

Математическая модель процесса расплавления алюмосодержащего сплава при доводке стали в сталеразливочном ковше

Ю.А. БОЛОТОВА, И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ.

Днепропетровский государственный технический университет

В работе разработана методика расчета задачи усвоения алюмосодержащих цилиндрических слитков жидкой сталью на основе математической модели, которая комплексно учитывает взаимовлияющие процессы перемещения слитка в расплаве и его одновременного расплавления в период наполнения ковша. Исследовано влияние химического состава, геометрических размеров, интенсивности движения жидкого металла и его температуры на кинетику расплавления алюмосодержащих слитков.

У роботі розроблено методику розрахунку задачі засвоєння алюмомістких циліндричних зливків рідкою сталлю на основі математичної моделі, що комплексно враховує взаємодіючі процеси переміщення зливку в розплаві і його одночасному розплавленні в період наповнення ковша. Досліджено вплив хімічного складу, геометричних розмірів, інтенсивності руху рідкого металу і його температури на кинетику розплавлення алюмомістких зливків.

In work the technique of account of a task of mastering AL-containing of cylindrical ingots by liquid steel is developed on the basis of mathematical model, which complex takes into account mutually influences processes of moving of an ingot in liquid steel and its simultaneous phase transition during filling a ladle. The influence of chemical structure, geometrical sizes, intensity of movement of liquid metal and its temperature on changes of phase transition AL-containing of ingots is investigated.

Внепечная обработка стали является одним из наиболее эффективных направлений коренного повышения качества и свойств металлопродукции массового назначения, а также ресурсосбережения в металлургии. Важнейшим аспектом разработки новых и оптимизации существующих процессов внеагрегатного легирования, раскисления, доводки, рафинирования и модифицирования стали является изучение кинетики усвоения (плавления, растворения, усреднения в объеме металла) твердых добавок ферросплавов, лигатур, алюминия в жидкой ванне.

Одним из традиционных раскислителей, применяемых для доводки стали, является алюминий, однако его введение в объем расплава связано с определенными трудностями, которые обусловлены малой плотностью алюминия по сравнению со сталью, что приводит, во-первых, к трудности его введения в объем расплава и, во-вторых, к быстрому его всплытию на поверхность с потерей в шлаковом слое или из-за сгорания [1].

Для преодоления этих трудностей используются различные специальные методы ввода алюминия в сталь, например, введение алюминия путем выстреливания в объем расплава алюминиевого слитка, имеющего форму пули, а также введение алюминиевой катанки или алюмосодержащей проволоки [1]. Недостатками упомянутых методов являются: наличие специального оборудования для изготовления упомянутых материалов и осуществления их ввода, а также относительно высокая стоимость вводимых материалов, что в значительной степени сказывается на себестоимости производимой продукции.

Одним из путей преодоления описанных выше трудностей, связанных с вводом алюминия в железоуглеродистый расплав является использование в процессах внепечной доводки алюмосодержащих сплавов на основе железа, которые имеют плотность, соизмеримую с плотностью стали (порядка $5300 - 6500 \text{ кг/м}^3$).

Авторами данной работы поставлена цель - исследовать процесс усвоения цилиндрических слитков алюмосодержащего сплава на основе железа (форма слитков определяется технологией их производства, для

массово используемых слитков отношение длины слитка к его толщине составляет 7:1) в процессе выпуска плавки в сталеразливочный ковш при различных параметрах их ввода в расплав, геометрических соотношениях и химическом составе слитка.

Процесс ввода слитков алюмосодержащих сплавов в сталеразливочный ковш в период выпуска плавки характеризуется следующими технологическими параметрами:

- температура, химический состав и масса обрабатываемого полупродукта стали;
- продолжительность процесса выпуска плавки;
- относительное расположение желоба для подачи кусковых материалов на зеркале металла;
- химический состав, масса и геометрические соотношения слитка алюмосодержащего сплава.

