

Бейцун С. В. /к. т. н./
Михайловский Н. В. /к. т. н./
Шибакинский В. И. /к. т. н./
НМетАУ

Исследование параметров модели теплового состояния сталеразливочного ковша

С целью создания адекватной модели теплового состояния сталеразливочных ковшей при внепечной обработке стали исследовано влияние вариативности конструктивных и теплофизических факторов на результаты моделирования. Получены выражения для коэффициентов чувствительности наиболее влияющих параметров: теплоемкости и массы расплава, степени черноты его поверхности, внутреннего диаметра ковша, начальной температуры внутренней стенки футеровки, плотности и теплоемкости слоя корунда. Ил. 6. Табл. 6. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, тепловое состояние, параметр модели, коэффициент влияния

To create adequate model of thermal state of steel-pouring ladles during secondary refining of steel, the influence of variation of constructive and thermophysical factors on the modeling results are investigated. The expressions for sensibility factors of dominant parameters are obtained: heating capacity and mass of smelt, emissivity factor of its surface, inner diameter of the ladle, initial temperature of lining inner wall, density and heating capacity of corundum layer.

Keywords: steel-pouring ladle, thermal state, model parameters, influence coefficient

Введение

Ограниченные возможности регулирования физических и физико-химических условий протекания процессов плавки в традиционных сталеплавильных 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 стали ковш превращается в металлургический реактор. Соответственно возрастают и требования к нему.

Одним из основных параметров, который ограничивает продолжительность технологических операций со сталеразливочными ковшами, является температура расплава [1]. Снижение температуры расплава связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с открытой поверхности расплава.

Исследованию теплового состояния системы расплав-ковш при внепечной обработке стали посвящено множество работ. В частности, в работе [2] предложена технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша. С использованием математической модели [3] нестационарного теплопере-

носа в статье [4] рассмотрено влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава. Математическая модель изменения теплосодержания футеровки и исследование изменения температуры расплава в зависимости от времени технологических операций ковшевой обработки приведены в работе [5]. В статье [6] представлены результаты исследования теплового состояния сталеразливочного ковша при переменной тепловой нагрузке.

Постановка задачи

В этих и других аналогичных исследованиях теплофизические характеристики расплава, огнеупорных материалов футеровки, коэффициенты конвективной и лучистой теплоотдачи не измеряются, а принимаются в соответствии со справочными данными. Как правило, температура окружающей среды на участке внепечной обработки стали не контролируется. В каждом конкретном случае налива расплава в ковш определяются 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 без какого-либо контроля. 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 находящегося в нем расплава.

Исходные данные для моделирования

Для исследования использовалась математическая модель [5] теплового состояния системы расплав-ковш, в которой рассчитываются тепловые потери через боковую поверхность и днище ковша, а также излучение с поверхности расплава.

Исходное поле температур в стенке и днище сталеразливочных ковшей определяется по заданным граничными условиями I-го рода – значениям температуры внутренней поверхности футеровки ковша и внешней поверхности его кожуха, принятым в соответствии с данными промышленных исследований.

Моделирование нестационарной теплоотдачи от расплава через многослойные стенку и днище сталеразливочного ковша производится по исходным данным и начальному полю температур слоев футеровки с учетом снижения температуры расплава.

В качестве исследуемого образца взят 120-тонный сталеразливочный ковш. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее компонентов соответствуют приведенным в таблице [5]. При этом зависимость теплоемкости и теплопроводности материалов от температуры t учитывается в виде коэффициентов соответствующих линейных уравнений.

Теплоемкость стали в зависимости от температуры t , Дж/(кг·°C):

- в диапазоне 100-500 °C – $C = 585 + 0,185t$;
- в диапазоне 900-1650 °C – $C = 859 - 0,040t$.

Номинальная начальная температура расплава в ковше после выпуска принята равной 1620 °C, а начальная температура внутренней поверхности футеровки подготовленного ковша – 1000 °C. Температура окружающей среды – 30 °C. Условия моделирования соответствовали случаю выдержки заполненного жидкой сталью ковша в течение 30 мин.

