

Р.В. ВОЛОШИН, магистр
М.В. БАБЕНКО, к.т.н., доцент
О.А. ЖУЛЬКОВСКИЙ, к.т.н., доцент
И.И. ЖУЛЬКОВСКАЯ, к.т.н., доцент
Я.О. ДЕГТЯРЕНКО, магистр

Днепропетровский государственный технический университет, г. Каменское

Алгоритм расчета плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке

В данной статье представлены алгоритмы расчета одно- и двухмерных математических моделей плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке в расплаве и при несимметричных граничных условиях на межфазной границе шлак-металл, а также результаты вычислительных экспериментов и анализ полученных расчетных данных.

Введение

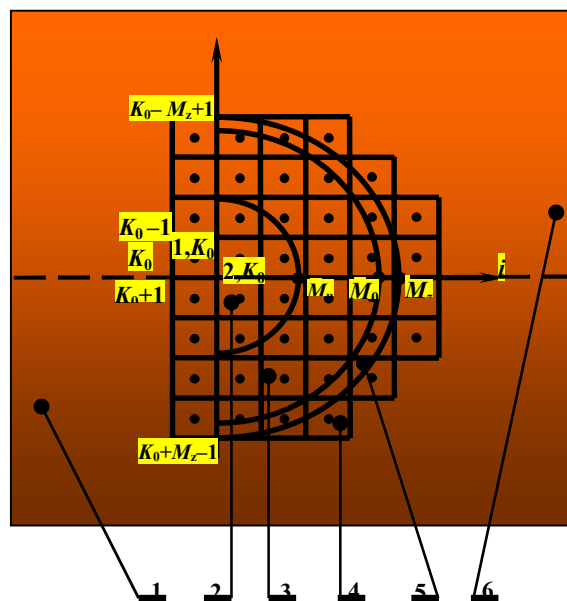
Одним из решений задачи ресурсосбережения при раскислении стали алюминием является увеличение плотности алюминиевого слитка путем ввода утяжелителя и с одновременной изоляцией его поверхности от воздействия окислительного шлака [1]. Ранее в статье [2] авторами была представлена математическая модель плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке. В данной публикации описывается алгоритм реализации математической модели, а так же результаты вычислительных экспериментов и анализ полученных расчетных данных.

Постановка задачи

Данная задача относится к задачам теплопроводности с подвижными границами раздела фаз. Целью статьи является разработка и усовершенствование алгоритмов реализации математических моделей кинетики плавления кусковых материалов цилиндрической формы в расплаве при несимметричных граничных условиях [3–5].

Алгоритм расчета. В качестве расчетной области выбрана половина поперечного сечения цилиндра. Для решения задачи формируем квадратную координатную сетку. Для этого отрезок $[0, R_0]$ покрывается равномерной сеткой r_i с шагом $\Delta r = R_0 / M_0$, где $r_i = i\Delta r$, $i = 0, 1, \dots, M$; M_0 — начальное количество расчетных узлов; M ($M > M_0$) — текущий граничный узел, т.е. разбиваем рассматриваемую половину сечения цилиндра вертикальными и горизонтальными линиями, как это показано на рис. 1. Также вводятся две переменные величины целого типа — M_u (количество слоев Δr по радиусу утяжелителя) и M_z (количество слоев Δr по толщине защитного покрытия). В итоге получаем контрольные объемы с координатами i, j . Значения температур определяем в центре контрольных объемов. 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 задается дополнительный столбец температур $t_{1,j}^n$. Равенство нулю 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 все

контрольные объемы расчетной области являются внутренними, что существенно упрощает конструирование программы расчета. Вводятся матрицы теплофизических параметров плотности $\rho_{i,j}^n$, теплопроводности $\lambda_{i,j}^n$ и теплоемкости $c_{i,j}^n$, куда заносятся на каждом временном слое соответствующие значения параметров материала цилиндра, вставки, оболочки и затвердевшего металла в зависимости от температуры.



