

## Математическое моделирование рациональных режимов усвоения алюминиевого стержня с защитным покрытием при выпуске металла в сталеразливочный ковш

*М.В. БАБЕНКО, А.П. ОГУРЦОВ, И.А. ПАВЛЮЧЕНКОВ*

Днепродзержинский государственный технический университет

Проведено математическое моделирование рациональных режимов усвоения алюминиевого стержня с защитным покрытием при выпуске металла в сталеразливочный ковш. На основе полученных данных проведена оценка длительности проплавления защитного слоя в зависимости от температуры металла в ковше.

Проведено математичне моделювання раціональних режимів засвоєння алюмінієвого стержня із захисним покриттям при випуску металу у сталеразливний ківш. На основі отриманих даних проведено оцінювання тривалості проплавлення захисного слою в залежності від температури металу у ковші.

Mathematical modeling of rational mode assimilations of aluminum shaft with defensive covering during metal casting into scoop have been conducted. The estimation of melting duration of defensive layer depending on the temperature of the metal into scoop have been made on the base of data obtained.

**Постановка проблемы.** Рациональное использование сырьевых ресурсов при выпечной обработке металла является одной из важнейших задач современного сталеплавильного производства и в значительной мере определяется эффективностью проведения ряда технологических операций выпечной обработки металла: раскислением, рафинированием, легированием металла редкоземельными элементами, модифицированием и т.д.

Неотъемлемой составной частью указанных технологических операций является плавление твердых материалов в жидком металле сталеразливочного ковша, поэтому исследование кинетических закономерностей при плавлении твердых материалов является актуальной задачей для практики.

Процессы с применением алюминия в металлургии находятся в постоянном развитии и совершенствовании. Разнообразие алюминиевых материалов применяемых в виде гранул и проволоки в металлургической оболочке или без нее; традиционные или специальной формы слитки; алюмосодержащие отходы и специальные брикеты предопределяет и различные технологические приемы их применения особенно на стадии раскисления и легирования и преследуют общую цель – снизить расход элемента и обеспечить стабильный ход операции.

**Анализ исследований и публикаций.** Особенности таких видов алюминиевых и алюмосодержащих материалов и способы их применения достаточно полно отражены в технической литературе [5-7]. Что касается сведений о применении алюминия, поверхность которого защищена покрытием из различных материалов, то они немногочисленны и отражены в работах [8, 9].

**Постановка задания.** В мартеновском цехе Днепропетровского металлургического комбината прошла промышленное опробование ресурсосберегающая технология раскисления металла алюминием, суть которой заключается во вводе под уровень металла двух комплектов алюминиевых чушек (вставок) с плавками защитными оболочками, устанавливаемых в 250 т ковш до выпуска плавки мостовым краном с помощью специального приспособления. Защитное покрытие выполняло роль замедлителя достижения алюминиевым стержнем температуры, при которой происходит его плавление, и способствовало таким образом заглужению реакции рас-

кисления под уровень расплава при непрерывном его повышении в результате схода металла из печи в ковш [1].

С целью определения рациональной толщины защитного покрытия, предотвращающего плавление алюминиевого стержня в процессе выпуска металла в ковш, в предлагаемой работе проведено математическое моделирование нагрева и плавления защитного покрытия. Нагрев и последующее плавление стержня, который устанавливается в сталеразливочный ковш вертикально к поверхности расплава, начинается с момента, когда уровень жидкого металла достигает нижней поверхности защитного покрытия. По мере поступления металла на боковой поверхности защитного покрытия происходит конвективный теплообмен с жидким металлом. На свободной от металла поверхности защитного покрытия осуществляется конвективный теплообмен с окружающей атмосферой.

Учитывая, что форма поперечного сечения стержня близка к квадрату (150×170 мм), поперечное сечение слитка заменяется на круг эквивалентного диаметра. В качестве расчетной области выбран вертикальный разрез стержня относительно его оси симметрии.

Геометрические параметры стержня задаются размерами в радиальном направлении радиусом эквивалентного круга  $R$  и толщиной боковой поверхности защитного покрытия  $h_b$ ; в вертикальном направлении, соответственно высотой стержня  $H$  (Рис. 1). Принимали, что толщина днища  $h_d$  совпадает с толщиной боковой поверхности защитного покрытия.

