

**И.А.Павлюченков, В.П.Пиптюк, М.В.Бабенко, Л.А.Игнатенко,
С.Н.Павлов, В.Ф.Поляков**

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПЛАВЛЕНИЯ ТУГОПЛАВКИХ ДОБАВОК НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ФАЗ

*Днепродзержинский государственный технический университет,
Институт черной металлургии НАН Украины*

Целью работы является исследование малоизученных вопросов плавления кусковых добавок алюминия, ферротитана и ферросилиция, вводимых в ковш на выпуске плавки на поверхности ванны. Приведена математическая модель и результаты численной оценки длительности плавления тугоплавких кусковых добавок на границе «шлак–металл» в условиях обработки расплава на установке «ковш–печь», что позволит прогнозировать эффективность ковшевой технологии и сформировать мероприятия по ресурсосбережению.

установка «ковш–печь», поверхности ванны, кусковые добавки, алюминий, ферротитан, ферросилиций, плавление, математическая модель .

Состояние вопроса. Экспериментальному и теоретическому исследованию процессов плавления разных кусковых добавок в объеме металлической ванны посвящено значительное число работ. Оценены характер и длительность плавления кусковых добавок в таких условиях. В то же время в некоторых из них [1–4] высказано мнение о плавлении кусковых ферротитана и ферросилиция, а также чушкового алюминия, вводимых в ковш на выпуске плавки и на УДМ, на поверхности ванны. Однако такие условия плавления материалов к настоящему моменту остаются малоизученными и поэтому длительность этих процессов не оценена.

Численными исследованиями плавления кусковых добавок ферромарганца, ферросилиция и ферротитана при вводе на установках ковш–печь (УКП) разного типа и мощности, выполненными с помощью усовершенствованной трехмерной математической модели гидродинамики и тепло–, массообмена [5, 6], уточнены ранее полученные результаты [7 – 9] в части условий и длительности их плавления. В отличие от указанных публикаций установлено, что кусковые добавки ферротитана и ферросилиция в рассмотренных условиях плавятся на границе раздела фаз "шлак–металл", а плавление ферромарганца при определенных условиях перемешивания металла в ковше и для некоторых используемых на практике фракций также может завершаться либо осуществляться в аналогичных условиях. Кроме того расчетным путем и экспериментально определено, что некоторые кусковые добавки, используемые в процессах ковшевой обработки (феррованадий, ферросиликоцирконий, феррохром среднеуглеродистый, силикокальций, лигатура РЗМ, ферробор, ферросиликомарганец и некото-

рые др.), ввиду сопоставимой или более низкой по сравнению с металлическим расплавом плотности, плавятся на границе раздела фаз.

Приведенные условия плавления указанных добавок характеризуются сравнительно низким и нестабильным уровнем усвоения элементов металлическим расплавом.

С учетом возможности прогнозирования эффективности использования перечисленных добавок разработана соответствующая математическая модели и исследование с ее помощью условий их плавления является актуальной научно–технической задачей, имеющей значительную практическую востребованность.

В опубликованных ранее работах [10,11] предложены алгоритмы (на основе метода Дюзимбера) расчета двумерных задач плавления тел (кусков) цилиндрической формы. В работе [10] в качестве расчетной области выбрано продольное сечение цилиндра. Намерзание расплава, ввиду низкого значения коэффициента температуропроводности, при этом не учитывалось. В работе [11] рассмотрен процесс плавления тугоплавкого цилиндра на границе «шлак–металл». В алгоритме расчета не учтен подогрев поверхности цилиндра до температуры плавления, что значительно уменьшает расчетное время полного расплавления цилиндра.

Цель работы. Целью работы является исследование малоизученных вопросов плавления кусковых добавок алюминия, ферротитана и ферросилиция, вводимых в ковш на выпуске плавки на поверхности ванны, и численное исследование процессов с использованием разработанной математической модели.

