0, \\ P' + HH' - H'' = 0, \end{cases} \quad (4)$$

со следующими граничными условиями:

$$\text{при } \zeta = 0: F = 0, G = 1, H = 0, P = 0;$$

$$\text{при } \zeta = \infty: F = 0, G = 0, H' = 0. \quad (5)$$

Впервые численные решения системы (4), (5) было получено В. Кохрэнном посредством представления каждой функции в виде степенных рядов для значения $\zeta = 0$ и их асимптотического разложения для больших значений ζ , после чего оба ряда смыкались при некотором среднем значении ζ .

Проведем преобразование дифференциальных уравнений второго порядка (4) к системе уравнений первого порядка в каноническом виде. Для этого введем следующие обозначения: $y_1 = F$, $y_2 = F'$, $y_3 = G$, $y_4 = G'$, $y_5 = H$, $y_6 = H'$, $y_7 = P$. Из первого уравнения можно записать $H' = -2F$ и $H'' = -2F'$, в результате получим

$$\begin{cases} \frac{dy_1}{d\zeta} = y_2, & \frac{dy_2}{d\zeta} = y_1^2 + y_2 \cdot y_5 - y_3^2, & \frac{dy_3}{d\zeta} = y_4, \\ \frac{dy_4}{d\zeta} = 2y_1 \cdot y_3 + y_5 \cdot y_4, & \frac{dy_5}{d\zeta} = y_6, & \frac{dy_6}{d\zeta} = -2y_2, \\ \frac{dy_7}{d\zeta} = -2y_2 - y_5 \cdot y_6. \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия

$$\text{при } \zeta = 0: y_1 = 0, y_3 = 1, y_5 = 0, y_7 = 0;$$

$$\text{при } \zeta = \infty: y_1 = 0, y_3 = 0, y_6 = 0. \quad (7)$$

В среде разработки *Matlab* создана компьютерная программа с использованием решателя *bvp4c*. В качестве граничного условия принимали $\zeta = 10$. Полученное решение с относительной точностью порядка 10^{-3} совпадало с табличными данными, приведенными в работе [13]. Результаты расчетов безразмерных скоростей и давления вблизи вращающегося диска в жидкости приведены на рис. 2.

С использованием полученных распределений безразмерных скоростей для шлака АНФ-6 (при $t = 1600$ °С) было получено поле скоростей вблизи вращающегося электрода. На рис. 3 показано изменение вертикальной проекции скорости $w(z)$ по оси ванны вблизи электрода, вращающегося с разными угловыми скоростями. Расстояние z , где наблюдается существенное изменение скорости, составляет около 10 мм, при этом максимальная вертикальная скорость флюса составляет порядка 10 мм/с.

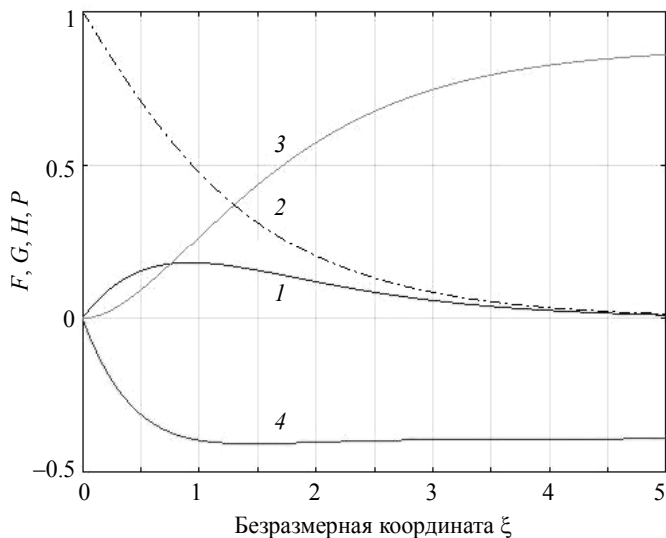


Рис. 2. Распределение безразмерных скоростей и давления
вблизи вращающегося диска в жидкости: 1 – F ; 2 – G ; 3 – H ; 4 – P
Fig. 2. Distribution of the dimensionless velocities and pressure
near the disk rotating in a liquid: 1 – F ; 2 – G ; 3 – H ; and 4 – P

