

УДК 669.046:621.746.56

Харлашин П.С.¹, Яценко А.Н.²

**О ВОЗМОЖНОСТИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ
АРГОННОЙ ПРОДУВКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗОГРЕТОЙ
ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША**

Рассмотрен алгоритм для математической модели теплофизических процессов, протекающих в многослойной футеровке сталеразливочного ковша. Приведенная методика расчёта может быть использована для усовершенствования существующих и разработки новых энергосберегающих режимов аргонной продувки предварительно подогретым инертным газом.

В настоящее время в Украине, как и в остальных странах СНГ, очень остро стоит проблема энергосбережения и ресурсосбережения. Metallургическая отрасль является одним из главных потребителей электрической энергии. Украина входит в десятку крупнейших производителей и экспортеров стали. Вместе с тем известна низкая рентабельность украинской стали, а ее экспорт идет по низким мировым ценам вследствие пониженного уровня необходимых для металла свойств. Поэтому актуальным для Украины является широкое применение комбинированных ресурсо-энергосберегающих внепечных процессов рафинирования стали от вредных примесей [1].

На основании ранее проведенных исследований можно сделать вывод, что не интенсивность продувки, а количество газовых пузырей, внедряемых в расплав в единицу времени, является доминирующим фактором повышения эффективности процессов дегазации жидкого металла продувкой инертным газом. При высоких интенсивностях продувки происходит слияние отдельных пузырей, приводя к снижению площади поверхности контакта газ-металл и эффективности дегазации. Фактор развития межфазной поверхности в увеличении эффективности рассматриваемых процессов существенно преобладает над повышением степени турбулизации металлической ванны. В процессе работы металлургического комплекса выделяется значительное количество тепла, которое не утилизируется, а рассеивается в окружающей атмосфере. В связи с этим заслуживает внимания разработка технологии аргонной продувки предварительно подогретым инертным газом, пропущенным через специальный теплообменник расположенный в футеровке сталеразливочного ковша.

Предварительный подогрев аргона привёл бы к увеличению дробления истекающих в жидкий металл струй аргона на более мелкие пузыри и, как следствие, к увеличению работы перемешивания жидкой стали за счет существенного роста числа всплывающих пузырей, рассредотачиванию барботажной зоны по большему объёму расплава в ковше, к снижению содержания водорода и оксидных неметаллических включений в стали.

Цель настоящей работы заключается в оценке возможности эффективного использования футеровки сталеразливочного ковша в качестве источника тепла для нагрева инертного газа, разработке математической модели теплофизических процессов, протекающих в многослойной футеровке ковша.

Для решения поставленной задачи необходим прогноз теплового состояния футеровки ковша в цикле от его разогрева до остывания после приёма металла, а также распределение температурного поля по слоям футеровки в период рабочей кампании сталеразливочного ковша. Поэтому возникла необходимость комплексно рассмотреть все тепловые процессы, протекающие со сталеразливочным ковшом от момента начала разогрева его на нагревательном стенде до окончания разлива стали. Как правило, схема движения сталеразливочного ковша в конвертерном цехе имеет следующий вид (рис. 1).

Зафутерованный сталеразливочный ковш поступает на стенд для сушки (поз. 1), разогрева и установки шиберного затвора (поз. 2). Сушка и разогрев ковша длится до 24 часов и более. При этом температура поверхности рабочего слоя футеровки достигает 800 – 900 °С.

¹ПГТУ, д-р техн. наук, проф.

²ПГТУ, аспирант

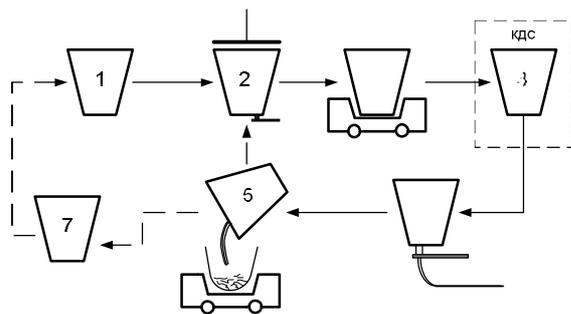


Рис. 1 – Схема движения сталеразливочного ковша в конвертерном цехе

Стенды для разогрева ковшей позволяют нагревать поверхность рабочего слоя футеровки до 1100 – 1200 °С. После сушки и разогрева на ковш устанавливаются шибберные затворы. Затем при помощи крана ковш помещается на сталевоз для ожидания выпуска плавки (поз. 3). После выпуска плавки сталевоз, заполненный жидким металлом, отправляется на установку ковш-печь для комплексной доводки стали (КДС). Доводка стали в ковше осуществляется в зависимости от химического состава, температуры и требуемых механических свойств в течение 12 – 45 минут, после чего ковш поступает на машину непрерывной разливки стали (поз. 5), которая длится 1 – 2 часа. После разливки стали из ковша удаляется шлак (поз. 6) и ковш, в случае необходимости, отправляется на участок ремонта или замены футеровки (поз. 7), либо отправляется на замену шибберного затвора (поз. 2) и затем устанавливается на сталевоз в ожидании следующей плавки (поз. 3). Далее цикл повторяется по приведенной схеме.

