

УДК 621.1.016

Акмен Р.Г., Круглякова О.В., Петрова Л.С., Садах А.Ф.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ
И РАЗОГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

В процессе разливки стали, главная роль принадлежит сталеразливочным ковшам. Сталеразливочный ковш вмещает металл плавки и небольшое количество шлака, покрывающего поверхность металла и предохраняющего его от быстрого остывания и окисления. Кожух ковша имеет форму усеченного конуса с широким основанием кверху, изготовленного из стальных листов путем сварки. Изнутри ковш футеруется двумя видами огнеупоров.

Первый слой футеровки – шамотный кирпич. Его толщина зависит от емкости ковша и, как правило, для больших емкостей составляет не менее 180 мм. Футеровка днища выкладывается еще дополнительными рядами кирпичей, чтобы компенсировать повышенное разрушение в результате более длительного контакта с расплавленным металлом. Толщина футеровки днища шамотным кирпичом для больших ковшей – не менее 345 мм.

Второй слой футеровки – набивная масса. В последнее время, с целью сокращения расхода шамотного кирпича, переходят на футеровку монолитной набивной массой. Ее использование позволяет существенно увеличить срок службы огнеупорного слоя и уменьшает издержки на эксплуатацию ковшей. В состав набивной массы входят: измельченная хромитовая руда, магнезитовый порошок и сернокислый магнезит. Подобная набивная масса выдерживает 170–190 плавов, в то время как шамотная футеровка – не более 90.

После нанесения влажной набивной массы ковш необходимо высушить и нагреть для приема стали до температуры 1180–1200 °С. Высокая температура футеровки необходима для уменьшения теплового удара при контакте с расплавленной сталью (1580 °С). Процессу сушки придается особенно большое значение, т.к. при резком разогреве влажной футеровки или в случае контакта ее с расплавленной сталью возможно местное взрывное разрушение.

По рекомендации завода-изготовителя [1], процесс сушки ковша должен проходить в три стадии: предварительный разогрев футеровки до температуры ~100 °С; удаление физической влаги (при этом скорость повышения температуры среды в ковше не должна превышать 2 °С/час); удаление химически связанной влаги, входящей в гидратные соединения (СаОН)₂, Mg(ОН)₂ при разложении последних в диапазоне температуры 300–400 °С (скорость подъема температуры не должна превышать 5–7 °С/час).

Окончание процесса сушки ковша согласно [2] оценивается по достижении температуры обечайки в зоне перехода стенки ковша в днище порядка 145–150 °С.

На разогрев ковша устанавливаются при температуре футеровки не ниже 800 °С, максимальная скорость подъема температуры – 100 °С/час.

Приведенные выше рекомендации по проведению процесса сушки и разогрева ковша базируются на экспериментальных данных, полученных заводами-изготовителями и сталелитейными заводами, эксплуатирующими сталеразливочные ковши.

Однако, создание новых ковшей большой емкости (300–350 т и более), а также применение новых огнеупорных материалов для футеровки ковшей, требует обоснования развития во времени процесса сушки и разогрева футеровки ковша. Одним из воз-

возможных методов решения подобной задачи является математическое моделирование процесса сушки и разогрева футеровки ковша [2].

В общей постановке подобная задача может быть сформулирована следующим образом.

Требуется найти решение нелинейного уравнения теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(q) \quad (1)$$

и уравнения влагопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = m_u \nabla^2 u + m_t \nabla^2 t \quad (2)$$

в области футеровки при соответствующих начальных и граничных условиях.

К сожалению, в имеющейся литературе по теплофизическим характеристикам материалов отсутствуют какие-либо данные по коэффициентам влагопроводности m_u и термовлагопроводности m_t огнеупорных материалов. Поэтому провести хотя бы численное решение уравнения (2) невозможно.

Примем допущения:

– т.к. отношение внутреннего диаметра футеровки ковша к его внешнему диаметру $< 1,2$, будем считать футеровку – плоской бесконечной пластиной;

– в связи с тем, что теплоемкость вещества аддитивная величина, будем считать теплоемкость влажной набивки из хромомagneзита зависящей от концентрации влаги, которая изменяется вследствие испарения ее части.

Тогда, с учетом допущений, математическую модель процесса сушки и разогрева футеровки ковша можно представить в следующем виде.

Отыскивается решение уравнения

$$c\rho_i \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (i = 1,2,3), \quad (3)$$

где 1 – металлическая обечайка ковша; 2 – шамот; 3 – хромомagneзит.

При краевых условиях.

Начальное условие (при $\tau = 0$) для процесса сушки

$$t(x,0) = t_0, \quad (4)$$

для процесса прогрева

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

где $f(x)$ – распределение температуры в обмуровке и обечайке ковша, которое может быть найдено из расчета процесса сушки или из расчета процесса охлаждения ковша за время простоя.