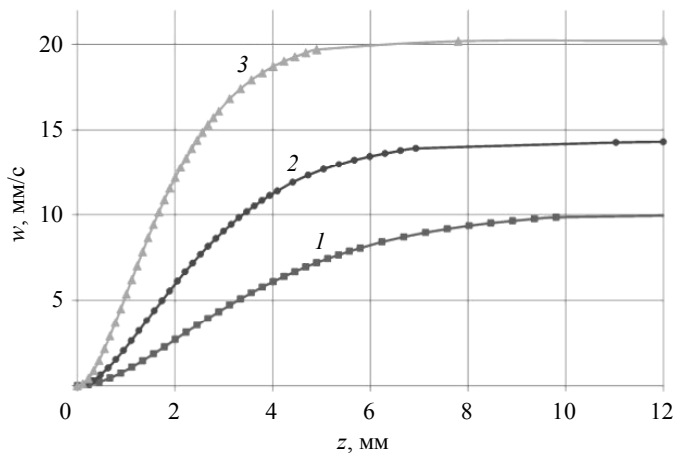


Рис. 3. Вертикальная составляющая скорости расплава флюса
вдоль оси ванны ($r = 0$) при разной скорости вращения электрода:
1 – $\omega = 50$ об/мин; 2 – $\omega = 100$ об/мин; 3 – $\omega = 200$ об/мин
Fig. 3. A vertical velocity component of the flux melt flow along the
bath center ($r = 0$) at different rotation speeds of the electrode: $\omega = (1)$
50, (2) 100, and (3) 200 rpm

На рис. 4 приведены зависимости радиальной и азимутальной составляющих скорости флюса от расстояния до электрода при разных расстояниях r от оси вращения. При увеличении расстояния от электрода z скорости быстро затухают и их значение пропорционально расстоянию от оси вращения r .

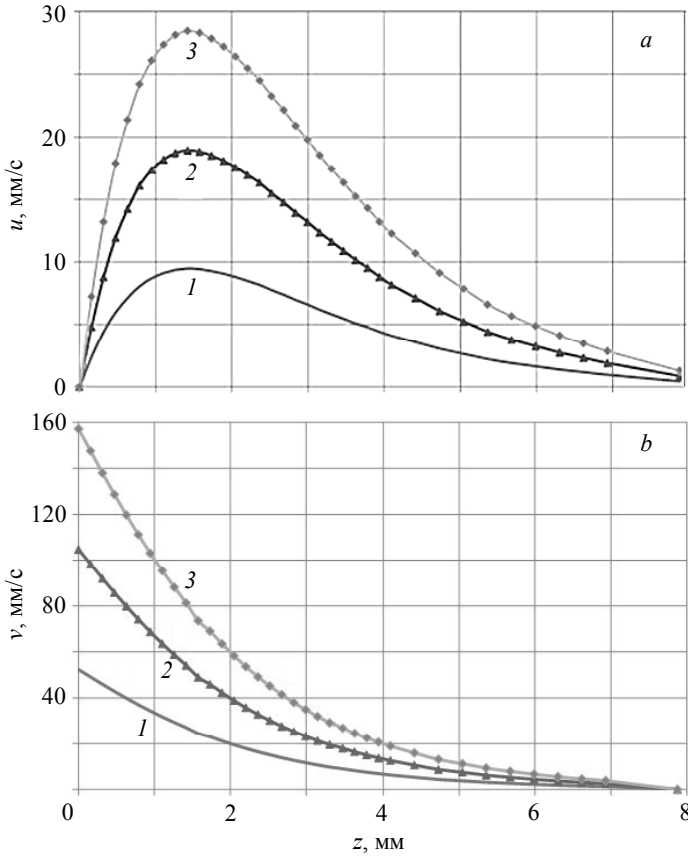


Рис. 4. Радиальная (а) и азимутальная (b) составляющие скорости расплава флюса в зависимости от расстояния до электрода для скорости его вращения $\omega = 100$ об/мин при: 1 – $r = 5$ мм; 2 – $r = 10$ мм; 3 – $r = 15$ мм

Fig. 4. (a) Radial and (b) azimuthal velocity components of the flux melt flow as functions of the distance to the electrode for its rotation speed $\omega = 100$ rpm at: $r = (1) 5, (2) 10, \text{ and } (3) 15$ mm

Составляющие скорости в горизонтальной плоскости u и v имеют заметные значения в пограничном слое толщиной $\delta = \sqrt{\nu/\omega_0}$. Так при $\omega = 50$ об/мин $\delta \approx 2$ мм, при $\omega = 100$ об/мин – $\delta \approx 1.6$ мм.