Методика разработки модели и ее описание. Разработку модели осуществляли по разным возможным вариантам плавления добавок. При этом всю гамму добавок, процесс плавления которых требует проведения исследований можно условно разделить на три группы: легкоплавкие ($t_{пл} < t_m^s$) – с температурой плавления добавки ($t_{пл}$) ниже температуры затвердевания расплава (t_m^s); тугоплавкие ($t_m^s < t_{пл} < t_m$) – с температурой плавления добавки равной или выше температуры затвердевания расплава, но ниже температуры расплава (t_m); сверхтугоплавкие ($t_{пл} > t_m$) – с температурой плавления добавки превышающей температуру расплава. К первой группе добавок относятся, например, ферросилиций марок ФС45, ФС65 и ФС75, силикокальций марок СК15, СК20 и СК30, лигатура ФС30РЗМ30, ферробор ФБ–3, ферросиликомарганец МнС17; ко второй – ферротитан ФТи30, феррованадий ФВд50У0,5 и среднеуглеродистый феррохром FeCr70C10LP; к третьей – ферросиликоцирконий ФСЦр50 и ферроний ФН650.

В связи с разнообразием вариантов плавления добавок на границе «шлак–металл» и сложным математическим описанием рассматриваемой задачи, на начальном этапе, провели разработку математической модели для группы тугоплавких добавок.

Первую часть модели, описывающую траекторию движения добавки при вводе в наполненную ковшевую ванну с одновременной асимметричной продувкой расплава аргонem, разрабатывали с использованием усовершенствованных трехмерных математических моделей гидродинамики и тепло-, массообмена [5, 6] и численного представления движения последней, приведенного в монографии [1].

При разработке второй части модели, описывающей процесс плавления добавки, использовали следующие допущения:

1. Расплавившиеся части добавки, намерзшей оболочки расплава или шлака мгновенно уносятся потоками металла.

2. Эффект разрыва оболочки металла или шлака под воздействием внутреннего давления, возникающего при плавлении, не учитывается.

3. Движение жидких фаз под оболочкой твердой стали или шлака не учитывается.

4. Добавка рассматривается условно цилиндрической или сферической формы эффективного диаметра.

Математическую модель кинетики плавления тугоплавкой добавки (далее – кусок) условно разделили на несколько периодов.

Период 1. Образование оболочки шлака на поверхности куса при его движении через слой шлака

За основу математической модели принята система одномерных уравнений теплопроводности для расчетной области, изображённой на рис.1.

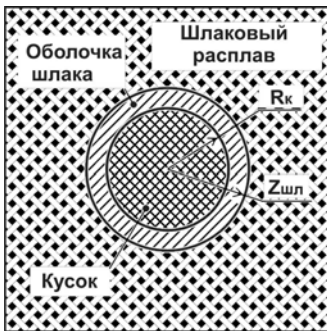


Рис. 1. Расчетная область к периоду образования оболочки шлака на поверхности тугоплавкого куса.

Распространение тепла в двухслойном теле описывается уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для материала куса ($0 \leq r < R_0$) и для затвердевшей шлаковой оболочки

($R_0 \leq r < Z_{ш}$) при $\tau > 0$:

$$\begin{aligned} c_k(t)\rho_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial \tau} &= \frac{\gamma}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_k \\ c_{ш}(t)\rho_{ш}(t)\frac{\partial t_{ш}(r,\tau)}{\partial \tau} &= \frac{\gamma}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_{ш}(t)\frac{\partial t_{ш}(r,\tau)}{\partial r}\right], R_k \leq r < Z_{ш} \end{aligned} \quad (1)$$

Граничные условия при $\tau > 0$:

на оси симметрии куса ($r = 0$) задано условие симметрии:

$$\frac{\partial t_k(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

на границе раздела материала куска и шлаковой оболочки ($r=R_k$) заданы граничные условия IV рода:

$$\lambda_k(t) \frac{\partial t_k(R_k, \tau)}{\partial r} = \lambda_{ш}(t) \frac{\partial t_{ш}(R_k, \tau)}{\partial r}, t_k(R_k, \tau) = t_{ш}(R_k, \tau), \quad (3)$$

условие теплообмена на границе шлаковая оболочка–расплав:

$$-\rho_{ш} Q_{ш} \frac{dZ_{ш}(\tau)}{d\tau} = \alpha_{ш} (t_p^m(\tau) - t_{ш}^m) - \lambda_{ш} \frac{\partial t_{ш}(Z_{ш}(\tau), \tau)}{\partial r},$$

$$t_{ш}(Z_{ш}(\tau), \tau) = t_{ш}^m, Z_{ш}(\tau) > R_k, t_{ш}(Z_{ш}(\tau), \tau) = t_{ш}^m, \quad (4)$$

где $t_{ш}^m$ – температура плавления (затвердевания) шлаковой оболочки; $Q_{ш}$ – теплота плавления шлака, $\alpha_{ш}$ – коэффициент теплоотдачи от жидкого шлака к поверхности шлаковой оболочки; t_p^m – температура жидкого шлака.