Скорость и степень усвоения добавки, вводимой в виде слитка алюмосодержащего сплава, определяется в значительной степени кинетикой протекания теплофизических процессов при одновременном движении, нагреве и плавлении слитка в расплаве, а также продолжительностью процесса дальнейшего усреднения в объеме ковша расплавленной добавки. Поэтому авторы настоящей работы впервые поставили цель - учесть при расчете процесса усвоения вводимой добавки алюмосодержащего слитка цилиндрической формы траекторию движения слитка под действием гидродинамики расплава с одновременным процессом нагрева и плавления слитка.

В данной работе поставленная задача решается в два этапа. На первом этапе рассчитывается поле скоростей металла при его выпуске в ковш с одновременной донной аргонной продувкой. На втором этапе, с учетом рассчитанного поля скоростей металла, производится численный расчет связанной задачи одновременного движения и плавления куска алюмосодержащего сплава, с учетом влияния гидродинамики расплава на процессы движения и плавления слитка, с расчетом продолжительности дальнейшего усреднения расплавленной добавки в объеме ковша.

Для решения задачи первого этапа – расчета поля скоростей жидкого металла – вводятся следующие допущения:

- предположение о сплошности единой газожидкостной среды, являющейся стратифицированной по плотности вязкой несжимаемой жидкостью;
- предполагается, что коэффициент газосодержания зависит явным образом лишь от пространственной точки и времени;
- продувка происходит в ковше, который имеет цилиндрическую форму (если форма ковша отличается от цилиндрической для большинства промышленных аналогов возможно сведение к цилиндрической форме с эффективным радиусом);
- на поверхности металла не происходит никаких волновых процессов, т.е. поверхность металла гладкая.

Нестационарная задача определения поля скоростей металла при заполнении ковша рассматривается как связанное последовательное протекание квазистационарных процессов на отдельных дискретных уровнях заполнения ковша. Стационарное течение единой газожидкостной среды на каждом этапе заполнения ковша в силу введенных предположений описывается системой нестационарных уравнений Навье-Стокса в приближении Буссинеска при $\tau \rightarrow \infty$:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad} P + \nu \Delta \bar{V} + (1 - \bar{\alpha}) \bar{g}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{\alpha}}{\partial \tau} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{\alpha} = 0, \quad (2)$$

$$\text{div} \bar{V} = 0. \quad (3)$$

Здесь \bar{V} - вектор скорости жидкости, имеющий следующие компоненты в направлении ортов $\{e_r, e_\varphi, e_z\}$ системы координат - $\{v_r, v_\varphi, v_z\}$ и определяемый как отношение плотности импульса среды $\bar{\pi}$ к массовой

плотности $\bar{V} = \frac{\bar{\pi}}{\rho}$, $v_\varphi = \frac{\mu_\varphi}{\rho_0}$ - эффективный коэффициент

кинематической вязкости жидкой среды, учитывающий турбулентный характер ее движения, $\rho = \rho_0(1 - \bar{\alpha})$ - плотность единой газожидкостной среды, ρ_0 - плотность жидкости, $\bar{\alpha}$ - объемная доля газа в газожидкостной среде. Данная система уравнений движения металла дополняется соответствующими граничными и начальными условиями. Поставленная задача решается численно в естественных переменных скорость-давление. При этом используется метод расщепления по физическим факторам. Результаты расчетов поля скоростей при заполнении 160-тонного сталеразливочного ковша на 2/3 его высоты представлены на рисунке 1.

На втором этапе решения задачи усвоения алюминосодержащего сплава производится расчет связанной задачи движения и плавления куска алюминосодержащего сплава с учетом подсчитанного на первом этапе поля скоростей жидкого металла для каждого квазистационарного уровня наполнения металла в ковше.

На втором этапе решения задачи усвоения алюминосодержащего сплава производится расчет связанной задачи движения и плавления куска алюминосодержащего сплава с учетом подсчитанного на первом этапе поля

скоростей жидкого металла для каждого квазистационарного уровня наполнения металла в ковше.