Распределение температур в стержне описывается двумерным уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат:

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

где  $\lambda = \lambda_r$ ,  $\rho \cdot c = \rho_r \cdot c_r$  при  $t < t_{пл}$

где  $\lambda = \lambda_ж$ ,  $\rho \cdot c = \rho_ж \cdot c_ж$  при  $t > t_{пл}$

индекс “r” обозначает твердую фазу алюминия, а индекс “ж” - жидкую фазу алюминия;  $t$  - температура °C;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности;  $\rho$  - плотность;  $c$  - теплоемкость алюминия;  $t_{пл}$  - температура плавления алюминия.

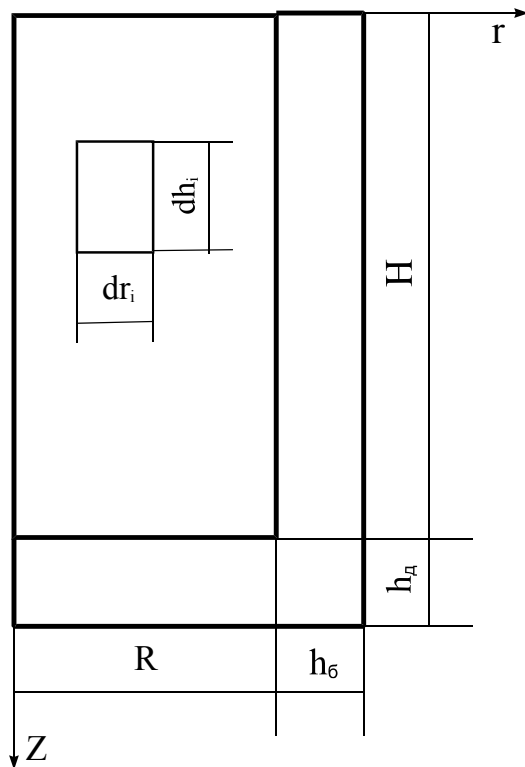


Рис. 1. Расчетная область

Уравнение (1) описывает распределение температур в каждой из фаз двухфазного тела. Пусть точка P принадлежит границе плавления в алюминиевом стержне. На фронте двух фаз выполняется условие движения границы плавления:

$$\lambda_{\tau} \frac{\partial t(p-0)}{\partial \bar{n}} - \lambda_{\text{ж}} \frac{\partial t(p+0)}{\partial \bar{n}} = \rho_{\tau} Q_{\text{пл}} \omega(p), \quad (2)$$

$\omega(p)$  - скорость перемещения точки P вдоль нормали  $\bar{n}$  к подвижной границе;  $Q_{\text{пл}}$  - скрытая теплота плавления алюминия.

Распределение температур в слое защитного покрытия имеет вид:

$$\rho_{\text{п}} \cdot c_{\text{п}} \frac{\partial t_{\text{п}}(r, z, \tau)}{\partial \tau} = \lambda_{\text{п}} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \frac{\partial t_{\text{п}}(r, z, \tau)}{\partial r} \right] + \lambda_{\text{п}} \frac{\partial^2 t(r, z, \tau)}{\partial r^2}, \quad (3)$$

$$R < r < R+h_b; z < H \quad \text{или} \quad H < z < H+h_d; 0 < r < R+h_b,$$

индекс "п" обозначает защитное покрытие

*Граничные условия.* Вдоль оси симметрии стержня тепловой поток равен 0, то есть:

$$\frac{\partial t(0, z, \tau)}{\partial r} = 0. \quad (4)$$

На верхней торцевой поверхности стержня тепловой поток также равен нулю. На границах раздела стержня и покрытия задан идеальный тепловой контакт.

На внешней боковой и нижней поверхностях защитного покрытия теплообмен происходит в результате конвекции с жидким металлом:

$$-\lambda_{\text{п}} \frac{\partial t_{\text{п}}(r, z, \tau)}{\partial \bar{n}_i} = \alpha_i (t(r, z, \tau) - t_{\text{ж}}), \quad (5)$$

где  $\bar{n}_i$  - нормаль к соответствующим поверхностям;  $\alpha_i$  - коэффициент теплоотдачи, принимающий значения  $\alpha_b$  (боковая поверхность защитного покрытия,  $\alpha_d$  (нижняя поверхность стержня и покрытия)  $t_{\text{ж}}$  - температура металла в ковше.