1 — расплав металла; 2 — утяжелитель (чугун); 3 — алюминий; 4 — квадратная ячейка разбиения; 5 — защитная оболочка (чугун); 6 — расплав шлака;

Рис. 1. Расчетная область к задаче плавления комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы с защитной оболочкой и утяжелителем

Шаг по времени выбираем из условия устойчивости явной разностной схемы. При проведении расчетов добивались также, чтобы внешняя граница плавления (затвердевания) за один шаг по времени изменялись не более чем на один шаг координатной

сетки. Этого добивались путем уменьшения шага по времени относительно выбранного из условия устойчивости.

Предположим, что на временном слое n известны значения температур t_i^n и значение переменной M , тогда на следующем временном слое $n+1$ значения температур во внутренних точках расчетной области ($1 \leq i \leq M-1$) определяются из уравнения:

$$\frac{t_i^{n+1} - t_i^n}{\Delta\tau} = \frac{2}{\Delta r^2 \rho_i^n c_i^n} \times \left[\frac{t_{i-1}^n - t_i^n}{\frac{1}{\lambda_{i-1}^n} + \frac{1}{\lambda_i^n}} - \frac{t_i^n - t_{i+1}^n}{\frac{1}{\lambda_i^n} + \frac{1}{\lambda_{i+1}^n}} + \frac{1}{i} \frac{t_{i+1}^n - t_{i-1}^n}{\frac{1}{\lambda_{i+1}^n} + \frac{1}{\lambda_{i-1}^n}} \right]. \quad (1)$$

Граничное условие симметрии посредством разностной аппроксимации со вторым порядком точности представляется в виде:

$$\frac{t_0^{n+1} - t_0^n}{\Delta\tau} = \frac{2(t_1^n - t_0^n)}{\Delta r^2 \rho_0^n c_0^n} \frac{\lambda_0^n \lambda_1^n}{\lambda_0^n + \lambda_1^n}, \quad (2)$$

Учет движения внешней границы намерзания и последующего плавления металлического расплава на поверхности чугунной оболочки осуществляется посредством расчета "избыточной" температуры по уравнению:

$$t_{изб}^{n+j} = t_V + \frac{\Delta\tau}{\rho_M c_M^n \Delta r} \left[\alpha(t_p^n - t_V) + \frac{\lambda_M^n}{\Delta r} (t_{M-1}^n - t_V) \right], \quad (3)$$

где t_V — температура нулевой жидкотекучести металла, α — коэффициент теплоотдачи от расплава к поверхности тела.

Далее определяется значение $\bar{S} = t_V - t_{изб}^{n+j}$. При $\bar{S} > 0$ происходит намерзание металлического расплава и через k_1 шагов по времени при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^{k_1} (t_V - t_{изб}^{n+j}) \geq Q / c_M^{n+1} \quad (4)$$

намерзнет слой толщиной Δr . При этом количество слоев M увеличится на единицу.

При $\bar{S} < 0$ происходит процесс плавления оболочки и по истечении k_2 шагов по времени и при выполнении условия:

$$\sum_{j=1}^{k_2} (t_{изб}^{n+j} - t_V) \geq Q / c_M^{n+1} \quad (5)$$

расплавляется слой толщиной Δr , т. е. M уменьшается на единицу. Расчет по данному алгоритму заканчивается при выполнении условия $M = M_0 + M_z$. к этому времени внутренние контрольные объемы уже расплавляются.

Предлагаемый алгоритм расчета содержит два этапа плавления слитка:

1. Намерзание оболочки расплава за период пребывания слитка полностью погруженного в металлический расплав. Таким образом, алгоритм описывает процесс решения одномерной задачи плавления слитка.

2. Плавление слитка, находящегося на границе шлак-металл, т.е. описывается решение двухмерной задачи плавления слитка.

