

**Кузьмичев Е. Н., Николенко С. В., Власенко В. Д., Дроздов Е. А.**  
**E. N. Kuzmichev, S. V. Nikolenko, V. D. Vlasenko, E. A. Drozdov**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА  
ПРИ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОМ ПЕРЕПЛАВЕ**

**SIMULATION OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES WHEN ELECTRO-SLAG  
REMELTING**

**Кузьмичев Евгений Николаевич** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 153. E-mail: e\_kuzmihev@mail.ru.

**Evgenii N. Kuzmichev** – PhD in Engineering, Associate Professor, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: e\_kuzmichev@mail.ru.

**Николенко Сергей Викторович** – доктор технических наук, главный научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153. E-mail: nikola1963@mail.ru.

**Sergei V. Nikolenko** – Doctor of Technical Sciences, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: nikola1960@mail.ru.

**Власенко Виктор Дмитриевич** – кандидат физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук – обособленного подразделения ХФИЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65. E-mail: vlasenko@as.khb.ru.

**Viktor D. Vlasenko** – PhD in Physics and Mathematics, Computing Center of Far Eastern Branch of the Russian Academy of Science (Russia, Khabarovsk). E-mail: vlasenko@as.khb.ru.

**Дроздов Евгений Александрович** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (Россия, Хабаровск); 680000, Хабаровск, ул. Тихоокеанская 153. E-mail: vag6@festu.khv.ru.

**Evgenii A. Drozdov** – PhD in Engineering, Institute of Materials Technology, Khabarovsk Centre of FEC the Russian Academy of Sciences (Russia, Khabarovsk). E-mail: vag6@festu.khv.ru.

**Аннотация.** Рассмотрены механизмы движения тепломассопереноса при электрошлаковом переплаве: возбуждение объёмной электромагнитной силы в расплаве шлака в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем и возникновение тепловой конвекции в результате выделения джоулева тепла. Показано, что определяющей в подобных процессах является электромагнитная конвекция.

**Summary.** The mechanisms of heat and mass transfer movement during electroslag remelting are considered: the excitation of a volumetric electromagnetic force in the slag melt as a result of the interaction of an electric current with its own magnetic field and the appearance of thermal convection as a result of the release of Joule heat. It is shown that the decisive factor in such processes is electromagnetic convection.

**Ключевые слова:** электрошлаковый переплав, электромагнитная конвекция, тепловая конвекция.

**Key words:** electroslag remelting, electromagnetic convection, thermal convection.

УДК 621.791

**Введение.** Электрошлаковый переплав – один из способов получения качественных рафинированных металлов и сплавов [1–5]. Отличительной особенностью электрошлакового процесса является то, что расходующий электрод переплавляется в ванне электропроводного синтетического солевого расплава под действием тепла, которое выделяется в жидкой шлаковой ванне при прохождении через неё электрического тока (см. рис. 1).

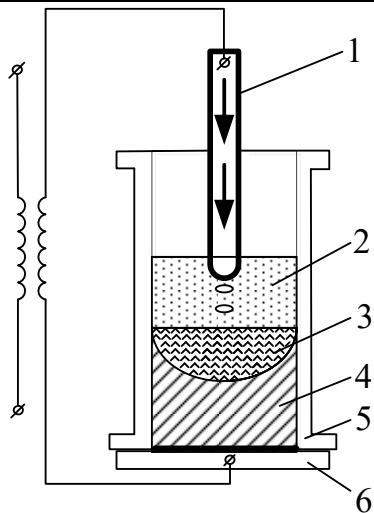


Рис. 1. Схема электрошлакового переплава: 1 – расходный электрод; 2 – шлаковая ванна; 3 – металлическая ванна; 4 – слиток; 5 – водоохлаждаемый кристаллизатор, 6 – поддон

