

## Алгоритм расчета кинетики плавления алюмосодержащего тугоплавкого цилиндра в сталеразливочном ковше на границе шлак-металл

ВОЛОШИН Р.В.

Днепропетровский государственный технический университет

Висока вартість розкислювачів різного хімічного і гранулометричного складу, втрати цих матеріалів (що супроводжуються їх винесенням на поверхню шлак-метал), недостатня вивченість кінетики плавлення добавок на межі шлак-метал в сталеразливочному ковші приводе до неефективного використання цих добавок. Задачею нашого дослідження є вивчення масообмінних процесів при плавленні розкислювачів (домішок) на межі шлак-метал в сталеразливочному ковші при позапічній обробці металу

Высокая стоимость раскислителей различного химического и гранулометрического состава, потери этих материалов (сопровождающиеся их выносом в шлаковый покров на поверхность металла), малоизученность кинетики плавления добавок на границе шлак-металл в сталеразливочном ковше приводят к неэффективному использованию этих добавок. Задачей нашего исследования является изучение тепломассообменных процессов при плавлении раскислителей (добавок) на границе шлак-металл в сталеразливочном ковше при внепечной обработке металла.

The high cost of deoxidizing agents with different chemical and granulometric composition, the loss of these materials (accompanied by their removal of slag cover on the metal surface), little-studied the kinetics of fusion of additives on the border of slag-metal ladle lead to inefficient use of these additives. The aim of our research is to study heat and mass transfer processes during melting deoxidizing agents (additives) on the border of the slag-metal ladle furnace for metal processing.

**Введение.** Основной задачей черной металлургии являются: ресурсосбережение при производстве стали, повышение ее качества и свойств, обеспечение конкурентоспособности продукции на мировом рынке [1,2]. В настоящее время сталеплавильное производство предусматривает выплавку полупродукта с последующей внепечной обработкой в сталеразливочном ковше или ковше-печи.

Раскисление – одна из основных операций внепечной обработки металла. Предназначено для уменьшения в расплаве растворенного в нем кислорода. Операция эта осуществляется, как правило, путем ввода в жидкий металл чушкового алюминия при выпуске стали в ковш из сталеплавильного агрегата.

Раскисление стали в ковше алюминиевыми слитками (чушками) во время выпуска плавки сопровождается значительным угаром алюминия (80-95 %), происходит это из-за низкой плотности ( $2,7 \text{ г/см}^3$ ) алюминия. Он не проникает вглубь расплава, плавает на его поверхности, окисляется кислородом атмосферы и шлака. Дефицит и высокая стоимость алюминия, заставляют металлургов искать различные пути снижения его расхода.

Исследование теплообменных процессов при плавлении алюмосодержащих добавок на границе шлак-металл в сталеразливочном ковше, ковше-печи при внепечной обработке металла актуальны для металлургической практики [3].

Высокая температура, непрозрачность и агрессивность жидкого металла не позволяют достаточно эффективно в промышленных условиях исследовать указанные процессы усвоения алюмосодержащих сплавов на основе железа, поэтому для их изучения предпочтительно отдается методам математического моделирования [4].

**Цель работы.** Подтвердить, что используемые мною математическая модель и алгоритм расчета, а также программное обеспечение для расчета кинетики плавления тугоплавкого, алюмосодержащего тела

цилиндрической формы верно описывает процесс его плавления на границе шлак-металл.

**Постановка задачи.** Анализируя технологию металлургического процесса раскисления, мы пришли к выводу, что определение температурного поля и кинетики плавления тел в расплаве относится к классу задач теплопроводности с подвижными границами раздела фаз. Для решения задач теплопроводности с подвижными границами раздела фаз применяются, как правило, численные методы. Среди численных методов наиболее универсальным является метод конечных разностей. Довольно эффективной является разностная схема, основанная на учете скрытой теплоты плавления по методу Дюзимбера. Данный метод ранее не применялся для решения двухмерных задач плавления кусковых материалов находящихся на границе шлак-металл, (при несимметричных граничных условиях).