Значения коэффициента теплоотдачи при обтекании нижней поверхности защитного покрытия  $\alpha_d$  определяется в виде [2]:

$$\text{Re} = V_d \cdot (2 \cdot R + h_b) / \nu; \quad \text{Pe} = \text{Pr} \cdot \text{Re}; \quad \text{Nu} = 0,46 \cdot \text{Pe}^{0,65}$$

$$\alpha_d = \frac{\lambda_{\text{ж.м.}} \cdot \text{Nu}_d}{(2 \cdot R + h_b)}, \quad (6)$$

где:  $V_d$  - горизонтальная составляющая скорости обтекания нижней поверхности защитного покрытия;  $\lambda_{\text{ж.м.}}$  - теплопроводность жидкого металла;  $\nu$  - вязкость расплава.

Значения коэффициента теплоотдачи при обтекании боковой поверхности защитного покрытия  $\alpha_b$  определяется в виде:

$$\text{Re} = V_b H_y / \nu; \quad \text{Pe} = \text{Pr} \cdot \text{Re}; \quad \text{Nu} = 0,46 \cdot \text{Pe}^{0,65}$$

$$\alpha_b = \frac{\lambda_{\text{ж.м.}} \cdot \text{Nu}_b}{H_y}, \quad (7)$$

где:  $V_b$  - вертикальная составляющая скорости обтекания боковой поверхности защитного покрытия;  $H_y$  - высота стержня покрытого металлом.

Начальное распределение температуры в стержне и покрытии принимается равномерным и равным 20 °С.

Значения скоростей обтекания  $V_d$  и  $V_b$  взяты из решения двухмерной осесимметрической задачи гидродинамики выпуска металла из кислородного конвертера в сталеразливочный ковш [3]. Данная задача решалась в естественных переменных методом расщепления по физическим факторам [4].

Для численного решения задачи нагрева и плавления защитного покрытия впервые для решения двухмерной задачи используется метод Дюзимбера, который успешно применялся при решении одномерных задач плавления материалов [3]. При проведении расчетов выбрана неравномерная расчетная сетка, с точками сгущения вблизи контакта поверхности стержня и защитного покрытия.

В соответствии с геометрией решаемой задачи разбиваем всю расчетную область на элементарные ячейки (контрольные объемы). Для облегчения расстановки граничных условий расчетная область окаймляется со всех сторон одним слоем контрольных объемов. Поэтому, например, ближайшая к оси симметрии ячейка будет номеровать как (2,j) [12]. Вводятся матрицы температур  $t[i,j]$  и  $t1[i,j]$  ( $1 \leq i \leq M+1$ ;  $1 \leq j \leq N+1$ ). Первая из матриц содержит значения температур на предыдущем "n" временном слое, а вторая - значение температур на последующем (искомом) "n+1" временном слое.

Равенство 0 тепловых потоков на оси симметрии и на верхней поверхности стержня и покрытия учитывается посредством присвоения соответствующих столбцов и строк, а именно:  $t[1,j] = t[2,j]$  (для оси симметрии) и  $t[i,1] = t[i,2]$  (для верхней поверхности).

Вводятся матрицы теплофизических параметров плотности  $\rho[i,j]$ , теплопроводности  $\text{lam}[i,j]$  и теплоемкости  $c[i,j]$ , куда заносятся соответствующие значения параметров в зависимости от координат и температуры (для алюминиевого стержня). В расчете используется явная разностная схема. В общем случае, при использовании метода контрольного объема в явном виде для расчета температуры в контрольных объемах для всей расчетной области необходимо записать 9 уравнений баланса тепла. В данной задаче используется только одно обобщенное уравнение расчета температур на “n+1” временном слое. Оно имеет следующий вид:

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

Значение коэффициента  $r_z$  (z-”запад”) определяется по формуле:

$$r_z = \frac{2 \cdot \Delta\tau \cdot r_{i-1}}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n (r_i^2 - r_{i-1}^2) \left( \frac{\Delta r_{i-1}}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r_{i-1}}{2\lambda_{i-1,j}^n} \right)}, \quad (9)$$

где  $r_i$  - расстояние от оси симметрии до контрольного объема с номером  $i$ ;  $\Delta r_i$  - элемент массива шагов по координате в радиальном направлении.

