

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 алюминоносодержащего сплава, с учетом влияния гидродинамики расплава на процессы движения и плавления слитка, а также расчет продолжительности дальнейшего усреднения расплавленной добавки в объеме ковша.

Детальное описание методики решения первого этапа поставленной задачи – определение поля скоростей жидкого металла при его выпуске в 160-тонный сталеразливочный ковш, а также результаты численных расчетов полей скоростей металла при различных уровнях заполнения ковша представлены в работе [2]

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

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

$$\frac{d}{dt} \left[ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}^i} \right] - \frac{\partial T}{\partial q^i} = Q_i \quad (1)$$

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

Подробное и детальное описание математической модели движения слитка алюминоносодержащего сплава цилиндрической формы в ковше в период выпуска плавки с учетом влияния гидродинамики расплава представлено в работе [3].

Уравнения движения слитка в виде, разрешенном относительно вторых производных обобщенных координат имеет вид:

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

Математическое описание плавления алюминоносодержащего слитка включает два периода – период намерзания оболочки железуглеродистого расплава на поверхности слитка и период нагрева и окончательного расплавления слитка.

Период 1. Намерзание оболочки железуглеродистого расплава на поверхности алюминоносодержащего слитка

Распространение тепла в двухслойном теле описывается уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для алюминоносодержащего материала (радиусом  $r=R_{cl}$ ) и для затвердевшей оболочки расплава (с внешним радиусом  $r=Z_p$ ):

$$c_{cl}(t)\rho_{cl}(t) \frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_{cl}(t) \frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial r} \right], \quad 0 \leq r \leq z_0, \tau > 0, \quad (3)$$

$$c_p(t)\rho_p(t) \frac{\partial t_p(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_p(t) \frac{\partial t_p(r,\tau)}{\partial r} \right], \quad 0 \leq r \leq z_0, \tau > 0. \quad (4)$$

Период 2. Нагрев и плавление алюминоносодержащего слитка

Поскольку процесс плавления материала слитка 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 слитка введена функция источника тепла которая учитывается посредством введением эффективной теплоемкости:

$$c_3 \rho(t) \frac{\partial t(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda(t) \frac{\partial t(r,\tau)}{\partial r} \right], \quad 0 \leq r \leq R_{cl}, \tau > 0 \quad (5)$$

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

$$c_3(t) = \begin{cases} c_S, T \leq T_S \\ \frac{c_S + c_L}{2} + Q_H \frac{\partial \psi}{\partial t}, \\ c_L, T > T_L \end{cases} \quad (6)$$

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:

$$\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{1}{t_S - t_L} \quad (7)$$

На оси симметрии слитка для всех периодов плавления задано условие:

$$\frac{\partial t_{cl}(0,\tau)}{\partial r} = 0, \tau > 0. \quad (8)$$

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

$$\lambda_{cl}(t) \frac{\partial t_{cl}(R_{cl},\tau)}{\partial r} = \lambda_p(t) \frac{\partial t_p(R_H,\tau)}{\partial r}, \quad t_{cl}(R_{cl},\tau) = t_p(R_{cl},\tau) \quad (9)$$

Условие теплообмена на границе оболочка расплава - расплав:

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

$$t_p(Z_p(\tau), \tau) = t_{пл}^p,$$

$$Z_p(\tau) > R_{сл}, t_p(Z_p(\tau), \tau) = t_{пл}^p \quad (10)$$

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

Детальное описание математической модели усреднения добавки в ковше в период выпуска плавки с учетом влияния гидродинамики расплава представлено в работе [1].

Результаты расчетов продолжительности расплавления слитков алюмосодержащего сплава с плотностью 5300–6560 кг/м<sup>3</sup> (содержание алюминия 7,5 – 30 %) различной массы в стали с различной температурой представлены графически на рис. 1 - 2.