Результаты работы

Проведены расчеты плавления алюминиевых слитков весом, не превышающим 17,6 кг, в зависимости от процентного содержания алюминия с различными размерами утяжелителя и защитной оболочки. Различные варианты указанных слитков приведены в таблице 1.

Таблица 1. Варианты утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя

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

В расчетах приняты некоторые допущения:

1. Средние скорости движения металла в среднем не превышают 0,2 м/с, что в совокупности с коэффициентом кинематической вязкости 0,0000007 м²/с не оказывает особо большого влияния на движение слитка. Иными словами, кинематическая картина движения раскислителя практически везде одинакова, и не зависит от места ввода в расплав слиток всплывает в месте ввода, затем сдвигается в направлении стенки ковша.

2. Слиток вводят (согласно технологической инструкции, используемой в конвертерном цехе ПАО "Днепропетровский металлургический комбинат", г. Каменское) с высоты 7 м в металлический расплав при заполнении 1/3 высоты ковша. Скорость вхождения слитка в ковш — это скорость, которую он достигает за счет своего свободного падения, с учетом поправки на торможение при соприкосновении с поверхностью металла.

3. Согласно технологической инструкции, подаваемые в ковш слитки должны расплавиться при заполнении 2/3 высоты ковша. Принимая среднюю длительность заполнения ковша, равной 7 минутам, время расплавления слитков не должна превышать 140 сек. Это время заполнения ковша с 1/3 до 2/3 высоты. Далее приведены расчеты в соответствии с таблицей 1. Начальное положение слитка во всех вариантах одинаково. На рис. 2—4 представлена траектория движения слитка на протяжении всего процесса заполнения ковша на 1/3 высоты и его конечное положение. Параллельно выведено поле скоростей, характеризующее движение слитка.

Слиток всплывает на поверхность расплава за 1 сек., поэтому основной процесс плавления происходит на поверхности шлак-металл. В момент всплытия на поверхность плотность слитка равна 5377 кг/м³, при этом уровень шлака составляет 0,59 — это свидетельствует, что слиток чуть больше половины диаметра погружен в металл. По завершении процесса плавления (спустя 9,59 сек) слиток будет иметь плотность 4053 кг/м³ и массу 11,9 кг (максимальная толщина металлической оболочки 0,18 мм), слиток успел расплавиться. Причем уровень шлака по окончании процесса составляет уже 0,26.