### Моделирование процесса.

Электрошлаковый переплав отличается от других видов сварки плавлением прежде всего тем, что основная доля теплоты, идущей на плавление электродного металла, выделяется в шлаковой ванне, в которую погружён переплавляемый электрод (вторым электродом служит жидкометаллическая ванна и частично стенки формирующего слиток кристаллизатора (см. рис. 1). Объясняется это высоким электросопротивлением расплава шлака, которое на 3-4 порядка выше электросопротивления металла, что и определяет значительную концентрацию в расплаве выделяемой при переплаве энергии:

$$Q = 0,24I_c^3(R_{ш} + R_э),$$

где  $I_c$  – сварочный ток;  $R_{ш}$  – электросопротивление межэлектродного промежутка шлаковой ванны;  $R_э$  – электросопротивление погружённого электрода, т.е. не погружённой в расплав части электрода.

Наличие жидкой шлаковой ванны определяет существенные отличия электрошлакового переплава от других видов электрической сварки плавлением.

Во-первых, устойчивый электрошлаковый процесс может быть обеспечен при достаточно большой глубине шлаковой ванны (20 мм и более).

Во-вторых, физико-химические свойства шлака определяют ионный, исключаяющий дуговой разряд характер электрического тока в расплаве.

Наконец, шлаковая ванна, в которой происходит как плавление, так и перенос капель расплавленного металла, характеризуется более равномерным распределением в ней теплоты. Кроме того, высокая устойчивость электрошлакового процесса, в том числе и при использовании переменного тока промышленной частоты, выгодно отличает его от дугового плавления электродов, так как устойчивость горения дуги в ряде случаев ограничена не только родом электрического тока, но и малыми толщинами электродов.

Свойства ионного расплава шлаковой ванны во многом определяют не только режимы, но и её схему, технику поддержания электрошлакового процесса.

Выделяющаяся в результате воздействия электрического тока теплота нагревает шлаковую ванну до температуры 2100...2600 К и более и вызывает оплавление конца электрода в ней. В результате электрошлакового процесса капли расплавленного металла проходят через жидкий шлак, кристаллизуясь под шлаковым слоем в виде металлического слитка.

В процессе электрошлакового переплава в образовавшемся металлическом слитке значительно снижается содержание кислорода, уменьшается содержание неметаллических включений, понижается концентрация серы, фосфора и других вредных для металла примесей. Полученный слиток отличается высокой плотностью и однородностью металла, хорошим качеством поверхности, обладает высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Важнейшим отличительным свойством электрошлакового процесса является электрический ток. Из-за относительно низкой электропроводимости шлака ток формирует в нём интенсивное джоулево тепловыделение, которое и обеспечивает плавление расходного электрода. Помимо этого, температура в шлаковой ванне неоднородна из-за неравномерного распределения плотности тока, вследствие чего в ней возникает тепловая конвекция. Также необходимо учитывать и тот факт, что электрический ток обладает собственным магнитным полем, что приводит к появлению электромагнитной силы, которая может вызвать конвекцию жидкого шлака. Таким образом, явление тепломассопереноса в шлаковой ванне необходимо рассматривать с помощью магнитной гидродинамики [6; 7].

Запишем основные уравнения переноса импульса, теплоты и массы. Наличие электрического тока в шлаковой и жидкометаллической ваннах содержится в уравнениях переноса.

Уравнение Навье-Стокса стационарного движения вязкой жидкости содержит дополнительную силу – электромагнитную  $\vec{f}_e = \vec{J} \times \vec{B}$  :

$$\rho(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla p + \rho\nu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g} + \vec{J} \times \vec{B},$$

