

## Компьютерный расчет кинетики усвоения ферроалюминиевых слитков в ковше на основе комплексной математической модели

И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ, Ю.А. БОЛОТОВА

Днепропетровский государственный технический университет

На основании результатов математического моделирования определены закономерности протекания тепло- и массообменных процессов при усвоении слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа в сталеразливочном ковше в период выпуска плавки. Метод расчета разработан с учетом взаимодействия процессов пространственного перемещения слитков алюмосодержащих сплавов в ковше под воздействием гидродинамики расплава и его плавления с последующим усреднением расплавленной доавки в ковше.

На підставі результатів математичного моделювання визначено закономірності протікання тепло- та масообмінних процесів під час засвоєння зливків алюмомістких сплавів на основі заліза в сталеразливочному ковші в період випуску плавки. Метод розрахунку розроблено з урахуванням взаємодії процесів просторового руху алюмомістких зливків під впливом гідродинаміки розплаву та його плавлення з подальшим усередненням розплавленої доавки в ковші.

On the grounds of results of mathematical modelling are determined regularities of progress heat and mass exchange processes during assimilation aluminium alloy ingot on iron base in steel teeming ladle in fusing period. The calculation method is designed bearing in mind of interaction processes of space moving of aluminium ingots under the influence of hydrodynamics melting and its melt with further homogenizing of melted adding in ladle.

Внепечное раскисление стали алюмосодержащими материалами является одним из наиболее эффективных направлений существенного повышения качества и свойств металлопродукции массового назначения. Изделия из первичного (алюминиевая катанка) и вторичного (слитки, чушки, стержни, отливки, гранулы) алюминия массово применяются на отечественных и зарубежных металлургических предприятиях для раскисления и микролегирования большинства спокойных и низколегированных сталей. При этом степень усвоения алюминия, согласно многолетним среднестатистическим данным, составляет для алюминиевой катанки 40-50%, для изделий из вторичного алюминия АВ-87 от 15 до 23% и характеризуется высоким показателем нестабильности: 10-12% и 20-25% соответственно. Наряду с применением изделий из первичного и вторичного алюминия, одним из наиболее эффективных способов ресурсосберегающей технологии внепечного раскисления стали является ввод слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа (ферроалюминия) в расплав сталеразливочного ковша в период выпуска плавки из плавильного агрегата, который обеспечивает лучшее усвоение алюминия и снижение его расхода в 1,5-2 раза, повышение стабильности процесса раскисления, простоту осуществления и улучшения свойств стали.

На основе анализа опытно-промышленных данных по внедрению технологии внепечного раскисления стали ферроалюминием становится очевидным факт, что данная технология эффективней конкурирующих. Наилучшие по показателям степени усвоения и стабильности раскисления результаты дает использование слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа большой массы (8-12кг) вытянутой формы с соотношением длины слитка к его ширине 1:5-8, т.е. условно цилиндрической формы. Несмотря на накопленные эмпирические знания по усвоению материала слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа в расплавах стали, технологические параметры обработки расплавов ферроалюминиевыми слитками, полученные в результате опытно-промышленных исследований, хоть и обеспечивают усвоение добавок, но не являются уни-

фицированными, т.е. они не отражают комплексного взаимодействия технологических параметров на степень и качество усвоения добавок.

Усвоение ферроалюминия при выпуске металла в ковш включает взаимозависимые тепло- и массообменные процессы при движении, плавлении слитка алюмосодержащего сплава и последующего конвективного массопереноса жидкой фазы раскислителя в объеме ковша. Степень и продолжительность усвоения ферроалюминия расплавом определяется кинетикой протекания теплофизических процессов при плавлении слитков ферроалюминия. Таким образом для установления влияния технологических параметров обработки расплава слитками ферроалюминия (масса, размер и состав слитков, место ввода на зеркале металла, масса, температура и состав расплава), необходимо детальное изучение закономерностей протекания теплофизических процессов при перемещении и плавлении слитков с учетом гидродинамики расплава в ковше. Исследование упомянутых закономерностей проводится в данной работе методами математического моделирования.

Для проведения численных расчетов кинетики расплавления слитков алюмосодержащих сплавов в период выпуска плавки в сталеразливочный ковш необходимо иметь достоверный сведения о физических и теплофизических свойствах сплавов алюминия с железом при различной содержании этих компонентов. Авторами работы проведен детальный анализ литературных источников, посвященный указанному вопросу, обобщены свойства ферроалюминия, полученные другими авторами экспериментальным либо расчетно-аналитическим путем. Подробное изложение физических и теплофизических свойств ферроалюминия представлено в [1].

