

Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ МОДЕЛИ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ «РАСПЛАВ–КОВШ»**

*Аннотация. Разработана математическая модель нестационарного теплопереноса через многослойную футеровку, а также за счет излучения с поверхности расплава. На основе анализа влияния конструктивных и теплофизических факторов в качестве основных параметров для идентификации модели выбраны приведенные значения внутреннего диаметра футеровки ковша и степени черноты поверхности расплава.*

*Ключевые слова: моделирование, сталеразливочный ковш, тепловое состояние, нестационарный теплоперенос.*

### **Постановка проблемы**

Ограниченные возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавления железа в традиционных агрегатах привели к созданию новых сталеплавильных процессов. В тех случаях, когда технологические операции, которые обеспечивают получение металла необходимого качества непосредственно в самом агрегате, приводят к потерям производительности процесса, их выполняют во вспомогательной емкости. В современном технологическом процессе внепечной обработки сталеразливочный ковш превращается из сугубо транспортного сосуда в металлургический реактор. Соответственно возрастают и требования к нему.

Основным фактором, который ограничивает продолжительность технологических операций с расплавом, находящимся в ковше, является температура жидкой стали. Ее снижение связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с поверхности расплава.

При передаче ковша на разливку необходимо обеспечить довольно узкий диапазон температуры стали. Поскольку в производственных условиях реализовать оперативный контроль этого важного параметра с требуемой точностью не представляется возможным, для управления процессом внепечной обработки стали изменение температуры нужно прогнозировать.

#### **Анализ публикаций по теме исследования**

Исследованию теплового состояния системы «расплав–ковш–окружающая среда» при внепечной обработке стали уделяется много внимания. В частности, в работе [1] предложена технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша. С использованием математической модели нестационарного теплопереноса в статье [2] рассмотрено влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава. В статье [3] представлены результаты исследования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке. В работе [4] исследовано изменение температуры расплава в зависимости от времени технологических операций ковшевой обработки.

#### **Формулировка целей статьи**

Обычно при моделировании теплофизические характеристики расплава и огнеупорных материалов футеровки, коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи не измеряются, а принимаются в соответствии со справочными данными. В каждом конкретном случае налива расплава в ковш измеряются только масса расплава, его начальная температура, а также начальная температура внутренней поверхности футеровки ковша после его термической подготовки. Температура окружающей среды обычно принимается равной стандартной температуре производственных помещений. В результате, реальные значения параметров моделей могут отличаться от принятых в пределах нескольких процентов.

Поэтому необходимо исследовать влияние вариативности значений параметров теплового состояния сталеразливочного ковша на результаты моделирования охлаждения расплава.

#### **Основная часть**

Для моделирования сталеразливочный ковш представлен в виде цилиндра с плоским днищем. В математической модели [2] учитываются тепловые потери через многослойные стенку и днище ковша,

а также излучением с поверхности расплава, которая частично или полностью покрыта слоем шлака.

Для расчета процесса нестационарного теплообмена при охлаждении расплава в сталеразливочном ковше в качестве исходных данных используются следующие параметры: геометрические размеры ванны и масса расплава; начальная температура расплава и внутренней поверхности футеровки ковша, а также температура окружающей среды; толщина и число слоев футеровки; теплофизические свойства расплава и материалов футеровки.

Начальное поле температур в стенке и днище сталеразливочных ковшей рассчитывается по заданным граничными условиями I-го рода – постоянным значениям температуры внутренней поверхности футеровки ковша и внешней поверхности брони, принятым в соответствии с данными промышленных наблюдений.

Для исследования взята модель 120-тонного сталеразливочного ковша с внешним диаметром 3,6 м и высотой 4,3 м. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее материалов взяты из [5]. Начальная температура расплава в ковше после выпуска, согласно нашим данным, составляет в среднем 1620°C, а начальная температура внутренней поверхности футеровки подготовленного ковша – 1100°C. Температура окружающей среды для расчетов принята равной 30°C. Условия моделирования соответствовали случаю выдержки ковша в течение 30 минут.

Для расчета процесса нестационарного теплообмена при охлаждении расплава в ковше используются следующие номинальные значения параметров модели: масса расплава 120000 кг; плотность расплава 7000 кг/м<sup>3</sup>; его теплоемкость 825 Дж/(кг·К); коэффициенты теплоотдачи конвекцией: от расплава к стенке ковша 5800 Вт/(м<sup>2</sup>·К); с поверхности расплава и от наружной стенки ковша в окружающую среду – соответственно, 27 и 12 Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коэффициенты влияния  $K_e$  параметров модели определяли как

$$K_e = \frac{(P_{\max} - P_{\min}) / P_n}{(\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}) / \Delta t_n}, \quad (1)$$

где  $P_{\max}$ ,  $P_{\min}$ ,  $P_n$  – соответственно, максимальное, минимальное и номинальное значения исследуемого параметра;  $\Delta t_{\max}$ ,  $\Delta t_{\min}$ ,  $\Delta t_n$  – соответствующее снижение температуры расплава.

Анализ результатов моделирования охлаждения расплава при вариативности параметров теплового состояния сталеразливочного ковша показал, что наиболее значимыми являются: теплофизические свойства жидкой стали (плотность и теплоемкость) – коэффициенты влияния  $K_e$  равны минус 0,89; начальная температура внутренней поверхности футеровки ( $K_e = -0,66$ ); внутренний диаметр ковша ( $K_e = +0,74$ ); степень черноты поверхности расплава ( $K_e = +0,39$ ). Менее влияют на точность модели вариации теплофизических свойств и толщины внутреннего слоя футеровки ( $0,2 > K_e > 0,05$ ). Неопределенностью значений остальных параметров системы «расплав–ковш» можно пренебречь.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований**

Учитывая надежность данных о теплофизических свойствах расплава и корунда, а также о начальной температуре футеровки ковша основными параметрами для адаптации модели теплового состояния ковша следует считать приведенные значения его внутреннего диаметра и степени черноты поверхности расплава.

Полученные результаты могут быть использованы для создания надежной системы прогнозирования изменения температуры расплава в ходе внепечной обработки стали.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Агеев С.В. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша // С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков, В.И. Бойков, С.В. Быстров, А.А. Блинников. – Металлург. – 2011. – № 5. – С. 48–52.
2. Михайловский Н.В. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава // Н.В. Михайловский, С.В. Бейцун. – Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – С. 135–142.
3. Ошовская Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой // Е.В. Ошовская, И.Н. Салмаш, Д.А. Фоменко. – Наукові праці ДонНТУ: Металургія. – 2011. – Вип. 13 (194). – С. 198–210.
4. Бейцун С. В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали // С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, В.И. Шибакинский. – Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – № 4. – С. 104–107.
5. Казанцев Е.И. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования. – 2-ое издание, перераб. и доп. / Е.И. Казанцев – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.