Начальные условия:

$$\begin{cases} t_k(r, 0) = t_k^{нач}, 0 \leq r \leq R_k \\ Z_{ш}(0) = R_k \end{cases} \quad (5)$$

Длительность τ_1 процесса намерзания шлаковой оболочки $Z_{ш}$ определяется в виде $\tau_1 = \frac{H_{ш}}{V_{ш}}$, где $H_{ш}$ – толщина шлака в сталеразливочном ковше, $V_{ш}$ – перпендикулярная к поверхности шлака скорость проникновения куска в ковш.

Период 2. Образование и плавление стальной оболочки на поверхности шлаковой оболочки при движении куска в металлическом расплаве

С момента попадания куска в жидкий металл на поверхности образовавшейся шлаковой оболочки происходит образование и последующее плавление оболочки расплава. Поверхность шлаковой оболочки прогревается до температуры плавления $t_{ш}^m$ и, поэтому, возможен процесс ее расплавления внутри

оболочки расплава. Расчетная область для четырехслойного тела изображена на рис.2.

Распространение тепла в четырехслойном теле описывается уравнениями теплопроводности для материала куска ($0 \leq r < R_k$), твердой шлаковой оболочки ($R_k \leq r < Z_{ш}^T$), жидкой шлаковой прослойки ($Z_{ш}^T \leq r < Z_{ш}$), затвердевшей оболочки расплава ($Z_{ш} \leq r < Z_{ш}$) при $\tau > \tau_1$:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_k(t)\rho_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial r} \right], 0 \leq r < R_k \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r} \right], R_k \leq r < Z_m^T \\ c_m^*(t)\rho_m^*(t)\frac{\partial t_m^*(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda_m^*(t)\frac{\partial t_m^*(r,\tau)}{\partial r} \right], Z_m^T \leq r < Z_m \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r} \right], Z_m \leq r < Z_m \end{array} \right. \quad (6)$$



Рис. 2. Расчетная область к периоду образования оболочки расплава на шлаковой оболочке на поверхности тугоплавкого куска.

Граничные условия при $\tau > \tau_1$:

на оси симметрии куска ($r = 0$) задано условие симметрии

$$\frac{\partial t_k(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

на границе раздела материала куска и шлаковой оболочки ($r=R_k$) условия IV рода:

$$\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(R_k, \tau)}{\partial r} = \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(R_k, \tau)}{\partial r}, t_k(R_k, \tau) = t_m(R_k, \tau), \quad (8)$$

на границе раздела твердой и жидкой фаз шлаковой прослойки ($r = Z_m^T$) условие:

$$-\rho_m(t)Q_m \frac{dZ_m^T(\tau)}{d\tau} = \lambda_m^*(t)\frac{\partial t_m^*(Z_m^T(\tau), \tau)}{\partial r} - \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m^T(\tau), \tau)}{\partial r}, \quad (9)$$

на границе раздела шлаковой и стальной оболочек ($r = Z_m$) условия IV рода:

$$\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m, \tau)}{\partial r} = \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m, \tau)}{\partial r}, t_m(Z_m, \tau) = t_m(Z_m, \tau), \quad (10)$$

условие теплообмена на границе намерзшая оболочка расплава – расплав ($r = Z_m$):

$$-\rho_m(t)Q_m \frac{dZ_m(\tau)}{d\tau} = \alpha_m(t_p(\tau) - t_v) - \lambda_m(t) \frac{\partial t_m(Z_m(\tau), \tau)}{\partial r},$$

$$t_m(Z_m(\tau), \tau) = t_v, Z_m(\tau) > Z_m. \quad (11)$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} t_k(r, \tau_1) = \varphi_k(r, \tau_1), 0 \leq r < R_k \\ t_m(r, \tau_1) = \varphi_m(r, \tau_1), R_k \leq r < Z_m \\ Z_m(\tau_1) = Z_m \end{cases} \quad (12)$$

где $\varphi_k(r, \tau_1)$, $\varphi_m(r, \tau_1)$ являются решением задачи теплопроводности для материала куска и намерзшей шлаковой оболочки, описанной в периоде 1, при $\tau = \tau_1$.