Авторами данной работы поставлена цель – разработка комплексной математической модели для исследования процесса усвоения слитков алюмосодержащего сплава на основе железа в процессе выпуска плавки в сталеразливочный ковш. Математическая модель должна учитывать взаимосвязанные процессы перемещения и плавления слитков под воздействием гидроди-

намики расплава при различном содержании алюминия в сплаве и технологических параметрах подачи слитков в расплав и процесс усреднения расплавленной добавки в объеме ковшевой ванны.

Ранее в работах авторов [2,3] изложено детальное описание математической модели пространственно-го перемещения слитков ферроалюминия с учетом гидродинамики расплава при выпуске на основе уравнения Лагранжа 2-го рода и приведен алгоритм расчета процесса перемещения слитка в расплаве.

Математическая модель гидродинамики расплава при выпуске плавки с учетом инъекции воздуха струей, построенная на основе уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости, и метод решения на основе метода расщепления по физическим факторам Белоцерковского подробно описаны в работах авторов [1,4].

При описании процесса плавления слитков алюмино-содержащих сплавов в жидкой стали используются следующие допущения:

1. Расплавившиеся части материала слитка, 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. Слитки рассматриваются условно цилиндрической формы эффективного диаметра.

5. Учитывая вытянутую форму слитка, скорость плавления по длине слитка пренебрежимо мала по сравнению со скоростью плавления по радиусу.

При расчете плавления материала слитка алюмино-содержащего сплава на основе железа учитывается суммарный тепловой эффект  $Q_{\Sigma}$  от растворения, окисления, молидации и кипения при взаимодействии его поверхности с расплавом. При этом принято, что указанный тепловой эффект распределяется между плавящимся материалом и жидкой сталью пропорционально коэффициентам их теплопроводности [44]. При расчете плавления материала слитка предусматривается возможность повторного нарастания стальной оболочки на оставшуюся твердую фазу материала слитка.

#### Математическая модель кинетики плавления слитка алюмино-содержащего сплава.

##### Период 1. Образование оболочки шлака на поверхности слитка.

Распространение тепла в двухслойном теле описывается уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для материала слитка ( $0 \leq r < R_{cl}$ ) и для затвердевшей шлаковой оболочки ( $R_{cl} \leq r < Z_u$ ) при  $\tau > 0$ :

$$\begin{cases} c_{cl}(t)\rho_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_{cl} \\ c_u(t)\rho_u(t)\frac{\partial t_u(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_u(t)\frac{\partial t_u(r,\tau)}{\partial r}\right], R_{cl} \leq r < Z_u \end{cases} \quad (1)$$

Граничные условия при  $\tau > 0$ :

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

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

на границе раздела материала слитка и шлаковой оболочки ( $r=R_{cl}$ ) заданы граничные условия IV рода

$$\lambda_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(R_{cl},\tau)}{\partial r} = \lambda_u(t)\frac{\partial t_u(R_{cl},\tau)}{\partial r},$$

$$t_{cl}(R_{cl},\tau) = t_u(R_{cl},\tau), \quad (3)$$

условие теплообмена на границе шлаковая оболочка - расплав

$$-\rho_u Q_u \frac{dZ_u(\tau)}{d\tau} = \alpha_u (t_p^u(\tau) - t_{nl}^u) - \lambda_u \frac{\partial t_u(Z_u(\tau),\tau)}{\partial r},$$

$$t_u(Z_u(\tau),\tau) = t_{nl}^u, Z_u(\tau) > R_{cl}, t_u(Z_u(\tau),\tau) = t_{nl}^u, \quad (4)$$

где  $t_{nl}^u$  - температура плавления (затвердевания) шлаковой оболочки;  $Q_u$  - теплота плавления шлака,  $\alpha_u$  - коэффициент теплоотдачи от жидкого шлака к поверхности шлаковой оболочки;  $t_p^u$  - температура жидкого шлака.

Начальные условия:

$$\begin{cases} t_{cl}(r,0) = t_{cl}^{нач}, 0 \leq r \leq R_{cl} \\ Z_{u(0)} = R_{cl} \end{cases} \quad (5)$$

Длительность  $\tau_I$  процесса намерзания шлаковой

оболочки  $Z_u$  определяется в виде  $\tau_I = \frac{H_u}{V_n}$ , где

$H_u$  - толщина шлака в сталеразливочном ковше,  $V_n$  - перпендикулярная к поверхности шлака скорость проникновения слитка алюмино-содержащего сплава в ковш.