Для этого в настоящей работе построена математическая модель движения слитка алюминосодержащего сплава в расплаве стали в процессе выпуска плавки в ковш. Уравнения движения слитка описываются уравнениями Лагранжа [2]:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{q}^i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q^i} = Q_i \quad (4)$$

где q^i - обобщенные координаты, T - кинетическая энергия, Q_i - обобщенные силы, действующие на слиток.

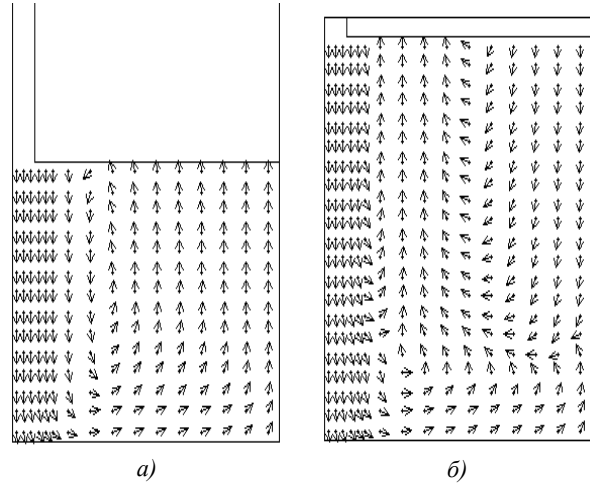


Рис. 1. Расчетные поля. Стрелки показывают направление движения металла. Буквами обозначено: а) при заполнении ковша на 2/3 высоты, б) при полном заполнении

Поскольку ковш имеет цилиндрическую форму, местонахождение центра масс слитка удобно фиксировать в цилиндрических координатах (ρ, φ, ζ) . Кроме того, для фиксации направления слитка и расстояния от центра масс используются сферические координаты (l, ψ, θ) . Длина слитка обозначена - L .

Декартовы координаты элемента слитка, находящегося на расстоянии l от его центра масс, через выбранные обобщенные координаты определяются следующим образом:

$$\begin{cases} x = \rho \cos \varphi + l \sin \theta \cos \psi \\ y = \rho \sin \varphi + l \sin \theta \sin \psi \\ z = \zeta + l \cos \theta \end{cases} \quad (5)$$

Скорость элемента слитка разобьем на две составляющие:

$$\bar{v} = \bar{v}_t + \bar{v}_\omega \quad (6)$$

\bar{v}_t - скорость центра масс с декартовыми компонентами

$$\begin{cases} v_t^x = \dot{\rho} \cos \varphi - \rho \dot{\varphi} \sin \varphi, \\ v_t^y = \dot{\rho} \sin \varphi + \rho \dot{\varphi} \cos \varphi, \\ v_t^z = \dot{\zeta}. \end{cases} \quad (7)$$

и \bar{v}_ω - линейную скорость, связанную с вращательным движением слитка, которая имеет компоненты:

$$\begin{cases} v_{\omega}^x = l(\dot{\theta} \cos \theta \cos \psi - \dot{\psi} \sin \theta \sin \psi), \\ v_{\omega}^y = l(\dot{\theta} \cos \theta \sin \psi + \dot{\psi} \sin \theta \cos \psi), \\ v_{\omega}^z = -l\dot{\theta} \sin \theta. \end{cases} \quad (8)$$

Вектор угловой скорости слитка имеет компоненты:

$$\begin{cases} \omega^x = -\dot{\theta} \sin \psi - \frac{1}{2} \dot{\psi} \sin 2\theta \cos \psi, \\ \omega^y = \dot{\theta} \cos \psi - \frac{1}{2} \dot{\psi} \sin 2\theta \sin \psi, \\ \omega^z = \dot{\psi} \sin^2 \theta. \end{cases} \quad (9)$$

Составляющая кинетической энергии, связанная с поступательным движением, принимает вид:

$$T_t = (m/2)(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \zeta^2), \quad (10)$$