Момент сопротивления цилиндрического вращающегося электрода и оценка времени обновления шлаковой ванны

Момент сопротивления цилиндрического вращающегося электрода, погруженного в шлак на глубину h , складывается из момента сопротивления диска радиуса R и момента сопротивления тонкого кольца шириной h и радиуса R . Момент сопротивления диска можно записать как $M_{\text{д}} = C_{\text{м}} \frac{\rho}{2} \omega_0^2 R^5$, Н·м, где коэффи-

коэффициент момента сопротивления диска, смоченного с обеих сторон, $C_m = 3,87/\sqrt{\text{Re}}$, соответственно для торца электрода имеем $C_m = C_m / 2$.

Момент сопротивления тонкого кольца $M_k = 2\pi R^2 h \cdot \tau_{z\varphi}$, где касательное напряжение на его стенке $\tau_{z\varphi} = \nu \rho \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)_{z=0}$ с использованием точного решения [13]

$$\tau_{z\varphi} = 0,616 \cdot \rho R \cdot v^{1/2} \omega_0^{3/2}, \text{ получим } M_k = C_m \frac{\rho}{2} \omega_0^2 R^4 h, \text{ Н}\cdot\text{м, где } C_m = 2 \cdot C_m.$$

Таким образом, результирующий момент сопротивления вращающегося электрода, погруженного в шлак

$$M = C_m \frac{\rho}{2} \omega_0^2 R^4 \left(\frac{R}{2} + 2h \right), \text{ Н}\cdot\text{м.} \quad (8)$$

Для изучения перемешивания объема жидкого флюса при вращении электрода определим секундный его объем, выбрасываемый наружу вследствие центробежного эффекта $Q = 2\pi R \int_{z=0}^{\infty} u dz$. Это значение было посчитано с использованием созданной компьютерной программы и численно совпало со значением, полученным по формуле [13]

$$Q = 0,886 \frac{\pi R^3 \omega}{\sqrt{\text{Re}}}, \text{ м}^3/\text{с.} \quad (9)$$

Зная Q , можно определить время обновления всей шлаковой ванны

$$\tau_{об} = \frac{V_{шл}}{Q}, \text{ с,} \quad (10)$$

где $V_{шл} = h_{шл} \pi \cdot D_{шл}^2 / 4$ – объем шлаковой ванны; $h_{шл}$, $D_{шл}$ – ее высота и диаметр соответственно.

Для анализа поведения этих параметров проведено компьютерное моделирование с использованием среды *Mathcad 14*. Для расчетов выбран шлак АНФ-6 (при $t = 1600$ °С). Зависимость момента сопротивления электрода M от его диаметра и скорости вращения показана на рис. 5, а. Из рисунка и формулы (8) видно, что величина момента сопротивления существенно растет при увеличении диаметра, глубины погружения и скорости вращения электрода.

Получена зависимость объемного расхода жидкого флюса от диаметра электрода при разной скорости его вращения (рис. 5, б), причем такой же объемный расход притекает к электроду в осевом направлении. С использованием формул (9), (10) можно оценить время обновления всей шлаковой ванны. Например, при диаметре и глубине шлаковой ванны $D_{шл} = 90$ мм, $h_{шл} = 25$ мм, для диаметра переплавляемого электрода $D = 40$ мм и скорости его вращения $\omega = 100$ об/мин имеем $Q = 18$ см³/с, $V_{шл} = 159$ см³, $\tau_{об} = 8.8$ с. Данная оценка времени обновления шлаковой ванны говорит о том, что для неглубокой шлаковой ванны, из-за интенсивного ее перемешивания под действием центробежных сил, температуру и химические свойства шлака по объему ванны в процессе ЭШП можно считать постоянными $t_{шл} = \text{const}$.

