УДК 51-73 + 669.087

ОСОБЕННОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИИ

Н.А. Игизьянова

Данная статья посвящена исследованию научными методами проблемы, возникающей в технологическом процессе электрошлакового переплава при переводе его с переменного тока на постоянный. По причине трудностей исследования физических явлений в таких процессах актуальным является математическое моделирование с применением компьютерных технологий. Решение проблемы заключается в нахождении особенностей поведения электромагнитных полей в ванне шлакового расплава. Моделирование основано на Максвелловской системе электромагнетизма. Проведенные расчеты выявили значительную анизотропию в перераспределении основных технологических параметров, что соответствует экспериментальным данным. Несоосность источника электрического тока влечет усиление данного явления.

Ключевые слова: электрошлаковый переплав, математическое моделирование, система электромагнетизма, значительная анизотропия, несоосность источника электрического тока.

Область применения жидких неметаллических высокотемпературных сред (ЖНВС) достаточно велика – это спецэлектрометаллургия, электросварочные технологии, производство огнеупорных материалов (периклаза). Причем эти технологии с применением ЖНВС были разработаны в прошлом веке и требуют своего совершенствования, с целью как энергосбережения, экологии, так и получения новых материалов.

Эти технологии очень энергоемкие, совершенствование их приведет к существенному улучшению экономических показателей и качеству выпускаемой продукции. Так, например, в электрошлаковой технологии для производства шарикоподшипниковых, быстрорежущих, нержавеющих, жароупорных и жаропрочных сплавов ванна ЖНВС (шлаковая ванна) является основным звеном печи электрошлакового переплава (ЭШП). Она представляет собой среду, в которой генерируется тепловая энергия при прохождении через нее электрического тока. По прогнозам специалистов перевод ЭШП на постоянный ток даст экономию электроэнергии порядка 10–15 %.

В настоящее время ведутся разработки по переводу некоторых технологий спецэлектрометаллургии (ЭШП, дуговые переплавы и т.д.) с переменного тока на постоянный. Простой переход на постоянный ток по на-

блюдениям специалистов приводит к дестабилизации ванны ЖНВС. В результате нарушается процесс переплава, направленная кристаллизация готового металла и снижается его качество. Поэтому требуются теоретические исследования процессов в токонесущих ЖНВС.

Трудность исследования физических явлений в таких средах заключается в том, что они представляют собой совокупность взаимосвязанных высокоинтенсивных теплофизических, электрохимических, электромагнитных процессов. Поэтому перспективным направлением исследования таких сложных систем является математическое моделирование с применением компьютерных технологий [1].

Для определенности дальнейших рассуждений была взята достаточно отработанная технология с использованием ЖНВС – электрошлаковая. В одном агрегате (печи ЭШП) осуществляется вся технология получения качественного металла (плавление, рафинирование, направленная кристаллизация). Если теплофизические процессы при вторичном переплаве достаточно полно исследованы, то электромагнитные практически не изучены [2].

Печь для ЭШП представляет собой цилиндрический кристаллизатор, в верхней части которого закреплен электрод с погруженным в ЖНВС (шлаковую ванну) нижним торцом (рис. 1).

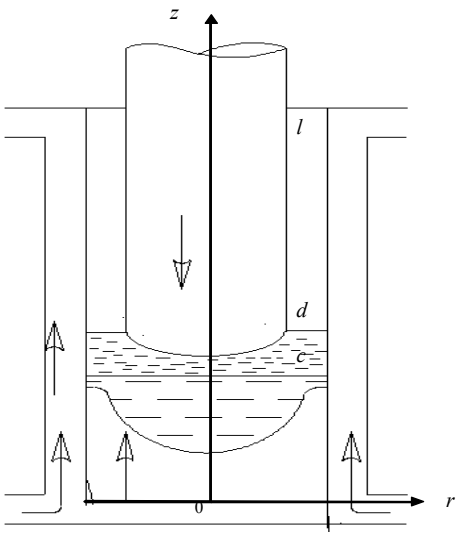

Рис. 1. Схема печи ЭШП

Рассмотренные факты позволяют сформулировать и исследовать в данной работе следующие и гипотезы:

1. Физические параметры: ток проводимости и выделенная тепловая энергия распределены равномерно по объему ванны ЖНВС.