а с вращательным - вычисляется следующим образом:

$$T_{\omega} = \int_0^{L/2} (m/L)(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \sin^2 \theta) l^2 dl = (mL^2/24)(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \sin^2 \theta) \quad (11)$$

где m - масса слитка. Таким образом, суммарная кинетическая энергия слитка в выбранных обобщенных координатах

$$T = (m/2)(\dot{\rho}^2 + \rho^2 \dot{\varphi}^2 + \zeta^2) + (mL^2/24)(\dot{\theta}^2 + \dot{\psi}^2 \sin^2 \theta) \quad (12)$$

Поле силы тяжести и выталкивающей силы обеспечивают наличие потенциальной энергии

$$U = \mathbf{g} \cdot \mathbf{k} \cdot m \cdot \zeta, \quad (13)$$

где \mathbf{g} - ускорение свободного падения, $\mathbf{k} = (1 - \rho_0 / \rho_1)$, причем ρ_0 и ρ_1 - плотности расплава стали и слитка соответственно. Это приводит к наличию составляющей потенциальной обобщенной силы, связанной с координатой ζ

$$Q_{\zeta}^U = -\frac{\partial U}{\partial \zeta} = -\mathbf{g} \cdot \mathbf{k} \cdot m \quad (14)$$

(здесь и далее обобщенные величины, связанные с определенной обобщенной координатой, несут индекс, соответствующий данной координате). Потенциальные обобщенные силы, связанные с другими обобщенными координатами, в рассматриваемой задаче отсутствуют.

Слиток движется в расплаве стали, испытывая с его стороны сопротивление. Эта сила, с учетом предположения о «тонкости» слитка, направлена в сторону, противоположную перпендикулярной слитку составляющей $\vec{\omega}_{\perp}$ скорости движения рассматриваемого элемента слитка относительно расплава

$$d\vec{F} = -C\mu\vec{\omega}_{\perp} dl, \quad (15)$$

где C - безразмерный коэффициент сопротивления, а μ - коэффициент динамической вязкости расплава стали. Коэффициент сопротивления C только при малых относительных скоростях движения является постоянным, что соответствует стоксовскому выражению для силы сопротивления [3]. При больших относительных скоростях движения сила сопротивления становится пропорциональной квадрату относительной скорости. В этом случае коэффициент сопротивления C , не постоянный

и, в частности, зависит от величины относительной скорости $\vec{\omega}_{\perp}$ и эффективного диаметра слитка D [3]:

$$C = C' \frac{D\omega_{\perp}}{v}, \quad (16)$$

где $v = \mu / \rho_0$ - коэффициент кинематической вязкости стали и C' - постоянный в данном случае безразмерный коэффициент сопротивления.

Поскольку, по определению $\vec{w} = \vec{v}_t + \vec{v}_{\omega} - \vec{v}_s$ (где \vec{v}_s - скорость расплава стали), обобщенные диссипативные силы могут быть разбиты на сумму трех составляющих

$$Q_i^F = Q_i^F_t + Q_i^F_{\omega} + Q_i^F_s, \quad (17)$$

первая из которых описывает сопротивление поступательному движению слитка, вторая - вращательному, а третья - эффекту увлечения слитка движущимся расплавом стали.

После несложных математических преобразований, после подстановки найденных величин в общее уравнение Лагранжа (1), получаются уравнения движения в виде, разрешенном относительно вторых производных обобщенных координат:

$$\begin{cases} \ddot{\rho} = \rho\dot{\varphi}^2 - C\mu L(w_{t\perp}^x \cos \varphi + w_{t\perp}^y \sin \varphi) / m, \\ \ddot{\varphi} = -[2\dot{\rho}\dot{\varphi} + C\mu L(-w_{t\perp}^x \sin \varphi + w_{t\perp}^y \cos \varphi) / m] / \rho, \\ \ddot{\zeta} = -gk - C\mu L w_{t\perp}^z / m, \\ \ddot{\psi} = -\{2\dot{\psi}\dot{\theta} \cos \zeta + C\mu[L\dot{\psi} \sin \theta - 3(-v_{\Delta}^x \sin \psi + v_{\Delta}^y \cos \psi)] / m\} / \sin \theta, \\ \ddot{\theta} = \frac{1}{2}\dot{\psi}^2 \sin 2\theta - C\mu[L\dot{\theta} - 3[\cos \theta \cdot (v_{\Delta}^x \cos \psi + v_{\Delta}^y \sin \psi) - \sin \theta \cdot v_{\Delta}^z]] / m. \end{cases} \quad (18)$$

Здесь по определению $\vec{w}_{t\perp} = \vec{v}_{t\perp} - \vec{v}_{st}$ - перпендикулярная к стержню составляющая средней скорости поступательного движения стержня относительно расплава.

Математическая модель плавления алюмосодержащего слитка представлена ниже.

Период 1. Намерзание оболочки железоуглеродистого расплава на поверхности алюмосодержащего слитка

В основу математической модели принята система нелинейных уравнений теплопроводности для расчетной области, изображенной на рис. . Распространение тепла в двухслойном теле описывается уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для алюмосодержащего материала (радиусом $r=R_{cl}$) и для затвердевшей оболочки расплава (с внешним радиусом $r=Z_p$):

$$c_{cl}(t)\rho_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial r}\right], \quad 0 \leq r \leq R_{cl}, \tau > 0, \quad (19)$$

$$c_p(t)\rho_p(t)\frac{\partial t_p(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_p(t)\frac{\partial t_p(r,\tau)}{\partial r}\right], \quad R_{cl} \leq r \leq Z_p, \tau > 0, \quad (20)$$

Период 2. Нагрев и плавление алюминосодержащего слитка

Поскольку наполнитель проволоки составляет материал, процесс плавления которого описывается с учетом двухфазной зоны [1], то при описании кинетики плавления такого материала для учета теплоты фазового перехода в двухфазной зоне температур солидуса

t_S^H и ликвидуса t_L^H в уравнение теплопроводности для плавящегося наполнителя введена функция источника тепла которая учитывается посредством введением эффективной теплоемкости:

$$c_3 \rho(t) \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \lambda(t) \frac{\partial t(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (21)$$

$$0 \leq r \leq R_{сл}, \quad \tau > 0$$

где $c_3(t)$, $\rho(t)$, $\lambda(t)$ - эффективная теплоемкость, плотность и теплопроводность определяются в виде:

$$c_3(t) = \begin{cases} c_S, & T \leq T_S \\ \frac{c_S + c_L}{2} + Q_H \frac{\partial \psi}{\partial t}, & T_S < T < T_L \\ c_L, & T > T_L \end{cases}, \quad (22)$$

где $\psi(t) = V_T(t)/V_0$ - доля твердой фазы в двухфазной зоне объемом V_0 ; $V_T(t)$ - объем твердой фазы материала сплава в двухфазной зоне. Величина $\frac{d\psi(t)}{dt}$ называется темпом кристаллизации. В расчетах принято, что линии солидуса и ликвидуса бинарного сплава представлены параллельными друг другу прямыми.

Поэтому величина $\frac{d\psi(t)}{dt}$ описана формулой:

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{1}{t_S - t_L} \quad (23)$$

На оси симметрии слитка для всех периодов плавления задано условие:

$$\frac{\partial t_{сл}(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad \tau > 0. \quad (24)$$