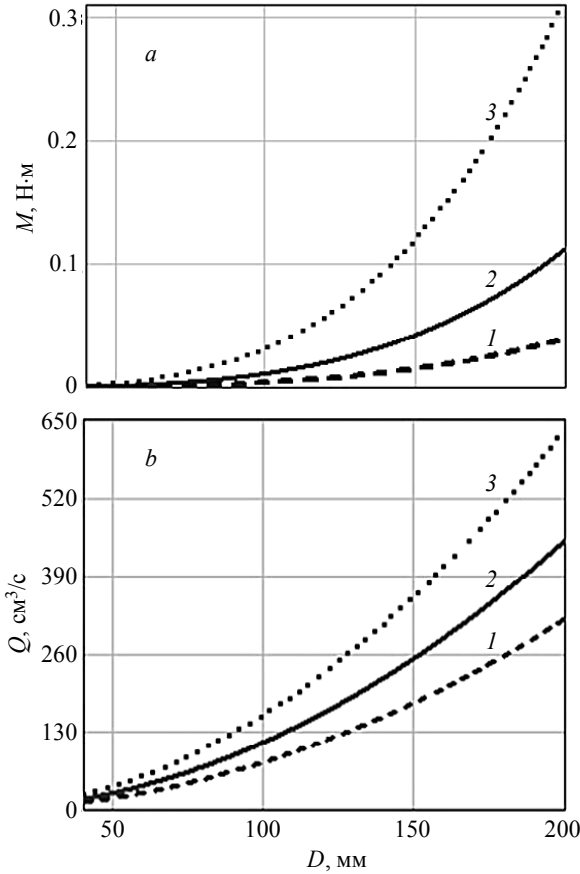


Рис. 5. Зависимость момента сопротивления вращающегося электрода (а) и объемного расхода жидкого флюса (б) от диаметра электрода при скорости его вращения: 1 – $\omega = 50$ об/мин; 2 – $\omega = 100$ об/мин; 3 – $\omega = 200$ об/мин; глубина погружения электрода в шлак АНФ-6 при $t = 1600$ °С составляет $h = 40$ мм

Fig. 5. Dependence of the (a) moment of rotating electrode resistance and (b) volumetric flow rate of the liquid flux on the electrode diameter at rotation speeds: $\omega = (1) 50$, (2) 100, and (3) 200 rpm; the depth of the electrode immersion into the ANF-6 slag at $t = 1600$ °C is $h = 40$ mm

Методология определения характера течения в шлаковой ванне на основе анализа соотношения центробежной и электромагнитной сил

На частицу жидкости, находящуюся в движении вблизи вращающегося электрода, вследствие вязкостного трения в слое на расстоянии r от оси, действует центробежная сила, которая на единицу объема равна $f_{ц} = \rho \cdot r \cdot \omega_0^2$. Максимальное значение этой силы будет наблюдаться на краю электрода

$$f_{ц} = \rho \cdot R \omega_0^2, \text{ Н/м}^3.$$

При вращении расходуемого электрода за счет вязкости на жидкий флюс начинают активно действовать центробежные силы, которые с определенных значений могут изменить характер течения в сравнении с процессом без вращения расходуемого электрода. Как уже отмечалось выше, действие электромагнитной и центробежной сил на характер течения шлака взаимно противоположное.

Определим, при каких условиях будет доминировать характер того или иного течения. При прохождении тока от электрода к поддону и боковой стенке через жидкий шлак и металл под действием электромагнитной силы возникают электровихревые течения. Объемную электромагнитную силу \vec{f} , действующую на единицу токонесущего объема жидкого шлака, в произвольной точке можно определить как [14] $\vec{f} = \mu_0 \cdot \vec{J} \times \vec{H}$, где \vec{J} – плотность тока в этой точке; \vec{H} – значение напряженности магнитного поля, создаваемого как внешними, так и токами, протекающими через объем, на который эта сила действует; μ_0 – магнитная постоянная.