##### Период 2. Образование и плавление стальной оболочки на поверхности шлаковой оболочки.

С момента попадания слитка алюмино-содержащего сплава в жидкий металл на поверхности образовавшейся шлаковой оболочки происходит образование и последующее плавление оболочки расплава. Поверхность шлаковой оболочки прогревается до температуры плавления  $t_{nl}^u$  и, поэтому, возможен процесс ее расплавления внутри оболочки расплава.

Распространение тепла в четырехслойном теле описывается уравнениями теплопроводности в цилиндрической системе координат для материала слитка ( $0 \leq r < R_{cl}$ ), твердой шлаковой оболочки ( $R_{cl} \leq r < Z_u^T$ ), жидкой шлаковой прослойки ( $Z_u^T \leq r < Z_u$ ), затвердевшей оболочки расплава ( $Z_u \leq r < Z_m$ ) при  $\tau > \tau_I$ :

$$\begin{cases} c_{cl}(t)\rho_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_{cl}(t)\frac{\partial t_{cl}(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_{cl} \\ c_u(t)\rho_u(t)\frac{\partial t_u(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_u(t)\frac{\partial t_u(r,\tau)}{\partial r}\right], R_{cl} \leq r < Z_u^T \\ c_u^{жс}(t)\rho_u^{жс}(t)\frac{\partial t_u^{жс}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_u^{жс}(t)\frac{\partial t_u^{жс}(r,\tau)}{\partial r}\right], Z_u^T \leq r < Z_u \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r}\right], Z_u \leq r < Z_m \end{cases} \quad (6)$$

Граничные условия при  $\tau > \tau_I$ :

на оси симметрии слитка ( $r=0$ ) задано условие симметрии, на границе раздела материала слитка и шлаковой оболочки ( $r=R_{cl}$ ) условия IV рода, на границе

раздела твердой и жидкой фаз шлаковой прослойки ( $r = Z_{ш}^T$ ) условие (4), на границе раздела шлаковой и стальной оболочек ( $r = Z_{ш}$ ) условия IV рода, на границе намерзшая оболочка расплава - расплав ( $r = Z_m$ ) условие (4).

Начальным условием является решение задачи теплопроводности для материала слитка 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 слитка алюминосодержащего сплава намерзших стальной и шлаковой оболочек. Продолжительность второго периода -  $\tau_2$ .

### Период 3. Образование и плавление оболочки расплава на поверхности слитка алюминосодержащего сплава.

После расплавления шлаковой оболочки поверхность рассматриваемого слитка алюминосодержащего сплава не достаточно прогрета (ввиду низкой теплопроводности шлаковой прослойки) и, поэтому возможен процесс образования и последующего расплавления оболочки расплава на поверхности рассматриваемого слитка. Данный период плавления описывается системой уравнений теплопроводности для двухслойного тела, включающей уравнения для материала слитка ( $0 \leq r < R_{сш}$ ) и для оболочки расплава ( $R_{сш} \leq r < Z_m$ ) при  $\tau > \tau_1 + \tau_2$ :

$$\begin{cases} c_{сш}(t)\rho_{сш}(t)\frac{\partial t_{сш}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_{сш}(t)\frac{\partial t_{сш}(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_{сш} \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r}\right], R_{сш} \leq r < Z_m \end{cases} \quad (7)$$

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

на оси симметрии слитка ( $r = 0$ ) - условие симметрии, на границе раздела материала слитка и оболочки расплава ( $r = R_{сш}$ ) условия IV рода, на границе намерзшая оболочка расплава - расплав ( $r = Z_m$ ) условие (4).

Начальными условием является решение задачи теплопроводности для материала слитка, описанной в периоде 2, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ .

Период 3 заканчивается, когда полностью расплавится оболочка расплава, намерзшая на поверхности слитка алюминосодержащего сплава. Продолжительность третьего периода -  $\tau_3$ .

### Период 4. Плавление материала слитка алюминосодержащего сплава.

Процесс плавления материала слитка алюминосодержащего сплава начинается после прогрева его поверхности до температуры плавления. Таким образом, решается задача теплопроводности для тела цилиндрической формы с граничными условиями III рода на внешней границе ( $r = Z_{сш}$ ). Прогрев поверхности слитка описывается уравнением теплопроводности для материала слитка при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ :

$$c_{нш}(t)\rho_{нш}(t)\frac{\partial t_{нш}(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r^\gamma}\frac{\partial}{\partial r}\left[r^\gamma\lambda_{нш}(t)\frac{\partial t_{нш}(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < Z_{нш} \quad (8)$$

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

на оси симметрии слитка ( $r = 0$ ) условие симметрии, на границе поверхность слитка - расплав ( $r = Z_{сш}$ ) условие (4).