Значение коэффициента  $r_v$  (v-”восток”) определяется в зависимости от значения температуры в контрольном объеме с номером  $(i+1,j)$ :

$$r_v = \frac{\Delta\tau \cdot r_i \cdot \alpha_6}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \quad t_{i+1,j}^n = t_{ж} \quad (10)$$

$$r_v = \frac{\Delta\tau \cdot r_i \cdot 17}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \quad t_{i+1,j}^n = t_{cp} \quad (11)$$

$$r_v = \frac{2 \cdot \Delta\tau \cdot r_i}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n (r_i^2 - r_{i-1}^2) \left( \frac{\Delta r_i}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r_{i+1}}{2\lambda_{i+1,j}^n} \right)} \quad t_{i+1,j}^n \neq t_{ж} \text{ и } t_{i+1,j}^n \neq t_{cp} \quad (12)$$

Значение коэффициента  $r_s$  (s-”север”) определяется в виде:

$$r_s = \frac{\Delta\tau}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n \cdot \Delta z_j \left( \frac{\Delta z_{j-1}}{2\lambda_{i,j-1}^n} + \frac{\Delta z_j}{2\lambda_{i,j}^n} \right)}, \quad (13)$$

где  $\Delta z_j$  - массив шагов по координате в осевом направлении.

Значение  $r_j$  (j-”юг”) определяется в зависимости от температуры в контрольном объеме с номером  $(i,j+1)$ :

$$r_j = \frac{\Delta\tau \cdot \alpha_d}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n \cdot \Delta z_j}, \quad t_{i,j+1}^n = t_{ж} \quad (14)$$

$$r_j = \frac{\Delta\tau}{\rho_{i,j}^n \cdot c_{i,j}^n \cdot \Delta z_j \left( \frac{\Delta r_j}{2\lambda_{i,j}^n} + \frac{\Delta r_{j+1}}{2\lambda_{i,j+1}^n} \right)}, \quad t_{i,j+1}^n \neq t_{ж} \quad (15)$$

Если контрольный объем с нижней и правой сторон обтекаются металлом, то  $r_i$  и  $r_v$  определяются по формулам (14) и (10), соответственно.

При обтекании контрольного объема с нижней поверхности металлом, а с правой боковой воздухом, то значение  $r_i$  определяется по формуле (14), и (11), соответственно.

Левая часть уравнения обозначает изменение теплосодержания контрольного объема с координатами  $(i,j)$  за период времени начиная с  $n \cdot \Delta\tau$  по  $(n+1) \cdot \Delta\tau$ . Второе слагаемое в правой части уравнения обозначает приток тепла посредством теплопроводности с левого соседнего контрольного объема с координатами  $(i-1,j)$  в контрольный объем с координатами  $(i,j)$ . Третье слагаемое обозначает поток тепла ушедшего с контрольного объема с координатами  $(i,j)$  в правый соседний контрольный объем с координатами  $(i+1,j)$ . При этом возможен один из 3 способов переноса тепла:

1. теплопроводностью если  $t[i+1,j]$  не равна температуре расплава или температуре окружающей среды, значение  $r_v$  при этом определяется по формуле (12);
2. конвективным теплообменом с расплавом, если  $t[i+1,j]$  равна температуре расплава, значение  $r_v$  при этом определяется по формуле (10);
3. конвективным теплообменом с окружающей средой, если  $t[i+1,j]$  равна температуре окружающей среды, значение  $r_v$  при этом определяется по формуле (11);

Четвертое слагаемое в правой части уравнения обозначает приток тепла посредством теплопроводности с верхнего соседнего контрольного объема с координатами  $(i,j-1)$  в контрольный объем с координатами  $(i,j)$ . Пятое слагаемое обозначает поток тепла ушедшего с контрольного объема с координатами  $(i,j)$  в нижний соседний контрольный объем с координатами  $(i,j+1)$ . При этом возможен один из 2 способов переноса тепла:

1. теплопроводностью если  $t[i,j+1]$  не равна температуре расплава, значение  $r_j$  при этом определяется по формуле (15);
2. конвективным теплообменом с расплавом, если  $t[i,j+1]$  равна температуре расплава, значение  $r_j$  при этом определяется по формуле (14).

Расчет по формулам (8-15) осуществляется для контрольных объемов температура которых ниже температуры плавления защитного покрытия. После расчета процесса подогрева стержня и покрытия на данном временном слое производится расчет плавления контрольных объемов в защитном покрытии которые прогрелись до температуры плавления. Для этого организуется внешний цикл по  $j$  ( $2 \leq j \leq N$ ) и внутренний цикл по  $i$  ( $2 \leq i \leq M$ ). Для каждого контрольного объема имеющему температуру равную температуре плавления покрытия вычисляется, согласно метода Дюзимбера [3], избыточная (в сравнении с температурой плавления покрытия) температура:

$$t_u = t_n + r_z(t_{i-1,j}^n - t_n) - r_v(t_n - t_{i+1,j}^n) + r_s(t_{i,j-1}^n - t_n) - r_j(t_n - t_{i,j+1}^n) \quad (16)$$

где:  $t_n$  - температура плавления защитного покрытия.