Поскольку сила \vec{f} определяется векторным произведением, то можно найти ее проекции в цилиндрической системе координат [15]:

$$\vec{f} = \mu_0 (J_\phi H_z - J_z H_\phi) \vec{e}_r + \mu_0 (J_z H_r - J_r H_z) \vec{e}_\phi + \mu_0 (J_r H_\phi - J_\phi H_r) \vec{e}_z.$$

Известно, что при осесимметричном растекании тока по ванне имеются одна азимутальная составляющая магнитного поля H_ϕ и две составляющие электрического поля E_r , E_z , а значит, и две составляющие плотности тока J_r , J_z . Поэтому предыдущее равенство принимает более простой вид

$$\vec{f} = \vec{f}_r + \vec{f}_z = -\mu_0 J_z H_\phi \vec{e}_r + \mu_0 J_r H_\phi \vec{e}_z.$$

Из этого выражения видно, что сила Лоренца \vec{f} имеет две проекции – радиальную $f_r = -\mu_0 J_z H_\phi$ и вертикальную $f_z = \mu_0 J_r H_\phi$, причем сила f_r имеет направление, противоположное оси r , что подтверждает природу пинч-эффекта (рис. 6).

Напряженность магнитного поля в шлаковой ванне увеличивается при приближении к краю электрода и достигает максимального значения на его краю (при $r = R$) $H_\phi = I / (2\pi R)$, где I – ток через электрод.

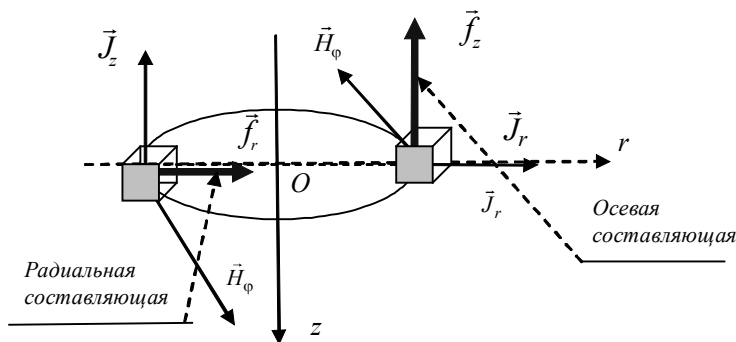


Рис. 6. Составляющие силы Лоренца, действующие на единицу объема жидкого флюса как токонесущей среды
Fig. 6. Components of the Lorentz force per unit volume of the liquid flux, representing a current-carrying medium

Можно отметить, что центробежная сила растет линейно при удалении от оси электрода, при растекании тока на поверхности электрода также растет и плотность тока вдоль его радиуса. Имеет место концентрация обеих проекций плотности тока на краях электрода. Для цилиндрического электрода проекция плотности тока J_z на краю электрода может быть в 1.5–2 раза выше средней плотности тока, протекающего через электрод, и ее можно оценить как $J_z = \frac{\zeta \cdot I}{\pi R^2}$. Таким образом, максимальную электромагнитную силу, действующую на расплав, можно по порядку величины определить как

$$|\vec{f}_m| \sim \mu_0 J_z H_\phi \sim \mu_0 \frac{\zeta \cdot I^2}{\pi^2 R^3}, \text{ Н/м}^3.$$

Характер течения в шлаковой ванне ЭШП можно оценить по порядку величины отношения центробежной и электромагнитной сил

$$\beta = \frac{f_{ц}}{f_m} = \frac{\pi^2 \rho R^4 \omega_0^2}{\mu_0 I^2}. \quad (11)$$

При одинаковых геометрических условиях и используемом шлаке это отношение пропорционально квадрату отношения скорости вращения к току.

Используя выражение (11), построим зависимость соотношения центробежной и электромагнитной сил от скорости вращения электрода диаметром $D = 40$ мм при разных токах через него (рис. 7).

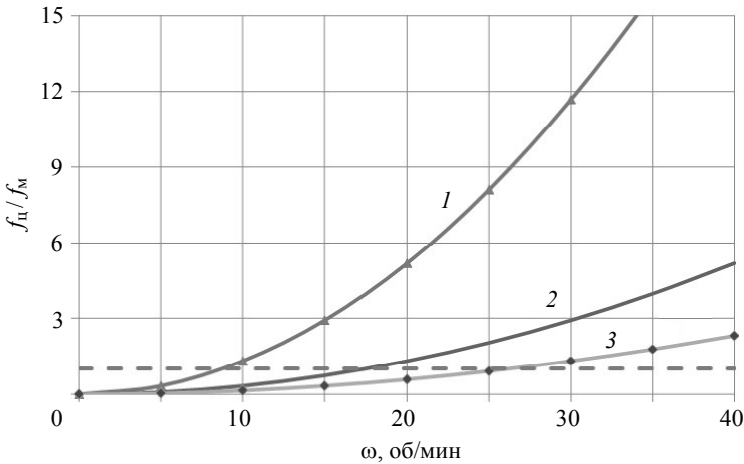


Рис. 7. Зависимость отношения центробежной и электромагнитной сил от скорости вращения электрода диаметром $D = 40$ мм при разных токах через него: 1 – 0.5 кА; 2 – 1 кА; 3 – 1.5 кА (пунктиром показано значение $\beta = 1$)