На границе раздела $r=R_{сл}$ в периоде 1 заданы граничные условия IV рода:

$$\lambda_{сл}(t) \frac{\partial t_{сл}(R_{сл}, \tau)}{\partial r} = \lambda_p(t) \frac{\partial t_p(R_H, \tau)}{\partial r}, \quad (25)$$

$$t_{сл}(R_{сл}, \tau) = t_p(R_{сл}, \tau)$$

Условие теплообмена на границе оболочка расплава - расплав:

$$-\rho_p Q_p \frac{dZ_p(\tau)}{d\tau} = \alpha (t_p^p(\tau) - t_{пл}^p) - \lambda_p \frac{\partial t_p(Z_p(\tau), \tau)}{\partial r}, \quad (26)$$

$$t_p(Z_p(\tau), \tau) = t_{пл}^p,$$

$$Z_p(\tau) > R_{сл}, \quad t_p(Z_p(\tau), \tau) = t_{пл}^p,$$

где $t_{пл}^p$ - температура плавления (затвердевания) оболочки; Q_p - теплота плавления расплава, α - коэффициент теплоотдачи от жидкого расплава к поверхности оболочки; t_p^p - температура жидкого расплава.

Результаты расчетов продолжительности расплавления слитков алюминосодержащего сплава с плот-

ностью 5300 - 6560 кг/м³ (содержание алюминия 7,5 - 30%) различной массы в стали с различной температурой представлены графически на рис.2 - 3.

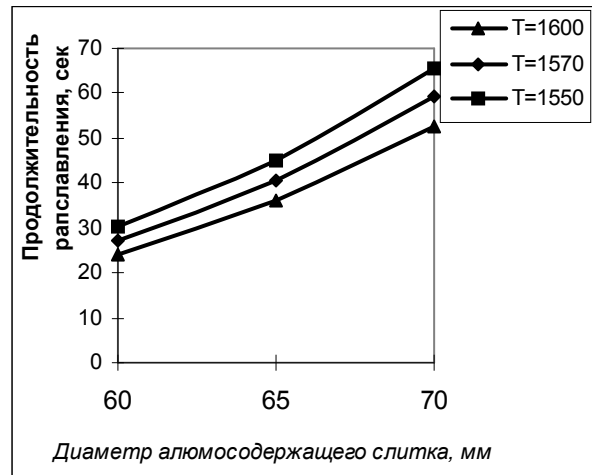


Рис. 2. Продолжительность расплавления алюминосодержащего слитка (плотность 6560 кг/м³, содержание алюминия 7,5 %) при выпуске стали в ковш различной диаметра при различной температуре стали

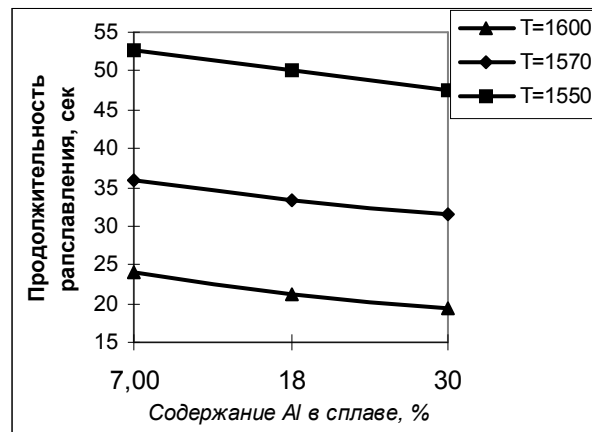


Рис. 3. Продолжительность расплавления алюминосодержащего слитка диаметром 60мм с различным содержанием алюминия при выпуске стали в ковш при различной температуре стали

Выводы.

Разработана методика расчета задачи усвоения алюминосодержащих материалов жидкой сталью из цилиндрических слитков на основе математической модели, которая комплексно учитывает взаимовлияющие процессы перемещения слитка в расплаве и его одновременного расплавления в период наполнения ковша. Исследовано влияние химического состава, геометрических размеров, интенсивности движения жидкого металла и его температуры на кинетику расплавления алюминосодержащих слитков. В дальнейших работах планируется исследовать влияние места ввода слитков на зеркале металла на степень усвоения алюминия и продолжительность усреднения расплавленной добавки в объеме ковшевой ванны.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вихлевщук В.А., Огурцов А.П., Павлюченков И.А., Черномаз Г.Н. Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали. – Киев ИСМО МО Украины. –1997, 153 с.
2. Ольховский И.И. Курс теоретической механики для физиков. – М.: «Наука», 1970, 448 с.
3. Огурцов А.П., Самохвалов С.С. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатofазних середовищах. – Київ: Наукова думка. – 2001, 410 с.