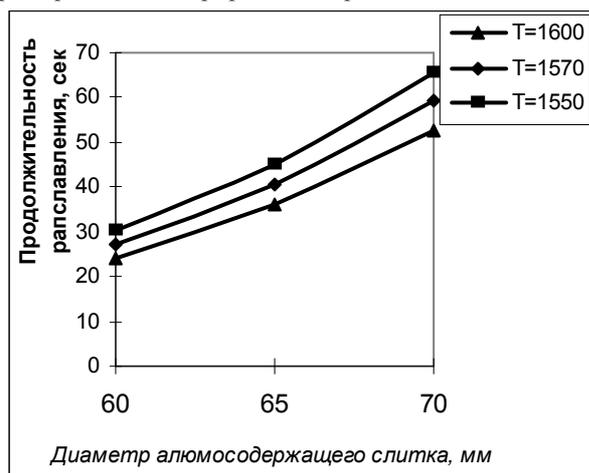


Рис. 1. Длительность расплавления слитка (плотность 6560 кг/м<sup>3</sup>, содержание алюминия 7,5%) различного диаметра при различной температуре стали

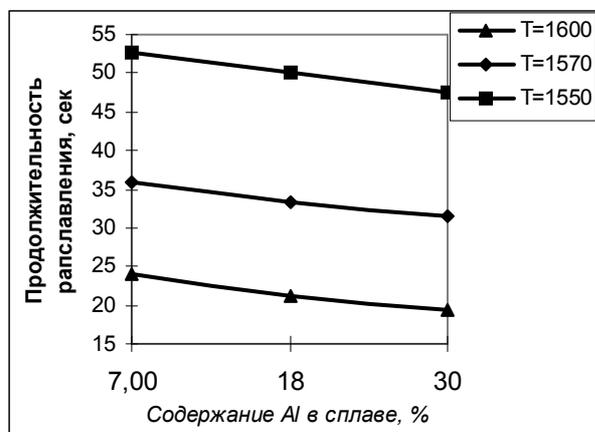


Рис. 2. Длительность расплавления слитка диаметром 60мм с различным содержанием алюминия при различной температуре стали

Результаты расчетов продолжительности расплавления слитков различной массы плотностью 6500 – 5300кг/м<sup>3</sup> (содержание алюминия 8 – 30%) и продолжительности усреднения расплавленной добавки в объеме ковша представлены в таблицах 1,2.

Таблица 1. Продолжительность плавления (в числителе) и последующего усреднения (в знаменателе) слитков с содержанием Al 8 % ( температура стали 1600 °С).

Уровень металла в ковше	Диаметр, мм (масса слитка, кг)		
	60 (8,2)	67 (10,3)	73 (12,2)
1/3	23,1	38,3	55,5
	32	45	65
1/2	23,8	38,8	56,1
	54	86	130
2/3	24,1	39,6	57,0
	87	135	215

Таблица 2. Продолжительность плавления (в числителе) и последующего усреднения (в знаменателе) слитков с содержанием Al 30 % ( температура стали 1550 °С).

Уровень металла в ковше	Диаметр, мм (масса слитка, кг)		
	60 (7,3)	67 (8,4)	73 (10,0)
1/3	19,5	31,4	47,6
	27	42	89
1/2	20,0	32,1	48,2
	29	67	112
2/3	20,7	32,6	48,9,0
	35	94	178

### Выводы

Разработана методика расчета задачи усвоения алюмосодержащих материалов жидкой сталью на основе математической модели, которая комплексно учитывает взаимовлияющие процессы перемещения слитка в расплаве и его одновременного расплавления в период наполнения ковша, а также последующего усреднения (массопереноса) расплавленной добавки в объеме ковшевой ванны. Исследовано влияние химического состава, геометрических размеров, интенсивности движения жидкого металла и его температуры на кинетику расплавления алюмосодержащих слитков и дальнейшего усреднения вводимой добавки в ковше. В дальнейших работах планируется исследовать влияние места ввода слитков на зеркале металла на степень усвоения алюминия металлом.

### 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. Болотова Ю.А., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Математическая модель процесса расплавления алюмосодержащего сплава при доводке стали в сталеразливочном ковше. – Математическое моделирование, 2005. – №1(13). – с. 49–53.
3. Павлюченков И.А., Болотова Ю.А. Исследование процессов расплавления слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа методами математического моделирования. Металлургическая теплотехника. Сб. Научных трудов НметАУ, т.1. – 2005. – с. 329–339.