Если после расплавления оболочки расплава остается не полностью расплавленный слой шлака, то его расплавление описывается уравнениями периода 1. Период 2 заканчивается при условии полного расплавления на поверхности куска намерзших стальной и шлаковой оболочек. Продолжительность второго периода – τ_2 .

Период 3. Образование и плавление оболочки расплава на поверхности куска при его движении в металлическом расплаве

После расплавления шлаковой оболочки поверхность рассматриваемого куска не достаточно прогрета (ввиду низкой теплопроводности шлаковой прослойки) и, поэтому, возможен процесс образования и последующего расплавления оболочки расплава на поверхности рассматриваемого куска (расчетная область изображена на рис.3).

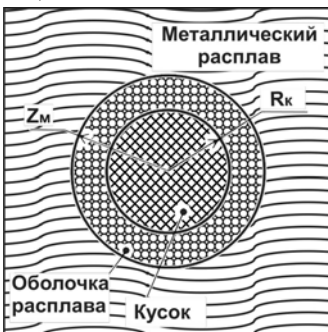


Рис. 3. Расчетная область к периоду образования оболочки расплава на поверхности тугоплавкого куска.

Данный период плавления описывается системой уравнений теплопроводности для двухслойного тела, включающей уравнения для материала куска ($0 \leq r < R_k$) и для оболочки расплава ($R_k \leq r < Z_m$) при $\tau > \tau_1 + \tau_2$:

$$\begin{cases} c_k(t)\rho_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_k \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r}\right], R_k \leq r < Z_m \end{cases} \quad (13)$$

Граничные условия при $\tau > \tau_1 + \tau_2$:

на оси симметрии куска ($r = 0$) задано условие симметрии:

$$\frac{\partial t_k(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad (14)$$

на границе раздела материала куска и оболочки расплава ($r = R_k$) заданы граничные условия IV рода:

$$\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(R_k,\tau)}{\partial r} = \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(R_m,\tau)}{\partial r}, t_k(R_k,\tau) = t_m(R_k,\tau), \quad (15)$$

условие теплообмена на границе намерзшая оболочка расплава – расплав ($r = Z_m$):

$$\begin{aligned} -\rho_m(t)Q_m \frac{dZ_m(\tau)}{d\tau} &= \alpha_m(t_p(\tau) - t_v) - \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m(\tau),\tau)}{\partial r}, \\ t_m(Z_m(\tau),\tau) &= t_v, Z_m(\tau) > R_k, \tau > \tau_1 + \tau_2 \end{aligned} \quad (16)$$

Начальные условия:

$$\begin{cases} t_k(r,\tau_1) = \varphi_k(r,\tau_1), 0 \leq r < R_k \\ Z_m(\tau_1 + \tau_2) = R_k \end{cases} \quad (17)$$

где $\varphi_k(r,\tau_1 + \tau_2)$, является решением задачи теплопроводности для материала куска, описанной в периоде 2, при $\tau = \tau_1 + \tau_2$.

Период 3 заканчивается, когда полностью расплавится оболочка расплава, намерзшая на поверхности куска. Продолжительность третьего периода – τ_3 .

Период 4. Плавление материала куска при его движении в металлическом расплаве. Процесс плавления материала куска начинается после прогрева его поверхности до температуры плавления. Таким образом, решается задача теплопроводности для тела с граничными условиями III рода на внешней границе ($r = Z_k$) для расчетной области, изображённой на рис. 4.