**Математическая модель.** Рассмотрим процесс плавления цилиндра из тугоплавкого материала, который расположен на границе шлак-металл. (рис.1). Принимаем, что температуры жидкого металла  $t_m$  и жидкого шлака  $t_{ш}$  постоянны и выше температуры  $t_{пл}$  плавления цилиндра. Принимаем также, что перед всплытием на границу шлак-металл вся поверхность цилиндра не имеет намерзших оболочек шлака и металла

Распределение температур в цилиндре-куске описывается двухмерным уравнением теплопроводности:

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

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

где:  $t$  – температура,  $r$ ,  $\vartheta$  – текущие значения радиуса и угла соответственно;

$\rho$ ,  $C$ ,  $\lambda$  – плотность, теплоемкость, теплопроводность материала цилиндра.

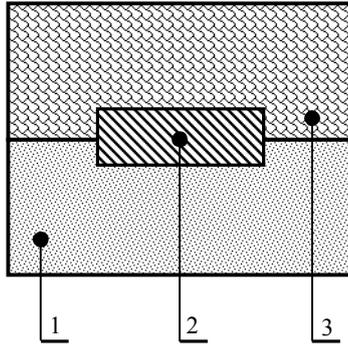


Рис.1. Схема к процессу плавления расположенного на границе шлак-металл цилиндра из тугоплавкого материала: 1 – расплав металла; 2 – расположенный на границе шлак-металл алюминоносодержащий, тугоплавкий цилиндр; 3 – расплав шлака.

Распределение температур в затвердевшей оболочке металла имеет вид:

$$C_i \rho_i \frac{\partial t_i}{\partial \tau} = \frac{\lambda_i}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial t_i}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_i}{r^2} \left[ \frac{\partial t_i^2}{\partial \vartheta_i^2} \right] \quad (2)$$

$$r > R_0, (0 < \vartheta < \pi)$$

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

$$\alpha_i (t_i(r, \vartheta, \tau) - t_m^i) \lambda_i \frac{\partial t_i(P_i)}{\partial n} = -\rho_i Q_i W(P_i); \quad (3)$$

$$t(P_i) = t_m^i$$

Распределение температур в затвердевшей оболочке шлака описывается аналогичным уравнением теплопроводности:

$$C_o \rho_o \frac{\partial t_o}{\partial \tau} = \frac{\lambda_o}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial t_o}{\partial r} \right] + \frac{\lambda_o}{r^2} \left[ \frac{\partial t_o^2}{\partial \vartheta_o^2} \right] \quad (4)$$

$$r > R_0, (0 < \vartheta < \vartheta_0)$$

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

$$\alpha_o (\dot{t}_o(r, \vartheta, \tau) - t_m^o) \lambda_o \frac{\partial \dot{t}_o(P_o)}{\partial n} = -\rho_o Q_o W(P_o); \quad (5)$$

$$\dot{t}(P_o) = t_m^o$$

После завершения периодов намерзания и последующего плавления металлической оболочки происходит подогрев поверхности цилиндра до температуры его плавления  $t_{i\bar{e}}$ . На нижней поверхности цилиндра ( $\vartheta_0 < \vartheta < \pi$ ) происходит конвективный теплообмен с жидким металлом с заданным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_i$ :

$$\alpha_i [t_i - t(R_0, \vartheta, \tau)] = -\lambda \frac{\partial t(R_0, \vartheta, \tau)}{\partial n}, \quad (\vartheta_0 < \vartheta < \pi) \quad (6)$$

После завершения периодов намерзания и последующего плавления шлаковой оболочки происходит подогрев поверхности цилиндра до температуры его плавления  $t_{i\bar{e}}$ . На верхней поверхности цилиндра ( $0 < \vartheta < \vartheta_0$ ) происходит конвективный теплообмен с жидким шлаком с заданным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_o$ :

$$\alpha_o [t_o - t(R_0, \vartheta, \tau)] = -\lambda \frac{\partial t(R_0, \vartheta, \tau)}{\partial n}, \quad (0 < \vartheta < \vartheta_0) \quad (7)$$

За начальное условие выбираем распределение температур в цилиндре в момент его всплытия на поверхность металл-шлак.

