

## Математическая модель плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке

Р. В. ВОЛОШИН, М. В. БАБЕНКО

Днепродзержинский государственный технический университет

В данной статье представлены одно- и двумерные математические модели плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке в расплаве и при несимметричных граничных условиях на межфазной границе шлак-металл.

У даній статті представлені одно- і двовимірні математичні моделі плавлення обважененого комбінованого алюмовмісткого розкислювача циліндричної форми в захисній оболонці в розплаві і при несиметричних граничних умовах на міжфазній межі шлак-метал.

This article presents the one- and two-dimensional mathematical model of melting aluminum-weighted combined deoxidizer cylindrical shape in the containment in the melt and asymmetric boundary conditions at the interface slag-metal.

**Введение.** В настоящее время для раскисления стали в ковше при выпуске плавки из агрегата обычно используется алюминий в чушках. Алюминий значительно легче стали, поэтому заброшенные в ковш чушки алюминия всплывают на поверхность шлака интенсивно взаимодействуют с атмосферой и со шлаком. Наблюдается низкое (5-15%) усвоение алюминия жидким металлом. Дефицит и высокая стоимость алюминия постоянно заставляют металлургов искать пути снижения его расхода. Одним из решений поставленной задачи является увеличение плотности алюминиевого слитка путем ввода утяжелителя и с одновременной изоляцией его поверхности от воздействия окислительного шлака [1—3].

**Постановка задачи.** Данная задача относится к задачам теплопроводности с подвижными границами раздела фаз. Целью статьи является разработка и усовершенствование математических моделей кинетики плавления кусковых материалов цилиндрической формы в расплаве при несимметричных граничных условиях [4—5].

При вводе слитка в процессе выпуска металла из конвертера в сталеразливочный ковш он будет находиться в объеме расплава или на границе шлак-металл. После расплавления намерзшей стальной оболочки и затем чугунной оболочки часть жидкого алюминия всплывет на шлак, а частично конвективными потоками металла попадет в объем металла.

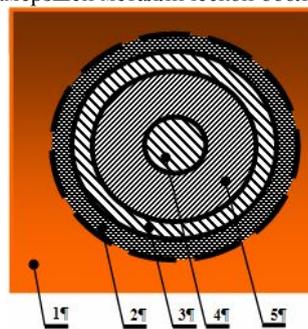
Указанный слиток представлен в виде цилиндра диаметром 70 мм и длиной 700 мм. Принимаем, что температуры жидкого металла  $t_m$  и жидкого шлака  $t_{ш}$  постоянны. Предполагаем, что теплофизические параметры слитка и защитного покрытия не зависят от температуры.

Рассматривая различные режимы ввода раскислителя в сталеразливочный ковш можно отметить тот факт, что не всегда алюмосодержащий слиток расплавляется в объеме расплава. Возможно, что слиток всплывает на поверхность и его дальнейшее плавление происходит на границе двухфазной зоны (шлак-металл).

Математическая модель плавления раскислителя в объеме металлического расплава.

С того момента когда рассматриваемый слиток попадает в металлический расплав на поверхности защитной оболочки происходит образование отвердевшей

оболочки расплава. Учитывая относительно низкую температуру плавления алюминия и высокую температуру плавления чугуна, становится возможен процесс плавления алюминия, утяжелителя и чугунной оболочки внутри намерзшей металлической оболочки (рис. 1).



1 – металлический расплав; 2 – металлическая оболочка расплава; 3 – чугунная оболочка слитка; 4 – чугунный утяжелитель (вставка); 5 – алюминий

Рис. 1. Схема к расчету плавления слитка содержащего алюминий с утяжелителем и чугунной оболочкой. Слиток погружен полностью в металлический расплав

Плавление комбинированного алюмосодержащего слитка представляет собой процесс передачи тепла для твердой, жидкой фаз и его двухфазной зоны, который описывается следующим уравнением:

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

$$R_y \leq r \leq R_{св}, \tau > 0, \quad (1)$$

где  $t$  – температура, °С;  $r$  – текущее значение радиуса;  $\tau$  – текущее значение времени процесса, с;  $\rho(t)$ ,  $C(t)$ ,  $\lambda(t)$  – плотность, теплоемкость, теплопроводность материала слитка.