Начальными условием является решение задачи теплопроводности для материала слитка описанной в периоде 3, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . Продолжительность периода прогрева поверхности слитка до температуры плавления -  $\tau_4^n$ .

После прогрева поверхности слитка алюминосодержащего сплава начинается процесс его расплавления, который описывается уравнением теплопроводности для материала слитка при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$ . Продолжительность периода плавления материала слитка -  $\tau_4^{nl}$ .

Период 4 считается законченным при условии полного расплавления материала слитка алюминосодержащего сплава на основе железа. Продолжительность четвертого периода -  $\tau_4 = \tau_4^n + \tau_4^{nl}$ .

Приведенная математическая модель детально описывает плавление слитка алюминосодержащего сплава с низким содержанием алюминия в сплаве, т.е. для тугоплавкого материала, у которого температура плавления выше температуры солидуса расплава, но ниже его температуры ликвидус. Для материала ферроалюминия с высоким содержанием алюминия (легкоплавкого) математическая модель дополняется уравнениями теплопроводности для жидкой фазы материала слитка с соответствующим граничным условием на границе твердой и жидкой фаз материала слитка.

Расчет процесса расплавления слитка алюминосодержащего сплава производится по представленной математической модели в соответствии с методом с явным выделением границы плавления профессора Никитенко.

Адекватность разработанной математической модели плавления слитков алюминосодержащих сплавов проводилась путем решения модельной задачи об обтекании слитка с различным содержанием алюминия расплавом стали и сравнением результатов расчета продолжительности плавления алюминиевого слитка и слитка из чистого железа, представленных в работах других авторов при различных скоростях движения расплава. Сравнительный анализ результатов решение модельной задачи позволяет сделать вывод о качественной и количественной адекватности, относительная погрешность расчетов находится в пределах 3-8%.

Сравнительный анализ результатов решение модельной задачи позволяет сделать вывод о качественной и количественной адекватности, относительная погрешность расчетов находится в пределах 3-8%.

При расчете продолжительности плавления слитков алюминосодержащих сплавов на основе железа с различным содержанием алюминия установлено, что продолжительность их плавления лимитируется расплавлением образующихся на слитке шлаковой и металлической оболочек, значительно повышаясь при снижении температуры жидкого металла и увеличении диаметра слитков, а также при снижении содержания алюминия в сплаве. На рисунках представлены графики зависимости толщины образовавшейся на поверхности слитка алюминосодержащего сплава оболочек шлака и расплава от времени при различных температурах стали и диаметрах слитка. Расчетами

установлено, что для всех рассматриваемых вариантов материал слитка алюминосодержащего сплава не успевает расплавиться за время теплового периода, когда на его поверхности существует оболочка расплава.

Слитки тугоплавких материалов с содержанием алюминия 10-20% расплавляются после протекания теплового периода в расплаве стали. Слитки легкоплавких материалов с содержанием алюминия 30-40% расплавляются с повторным образованием и плавлением оболочки расплава на поверхности слитка. Расчеты показывают, что толщина повторно образовавшейся оболочки расплава существенно меньше, чем толщина оболочки расплава, образующаяся в первый раз на поверхности рассматриваемого слитка. В случае учета жидкого шлака на поверхности ковша, шлаковая оболочка замедляет процесс плавления слитка, при этом значительно повышается продолжительность расплавления алюминосодержащего материала внутри оболочки расплава. Слитки легкоплавких материалов с содержанием алюминия 50-60% практически расплавляются в тепловой период существования на поверхности слитка оболочек шлака и расплава. Расчеты показывают, что кинетика плавления слитка в период существования оболочек расплава и шлака значительно интенсивней, чем дальнейшее плавления материала слитка в расплаве.