2. Электромагнитные силы распределены неравномерно по объему ванны расплава.

3. Дестабилизации ванны расплава обусловлена отклонениями в позиционировании подведенного источника тока.

Поскольку исследуемая система представляет собой сплошную жидкую среду, то ее взаимодействие с электромагнитными полями полностью описывается системой уравнений, которая является совокупностью уравнений Максвелла для электромагнитного поля, гидродинамических уравнений движения, термодинамических уравнений состояния среды и уравнения закона сохранения энергии. Эту систему в зависимости от постановки задачи можно решать раздельно, т.е. либо только электромагнитную часть системы, либо тепловую, либо только динамику жидкой среды в объеме

ванны при допущении, что электромагнитное поле и профиль скорости потока жидкости взаимно не деформируют друг друга:

$$\mathrm{rot}\,\overline{H} = \bar{j};$$

$$\frac{\partial \overline{H}}{\partial t} = \mathrm{rot}[\bar{v}\overline{H}] + \nu_m \Delta \overline{H};$$

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + (\bar{v}\nabla)\bar{v} = -\frac{1}{\rho}\mathrm{grad}\ p - \frac{1}{4\pi\rho}[\overline{H}\,\mathrm{rot}\overline{H}] + \frac{\eta}{\rho}\Delta\bar{v} + \frac{1}{\rho}\left(\zeta + \frac{\eta}{3}\right)\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\bar{v};$$

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\rho\bar{v}^2}{2} + \rho u + \frac{\overline{H}^2}{8\pi}\right) = -\mathrm{div}\,\overline{w};\ \bar{f} = \bar{j} \times \overline{H}.$$

В уравнениях приняты обозначения: $\overline{H}$ – напряженность магнитного поля; $\bar{j}$ – плотность объемного тока; $\nu_m = \dfrac{c^2}{4\pi\gamma}$ – коэффициент магнитной вязкости; η и ζ – коэффициенты сдвиговой и объемной вязкости; ρ – плотность среды; p – давление; u – удельная внутренняя энергия среды; $\bar{v}$ – скорость движения среды; $\overline{w}$ – энтропия; $\bar{f}$ – электромагнитная объемная сила.

Объемные электромагнитные силы вычисляются как произведение векторов (в цилиндрических координатах):

$$\bar{f} = \begin{vmatrix} \bar{e}_r & \bar{e}_\varphi & \bar{e}_z \\ j_r & j_\varphi & j_z \\ H_r & H_\varphi & H_z \end{vmatrix} = \bar{e}_r\left(j_\varphi H_z - j_z H_\varphi\right) - \bar{e}_\varphi\left(j_r H_z - j_z H_r\right) + \bar{e}_z\left(j_r H_\varphi - j_\varphi H_r\right).$$

Расчетная область: $r_э = 0{,}15$ м, $r_k = 0{,}26$ м;

- свободная поверхность: при $r_э < r < r_k : z = d; \dfrac{\partial U}{\partial z} = 0;$
- область входа электрода: при $0 < r < r_э : z = d; \dfrac{\partial U}{\partial z} = -\dfrac{j_э}{\sigma};$

где $j_э$ – плотность тока на пятне электрода, кА/м^2; $r_э, r_k$ – радиусы электрода и кристаллизатора, м; σ – коэффициент электропроводности шлака, (Ом·м)$^{-1}$.