Для учета теплоты фазового перехода в двухфазной зоне температур солидуса  $t_s$  и ликвидуса  $t_L$  в уравнение теплопроводности для алюминия введена функция источника тепла, которая учитывается посредством введением эффективной теплоемкости по формуле (2). Плотность и теплопроводность алюминия определяются по формулам (3), (4).

$$c_{эф}(t) = \begin{cases} \frac{c_{ж}(t) + c_{ТВ}(t)}{2} + Q_{кр} \frac{d\psi(t)}{dt}, & t_S < t < t_L \\ c_{ТВ}(t), & t \leq t_S \end{cases} \quad (2)$$

где  $\psi(t) = V_T(t)/V_0$  - доля твердой фазы в двухфазной зоне объемом  $V_0$ ;  $V_T(t)$  - объем твердой фазы материала куска 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  $\frac{d\psi(t)}{dt} = \frac{1}{t_S - t_L}$ .

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_{ж}(t), & t \geq t_L \\ (\rho_{ТВ}(t) + \rho_{ж}(t))/2, & t_S < t < t_L \\ \rho_{ТВ}(t), & t \leq t_S \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_{ж}(t), & t \geq t_L \\ (\lambda_{ТВ}(t) + \lambda_{ж}(t))/2, & t_S < t < t_L \\ \lambda_{ТВ}(t), & t \leq t_S \end{cases} \quad (4)$$

Аналогично происходит процесс плавления утяжелителя и оболочки из чугуна, представляющий собой процесс передачи тепла для твердой, жидкой фаз и его двухфазной зоны, который описывается следующим уравнением:

$$C_{эф,ч}\rho_{ч}(t) \frac{\partial t_{ч}(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_{ч}(t) \frac{\partial t_{ч}(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (5)$$

где  $C_{эф,ч}(t)$ ,  $\rho_{ч}(t)$ ,  $\lambda_{ч}(t)$  - эффективная теплоемкость, плотность и теплопроводность чугуна.

Для учета теплоты фазового перехода в двухфазной зоне температур солидуса  $t_S^ч$  и ликвидуса  $t_L^ч$  в уравнение теплопроводности для утяжелителя и оболочки также введена функция источника тепла, которая учитывается посредством введения эффективной теплоемкости по формуле, аналогичной (2). Плотность и теплопроводность чугуна определяются по формулам, аналогичным (3), (4).

Для затвердевшей металлической оболочки уравнение принимает вид:

$$C_M \rho_M(t) \frac{\partial t_M(r, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \lambda_M(t) \frac{\partial t_M(r, \tau)}{\partial r} \right], \quad (6)$$

$$r > R_{сл} + h_{об}, \tau > 0,$$

На оси симметрии слитка ( $r = 0$ ) задано условие симметрии:

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

Условие теплообмена на границе металлическая оболочка - расплав ( $r = Z_M$ ):

$$\begin{aligned} \alpha_M (t_M(r, \tau) - t_{пл}^M) - \lambda_M(t) \frac{\partial t_M(Z_M(\tau), \tau)}{\partial r} = \\ = -\rho_M(t) Q_M \frac{\partial Z_M(\tau)}{\partial \tau}; \\ t_M(Z_M(\tau), \tau) = t_{пл}^M, \tau > 0 \end{aligned} \quad (8)$$

На границе раздела алюминия, чугуна и металлической оболочки заданы граничные условия IV рода.

Начальные условия:

$$\begin{cases} t(r, \tau = 0) = t_0, 0 \leq r \leq R_0 + h_{об} \\ Z_M(\tau = 0) = R_0 + h_{об} \end{cases} \quad (9)$$

#### Математическая модель плавления раскислителя на границе шлак-металл.

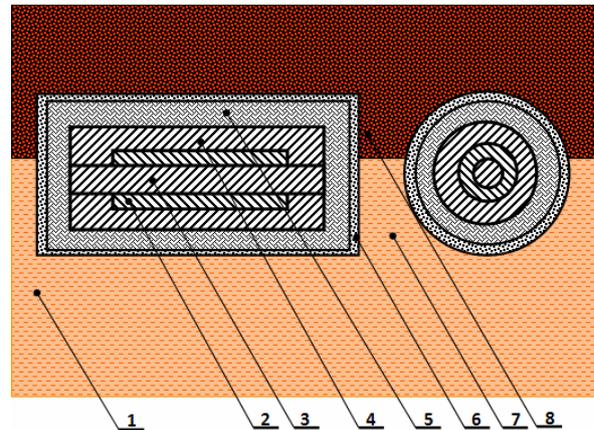
Если слиток за период погружения и всплытия не успевает расплавиться в объеме расплава, то дальнейший процесс плавления описывается ниже приведенной математической моделью.