Прогрев поверхности куска описывается уравнением теплопроводности для материала куска при $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$:

$$c_k(t)\rho_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{\gamma}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_k(t)\frac{\partial t_k(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < Z_k \quad (18)$$

Граничные условия при $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$:

на оси симметрии куска ($r = 0$) задано условие симметрии:

$$\frac{\partial t_k(0, \tau)}{\partial r} = 0, \quad (19)$$

условие теплообмена на границе поверхность куска – расплав ($r = Z_k$):

$$\lambda_k(t) \frac{\partial t_k(Z_k, \tau)}{\partial r} = \alpha_m [t_p(\tau) - t_k(Z_k, \tau)], \quad (20)$$

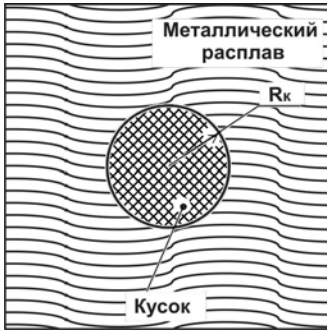


Рис. 4. Расчетная область к периоду прогрева и плавления тугоплавкого куска.

Начальные условия:

$$\begin{cases} t_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = \varphi_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3), 0 \leq r < Z_k \\ Z_k(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = R_k \end{cases} \quad (21)$$

где $\varphi_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$ является решением задачи теплопроводности для материала куска, описанной в периоде 3, при $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$. Продолжительность периода прогрева поверхности куска до температуры плавления – τ_4^n .

После прогрева поверхности куска начинается процесс его расплавления, который описывается уравнением теплопроводности (18) для материала куска при $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$.

Условие теплообмена на границе поверхность куска – расплав ($r = Z_k$):

$$\begin{aligned} -\rho_k(t) Q_k \frac{dZ_k(\tau)}{d\tau} &= \alpha_m (t_p(\tau) - t_k^k) - \lambda_k(t) \frac{\partial t_k(Z_k(\tau), \tau)}{\partial r}, \\ t_k(Z_k(\tau), \tau) &= t_L^k, 0 \leq Z_k < R_k, \tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n. \end{aligned} \quad (22)$$

Начальные условия:

$$t_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n) = \varphi_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n), 0 \leq r < Z_k, \quad (23)$$

где $\varphi_k(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n)$, является решением задачи теплопроводности для материала куска, описанной в периоде прогрева поверхности ма-

териала куска до температуры плавления при $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$. Продолжительность периода плавления материала куска – $\tau_4^{пл}$.

Период 4 считается законченным при условии полного расплавления материала куска. Продолжительность четвертого периода – $\tau_4 = \tau_4^n + \tau_4^{пл}$.

Период 5. Плавление тугоплавкого куска на границе «шлак–металл»

Так как процесс плавления тугоплавкого куска из рассматриваемой группы добавок, главным образом, завершается (или осуществляется) на границе раздела фаз «шлак–металл», рассмотрим его математическое представление.

Используя нижеприведенную зависимость соотношения плотностей куска тугоплавкого материала ($\rho(T)$), металлической (ρ_m) и шлаковой ($\rho_{ш}$) фаз расплава $\frac{\rho(T) - \rho_{ш}}{\rho_m - \rho_{ш}}$ можно оценить части куска, находящиеся в той или иной фазе в период его плавления на границе «шлак–металл».

Схема расположения куска из тугоплавкого материала на границе «шлак–металл» в период его плавления представлена на рис.5. Принимаем, что температуры жидкого металла t_m и жидкого шлака $t_{ш}$ постоянны и выше температуры плавления куска $t_{пл}$. Ввиду низких значений коэффициента теплопроводности шлака и коэффициента теплоотдачи к погруженной в нем поверхности куска предполагаем, что тепловой поток от жидкого шлака к поверхности куска равен 0.

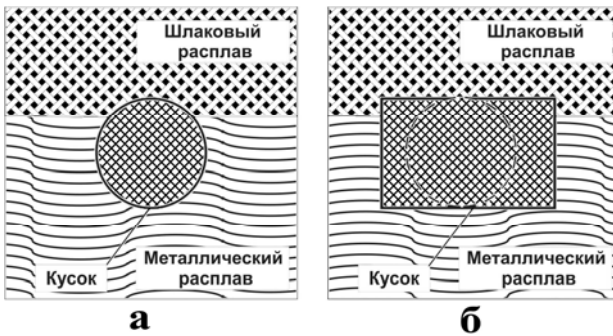


Рис. 5. Схема к процессу плавления куска сферической (а) и цилиндрической (б) формы из тугоплавкого материала, находящегося на границе «шлак–металл»

В качестве расчетной области при плавлении цилиндра выбрана половина поперечного сечения (рис. 6), а при плавлении сферы выбрана четвертая часть ее осевого сечения (рис. 7).