Для определения причин, дестабилизирующих ванну ЖНВС, наклоняя и вращая ее трудно контролируемым образом, была выдвинута гипотеза о том, что это, в основном, результат воздействия объемных электромагнитных сил, а также других факторов. Например, несоосность электрода в кристаллизаторе, анизотропия теплопроводности в ЖНВС, не цилиндрическая форма электрода. Все эти предположения подлежат теоретическому обоснованию. С этой целью на компьютере моделировали варианты про-

цесса: расходуемый электрод цилиндрической формы в кристаллизаторе расположен соосно и несоосно. Решение системы уравнений проводилось численным методом конечных разностей (МКР) [3]. Для этого предварительно исследовалась устойчивость, точность аппроксимации конечно-разностной схемы.

Параметры ЭШП были приняты близкими к реальному технологическому процессу переплава – ток переплава 2 кА, сопротивление электрода 1 мкОм, электропроводность шлака 500 $(\text{Ом}\cdot\text{м})^{-1}$ [4].

Моделировался процесс при соосном и несоосном расположении электрода, и вычислялись распределения потенциала, плотности тока, энергии Q, выделяемой в шлаке током, ОЭМС.

На рис. 2 приведено распределение плотности тока в осевом сечении шлаковой ванны.

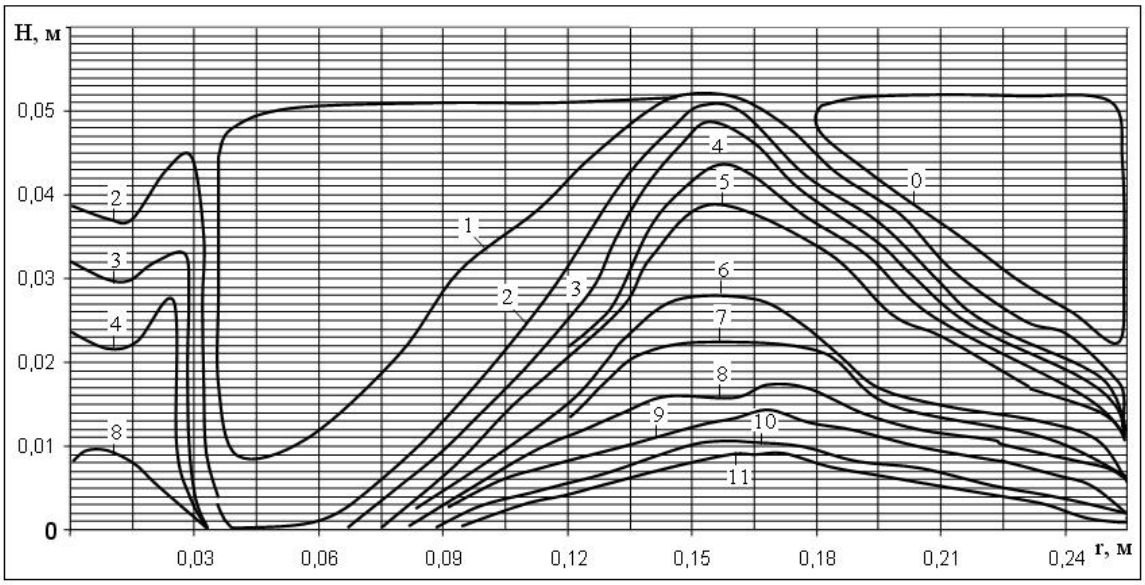

Рис. 2. Изолинии амплитуды плотности тока в шлаковой ванне:
0–0; 2–30,5; 4–50,0; 6–150,0; 8–300,0; 10–2000,0 кА/м^2

Наибольшая плотность тока наблюдается при радиусе $r = r_э$. Под электродом плотность тока более равномерная и при $r_э < r < r_k$ при $z = m_i h$ $(i = \overline{5,10})$ плотность тока нулевая. В этой части пространства не наблюдается и выделение энергии, эта область есть самое холодное пространство шлаковой ванны.

По найденным значениям плотности и силы тока определялась выделенная энергия в точках шлакового пространства по известному феноменологическому соотношению $Q = I^2 R_ш t$.