#### Алгоритм расчета плавления цилиндра с использованием квадратной сетки:

Расчетной областью выбрана половина поперечного сечения цилиндра (рис.2). Для решения задачи формируем квадратную координатную сетку, разобива рассматриваемую половину сечения вертикальными и горизонтальными линиями (как это показано на (рис.2)). В итоге получим контрольные объемы с координатами  $i, j$ . Значения температур будем определять в центре каждого из контрольных объемов. Задаем  $M_0$  – начальное количество узлов по радиусу. В предлагаемом алгоритме расчета используется явная разностная схема. вводятся матрицы температур  $t_{i,j}^n$  и

$t_{i,j}^{n+1}$  для  $(n)$  и  $(n+1)$  временных слоев. Для учета условия симметрии задаем дополнительный столбец температур  $t_{1,j}^n$ . Равенство 0 тепловых потоков на оси симметрии учитывается посредством присвоения на каждом временном слое значений температур соответствующих столбцов:  $t_{1,j}^n = t_{2,j}^n$ .

В результате такого подхода к решению все контрольные объемы расчетной области являются внутренними, что существенно упрощает составление программы расчета.

В программу расчета вводим матрицы теплофизических параметров плотности

$$\rho_{i,j}^n, \text{ теплопроводности } \lambda_{i,j}^n \text{ и теплоемкости}$$

$C_{i,j}^n$ , куда заносятся соответствующие значения параметров материала цилиндра на каждом временном слое, затвердевшего металла в зависимости от температуры.

Хотелось бы отметить что для решения данной задачи используется только одно обобщенное уравнение для расчета температур на “ $n+1$ ” временном слое. Оно имеет следующий вид:

$$t_{i,j}^{n+1} = t_{i,j}^n + r_z (t_{i-1,j}^n - t_{i,j}^n) - r_v (t_{i,j}^n - t_{i+1,j}^n) + r_s (t_{i,j-1}^n - t_{i,j}^n) - r_j (t_{i,j}^n - t_{i,j+1}^n) \quad (8)$$

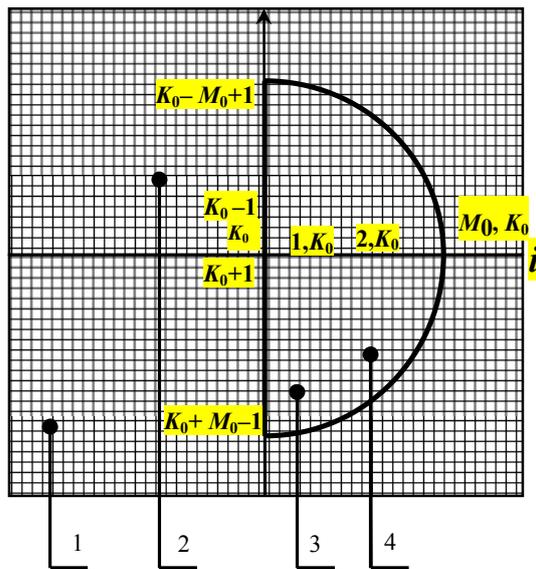


Рис.2. Расчетная область к задаче плавления тугоплавкого цилиндра, расположенного на границе шлак-металл; 1 – расплав металла; 2 – расплав шлака; 3 – квадратная ячейка разбиения; 4 – половина поперечного сечения тугоплавкого цилиндра.