Fig. 7. Dependence of the ratio of centrifugal and electromagnetic forces on the rotation speed of an electrode with a diameter of $D = 40$ mm at different current passages: (1) 0.5, (2) 1, and (3) 1.5 kA (the dotted line indicates the value $\beta = 1$)

При $\beta < 1$ характер течения и гидродинамику в жидкой ванне определяет электромагнитная сила, а при $\beta > 1$ существенной оказывается центробежная сила. Например, из рисунка видно, что для тока 1.5 кА при скорости вращения более 30 об/мин решающую роль оказывает центробежная сила. При частоте вращения этого электрода менее 25 об/мин более значимыми будут электромагнитные силы, которые и будут определять характер течения в шлаковой ванне.

Заключение

1. Течение жидкости около вращающегося электрода ЭШП при доминировании центробежных сил над электромагнитными и используемых на практике скоростях вращения электродов для флюса АНФ-6 можно считать ламинарным.

2. Получена система дифференциальных уравнений первого порядка в каноническом виде и граничные условия для приближенного расчета трехмерного ламинарного течения жидкости вблизи вращающегося диска.

3. Вследствие вязкости слой флюса, непосредственно прилегающий к электроду, увлекается последним и под действием центробежной силы отбрасывается наружу от его оси вращения. Взамен отброшенной жидкости к электроду притекает в осевом направлении новая порция жидкости, что и создает трехмерное течение в объеме расплава. Для флюса АНФ-6 при 1600 °С получено, что вертикальная составляющая скорости по оси в зависимости от скорости вращения электрода существенно изменяется на расстоянии порядка 10 мм от электрода, при этом максимальная скорость составляет по порядку величины 10 мм/с. Азимутальная и радиальная составляющие скорости при увеличении расстояния от электрода быстро затухают и их значение пропорционально расстоянию от оси вращения. Составляющие скорости в горизонтальной плоскости имеют заметные значения в пограничном слое, толщина которого зависит от скорости вращения электрода и вязкости шлака.

4. Приведена аналитическая зависимость момента сопротивления вращающегося электрода в зависимости от его диаметра и глубины погружения в шлак. С ее помощью при экспериментальном измерении момента сопротивления свободного электрода и погруженного в шлак можно определить вязкость используемого флюса.

5. Предложено выражение для оценки времени обновления шлаковой ванны с вращающимся электродом. При небольшой глубине жидкой ванны за счет ее интенсивного перемешивания под действием центробежных сил температуру и химические свойства флюса по объему ванны в процессе ЭШП можно считать постоянными.