Исходя из принятого допущения, что внешний теплообмен шлаковой ванны отсутствует, тогда внутри ванны распределение тепла происходит

теплопроводностью [5]. Из соотношения для теплового потока $Q = \lambda_{шл} S_i (T_{i+1} - T_i) / \Delta r$ от слоя к слою была вычислена разность температур $T_{i+1} - T_i = \Delta T_i$. Теплопроводность шлака $\lambda_{шл} = 4{,}64$ Вт(м · К). Площадь сечения *i*-го слоя вычислялась по формуле: $S_i = \Pi (r_{i+1} + r_i) \Delta r$.

На рис. 3 приведено изменение ΔT_j при $i = 5$. Максимальная неоднородность значений температуры наблюдается в области при $r = r_э$ и в этой периферийной зоне электрода происходит перегрев шлака. При внешнем теплообмене этот пик перегрева сглаживается, но анизотропия температурного поля остается очень значительная. В работе замеры температуры проводились путем просвечивания ванны рентгеновским лучом и по степени затемнения пленки определяли температуру. При этом следует заметить, что луч, проходя по диаметру ванны, дает интегральную характеристику затемнения пятна на пленке. Вычисленная среднеинтегральная температура в сечении (см. рис. 3) равна 341,1 К.

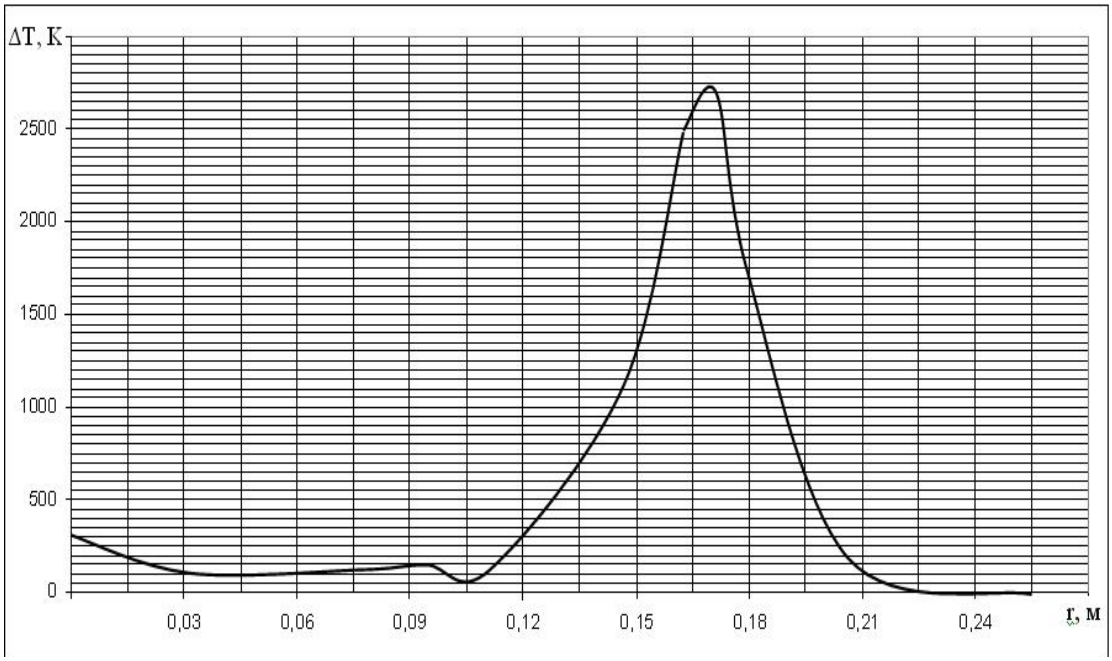

Рис. 3. Изменение разности температур. Меж уровнями в расплаве

При наличии внешнего теплообмена эта температура будет ниже, что соответствует экспериментальным данным работы.