Распределение температур в куске описывается двумерным уравнением теплопроводности:

– для цилиндра:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right],$$

$$0 < r < R_0, \quad 0 < \vartheta < \pi$$

– для сферы:

$$C(T)\rho(T)\frac{\partial T(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda(T)r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{1}{r} \lambda(T) \sin \vartheta \frac{\partial T}{\partial \vartheta} \right], \quad (24)$$

$$0 < r < R_0, \quad 0 < \vartheta < \pi$$

где T – температура, °C; r, φ, ϑ – текущие значения радиуса и углов соответственно; $\rho(T), C(T), \lambda(T)$ – плотность, теплоемкость, теплопроводность материала куска.

Граничные условия. На оси симметрии поперечного сечения куска тепловой поток равен 0, то есть:

$$\frac{\partial t(0, z, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (25)$$

На нижней поверхности куска ($\vartheta_0 < \vartheta < \pi$) происходит конвективный теплообмен с жидким расплавом с заданным коэффициентом теплоотдачи α_m . Между намерзшими оболочками металла, шлака и поверхностью куска существует идеальный тепловой контакт, т.е. заданы граничные условия IV рода.

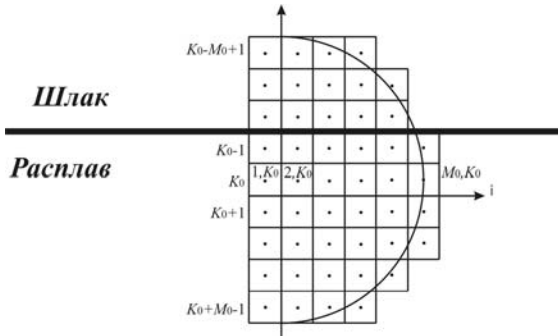


Рис. 6. Расчетная область к задаче плавления куска цилиндрической формы из тугоплавкого материала, находящегося на границе «шлак–металл».

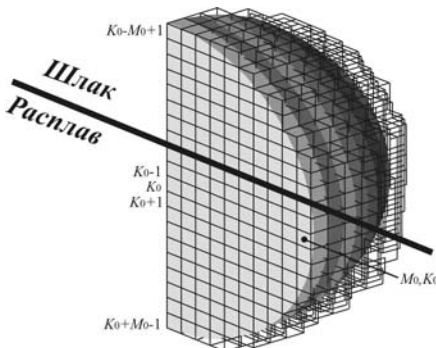


Рис. 7. Расчетная область к задаче плавления куска сферической формы из тугоплавкого материала, находящегося на границе «шлак–металл».

Распределение температур в затвердевшей оболочке металла имеет вид:

– для цилиндра:

$$C_m(T)\rho_m(T)\frac{\partial T_m}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_m(T)r \frac{\partial T_m}{\partial r} \right] + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\lambda_m(T) \frac{\partial T_m}{\partial \vartheta} \right],$$

$$r > R_0, \quad \vartheta_0 < \vartheta < \pi$$

– для сферы:

$$C_m(T)\rho_m(T)\frac{\partial T_m(r, \vartheta, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left[\lambda_m(T)r^2 \frac{\partial T_m}{\partial r} \right] + \frac{1}{r \sin \vartheta} \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left[\frac{1}{r} \lambda_m(T) \sin \vartheta \frac{\partial T_m}{\partial \vartheta} \right], \quad (26)$$

$$0 < r < R_0, \quad \vartheta_0 < \vartheta < \pi$$

Пусть точка P_m принадлежит границе плавления (намерзания) затвердевшей оболочки металла. При этом условие движения границы плавления (намерзания) запишем в виде:

$$\alpha_m (T_m(r, \vartheta, \tau) - t_{пл}^m) - \lambda_m \frac{\partial T_m(P_m)}{\partial \bar{n}} = -\rho_m Q_m W(P_m); \quad T(P_m) = t_{пл}^m; \quad (27)$$

После завершения периодов намерзания и последующего плавления металлической оболочки происходит подогрев поверхности куска до температуры его плавления $t_{пл}$. При этом на нижней поверхности куска ($\vartheta_0 < \vartheta < \pi$) происходит конвективный теплообмен с жидким металлом с заданным коэффициентом теплоотдачи α_m :

$$\alpha_m [t_m - T(R_0, \vartheta, \tau)] = -\lambda \frac{\partial T(R_0, \vartheta, \tau)}{\partial \bar{n}}, \quad (\vartheta_0 < \vartheta < \pi) \quad (28)$$

В качестве начального условия выбирается распределение температур в куске в момент всплытия его на поверхность «шлак–металл».