Слиток представлен в виде цилиндра и расположен на границе шлак-металл. Схематически этот процесс представлен на рисунке (рис.2). Предполагаем, что теплофизические параметры слитка, утяжелителя и защитного покрытия не зависят от температуры. Предполагаем также, что тепловой поток по длине слитка не значителен, поэтому трехмерная задача нагрева и плавления слитка сводится к двумерной (по радиусу  $r$  и углу  $\varphi$ ). Принимаем также, что перед всплытием на границу шлак-металл вся поверхность куска не имеет намерзших оболочек шлака и металла.

Представим уравнение теплопроводности для трех фаз слитка (твердой, двухфазной, жидкой):

$$\begin{aligned} C_{эф}(t)\rho(t) \frac{\partial t(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(t)r \frac{\partial t(r, \varphi, \tau)}{\partial r} \right] + \\ + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left[ \lambda(t) \frac{\partial t(r, \varphi, \tau)}{\partial \varphi} \right] \\ 0 < r < R_{сл}, 0 < \varphi < \pi \end{aligned} \quad (10)$$

где  $t$  - температура, °C;  $r$ ,  $\varphi$  - текущие значения радиуса и угла соответственно;  $C_{эф}(t)$ ,  $\lambda(t)$ ,  $\rho(t)$  - эффективная теплоемкость, теплопроводность и плотность алюминия определяются в виде (2)–(4).



1 - расплав металла; 2 - алюминий; 3 - утяжелитель (чугун); 4 - защитная оболочка (чугун); 5 - намерзшая стальная оболочка в процессе нахождения слитка в объеме металлического расплава; 6 - намерзшая стальная оболочка в процессе нахождения слитка на границе шлак-металл; 7 - намерзшая шлаковая оболочка; 8 - расплав шлака

Рис. 2. Схема к процессу плавления комбинированного алюмосодержащего слитка с защитным покрытием и утяжелителем, расположенного на границе шлак-металл

Аналогично, плавление утяжелителя и оболочки из чугуна представляет собой процесс передачи тепла для твердой, жидкой фаз и его двухфазной зоны, который описывается следующим уравнением:

$$C_{эф,ч}(t)\rho_{ч}(t)\frac{\partial t_{ч}(r,\varphi,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_{ч}(t)r\frac{\partial t_{ч}(r,\varphi,\tau)}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_{ч}(t)\frac{\partial t_{ч}(r,\varphi,\tau)}{\partial \varphi}\right] \quad (11)$$

$0 < r < R_{ч}$ ,  $0 < \varphi < \pi$  - в утяжелителе

$R_{сл} < r < R_{ч}$ ,  $0 < \varphi < \pi$  - в защитной оболочке чугуна  
где  $C_{эф,ч}$ ,  $\rho_{ч}$ ,  $\lambda_{ч}$  - эффективная теплоемкость, плотность и теплопроводность чугуна определяются по формулам, аналогичным (2)–(4).

Распределение температур в затвердевшей оболочке металла в момент всплытия на поверхность шлак-металл ( $r > R_{ч}$ ,  $0 < \varphi < \pi$ ) и в дальнейшем затвердевании оболочки металлического расплава ( $r > R_{ч}$ ,  $\varphi_0 < \varphi < \pi$ ) имеет вид:

$$C_{м}(t)\rho_{м}(t)\frac{\partial t_{м}(r,\varphi,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_{м}(t)r\frac{\partial t_{м}(r,\varphi,\tau)}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_{м}(t)\frac{\partial t_{м}(r,\varphi,\tau)}{\partial \varphi}\right] \quad (12)$$

$r > R_{ч}$ ,  $\varphi_0 < \varphi < \pi$

Пусть точка  $P_{м}$  принадлежит границе плавления (намерзания) затвердевшей оболочки металла. При этом условие движения границы плавления (намерзания) запишем в виде:

$$\alpha_{м}(t_{м}(r,\varphi,\tau) - t_{пл}^м) - \lambda_{м}\frac{\partial T_{м}(P_{м})}{\partial n} = -\rho_{м}Q_{м}W(P_{м}); \quad T(P_{м}) = t_{пл}^м \quad (13)$$

где  $Q_{м}$  – теплота плавления,  $\frac{кДж}{кг \cdot ^\circ C}$ ;  $W(P_{м})$  – скорость движения границы, м/с.