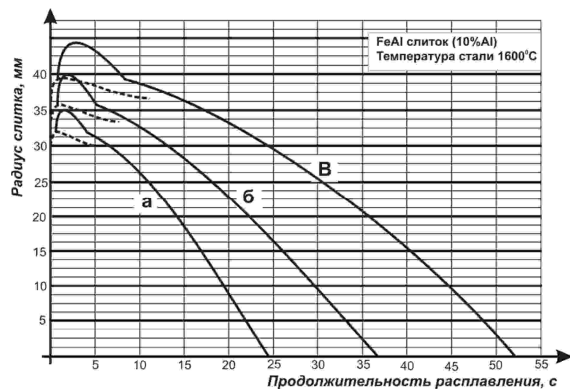


Рис. 1. Продолжительность расплавления слитка 10% алюминосодержащего сплава при выпуске в ковш с температурой стали 1600°C. Буквами обозначены диаметры слитка: а – 60мм (8,2кг), б – 67мм (10,3кг), в – 73мм (12,2кг). Сплошные линии – диаметры слитка, пунктир – оболочка шлака.

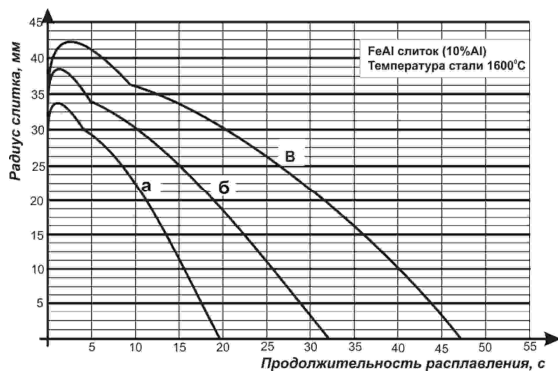


Рис. 2. Продолжительность расплавления слитка 10% алюминосодержащего сплава в стали с температурой 1600 °C без учета шлаковой оболочки. Обозначения такие же, как на рис. 1.

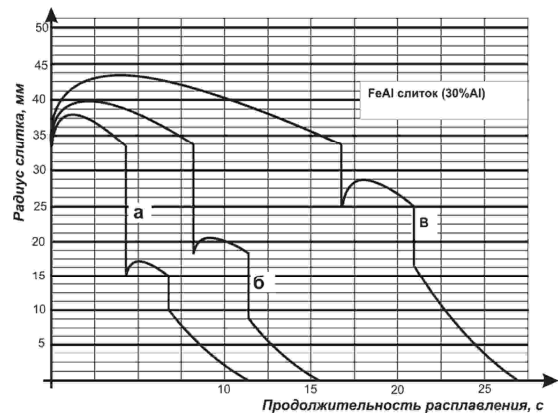


Рис. 3. Продолжительность расплавления слитка 30% алюминосодержащего сплава массой 8,2 кг (диаметр 67мм) без учета шлаковой оболочки. Буквами обозначены температуры стали: а – 1650 °C, б – 1600 °C, в – 1550 °C.

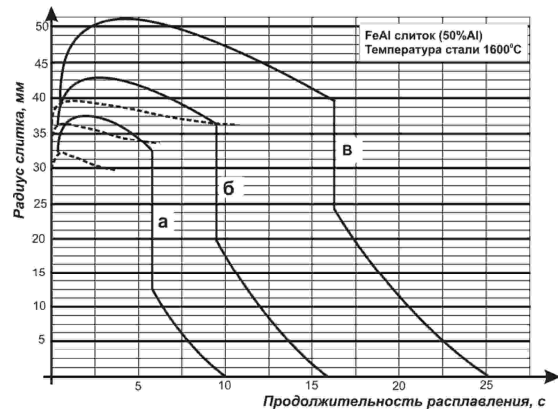


Рис. 4. Продолжительность расплавления слитка 50% алюминосодержащего сплава при выпуске в ковш с температурой стали 1600 °C. Обозначения такие же, как на рис. 1.

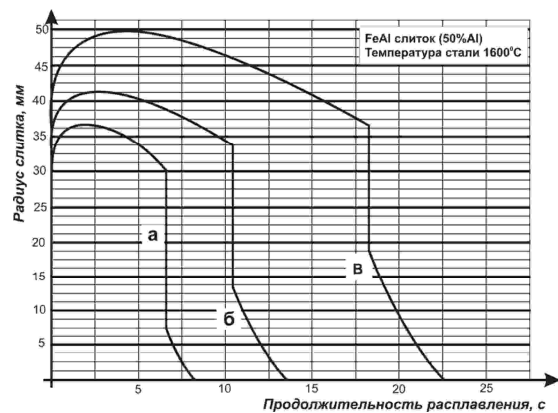


Рис. 5. Продолжительность расплавления слитка 50% алюминосодержащего сплава в стали с температурой 1600 °C без учета шлаковой оболочки. Обозначения такие же, как на рис. 1.