пост. 04.05.05

Математическое моделирование гидродинамики шлакометаллической ковшевой ванны на установке ковш-печь переменного тока

В.А. ВИХЛЕВЩУК, В.П. ПИПТЮК, В.Ю. БОЛОТОВ*, И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ*
В.Г. КНОХИН**, И.Н. ЛОГОЗИНСКИЙ**

Институт черной металлургии НАНУ, Днепродзержинский государственный технический университет*,
ОАО «Днепрспецсталь»**

Разработана трехмерная математическая модель процессов гидродинамики шлакометаллической ванны в наполненном сталеразливочном ковше на установке ковш-печь переменного тока. Численными исследованиями оценены качественная картина потоков расплава и количественные параметры процессов гидродинамики, установлены закономерности влияния переменных технологических факторов на характер этих процессов.

Розроблено тривимірну математичну модель процесів гідродинаміки шлакометалевої ванни в наповненому сталерозливочному ковші на установці ковш-піч перемінного струму. Чисельними дослідженнями оцінена якісна картина потоків розплаву і кількісні параметри процесів гідродинаміки, установлені закономірності впливу перемінних технологічних факторів на характер цих процесів.

The three-dimensional mathematical model of processes of hydrodynamics slag-metal of a bath in filled steel ladle a ladle on installation a ladle - furnace of an alternating current is developed. By numerical researches are appreciated a qualitative picture of flows расплава and quantitative parameters of processes of hydrodynamics, the laws of influence of variable technology factors on character of these processes are established.

В условиях повышения требований металлопотребляющих отраслей к качеству металлопродукции возрастает роль технологических приемов и средств, обеспечивающих производство чистых сталей и металлопродуката с высокими стабильными механическими и эксплуатационными показателями.

К числу технологий и оборудования, способствующих получению чистой по вредным примесям стали, принадлежит обработка на установке ковш-печь (УКП).

Основные технологические функции и конструктивно-компоновочные решения современных УКП изложены в работах [1,2].

Анализ [2-8] и многих других публикаций свидетельствует об отсутствии к настоящему моменту комплексного математического описания процессов обработки металла на УКП с учетом основных взаимовлияющих переменных технологических и энергетических параметров

Поставленная перед авторами цель исследований - разработать комплексную модель теплового состояния расплава при обработке на УКП с учетом максимально возможного количества технологических и энергетических параметров, особенностей конструкции установки, свойств обрабатываемого металла и вводимых добавок, режимов, состава и количества присаживаемых ТШС, раскислителей, легирующих и модификаторов, интенсивности подводимого тепла и продувки аргоном и т.д. В

целом задача моделирования процесса обработки металла на УКП включает:

- определение полей скоростей металлического расплава в заполненном ковше при донной продувке аргоном и включенном трехфазном модуле нагрева;

- определение температуры металлического расплава в объеме ковшевой ванны в процессе его верхнего концентрированного нагрева электродугами переменного тока с одновременной асимметричной донной продувкой аргоном;

- определение продолжительности нагрева и усреднения ковшевой металлической ванны по температуре в зависимости от переменных технологических параметров (скорости нагрева расплава, интенсивности продувки расплава аргоном, места расположения продувочной фурмы, марки стали, вида, состава и количества покровного шлака);

- обоснование оптимального места расположения донной продувочной фурмы ковша с учетом принятой компоновки технологических отверстий в крышке УКП переменного тока;

- определение продолжительности формирования рафинирующего синтетического шлака на УКП переменного тока при варьировании переменными технологическими параметрами (химическим и гранулометрическим составом ТШС, маркой стали, температурой расплава) и оптимальном расходе аргона;

