

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/м³; его теплоемкость 825 Дж/(кг·К); коэффициенты теплоотдачи конвекцией: от расплава к стенке ковша 5800 Вт/(м²·К); с поверхности расплава и от наружной стенки ковша в окружающую среду – соответственно, 27 и 12 Вт/(м²·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; Δt_{\max} , Δt_{\min} , Δt_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.