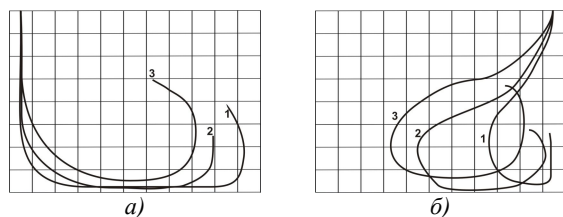


Рис. 6. Траектория перемещения слитка до полного расплавления в 250-тонном ковше с температурой стали 1600<sup>0</sup>С. Слиток вводится на уровне 1/3 наполнения ковша. Обозначения: а – ввод под струей металла, б – ввод около борта ковша; 1 – содержание алюминия в материале слитка 20%, 2 – содержание алюминия в материале слитка 30%, 3 – содержание алюминия в материале слитка 50%.

Полученные результаты по обработке стали в ковше слитками алюмосодержащих сплавов на основе железа показывают, что среднее остаточное содержание алюминия на плавках по традиционной технологии (с применением изделий из вторичного алюминия АВ-87) и с вводом ферроалюминия в ковш практически идентично – 0,02132% и 0,02075% соответственно.

В то же время, сравнение средних количеств алюминия, введенного в металл показывает, что аналогичный результат получен при в три раза меньшем количестве введенного чистого алюминия – 0,00192 кг/кг (средний расход на плавках – 1,5 кг/кг) стали при использовании вторичного алюминия марки АВ-87 и 0,00064кг/кг (средний расход на плавках – 0,00055 кг/кг) стали при использовании ферроалюминия. Полученные данные показывают, что реальный коэффициент замены вторичного алюминия АВ-87 на слитки алюмосодержащих сплавов на основе железа по результатам опытного опробования составил 1,87 кг/кг.

Рассчитан и подтвержден опытно-промышленным путем экономический эффект от замены вторичного алюминия на слитки ферроалюминия при доводке стали. Экономический эффект составляет 3,20-4,30 грн/т стали.

### Выводы

В результате реализации нового, предложенного авторами, подхода к исследованию процессов усвоения слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа большой массы условно цилиндрической формы, основанного на комплексной модели процесса усвоения материала слитков, учитывающей взаимовлияющие процессы движения слитка, его плавления и массопереноса расплавленной добавки в ковше, установлено следующее.

1. Применение слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа большой массы условно цилиндрической формы для раскисления стали при выпуске

плавки в ковш повышает степень, качество и стабильность усвоения алюминия по сравнению с традиционными способами ввода алюминия в расплав стали.

2. Полученные данные подтверждают, что отличие физических и теплофизических свойств сплава алюминия с железом от свойств чистого алюминия определяют более инертную кинетику протекания процесса плавления ферроалюминия по сравнению с чистым алюминием, в то же время обеспечивают более глубокое погружение под слой металла при расплавлении, а, следовательно, и более высокую степень усвоения.

3. При различных технологических режимах ввода алюмосодержащих слитков в расплав (масса, размер и состав слитков, место ввода на зеркале металла, масса, температура и состав расплава) определены кинетика и продолжительность расплавления, глубина расплавления и продолжительность массопереноса расплавленной добавки в объеме ковша.

4. Определены рациональные режимы ввода слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа в ковш при выпуске плавки, обеспечивающие максимальную глубину расплавления добавки и минимальную продолжительность усреднения добавки в объеме ковша, при этом достигается повышение степени усвоения алюминия на 20-25%.

5. Дальнейшие исследования процесса усвоения слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа могут быть направлены на исследования физико-химических процессов при плавлении алюмосодержащего материала и связывании кислорода в окислы алюминия при внепечном раскислении металла.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Павлюченков И.А., Болотова Ю.А. Особенности математического моделирования плавления слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа в сталеразливочном ковше // Сборник научных трудов НМетАУ “Металлургическая теплотехника”. 2006. - С. 261-271.
2. Болотова Ю.А., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Математическая модель расплавления алюмосодержащего сплава при доводке стали в сталеразливочном ковше // Новые технологии. 2005. - №2(7-8). - С. 218-225.
3. Болотова Ю.А. Исследование процесса усвоения алюмосодержащих слитков в сталеразливочном ковше на основе математической модели // Математичне моделювання. 2005. - №2(14). - С. 60-62.
4. 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.

пост. 10.04.07.