Разность между значением избыточной температуры и температуры плавления покрытия суммируется в отдельном счетчике. Для этих целей введена матрица  $cd[i,j]$ , в начале счета по программе ее элементы равны 0. Если значение  $cd[i,j]$  станет больше отношения теплоты плавления покрытия к его теплоемкости, то считается что ячейка с координатами  $(i,j)$  расплавилась. При этом значение  $t[i,j]$  становится равным температуре расплава. После расчета избыточной температуры для соответствующих контрольных объемов на каждом временном слое производится перенос полученного поля температур  $t[i,j]$  в предыдущее поле температур  $t[i,j]$ .

**Выводы.** Расчеты проведены для условий выпуска плавки в 250 т ковш ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат». Длительность выпуска плавки составила 300 с; учитывая, что расстояние от днища до нижнего основания стержня составляет шестую часть высоты ковша, необходимо рассчитать толщину покрытия таким образом, чтобы длительность его проплавления составила не менее 250 с. Температуру металла в ковше приняли равной 1600 °С. По результатам расчета определена минимальная толщина покрытия, составляющая 80-90 мм, при которой происходит его расплавление к моменту окончания выпуска плавки (в течение 250 с). Установлено, что при увеличении начальной толщины покрытия значительно увеличивается длительность его проплавления, причем «оголение» алюминиевого стержня начинается в его нижней части.

Температура, °С	1610	1630	1640	1650
длительность расплавления, с	190	170	160	150

Для выбранной толщины покрытия проведен расчет длительности его проплавления в зависимости от температуры металла в ковше, начиная с 1610 °С по 1650 °С. Результаты расчета сведены в таблицу, из ко-

торой видно, что повышение температуры металла в ковше существенно ускоряет процесс плавления защитного покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ресурсосберегающая технология раскисления металла алюминием. / А.П.Огурцов, М.А. Кащеев, А.С.Бродский, П.А.Старков, И.В. Губарев // Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1998. - N 5, 6 - С. 25-27
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали.- М.: -Металлургия,1976. -552 с.
3. Павлюченков И.А. Теория и технология плавления материалов при производстве стали / Дис. докт. техн. наук. Днепропетровский. 1995.-350 с.
4. Огурцов А.П., Самохвалов С.Е. Численные методы исследования гидродинамических и тепломассопереносных процессов сталеплавильного производства.- Киев: Наук. думка, 1993.-220 с.
5. Совершенствование методов конечного раскисления при выплавке шарикоподшипниковых сталей/ Г.И. Антипенко, Н.В. Стеценко, В.Н. Городничий и др. // Сталь, 1982. - N 9 - С. 7-9
6. Раскисление стали алюминиевыми сплавами в ковше после выпуска плавки /Я.А.Шнееров, В.А. Вихлевщук. Л.М.Катель и др. //Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1984. - N 10 - С. 48-49
7. Технология раскисления и доводки стали по содержанию алюминия с использованием штанг из вторичного алюминия/ В.И. Новиков, А.М. Поживанов, В.В. Рябов и др. // Черная металлургия. Бюл. НТИ. 1984. - N 16 - С. 44-46
8. А.с. 1219654 СССР МКИС21С 7/00 Способ легирования стали/ Е.М.Кривко, А.П.Огурцов, С.С.Бродский и др. (СССР) - N 1743847/22 заявлено 22.02.84; опубл. 10.11.86
9. А.с. 1225861.СССР МКИС21С 5/54 Брикет для раскисления стали и сплавов/ Смирнов Н.А., Исаев Г.А., Хиженков С.Я. и др. Моск. веч. металлург. ин-т. (СССР) - N 3813846/22-02, заявл. 22.11.84., опубл. 06.08.86.

пост. 15.12.05

## Моделирование корректирования массы кокса по его влажности при загрузке в доменную печь

В.А. СМОЛЯК

Днепропетровский государственный технический университет

Изложены результаты анализа способов измерения влажности кокса и корректирования его массы по влажностному содержанию при загрузке в доменную печь.

Викладені результати аналізу способів вимірювання вологості коксу та корегування його маси по вологості при завантаженні у домену піч.

Results of analyses of method of the coke humidity measurement and correction of coke mass by its moisture content when charging a blast furnace are described in this paper.

Экономия топливно-энергетических ресурсов является одной из основных задач, совершенствования тех-

нологии металлургических процессов и повышения эффективности производства в целом. В черной металлургии,