Физические условия:

теплофизические характеристики металла обечайки λ_1, ρ_1, c_1 – считаем постоянными;

теплофизические характеристики шамота считаем зависящими от температуры [3], т.е. $\lambda_2(t), \rho_2(t), c_2(t)$;

теплофизические характеристики хромомagnesита считаем:

$\lambda_3(t), \rho_3(t)$ – по [3] для сухого материала, т.к. коэффициент теплопроводности не является аддитивной величиной, а воспользоваться [2] не представляется возможным,

$$c\rho_3(t) = \begin{cases} c_3(t)_{\text{сух}}(1-u)\rho_3(t) + (c_{\text{в}}u + r \cdot du)\rho_{\text{в}} & \text{при } t \leq 100^\circ\text{C} \\ c_3(t)_{\text{сух}}\rho_3(t) & \text{при } t > 100^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (6)$$

где u – текущее влагосодержание, du – изменение влагосодержания материала при испарении части влаги, пропорциональной градиенту температуры, $c_{\text{в}}, r, \rho_{\text{в}}$ – теплоемкость, скрытая теплота парообразования и плотность воды.

Граничные условия на внешней поверхности обечайки – III-го рода

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \quad (7)$$

где α_{Σ} – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности обечайки в окружающую среду с учетом конвективной и лучистой составляющих.

В местах контакта разнородных сред (металл-шамот, шамот-хромомagnesит) совершенный тепловой контакт (условия IV-го рода)

$$\lambda_i \left(\frac{\partial t_i}{\partial x} \right)_{\text{п}} = \lambda_{i+1} \left(\frac{\partial t_{i+1}}{\partial x} \right)_{\text{п}} \quad (i = 1, 2). \quad (8)$$

На внутренней поверхности футеровки – граничные условия III-го рода

$$\lambda_3(t) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(\tau)[t_{\text{г}}(\tau) - t_{\text{п3}}], \quad (7)$$

где $\alpha_{\Sigma}(\tau)$ – суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания топлива к поверхности хромомagnesита с учетом лучистой и конвективной составляющих.

Таким образом, система уравнений (3–7) замкнута. Ее решение проведено численным методом с использованием неявной конечно-разностной аппроксимации.

Определение теплового состояния системы металл-обмуровка ковша позволило составить пошаговый тепловой баланс этой системы в виде

$$V_{\text{г}}(I_{\text{вх}} - I_{\text{вых}}) \cdot d\tau = \sum_{i=1}^3 V_i \rho_i \Delta I_i + Q_{\text{пот}}, \quad (8)$$

где $V_{\text{г}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}$ – расход газа и энтальпия продуктов его горения на входе и выходе из ковша; $d\tau$ – шаг по времени численного решения; $V_i \rho_i$ – масса, ΔI_i – изменение энтальпии слоев металла и футеровки за время $d\tau$; $Q_{\text{пот}}$ – потери в окружающую среду.

Из (8) определяется расход топлива и его изменение во времени.

Проведенный с помощью разработанной модели численный эксперимент позволил получить изменение во времени расхода газа при прогреве ковша емкостью 300 т после его сушки.

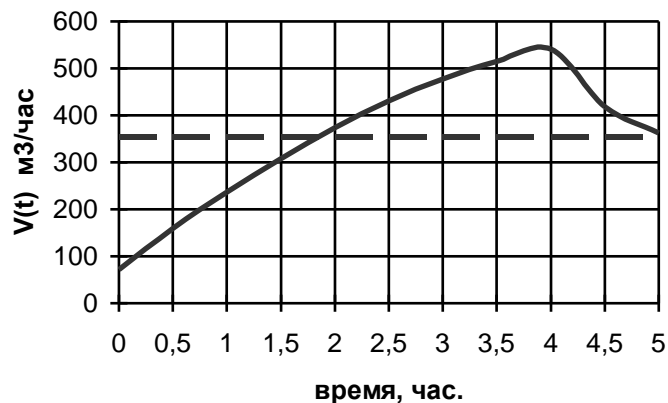


Рисунок – Изменение расхода газа при прогреве ковша 300 т после сушки

Сопоставление полученного значения среднего по времени расхода газа в процессе прогрева ковша с данными печного отдела ГИПРОСталь, где проектируется подобная установка, дает практически полное их совпадение, что может служить показателем адекватности предлагаемой модели.

Литература

1. Коршунов В.А., Советкин В.Л. Совершенствование технологии подготовки сталеразливочных ковшей // *Сталь*. – 1996. – № 2. – С. 12–14.
2. Сущенко А.В. Математическое моделирование и совершенствование технологии тепловой подготовки 350-тонных сталеразливочных ковшей // *Металл и литье Украины*. – 2003. – № 7/8. – С. 22–24.
3. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А.С. Телегина. – М: Металлургия, 1970. – 528 с.

УДК 621.1.016

Акмен Р.Г., Круглякова О.В., Петрова Л.С., Садах О.Ф.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШКИ ТА РОЗІГРІВУ СТАЛЕРОЗЛИВОЧНИХ КОВШЕЙ

Розроблена та реалізована математична модель процесу сушки та розігріву футеровки сталерозливочних ковшей великої місткості. Модель відрізняється від існуючих тим, що враховує витрати теплоти на випарювання вологи з футеровки в залежності від швидкості зміни вологомісткості футеровки. Результати розрахунку витрат палива на процес розігріву ковшей, що проведено за допомогою моделі, добре збігається з розрахунками інституту ДІПРОСталь, де проектується аналогічна установка.