а уравнение переноса теплоты – плотность джоулева тепловыделения  $|\vec{J}|^2 / \sigma$  :

$$\rho\vec{v}\nabla T = \kappa\nabla^2 T + |\vec{J}|^2 / \sigma.$$

Уравнения переноса концентрации и неразрывности:

$$\vec{v}\nabla C = D\nabla^2 C, \quad \text{div}\vec{v} = 0.$$

К этим уравнениям добавляется уравнение состояния среды:

$$\rho = \rho(T, C).$$

Кроме того, необходимы уравнения Максвелла:

$$\text{div}\vec{B} = 0,$$

$$\vec{J} = \frac{1}{\mu_0\mu} \text{rot}\vec{B},$$

$$\partial\vec{B}/\partial t = -\text{rot}\vec{E},$$

$$\text{div}\vec{E} = \rho_e / \epsilon_0,$$

где  $\vec{v}$  – скорость;  $T$  – температура;  $C$  – концентрация;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $\nu$  – кинетическая вязкость;  $\vec{g}$  – ускорение свободного падения;  $\kappa$  – коэффициент теплопроводности;  $D$  – коэффициент диффузии;  $\vec{J}$  – плотность электрического тока;  $B$  – индукция магнитного поля;  $E$  – напряжённость электрического поля;  $\sigma$  – удельная электропроводимость жидкости;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость вещества;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $\rho_e$  – плотность электрических зарядов.

**Решение задачи.** Вышеприведённые дифференциальные уравнения переноса и электромагнитного поля должны решаться при определённых граничных условиях.

При электрошлаковом переплаве расплавленный флюс и жидкий металл находятся в замкнутом объёме шлаковой ванны, причём на твёрдых поверхностях, ограничивающих этот объём, выполняется условие прилипания  $\vec{v} = 0$ , а на свободной поверхности –  $\partial\vec{v}_\tau / \partial\vec{n} = 0$  ( $\vec{v}_\tau$  – касательная скорость,  $\vec{n}$  – нормаль к поверхности). То есть на границах жидкого объёма заданы однородные граничные условия, и, значит, на границе объёма не задан внешний источник расплава, связанный с действием поверхностных сил. В таком случае жидкость может прийти в движение лишь за счёт действия внутренних объёмных сил, но при этом сила должна быть вихревой ( $\text{rot}\vec{f} \neq 0$ ).

Так как к расплаву подводится извне только электрический ток, то только он может стать источником движения расплава. Рассмотрим два механизма этого движения: возбуждение объёмной электромагнитной силы в расплаве в результате взаимодействия электрического тока с собственным магнитным полем и возникновение тепловой конвекции из-за джоулева тепловыделения.

Рассмотрим первый механизм. Пусть ванна имеет форму круглого цилиндра, соосно которому погружён в расплав электрод. Вторым электродом является дно цилиндра. В цилиндриче-

ской системе координат  $(z, r, \varphi)$  сварочный ток имеет  $z$ - и  $r$ -составляющие. При условии осевой симметрии  $\partial/\partial\varphi = 0$  с учётом выражения ротора в цилиндрических координатах ( $\vec{i}_z, \vec{i}_r, \vec{i}_\varphi$  – единичные вектора)

$$\text{rot } \vec{A} = \frac{1}{r} \begin{vmatrix} \vec{i}_z & \vec{i}_r & \vec{i}_\varphi \\ \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} & 0 \\ A_z & A_r & rA_\varphi \end{vmatrix},$$

а также уравнения Максвелла получаем, что такой ток вызывает только азимутальное магнитное поле  $B_\varphi$  и следующую связь между  $B_\varphi$  и составляющими плотности тока:

$$\vec{J}_z = \frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\varphi}{\partial r}, \quad \vec{J}_r = -\frac{1}{\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial r B_\varphi}{\partial z} = -\frac{1}{\mu_0} \frac{\partial B_\varphi}{\partial z}.$$

Тогда электромагнитная сила вычисляется как  $\vec{f}_e = J_r B_\varphi \vec{i}_z - J_z B_\varphi \vec{i}_r$ , т.е. как и электрический ток, она действует в меридиональных плоскостях  $z-r$ . Вычислим ротор силы  $\vec{f}_e$ , тогда по знаку ротора можно узнать характер движения в ванне и, приравнивая ротор  $\vec{f}_e$  нулю, можно выяснить, при каких условиях электрический ток не вызывает движения расплава.