Для предварительной оценки адекватности представленных математической модели и алгоритма расчета проведены расчеты плавления добавки ФТi30 в одномерной [1] и двумерной постановках задачи при симметричных граничных условиях. Погрешность результатов расчета составила 7% для «грубой» (5–10мм) и до 1% для «мелкой» (0,5–1мм) разностных сеток. По разработанным алгоритмам проведены расчеты кинетики плавления тугоплавких кусковых добавок ФТi30, ФВд50У0,5 и FeCr70C10LP.

Исходные данные и основные результаты исследований. В табл.1 приведены свойства кусковых тугоплавких добавок для численного исследования длительности их плавления на границе «шлак–металл». На начальном этапе исследований разработанную математическую модель использовали для определения длительности плавления элементов из ту-

гоплавких добавок, вводимых в ковш при обработке расплава на УКП, применительно к условиям ОАО МК «Азовсталь».

В расчетах принимали одинаковую температуру металла и шлака – 1600°С и стационарное состояние перемешивания ковшевой ванны при равном расходе аргона (100 л/мин) через каждую из двух фурм для практически используемого варианта расположения продувочного блока.

В табл.2 представлены результаты расчета длительности плавления кусковых (в виде сферы) тугоплавких добавок (в числителе – при толщине шлака в ковше 200мм; в знаменателе – при толщине шлака 400мм).

Таблица 1. Основные свойства кусковых тугоплавких добавок

Наименование добавки	Свойства добавки ^{*)}							
	Теплота фазового перехода ($\Delta H_{пл}$), кДж/кг	Теплоемкость (C_p), Дж/(кг·К)	Плотность (d), кг/м ³	Теплопроводность твердой фазы (λ_T), Вт/(м·К)	Температура ликви-дус, (T_L), К	Температура солидус, (T_S), К	Диаметр сферы или цилиндра, мм	Начальная температура, К
ФТн30 [12]	386,0	681	5860	76,6	1808	1653	5; 25; 50	298
ФВд50У0,5 [12]	320,0	475	6920	39,9	1813	1748	5; 25; 50	298
FeCr70C10LP [13]	316,8	461(373К) 535(773К) 580(1273К)	6900	93,6(373К) 101,8(773К) 112,7(1273К)	1833	1753	5; 25; 50	298

^{*)} теплоемкость, плотность и теплопроводность жидкой фазы принята по соответствующему значению в твердом состоянии.

Таблица 2. Расчетная длительность плавления (с) кусковых добавок на границе «шлак–металл»

Диаметр сферического куска, мм	Вид добавки		
	ФТн30	ФВд50У0,5	FeCr70C10LP
5	3,0 / 3,5	4,0 / 4,6	25,0 / 28,3
25	32,0 / 37,0	43,0 / 49,5	276,0 / 314,6
50	84,0 / 97,0	95,0 / 108,3	685,0 / 794,5

Установлено, что длительность плавления кусковой добавки зависит от ее вида, размера и толщины шлакового покрова в ковше. Преобладаю-

щими факторами, определяющими продолжительность плавления тугоплавкой добавки, являются вид (свойства) и размера куска. Увеличение толщины шлака в исследованных пределах способствует незначительному повышению длительности плавления (на 10–15% абс.) кусковой добавки.

Перспективы использования результатов работы.

Дальнейшая проверка адекватности результатов расчета будет осуществляться после оценки длительности усвоения расплавленной фазы добавок с использованием дополнительно разработанной математической модели.

Численные исследования продолжают в направлении оценки длительности плавления и усвоения элементов расплавом из добавок рассматриваемой группы в кусках разной геометрической формы, (приближенной к сферической или цилиндрической) для разных технологических и производственных условий.

Предполагается также расширение исследований с учетом развития разработанных математических моделей, применительно к другим группам (сверхтугоплавкие и легкоплавкие) добавок, для теоретического анализа и практической оценки условий их плавления и усвоения металлом в различных процессах внепечной обработки.