6. Получена оценка, определяющая влияние на гидродинамику жидкой ванны центробежной и электромагнитной сил. Чем меньше диаметр, частота вращения электрода и больше через него ток, тем более значимым на характер течения оказывают электромагнитные силы. При одинаковых геометрических условиях и используемом шлаке отношение центробежной и электромагнитной сил пропорционально квадрату отношения скорости вращения электрода к силе тока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Медовар Б.И. Тепловые процессы при электрошлаковом переплаве. Киев: Наукова думка, 1978. 304 с.
2. Paton B.E., Medovar L.B. Improving the electroslagremelting of steel and alloys // Steel in Translation. 2008. V. 38(12). P. 1028–1032. DOI: 10.3103/S0967091208120218.
3. Wang Q., Li G., He Z., Li B. Numerical study on the effect of electrode polarity on desulfurization in direct current electroslag remelting process // Metallurgical and Materials Transactions B. 2017. V. 48. P. 2649–2663. DOI: 10.1007/s11663-017-1040-7.
4. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Würzinger P. Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting // Steel Research Int. 2014. V. 85(4). P. 570–578.
5. Чуманов В.И., Белозёров Б.П., Чуманов И.В. Математическая модель переплава вращающегося электрода // Известия вузов. Черная металлургия. 1991. № 12. С. 74 – 75.
6. Чуманов И.В., Пятыгин Д.А. Особенности электрошлакового переплава на постоянном токе с вращением расходуемого электрода // Известия вузов. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 22 – 25.
7. Chumanov I.V., Chumanov V.I. Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating of consumable electrode: Part I // Russian Metallurgy (Metally). 2010. 68. P. 499–504. DOI: 10.1134/S003602951006008X.
8. Chumanov V., Chumanov I. Speed control of remelting in the electroslag process by changing the rotation speed consumable electrode // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. 2016. P. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911021.
9. Коптев А.А. Движение жидкости в центробежных полях. Ч. I. Течение жидкости вблизи вращающегося диска. М.: Машиностроение, 2005. 240 с.
10. Хмелева М.Г., Даммер В.Х., Тохметова А.Б., Миньков Л.Л. Численное исследование вихреобразования в жидком металле под действием дискового завихрителя // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2017. № 46. С. 76–85.
11. Воробьев А.А., Пожидаев Ю.В. Электрошлаковый переплав. Новокузнецк: СибГИУ, 2002. 116 с.
12. Лопав Б.Е., Кагарманов И.И. Расчет вязкости флюсов для электрошлакового переплава на основе способа равных сумм // Омский научный вестник. 2016. № 1(145). С. 18–21.
13. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 712 с.
14. Гельфгат Ю.М., Лиелаусис О.А., Щербинин Э.В. Жидкий металл под действием электромагнитных сил. Рига: Зинатне, 1975. 248 с.
15. Ячиков И.М., Карандаева О.И., Ларина Т.П. Моделирование электровихревых течений в ванне дуговой печи постоянного тока. Магнитогорск: ГОУВПО «МГТУ», 2008. 234 с.

Статья поступила 11.11.2020

Chumanov I.V., Yachikov I.M., Yachikov M.I., Matveeva M.A., Sergeev D.V. (2021) INFLUENCE OF THE CONSUMABLE ELECTRODE ROTATION DURING ELECTROSLAG REMELTING ON HYDRODYNAMICS OF A SLAG BATH. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 73. pp. 121–134

DOI 10.17223/19988621/73/11

Keywords: electroslag remelting, rotatable remelting electrode, hydrodynamics of a slag bath, flow pattern, centrifugal force, electromagnetic force.

Slag melt is a current-carrying medium with intense currents induced by gravitational and electromagnetic forces. The remelted electrode rotation leads to a change in hydrodynamic processes proceeding in a slag bath of the ESR installation and associated primarily with the

occurrence of a centrifugal force. The flow pattern, which is developed in the slag bath under this force action, is different from that developed at a stationary consumable electrode. A mathematical model is proposed to assess the impact of consumable electrode rotation on hydrodynamics in a slag bath during electroslag melting. A computer program is created to determine the projections of the flow velocities for a liquid flux near a rotating electrode, the moment of its hydraulic resistance, and the renewal time for the slag bath while being stirred.

The critical speed of the rotation of the electrode is determined as a function of its diameter at a transitional flow regime for ANF-6 flux. The dependence of the flux flow velocity on the electrode rotation speed is presented. The moment of the rotating electrode resistance in a slag bath is determined at various electrode diameters and various depths of the electrode immersion into the slag. An expression is proposed for estimating the time of the slag bath renewal. It is also shown that at a small depth in the bath due to its intensive mixing under the action of centrifugal forces, the temperature and chemical composition over the slag bath volume during the ESR process can be considered as constant.

The ratio of centrifugal and electromagnetic forces is estimated. The results determine a flow pattern of the liquid slag and the conditions under which the hydrodynamics in the slag bath is governed by centrifugal forces.

Financial support. The reported study was funded by RFBR, project number 19-38-90081.