Найдём

$$\text{rot } \vec{f}_e = -\vec{i}_\varphi \frac{1}{\mu_0 r} \frac{\partial B_\varphi^2}{\partial z}. \quad (1)$$

Если внутри ванны выделить цилиндрическую поверхность радиуса  $r_1$  (на рис. 2 показана штриховой линией), то видно, что когда площадь погружённого электрода меньше площади поперечного сечения ванны, полный ток внутри выделенного цилиндра будет возрастать по мере приближения к электроду. Следовательно, будет возрастать и  $B_\varphi$  на поверхности цилиндра, т.е.

$$\left. \frac{\partial B_\varphi}{\partial z} \right|_{r = \text{const}} > 0 \text{ с ростом } z.$$

Таким образом,  $\text{rot } \vec{f} \neq 0$  и электромагнитная сила должна закручивать жидкость в меридиальной плоскости в показанном на рис. 2 направлении. Поэтому общее движение расплава представляет собой вихревой тор с движением по оси симметрии тора вниз от погружённого электрода и вверх вдоль боковых стенок ванны.

Рассмотрим теперь второй механизм. Применим тот же приём, что и при рассмотрении электромагнитной силы, т.е. обратимся не к самой силе, а к её ротору. Применяя в осесимметричном (для простоты) случае операцию  $\text{rot}$  к архимедовой силе  $\rho \vec{g} = -\rho g \vec{i}_z = -\rho_0 g (1 - \beta T) \vec{i}_z$ , получаем

$$\text{rot } \rho \vec{g} = g \frac{\partial \rho}{\partial r} \vec{i}_\varphi = -g \rho_0 \beta \frac{\partial T}{\partial r} \vec{i}_\varphi, \quad (2)$$

т.е. тепловая конвекция возможна только при радиальном градиенте температуры. Другого механизма возникновения тепловой конвекции в слое жидкости, подогреваемой сверху, нет, в отличие от подогрева снизу, когда одной из причин возникновения движения может явиться конвективная неустойчивость.

На основании полученного результата можно предсказать и характер тепловой конвекции. Во-первых, она будет происходить в вертикальных (меридиональных) плоскостях. Во-вторых, направление движения расплава, определяемое знаком  $\text{rot } \rho \vec{g}$ , зависит от характера изменения температуры по радиусу (от знака  $\partial T / \partial r$ ).

Тепловая конвекция прямо противоположна электромагнитной (см. рис. 2). В этой связи возникает проблема оценки относительной роли тепловой конвекции и электромагнитной, так как в зависимости от преобладания того или иного механизма конвекции коренным образом меняются условия тепломассообмена в ванне.

Сравнение роторов сил по (1) и (2) затруднительно тем обстоятельством, что первый из них определяется производной энергии магнитного поля по осевому направлению, а второй – производной температуры по радиальному направлению. Для примера возьмём следующие данные: радиус шлаковой ванны  $R = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м, радиус электрода  $r_0 = 2,5 \cdot 10^{-3}$  м, высота ванны  $h = R$ , сварочный ток  $I_c = 1500$  А. Дифференциалы величин в (1), (2) заменим конечными разностями:  $\partial z \rightarrow h$ ,  $\partial r \rightarrow r_1$  ( $r_1$  – произвольный радиус (см. рис. 2));

$$\partial B_\phi^2 \rightarrow B_\phi^2|_{z=0} - B_\phi^2|_{z=h} = \left( \frac{\mu_0}{2\pi r_1} \right)^2 (I^2 - k^2 I^2),$$

где  $k$  – коэффициент, определяющий долю полного тока, проходящего через круг радиуса  $r_1$  на дне ванны,

$$\partial T \rightarrow \Delta T = T|_{r=0} - T|_{r=r_1}.$$

Тогда

$$|\text{rot} \vec{f}_e| = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 r_1^3 h} (1 - k^2), \quad |\text{rot} \rho \vec{g}| = \frac{g \rho_0 \beta \Delta T}{r_1}. \quad (3)$$