Методика расчёта теплофизического состояния ковшевых огнеупоров сталеразливочного ковша должна предусматривать расчёт температурного поля при сушке и разогреве стальковша на нагревательном стенде, при его простое в ожидании плавки, при транспортировке стали в ковше, при разливке стали на машинах непрерывного литья заготовки.

Представим сталеразливочный ковш в виде полого цилиндра и, формулируя задачу для футеровки, как линейную, получим следующее уравнение в цилиндрических координатах [2]:

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

где c – средняя удельная теплоёмкость кДж/(кг·К), ρ – плотность, кг/м³, t – температура, °С; x, r, φ – цилиндрические координаты, в которых положение любой точки определяется по оси R , координатой по оси X и углом поворота $\varphi = 0 - 180^\circ$, τ – время, с; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Для расчёта температурного поля в футеровке во время разогрева сталеразливочного ковша на нагревательном стенде получаем осесимметричную одномерную задачу, для которой уравнение (1) примет следующий вид:

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

Для расчёта разогрева сталеразливочного ковша на нагревательном стенде распределение температуры внутри футеровки в начальный момент времени:

$$t(r,0) = f(r). \quad (3)$$

Начальное температурное поле в футеровке ковша в данном случае может быть определено в результате предварительного расчёта, либо расчёта остывания ковша во время простоя.

Поскольку процесс остывания сталеразливочного ковша во время простоя, особенно во время разливки стали, характеризуется значительной разницей температур футеровки по высоте ковша, сформулируем для расчёта остывания футеровки ковша осесимметричную двухмерную задачу [3, 4], для которой уравнение (1) примет следующий вид:

$$c\rho \frac{\partial t(x,r,\varphi,\tau)}{\partial \tau} = \lambda \left[\frac{\partial^2 t(x,r,\varphi,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t(x,r,\varphi,\tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t(x,r,\varphi,\tau)}{\partial r} \right]. \quad (4)$$

Для расчёта остывания сталеразливочного ковша во время простоя распределение температуры внутри футеровки в начальный момент времени:

$$t(x,r,0) = f(x,r). \quad (5)$$

Начальное температурное поле в футеровке ковша в данном случае может быть определено в результате расчёта разогрева сталеразливочного ковша на нагревательном стенде, либо расчёта разливки стали.

В качестве граничного условия на нижнем торце стен ковша принимаем условие теплоизолированности:

$$\partial t(0, r, \tau) / \partial x = 0. \quad (6)$$

Аналогичное граничное условие принимаем и для жидкой стали при $r = 0$:

$$\partial t_{cm}(x, 0, \tau) / \partial r = 0. \quad (7)$$

При соприкосновении жидкой стали с рабочей поверхностью футеровки запишем граничное условие IV рода:

$$t_{cm}(x, R_0, \tau) = t(x, R_0, \tau), \quad (8)$$

$$t_{cm}(x, R_0, \tau) / \partial r = t(x, R_0) / \partial r. \quad (9)$$

Для остальных поверхностей принимаем граничные условия III рода.

Для расчёта температурных полей в стали и футеровке сталеразливочного ковша во время разлива стали воспользуемся уравнением (4). Распределение температуры внутри футеровки в начальный момент времени:

$$t(x, r, 0) = f(x, r). \quad (10)$$

Начальное температурное поле в футеровке в данном случае может быть определено в результате расчёта транспортировки стали в ковше.

Указанный аналитический метод расчёта характеризуется относительной сложностью, поэтому в практических целях для инженерных расчётов распределения температуры в слоях футеровки могут быть использованы прогнозные методики, составленные для условий тепловой работы футеровки в стационарном режиме.

Коэффициенты теплопроводности слоёв определяются по справочным формулам вида

$$\lambda_i = a_i + b_i \cdot 10^{-5} \cdot t_{cpi}, \quad (11)$$

где t_{cpi} – средняя температура i -го слоя, °C; a , b – экспериментальные коэффициенты.

Тепловой поток Q , Вт, в стационарном режиме через стенку любой формы определяется по закону Фурье:

$$Q = -\lambda(t) \frac{dt}{dr} \cdot F(r), \quad (12)$$

где $\frac{dt}{dr}$ – градиент температур, К/м; $F(r)$ – величина изотермической поверхности слоя, м².

Разделив переменные, преобразуем выражение (12) к виду:

$$Q \frac{dr}{F(r)} = -\lambda(t) \cdot dt, \quad (13)$$

$$S_F = \int_{r_{i-1}}^{r_i} \frac{dr}{F(r)} = \frac{1}{F_k} \int_{r_{i-1}}^{r_i} \frac{dr}{r^{k-1}}, \quad (14)$$

где k – коэффициент формы, для пластины, цилиндра и сферы соответственно $k = 1, 2, 3$;

F_k – постоянная составляющая площади поверхности, м²:

$$F_{k=1} = LH, \quad F_{k=2} = \frac{\pi H \varphi}{180}, \quad F_{k=3} = 2\pi \left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right) \quad (15)$$

где L – длина плоской стенки, м; H – высота стенки, м; φ – угол раскрытия, град;

$k = 1, 2, 3$ – геометрическая форма стенки ковша: плоская, цилиндрическая, сферическая соответственно.