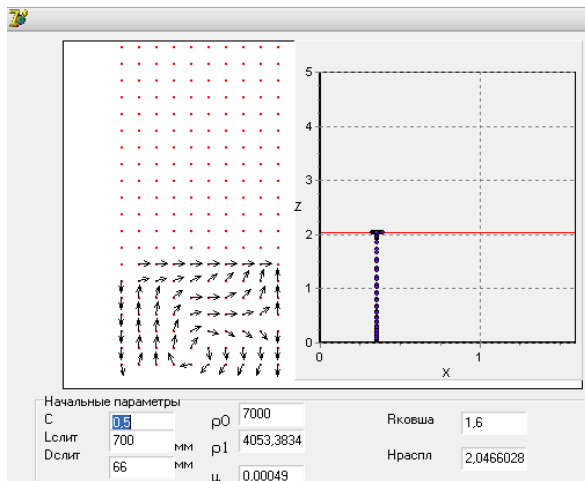


Рис. 2. Вариант 7—40 процентное содержание алюминия

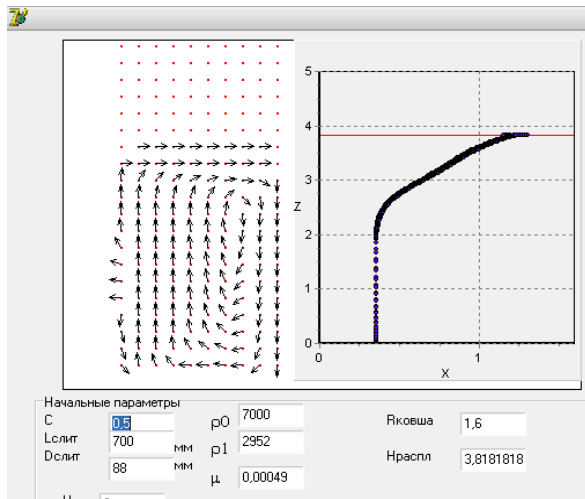


Рис. 3. Вариант 4—70 процентное содержание алюминия

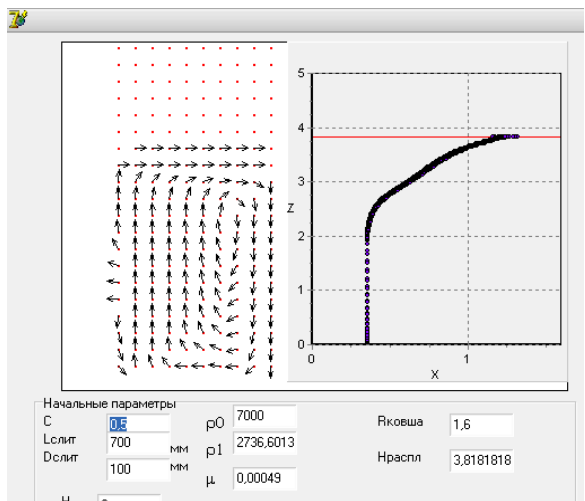


Рис. 4. Вариант 2—90 процентное содержание алюминия

Это свидетельствует о том, что с уменьшением массы слитков все больше всплывает на поверхность.

Слиток всплывает на поверхность расплава за 1 сек., поэтому основной процесс плавления происходит на поверхности шлак-металл. В момент всплытия на поверхность шлак-металл плотность слитка равна 4698 кг/м^3 , уровень шлака составляет 0,42. По завершению процесса заполнения на 2/3 высоты ковша — он не успел расплавиться. Спустя 133,02 сек. слиток, будет иметь плотность 2952 кг/м^3 и массу 17,64 кг, причем уровень шлака составляет уже 0,01, т.е. верхняя поверхность слитка расположена выше верхней поверхности шлака.

В момент всплытия на поверхность плотность слитка равна 4375 кг/м^3 , уровень шлака составляет 0,34. При заполнении ковша на 2/3 высоты — он не расплавился. Спустя 133,02 сек. слиток будет иметь плотность 2736 кг/м^3 и массу 20,93 кг (корка 0,655), причем уровень шлака составляет уже 0,07.

Выводы

Результаты вычислительного эксперимента позволяют установить рациональные режимы ввода слитков, обеспечивающие наиболее благоприятные условия для их расплавления в сталеразливочном ковше в процессе выпуска металла из кислородного конвертера.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бабенко М.В., Павлюченков И.А. Раскисление металла с использованием алюминиевых стержней с защитным покрытием при внепечной доводке стали. // А.Ясауи атындыгы Халыкаралык казактурік университетінін хабаршысы. № 1. 2008. С. 61 – 65.
2. Р.В. Волошин, М.В. Бабенко. Математическая модель плавления утяжеленного комбинированного алюмосодержащего раскислителя цилиндрической формы в защитной оболочке // Математичне моделювання. – 2015. – №1(32). – С. 33 – 35.
3. Павлюченков И.А. Численное моделирование (на основе метода Дюзимбера) процессов плавления тел в расплаве // Математичне моделювання. – 1997. – №2. С. 37 – 43.
4. Бабенко М. В. Алгоритм расчета (на основе метода Дюзимбера) двумерной 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.
5. Павлюченков И.А., Сало Е.В., Трикило А.И., Волошин Р.В., Овчаренко Т.Н. Программное обеспечение процесса плавления тугоплавких материалов цилиндрической формы на границе шлак-металл. // Сборник научных трудов ДГТУ (технические науки). – Днепродзержинск, 2010 г., выпуск 2 (15), с. 170 – 176.

пост. 13.02.2017