

Математическое моделирование процесса плавения алюмосодержащего слитка при выпуске металла из конвертера в сталеразливочный ковш

ВОЛОШИН Р.В.

Днепродзержинский государственный технический университет

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. Высокая стоимость алюминия приводит металлургов к постоянному поиску пути снижения его расхода. Одним из решений поставленной задачи является увеличения плотности алюминиевого слитка путем ввода утяжелителя и с одновременной изоляцией его поверхности от воздействия окислительного шлака. В предлагаемой работе с использованием математического моделирования проведено исследование процесса плавения алюминиевого слитка в зависимости от толщины защитного покрытия и массы утяжелителя.

Для розкиснення сталі в ковші при випуску плавки з агрегату зазвичай використовується алюміній в чушках. Алюміній значно легший за сталь, тому закинуті в ківш чушки алюмінію спливають на поверхню шлаку інтенсивно взаємодіють з атмосферою і зі шлаком. Висока вартість алюмінію призводить металургів до постійного пошуку шляху зниження його витрат. Одним з рішень поставленої задачі є збільшення щільності алюмінієвого зливку шляхом вводу обважнювача і з одночасною ізоляцією його поверхні від впливу окислювального шлаку. В запропонованій роботі з використанням математичного моделювання проведено дослідження процесу плавлення алюмінієвого зливку в залежності від товщини захисного покриття і маси обважнювача.

The aluminum in the irons often uses for the deoxidizing of steel into the ladle by tapping out of an aggregate. Aluminum is lightest than steel so blushed in the ladle irons surface slag intensively interact with atmosphere and slag. Aluminum's high cost leads metallurgists to the constant search the way of cutting it consumption. One of the solutions this assigned task are increase density aluminum ingot by introducing weighting and with simultaneous isolation its surface from the influence oxidizing slag. In this work using mathematics modeling had been conducted study of the melting process of aluminum ingot depending of the thickness of the protective coating and mass weighting.

Введение. Внепечная обработка металла является одним из наиболее эффективных направлений коренного повышения качества металла и ресурсосбережения в металлургии. Одной из основных операций внепечной обработки является уменьшение в расплаве растворенного в нем кислорода. Эта операция называется раскиснением и, как правило, осуществляется путем введения в жидкий металл алюминия в чушках при выпуске его в ковш из сталеплавильного агрегата. Алюминий значительно легче стали, поэтому заброшенные в ковш чушки алюминия всплывают на поверхность шлака, интенсивно взаимодействуя с атмосферой и со шлаком. При использовании упомянутых изделий 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 алюмосодержащего слитка путем ввода утяжелителя и с одновременной изоляцией его поверхности.

Постановка задачи. Данная задача относится к задачам теплопроводности с подвижными границами раздела фаз. Для ее решения использована разностная схема, основанная на учете скрытой теплоты плавления по методу Дюзимбера [1]. Метод был применен в одномерной постановке при решении задачи плавления чушкового алюминия при раскислении и доводке стали в сталеразливочном ковше [2], а также для исследования кинетики плавления алюминиевой и порошковой проволоки при вводе в жидкую сталь [3, 4]. Данный метод был применен также при решении двухмерной задачи плавления алюминиевого цилиндра с защитным покрытием [5]. Целью статьи является разработка алгоритмов расчета (на основе метода

Дюзимбера) кинетики плавления кусковых материалов цилиндрической формы в расплаве при несимметричных граничных условиях.

При вводе слитка в процессе выпуска металла из конвертера в сталеразливочный ковш он будет находиться вначале в объеме расплава, а затем всплывет на границу шлак-металл (рис. 1). После расплавления намерзшей стальной оболочки и затем чугунной оболочки часть жидкого алюминия всплывет на шлак, а частично конвективными потоками металла разнесется в объеме металла.

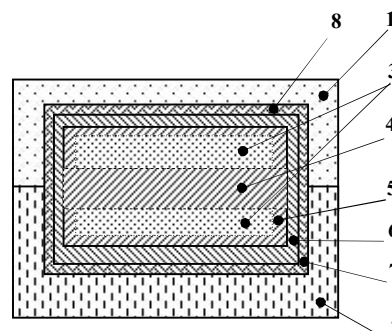


Рис. 1. Схема к процессу плавления алюминиевого слитка с защитным покрытием и утяжелителем, который расположен на границе шлак-металл: 1 - шлаковый расплав; 2 - металлический расплав; 3 - алюминий; 4 - утяжелитель (чугун); 5 - защитная оболочка (чугун); 6 - намерзшая стальная оболочка в процессе нахождения слитка в объеме металлического расплава; 7 - намерзшая стальная оболочка в процессе плавления слитка на границе шлак-металл; 8 - намерзшая шлаковая оболочка;

Для разработки математической модели и проведения расчетов слиток представлен в виде цилиндра диаметром 70 мм и длиной 700 мм и расположен на границе шлак-металл (рис. 1). Предполагаем, что теплофизические параметры слитка и защитного покрытия не зависят от температуры. Принимаем, что тепловой поток по длине слитка не значителен. Поэтому трехмерная задача нагрева и плавления слитка сводится к двумерной (по радиусу r и углу φ).