Для расчета процесса намерзания и последующего плавления металлической оболочки вычисляется, согласно метода Дюзимбера, избыточная температура:

$$t_u = t_v + r_z(t_{i-1,j}^n - t_v) - r_v(t_v - t_{i+1,j}^n) + r_s(t_{i,j-1}^n - t_v) - r_j(t_v - t_{i,j+1}^n) \quad (9)$$

где  $t_v$  - температура нулевой жидкотекучести (выливаемости) металла. Если значение избыточной температуры  $t_u$  меньше температуры нулевой жидкотекучести металла  $t_v$ , то на данном временном слое происходит процесс намерзания металла. Если значение избыточной температуры  $t_u$  больше температуры нулевой жидкотекучести металла  $t_v$ , то на данном временном слое происходит процесс расплавления намерзшего металла.

Аналогично, для расчета процесса намерзания и последующего плавления шлаковой оболочки вычисляется, согласно метода Дюзимбера, избыточная температура:

$$t_u = t_m^h + r_z(t_{i-1,j}^n - t_m^h) - r_v(t_m^h - t_{i+1,j}^n) + r_s(t_{i,j-1}^n - t_m^h) - r_j(t_m^h - t_{i,j+1}^n) \quad (10)$$

где  $t_m^h$  - температура плавления шлака.

Если значение избыточной температуры  $t_u$  меньше температуры плавления шлака  $t_m^h$ , то на данном временном слое происходит процесс намерзания шлака.

После расчета процесса подогрева цилиндра на данном временном слое производится расчет плавления контрольных объемов в цилиндре, которые прогрелись до температуры плавления.

Для каждого контрольного объема, имеющего температуру плавления цилиндра  $t_{i\bar{e}}$ , вычисляется избыточная температура:

$$t_u = t_{i\bar{e}} + r_z(t_{i-1,j}^n - t_{i\bar{e}}) - r_v(t_{i\bar{e}} - t_{i+1,j}^n) + r_s(t_{i,j-1}^n - t_{i\bar{e}}) - r_j(t_{i\bar{e}} - t_{i,j+1}^n) \quad (11)$$

Расчет по данному алгоритму заканчивается при условии, что все контрольные объемы расплавились.

**Результаты расчетов.** Ниже приведены результаты расчета времени плавления для тугоплавких алюмосодержащих цилиндров диаметром 5,25,50мм, при количестве расчетных объемов 5, 10, 15,25,1.

Таблица 1. Результаты расчетов времени плавления тугоплавкого цилиндра в сталеразливочном ковше на границе шлак-металл с различным количеством разбиений на контрольные объемы

Диаметр цилиндра, мм	Количество разбиений 5	Количество разбиений 10	Количество разбиений 15	Количество разбиений 25
5	1,5 сек.	1,5 сек.	1,5 сек.	1,5 сек.
25	19,8 сек.	19,5 сек.	19,2 сек.	18 сек.
50	56,3 сек.	56,1 сек.	57,3 сек.	56,7 сек.

### Выводы

Из данных результатов расчета видно, что количество разбиений расчетной области не оказывает влияние на результаты расчета. Тем самым, подтверждая, что разработанная нами математическая модель, алгоритм расчета и программное обеспечение для решения задачи плавления тугоплавкого алюмосодержащего цилиндра на границе шлак-металл, является устойчивыми и верно описывают тепловые процессы плавления.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Болотова Ю.А., Павлюченков И.А., Самохвалов С.Е. Математическая модель расплавления алюмосодержащего сплава при доводке стали в сталеразливочном ковше // Новые технологии. – 2005. – №1-2(7-8). – С. 218-225.
2. Болотова Ю.А., Павлюченков И.А. Исследование процессов расплавления слитков алюмосодержащих сплавов на основе железа методами математического моделирования // Сборник научных трудов НМетАУ “Металлургическая теплотехника”. – 2005. – №1. – С. 329 – 338.
3. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства. – К.: Наукова думка, 1993. – 220 с.
4. Самохвалов С.Е. Теплофізичні процеси в багатofазних середовищах: теоретичні основи комп’ютерного моделювання. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 1994. – 172с.