Наличие данных о продолжительности плавления и усвоения разных добавок на границе «шлак–металл» позволит прогнозировать эффективность их использования в ковшевой технологии и сформировать мероприятия по ресурсосбережению.

1. *Математическое моделирование процессов внеагрегатной обработки стали.* / В.А.Вихлевщук, А.П.Огурцов, И.А.Павлюченков и др. – Киев: ИСМО МО Украины, 1997. – 151 с.
2. *Вихлевщук В.А., Харахулах В.С., Бродский С.С.* Ковшевая доводка стали. – Днепропетровск: Системные технологии, 2000. – 190 с.
3. *Изучение влияния технологических факторов на время плавления кремнистых ферросплавов в жидком металле.* / Е.Ю.Лозовая, А.В.Некрасов, В.И.Жучков и др. // Расплавы. – 2001. – №3. – С.10–17.
4. *Охотский В.Б.* Растворение ферросплавов при ковшевом легировании стали. // Процессы литья. – 2003. – №2. – С.3–6.
5. *Влияние постоянного тока на характер массопереноса в металлическом расплаве установки ковш–печь.* Ч.2. Модель массопереноса / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А.Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2007. – № 4–5. – С.14–17.
6. *Исследование тепло-, массообменных процессов в ванне установки ковш–печь.* Ч.1. Математическая модель. / В.П.Пиптюк, С.Е.Самохвалов, И.А.Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2008. – №3. – С.3–5.
7. *Исследование методом математического моделирования процессов обработки стали на установке «ковш–печь».* / В.П.Пиптюк, В.Ф.Поляков, В.А.Поляков и др. // Металл и литье Украины. – 2006. – №1. – С.48–54.

8. *Исследование* особенностей доводки стали кусковыми добавками на установке ковш–печь. /В.П.Пиптюк, В.Ю.Болотов, И.А.Павлюченков и др. // Теория и практика металлургии. – 2006. – №1–2. – С.28–33.
9. *Исследование* процессов шлакообразования и доводки металла на установке ковш–печь переменного тока с использованием математической модели гидродинамики и тепло-, массообмена. / В.П.Пиптюк, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков и др. // Сб. тр. VII междунар. конф. «Тепло и массообменные процессы в металлургических системах» (Мариуполь, 6–8 сентября 2006 г.). – 2006. – С.102–107.
10. *Бабенко М.В., Павлюченков И.А.* Алгоритм расчета (на основе метода Дюзимбера) двумерной задачи плавления цилиндра в расплаве. // Металургійна теплотехніка: Зб. наук. пр. НМетАУ. – Дніпропетровськ: «ПП Грек О.С.». – 2006. – С.3–7.
11. *Моделирование* задачи плавления тел цилиндрической формы в различных средах. / И.А.Павлюченков, Л.А.Игнатенко, В.Ю.Болотов, М.В.Бабенко // Харьковськы. – 2008. – №1 (61). – С.36 – 43.
12. *Изучение* свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали. / В.С.Игнатъев, В.А.Вихлевщук, В.М.Черногрицкий и др. // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1988. – №6. – С.37 – 42.
13. *Комплексное* исследование свойств легирующих и микролегирующих материалов. / В.А.Вихлевщук, В.С.Игнатъев, Ю.Н.Омель и др. // Теория и практика металлургии. –1999. – №3. – С.29–30.

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Сталеплавильное производство»
докт.техн.наук, проф. В.Ф.Поляков*

І.А.Павлюченков, В.П.Піптюк, М.В.Бабенко, Л.А.Ігнатенко, С.М.Павлов, В.Ф.Поляков

Розробка моделі і дослідження процесів плавлення тугоплавких добавок на межі розділу фаз

Метою роботи є дослідження маловивчених питань плавлення кускових добавок алюмінію, ферротитану і ферросиліцію, що вводяться в ківш на поверхню ванни під час випуску плавки. Приведено математичну модель і результати чисельної оцінки тривалості плавлення тугоплавких кускових добавок на межі «шлак–метал» в умовах обробки розплаву на установці «ківш–піч», що дасть змогу прогнозувати ефективність ковшової технології та сформулювати заходи щодо ресурсозбереження.