Наибольшее значение ротора электромагнитной силы будет иметь место при  $r_1 = r_2$ , наименьшее – при  $r_1 = 0$  и при  $r_1 = R$ . Наибольшее значение ротора архимедовой силы определяется максимальной разностью температуры. Естественно, что  $\Delta T_{\max} = T|_{r=0} - T|_{r=R}$ , т.е. во втором выражении (3) следует положить  $r_1 = R$ . Беря данные для шлака и полагая  $\Delta T_{\max} = 10^3$  К, получаем

$$\text{rot} \vec{f}_e|_{\max} \approx 2 \cdot 10^8 \text{ н/м}^4, \quad |\text{rot} \rho \vec{g}|_{\max} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ н/м}^4.$$

### Выводы.

1. Решение показывает, что в выбранных условиях электрошлакового процесса определяющей является электромагнитная конвекция. Естественно, при других условиях оценки могут быть иными.

2. Применение управляемых процессов при электрошлаковом переплаве позволит в перспективе получать этой технологией металлические композиционные материалы на основе комплексного использования минеральных концентратов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Компан, Я. Ю. Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД-процессами / Я. Ю. Компан, Э. В. Щербинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
2. Kuzmichev, E. Complex alloying of low-carbon steel by mineral concentrates under electroslag remelting / E. Kuzmichev, D. Balakhonov, H. Ri, S. Nikolenko // Procedia Engineering. – 2016. – V. 165. – P. 1496-1502.
3. Бабенко, Э. Г. Разработка и исследование легированных сталей, полученных электрошлаковым переплавлением низкоуглеродистой стали с использованием минеральных ассоциаций / Э. Г. Бабенко, А. Д. Верхотуров, Е. Н. Кузьмичев // Перспективные материалы. – 2003. – № 1. – С. 67-72.

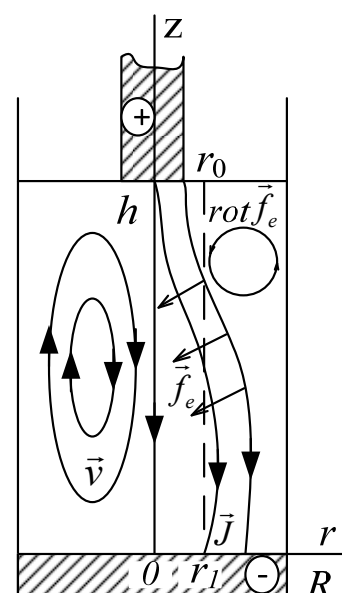


Рис. 2. Возникновение движения в шлаковой ванне:  $\vec{J}$  – линии электрического тока;  $\vec{f}_e$  – распределение магнитной силы;  $\vec{v}$  – движение расплава;  $r_0$  – радиус электрода;  $R$  – радиус ванны;  $h$  – высота шлаковой ванны

4. Verkhoturov, A. D. Development and examination of alloy steels, produced by electroslag remelting of low carbon steel using mineral associations / A. D. Verkhoturov, E. G. Babenko, E. N. Kuzmichev // Journal of Advanced Materials. – 2003. – № 1. – P. 75-78.
5. Verkhoturov, A. D. Reduction of tungsten during the electroslag remelting of flux containing the scheelite concentrate for production of tungsten-containing steels / A. D. Verkhoturov, E. G. Babenko, E. N. Kuzmichev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering September. – 2014. – V. 48, Iss. 5. – P. 716-721.
6. Hernandez-Morales B. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer and mass transfer in electroslag remelting process / B. Hernandez-Morales, A. Mitchell // Ironmaking and Steelmaking. – 1999. – V. 26. – P. 423-438.
7. Choudhary M. Modelling of fluid flow and heat transfer in industrial-scale ESR system / M. Choudhary, J. Szekely // Ironmaking and Steelmaking. – 1981. – V. 5. – P. 225-232.