Математическая модель. Уравнение теплопроводности для трех фаз слитка (твердой, двухфазной, жидкой):

$$C_{эф}\rho \frac{\partial T(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} \right], \quad (1)$$

$$0 > r > R_0, \quad 0 < \varphi < \pi$$

где $C_{эф}$ - эффективная теплоемкость и плотность определяются в виде:

$$C_{эф}(T) = \begin{cases} c_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ c_{мс}(t) Q_{мс} \frac{d\psi(t)}{dt}, t_S^T < T < t_L^T \\ c_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho(t) = \begin{cases} \rho_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ (\rho_{мс}(t) + \rho_{жс}(t))/2, t_S^T < T < t_L^T \\ \rho_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases} \quad (3)$$

$$\lambda(t) = \begin{cases} \lambda_{жс}(t), T \geq t_L^T \\ (\lambda_{жс}(t) + \lambda_{мс}(t))/2, t_S^T < T < t_L^T \\ \lambda_{мс}(t), T \leq t_S^T \end{cases} \quad (4)$$

Распределение температур в утяжелителе и защитной оболочке имеет вид:

$$C_ч\rho_ч \frac{\partial T_ч(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda_ч \frac{\partial^2 T_ч}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T_ч}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda_ч \frac{\partial^2 T_ч}{\partial \varphi^2} \right], \quad (5)$$

$$0 > r > R_v, \quad 0 < \varphi < \pi \text{ - в утяжелителе}$$

$$R_0 > r > R_ч, \quad 0 < \varphi < \pi \text{ - в защитной оболочке чугуна}$$

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

$$\frac{\partial t(r, 0, \tau)}{\partial \varphi} = 0 \quad (6)$$

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 α_m . Между намерзшими оболочками металла, шлака, защитной оболочкой и поверхностью цилиндра существует идеальный тепловой контакт, т.е. заданы граничные условия IV рода.

Распределение температур в затвердевшей оболочке металла имеет вид:

$$c\rho \frac{\partial T(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right], \quad (6)$$

$$r > R_ч, \quad (\varphi_0 < \varphi < \pi)$$

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

$$\alpha(t(r, \varphi, \tau) - t)$$

$$-\lambda \frac{\partial t_m(P_m)}{\partial n} = -\rho_m Q_m W(P_m); \quad t(P) = t_v \quad (7)$$

где t_v - температура нулевой жидкотекучести (выливаемости) металла

Распределение температур в затвердевшей оболочке шлака имеет вид:

$$c_{ш}\rho_{ш} \frac{\partial T_{ш}(r, \varphi, \tau)}{\partial \tau} = \left[\lambda_{ш} \frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial r^2} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{ш}}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \left[\lambda_{ш} \frac{\partial^2 T_{ш}}{\partial \varphi^2} \right], \quad (8)$$

$$r > R_ч, \quad (0 < \varphi < \varphi_0)$$

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

$$\alpha(t(r, \varphi, \tau) - t) - \lambda \frac{\partial t(P)}{\partial n} = -\rho Q W(P); \quad (P_h) = t_{ш}^{ш} \quad (9)$$

В качестве начального условия выбирается равномерное распределение температур в слитке, утяжелителе и защитной оболочке.

Коэффициент теплоотдачи от жидкого металла определяли по данным из следующего критериального уравнения, в котором за характерный размер d принят удесятеренный диаметр слитка.

$$Nu = \frac{0,037 Re^{0,8} Pr}{1 + 2,433 Re^{-0,11} (Pr^{2/3} - 1)} \quad (10)$$

где Re , Pr , Nu - критерии Рейнольдса, Прандтля и Нуссельта соответственно.

Расчетная область принята в виде половины поперечного сечения цилиндра (рис. 2). Для решения задачи формируем квадратную координатную сетку. Разобьем рассматриваемую половину сечения вертикальными и горизонтальными линиями как это показано на рисунке 2. Получим контрольные объемы с координатами i, j . Значения температур будем определять в центре контрольных объемов. Задаем M_0 - начальное количество узлов по радиусу. В алгоритме расчета используется явная разностная схема. Алгоритм расчета приведен в работе [6]. Теплофизические параметры алюминия, чугуна и металла взяты из работы [7].

Слиток бросают (согласно технологической инструкции используемой в конвертерном цехе Днепровского металлургического комбината) с высоты 7м в металлический расплав при заполнении 1/3 заполнения ковша. Согласно технологической инструкции, подаваемые в ковш слитки должны расплавиться при заполнении 2/3 ковша.