Il'ya V. CHUMANOV (Doctor of Technical Sciences, Professor, South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation). E-mail: chumanoviv@susu.ru

Igor' M. YACHIKOV (Doctor of Technical Sciences, Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation). E-mail: jachikov@mail.ru

Matvey I. YACHIKOV (Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation). E-mail: jachikov@mail.ru

Mariya A. MATVEEVA (South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation). E-mail: matveevama@susu.ru

Dmitriy V. SERGEEV (South Ural State University, Zlatoust, Russian Federation). E-mail: sergeevdv@susu.ru

REFERENCES

1. Medovar B.I. (1978) *Teplovye protsessy pri elektroshlakovom pereplave* [Thermal processes in electroslag remelting]. Kiev: Naukova dumka.
2. Paton B.E., Medovar L.B. (2008) Improving the electroslag remelting of steel and alloys. *Steel in Translation*. 38(12). pp. 1028–1032. DOI: 10.3103/S0967091208120218.
3. Wang Q., Li G., He Z., Li B. (2017) Numerical study on the effect of electrode polarity on desulfurization in direct current electroslag remelting process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 48. pp. 2649–2663. DOI: 10.1007/s11663-017-1040-7.
4. Paar A., Schneider R., Zeller P., Reiter G., Paul S., Würzinger P. (2014) Effect of electrical parameters on type and content of non-metallic inclusions after electro-slag-remelting. *Steel Research International*. 85(4). pp. 570–578. DOI: 10.1002/srin.201300317.
5. Chumanov V.I., Belozyorov B.P., Chumanov I.V. (1991) Matematicheskaya model' pereplava vrashchayushchegosya elektroda [A mathematical model of the remelting of a rotating electrode]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 12. pp. 74–75.
6. Chumanov I.V., Pyatygin D.A. (2006) Osobennosti elektroshlakovogo pereplava na postoyannom toke s vrashcheniem raskhoduемого elektroda [Features of the electroslag remelting at direct current with rotating consumable electrode]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya – Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 3. pp. 22–25.
7. Chumanov I.V., Chumanov V.I. (2010) Increasing the efficiency of the electroslag process and improving the metal quality by rotating a consumable electrode: Part I. *Metally – Russian metallurgy*. 68. pp. 499–504. DOI: 10.1134/S003602951006008X.

8. Chumanov V., Chumanov I. (2016) Speed control of remelting in the electroslag process by changing the rotation speed consumable electrode. *Proceedings of the 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*. pp. 1–4. DOI: 10.1109/ICIEAM.2016.7911021.
9. Koptev A.A. (2005) *Dvizhenie zhidkosti v tsentrobezhnykh polyakh. Chast' I. Techenie zhidkosti vblizi vrashchayushchegosya diska* [Liquid motion in centrifugal fields. Part I. Fluid flow near a rotating disk.]. Moscow: Mashinostroenie.
10. Khmeleva M.G., Dammer V.K., Tokhmetova A.B., Min'kov L.L. (2017) Chislennoe issledovanie vikhreobrazovaniya v zhidkom metalle pod deystviem diskovogo zavikhritelya [Numerical investigation of the vortex formation in a liquid metal under the action of disk agitator]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 46. pp. 76–85. DOI: 10.17223/19988621/46/10.
11. Vorob'ev A.A., Pozhidaev Yu.V. (2002) *Elektroshlakovyy pereplav* [Electroslag remelting]. Novokuznetsk: SibGIU.
12. Lopaev B.E., Kagarmanov I.I. (2016) Raschet vyazkosti flyusov dlya elektroshlakovogo pereplava na osnove sposoba ravnykh summ [Calculation of the viscosity of fluxes for electroslag remelting based on the method of equal sums]. *Omskiy nauchnyy vestnik – Omsk Scientific Bulletin*. 1(145). pp. 18–21.
13. Shlikhting G. (1974) *Teoriya pogrannichnogo sloya* [Boundary layer theory]. Moscow: Nauka.
14. Gel'fgat Yu.M., Lielausis O.A., Shcherbinin E.V. (1975) *Zhidkiy metall pod deystviem elektromagnitnykh sil* [Liquid metal under the action of electromagnetic forces]. Riga: Zinatne.
15. Yachikov I.M., Karandaeva O.I., Larina T.P. (2008) *Modelirovanie elektrovikhrevykh techeniy v vanne dugovoy pechi postoyannogo toka* [Modeling of electric vortex flows in a bath of the DC arc furnace]. Magnitogorsk: MGTU.

Received: November 11, 2020