Распределение температур в затвердевшей оболочке шлака имеет вид:

$$C_{ш}(t)\rho_{ш}(t)\frac{\partial t_{ш}(r,\varphi,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\lambda_{ш}(t)r\frac{\partial t_{ш}(r,\varphi,\tau)}{\partial r}\right] + \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial \varphi}\left[\lambda_{ш}(t)\frac{\partial t_{ш}(r,\varphi,\tau)}{\partial \varphi}\right] \quad (14)$$

$r > R_{ч}$ ,  $0 < \varphi < \varphi_0$ ,

Пусть точка  $P_{ш}$  принадлежит границе плавления (намерзания) затвердевшей оболочки шлака. При этом условие движения границы плавления (намерзания) запишем в виде:

$$\alpha_{ш}(t_{ш}(r,\varphi,\tau) - t_{пл}^ш) - \lambda_{ш}\frac{\partial T_{ш}(P_{ш})}{\partial n} = -\rho_{ш}Q_{ш}W(P_{ш}); \quad T(P_{ш}) = t_{пл}^ш \quad (15)$$

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

$$\frac{\partial t(0,\varphi,\tau)}{\partial r} = 0 \quad (16)$$

На верхней боковой поверхности цилиндра ( $0 < \varphi < \varphi_0$ ) происходит конвективный теплообмен с жидким шлаком с заданным коэффициентом  $\alpha_{ш}$  теплоотдачи. На нижней боковой поверхности цилиндра ( $\varphi_0 < \varphi < \pi$ ) происходит конвективный теплообмен с жидким металлом с заданным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_{м}$ . Между намерзшими оболочками металла, шлака, защитной оболочкой и поверхностью цилиндра существует идеальный тепловой контакт, т.е. заданы граничные условия IV рода.

В качестве начального условия выбирается распределение температур в слитке, утяжелителе и защитной оболочке в момент всплытия на границе шлак-металл.

### Выводы

Разработаны математические модели процесса плавления в металлическом расплаве и на границе шлак-металл утяжеленного алюминиевого слитка со вставкой и в защитной оболочке. В следующей статье авторы планируют представить алгоритмы расчетов по вышеприведенным математическим моделям и результатами вычислительного эксперимента, проведение которого позволит установить рациональные режимы ввода слитков, обеспечивающие наиболее благоприятные условия для их расплавления в сталеразливочном ковше или ковше-печи.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Моделирование процесса плавления чушкового алюминия при раскислении и доводке стали в ковше. / Вихлевщук В. А., Носов К. Г., Поляков В. Ф. и др. // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1988. — №9. — С.31—34.
2. Бабенко М. В., Павлюченков И. А. Раскисление металла с использованием алюминиевых стержней с защитным покрытием при внепечной доводке стали. // А.Ясауи атындыгы Халькааралык казактурк университетинін хабаршысы. № 1. 2008. С. 61—65.
3. Компьютерный расчет плавления алюминиевого стержня с защитным покрытием при разработке ресурсосберегающей технологии раскисления стали. / Павлюченков И. А., Бабенко М. В., Болотов В. Ю., Толстых Ю. М. // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). Випуск 1 (9). 2008. С.3—8.
4. Расчет кинетики плавления материалов в расплаве при несимметричных граничных условиях. / Павлюченков И. А., Бабенко М. В., Волошин Р. В. и др. // Херсонский национальный университет. «Весник». № 35. 2009 г. С. 342—348.
5. Волошин Р. В. Математическое моделирование процесса плавления алюмосодержащего слитка при выпуске металла из конвертера в сталеразливочный ковш. / Математичне моделювання. №1(24). 2011 г. С. 32—34.