Распределение объемной плотности ОЭМС при соосном положении электрода приведено на рис. 4, откуда видно, что силы распределены симметрично вокруг оси электрода [6]. При несоосном положении источника тока происходит смещение составляющих вектора силы, и с глубиной ванны это смещение все больше, «двигая» содержимое жидкой среды в сторону смещения электрода.

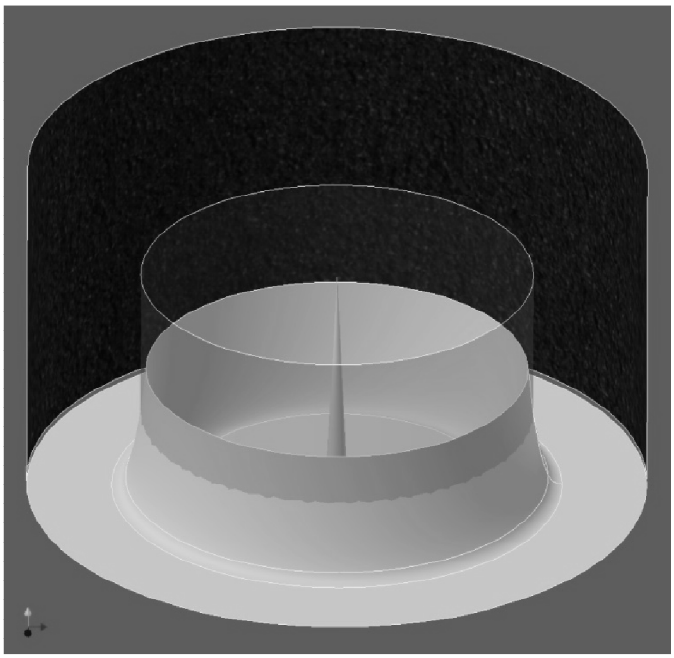

Рис. 4. Амплитуда плотности ОЭМС в шлаковом расплаве

Таким образом, по результатам математического моделирования можно сделать выводы следующие ниже.

Гипотеза о равномерном распределении тока проводимости и выделенной тепловой энергии в токонесущей ЖНВС не подтвердилась. Установлена значительная анизотропия распределения физических параметров в токонесущей ЖНВС – плотности тока, тепловой энергии, объемных электромагнитных сил.

Гипотеза о неравномерном распределении электромагнитных сил подтвердилась.

Гипотеза о дестабилизации ванны расплава вследствие отклонений в позиционировании подведенного источника тока подтвердилась. Неравномерность распределения основных физических параметров значительно усиливается отклонениями в позиционировании источника подвода тока.

Библиографический список

1. Емельяненко, Ю.Г. Исследование гидродинамики при ЭШП методами физического и математического моделирования / Ю.Г. Емельяненко, С.Ю. Андриенко, Л.Н. Ясницкой // Проблемы специальной электрометаллургии. – 1987. – № 4. – С. 5–7.

2. Демиденко, Н.Д. Моделирование и оптимизация систем с распределенными параметрами / Н.Д. Демиденко, В.И. Потапов, Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 551 с.

3. Лисейкин, В.Д. Разностные сетки и координатные преобразования для численного решения сингулярно возмущенных задач / В.Д. Лисейкин, Ю.В. Лиханова, Ю.И. Шокин. – Новосибирск: Наука, 2007. – 312 с.

4. Потапов, В.И. Математическая модель волнового процесса кристаллизации металла / В.И. Потапов // Материалы VI Международной конференции ВМТ. – Курск. – 2003. – С. 112–115.

5. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Т.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.

6. Игизьянова, Н.А. Объемные электромагнитные силы в токонесущем шлаковом расплаве при ЭШП / Н.А. Игизьянова, В.И. Потапов // XIV-я международная научная конференция «Современные проблемы электрометаллургии стали». – Сатка. – 2010.

К содержанию