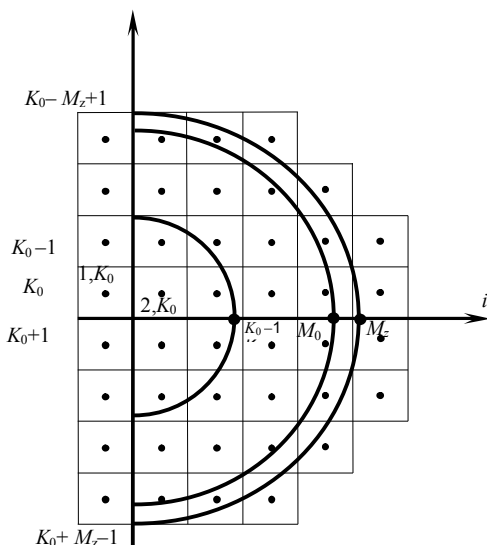


Рис. 2. Расчетная область к задаче плавления алюминосодержащего слитка с защитной оболочкой и утяжелителем, который расположен на границе шлак-металл

Принимая среднюю длительность заполнения ковша равную 7 минутам, время расплавления слитков не должно превышать 140 сек. Расчет гидродинамики процесса заполнения ковша проведен по методике, приведенной в работах [8,9]. Проведены расчеты плавления алюминиевых слитков весом, не превышающим 17,6 кг (для условий Днепровского металлургического комбината) в зависимости от процентного содержания алюминия с различными размерами утяжелителя и защитной оболочки. Различные варианты указанных слитков приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№	Al, %	Диаметр цилиндра, мм	Диаметр утяжелителя, мм	Но, Толщина оболочки, мм	Вес цилиндра, кг
1	40	66	38	5	17,5
2	50	74	33	4	17,5
3	60	82	28	3	17,5
4	70	88	26	2	17,4
5	80	94	24	1	17,6
6	90	100	24	0	17,4
7	100	106	0	0	17,6

Результаты расчетов: При малом (40%) процентном содержании алюминия слиток достаточно быстро всплывает на поверхность расплава за 1 сек, поэтому основной процесс плавления происходит на поверхности шлак-металл. В момент всплытия на поверхность слиток уже приобрел плотность 5377 (кг/м³), при этом уровень шлака составляет 0,59 – это свидетельст-

вует, что слиток чуть больше половины своего диаметра погружен в металл. По завершении процесса плавления (спустя 9,6 сек) слиток будет иметь плотность 4053 (кг/м³) и массу 11,9 кг. Аналогично, при (50%) слиток также достаточно быстро всплывает на поверхность расплава за 1 сек. В момент всплытия на поверхность слиток уже приобрел плотность 5014 (кг/м³), уровень шлака составляет 0,5. По завершении процесса плавления (спустя 8 сек) слиток будет иметь плотность 3668 (кг/м³) и массу 13,2 кг. При процентном содержании алюминия свыше 50% слиток не успевает расплавиться в течение 140 сек.

Выводы

Результаты вычислительного эксперимента позволяют установить рациональные режимы ввода кусковых добавок из различных материалов, обеспечивающие наиболее благоприятные условия для их расплавления в сталеразливочном ковше или ковше-печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Павлюченков И. А. Численное моделирование (на основе метода Дюзимбера) процессов плавления тел в расплаве // Математичне моделювання.—1997.— №2 С. 37 — 43.
2. Моделирование процесса плавления чушкового алюминия при раскислении и доводке стали в ковше/ В. А. Вихлевщук, К. Г. Носов, В. Ф. Поляков [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1988 — №9 — С. 31-34.
3. Исследование процесса плавления алюминиевой проволоки при вводе в сталь. В. А. Вихлевщук, И. А. Павлюченков, В. Г. Щербинский [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия.—1988.—№2.— С. 32-38.
4. Исследование кинетики плавления порошковой проволоки при вводе в жидкую сталь / И. А. Павлюченков, В. А. Вихлевщук, В. И. Тимошпольский [и др.] // Изв. вузов. Энергетика. — 1992. — №9—10. — С. 87-91.
5. Бабенко М. В Алгоритм расчета (на основе метода Дюзимбера) двухмерной задачи плавления цилиндра в расплаве / М. В Бабенко, И. А. Павлюченков // Металургійна теплотехніка: Зб. наук. праць Національної металургійної академії України. — Дніпропетровськ: ПП Грек О. С., 2006. С. 3 — 7.
6. Изучение свойств ферросплавов и лигатур для микролегирования и раскисления стали / В. С. Игна-тьев, В. А. Вихлевщук, В. М. Черногрицкий [и др.] // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1988. — №6. — С. 37 — 42.
7. Огурцов А. П., Самохвалов С. Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. — К.: Наукова думка, 1993. — 220 с.
8. Самохвалов С. Е. Теплофізичні процеси в багатofазних середовищах: теоретичні основи комп'ютерного моделювання. — Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. — 172 с.