Вычисление подинтегральной функции с применением ЭВМ может быть реализовано с помощью метода трапеции:

$$E = \int_{r_{i-1}}^{r_i} \frac{dr}{r^{k-1}} = 0,5 h_i \left(\frac{1}{r^{k-1}} + \frac{2}{r_1^{k-1}} + \frac{2}{r_2^{k-1}} + \dots + \frac{2}{r_{i-1}^{k-1}} + \frac{1}{r_{i-1}^{k-1}} \right), \quad (16)$$

где $h_i = \delta_i / N$ – толщина i -го подслоя, м; δ_i – толщина i -го слоя, м;

N – количество подслоёв, на которые разделён слой; r_i – радиус слоя, м.

На рабочей стороне футеровки принимаются граничные условия I рода ($t_{ж} = \text{const}$), а на наружной стороне кожуха – граничные условия III рода:

$$-\lambda(t) \frac{dt}{dr} = \alpha_k (t_k - t_c). \quad (17)$$

Расчётное соотношение для определения теплового потока через многослойную стенку криволинейной геометрической формы будет иметь вид:

$$Q = \frac{t_{жс} - t_c}{\sum_{i=1}^M \frac{h_i E_i}{\lambda_i F_k} + \frac{1}{\alpha_k F_k r_M^{k-1}}}, \quad (18)$$

Расчётное соотношение для определения температуры на границе подслоёв после решения соотношения (11) с учётом (14 – 18) имеет вид:

$$t_{i,N} = -\frac{1}{b_{i,N}} (a_{i,N} - \sqrt{\lambda_{i,N}^2 - 2b_{i,N} QS_F}). \quad (19)$$

Для расчёта распределения температуры по слоям футеровки криволинейной геометрической формы была составлена программа расчёта температурных полей и тепловых потерь через футеровку 160-т сталеразливочного ковша, реализованная на ЭВМ типа IBM PC/AT. Рабочий слой футеровки состоит из штучных огнеупорных материалов типа KUMAL-5CE толщиной 230 мм, арматурный слой – ШКУ 37 толщиной 100 мм, кварцитная масса – толщиной 40 мм и кожух – из листовой углеродистой стали толщиной 22 мм. Средняя температура жидкой стали составляет 1604 °С. Расчёт проводили при температуре окружающей среды 20 °С.

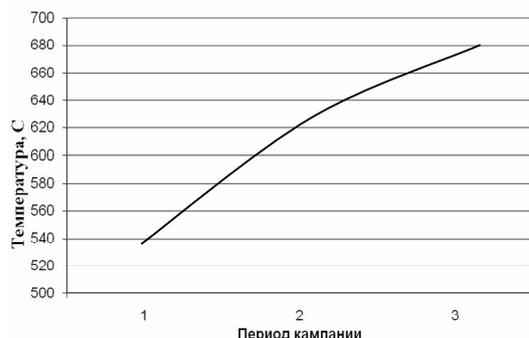


Рис. 2 – Расчётное изменение температуры теплообменника в начале (1), середине (2) и конце (3) кампании ковша

В результате проведенных расчётов на ЭВМ установлено, что температура теплообменника для подогрева инертного газа, расположенного в футеровке сталеразливочного ковша в начале периода его кампании составляет 510 – 530 °С. По мере износа футеровки постоянно температура теплообменника увеличивается, достигая в конце кампании сталеразливочного ковша (практически полное разрушение рабочего слоя футеровки) 655 – 665 °С (рис. 2). Таким образом, температура теплообменника повышается в 1,3 раза.

Выводы

1. Представлена математическая модель, которая позволяет решать комплексную задачу расчёта температурных полей в футеровке сталеразливочного ковша в реальном технологическом процессе.
2. Для практических целей результаты достаточной точности дают инженерные методы оценки температурных полей в футеровке сталеразливочного ковша.
3. Показана принципиальная возможность предварительного нагрева инертного газа футеровкой ковша с целью дополнительной дегазации и очистки стали. В дальнейшем планируется разработка конструкции теплообменника и проведение опытно-промышленной кампании в условиях кислородно-конвертерного цеха.

Перечень ссылок

1. Бойченко Б.М. Конвертерне виробництво сталі (теорія, технологія, якість сталі, конструкція агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія) / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотський, П.С. Харлашин. – К.: Дніпро-ВАЛ, 2004. – 460 с.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков – М.: Высшая школа, 1967. – 520 с.
3. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1967. – 491 с.
4. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: АН СССР, 1952. – 537 с.

Рецензент: А.М. Скребцов
д-р техн. наук, проф., ПГТУ

Статья поступила 11.03.2009