Для расчета процесса нестационарного теплообмена при охлаждении расплава в сталеразливочном ковше используются следующие номинальные (средние) значения параметров модели:

- масса расплава 120 т;
- плотность расплава 7000 кг/м³;
- геометрические размеры ванны: диаметр 3,000 м; высота 2,425 м;
- коэффициенты теплоотдачи конвекцией, Вт/(м²·°C):

- от расплава к стенке ковша – 5800;
- от поверхности расплава к воздуху – 27;
- от наружной стенки ковша к воздуху – 12;
- степень черноты поверхности расплава – 0,48.

Последовательность моделирования

Моделирование проводилось для двух вариантов значений каждого из параметров: на 10 % меньше и на 10 % больше их номинального значения. В каждом случае определялась величина коэффициента влияния параметра на величину снижения температуры расплава за время моделирования (30 мин).

Коэффициенты влияния K_e параметров рассчитывались по формуле

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

где P_{\max} , P_{\min} , P_n – соответственно, максимальное, минимальное и номинальное значения исследуемого параметра; Δt_{\max} , Δt_{\min} , Δt_n – соответствующие значения снижения температуры расплава за время моделирования.

Результаты моделирования

В результате проведенного исследования на модели [5] получены следующие коэффициенты влияния ее параметров.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее чувствительна модель к точности задания следующих параметров (коэффициенты влияния $K_e > 0,3$):

- 1) теплоемкость расплава $K_e = - 0,852$;
- 2) внутренний диаметр ковша $K_e = + 0,740$;
- 3) начальная температура внутренней стенки футеровки $K_e = - 0,655$;
- 4) масса расплава $K_e = - 0,567$;
- 5) степень черноты поверхности расплава $K_e = + 0,392$.

Менее значимо влияние параметров ($0,3 > K_e > 0,01$):

- 6) плотность (теплоемкость) корунда $K_e = + 0,236$;
- 7) теплопроводность корунда $K_e = + 0,155$;
- 8) толщина слоя корунда $K_e = + 0,079$;
- 9) коэффициент теплоотдачи конвекцией с поверхности расплава $K_e = + 0,053$;
- 10) коэффициент теплоотдачи от кожуха ковша $K_e = + 0,010$.

Рассмотрим, как меняется величина снижения температуры расплава за время моделирования (30 мин) на единицу измерения исследуемого параметра во всем диапазоне его значений, которые могут быть реализованы на практике. Изменения коэффициента чувствительности

Коэффициенты влияния параметров модели

Наименование параметра		Номинальное значение	Единица измерения	Коэффициент влияния
1		2	3	4
Масса расплава		120	т	минус 0,567
Теплоемкость расплава		796	Дж/(кг·°С)	минус 0,852
Внутренний диаметр ковша (приведенное значение)		3,000	м	плюс 0,740
Начальная температура внутренней поверхности футеровки ковша		1000	°С	минус 0,655
Степень черноты поверхности расплава		0,48	-	плюс 0,392
Коэффициент теплоотдачи конвекцией от расплава		27	Вт/(м ² ·°С)	плюс 0,053
Коэффициент теплоотдачи от кожуха ковша		12	Вт/(м ² ·°С)	плюс 0,0098
Коэффициент теплоотдачи от расплава к футеровке ковша		5800	Вт/(м ² ·°С)	плюс 0,0067
Температура окружающей среды		30	°С	минус 0,0019
Толщина слоя материалов футеровки ковша	корунда	150	мм	плюс 0,079
	муллита	65	мм	минус 0,0049
	шамота	32	мм	минус 0,0042
	АССБ	85	мм	минус 0,0033
	кожуха	20/25	мм	плюс 0,00016
Свойства корунда (рабочий слой футеровки)	плотность	3000	кг/м ³	плюс 0,236
	теплоемкость	1290	Дж/(кг·°С)	плюс 0,236
Теплопроводность материалов футеровки	корунда	4,0	Вт/(м·°С)	плюс 0,155
	муллита	1,85	Вт/(м·°С)	плюс 0,0055
	шамота	0,86	Вт/(м·°С)	плюс 0,0043
	АССБ	0,55	Вт/(м·°С)	плюс 0,0034

Примечание. Значения коэффициентов влияния величин плотности и теплоемкости материалов футеровки (кроме рабочего слоя корунда), а также теплофизических свойств стального кожуха не превышают 0,001.

модели $\bar{\Delta}t$ для каждого достаточно влиятельного параметра были определены по выражению

$$\bar{\Delta}t = \frac{\Delta t_{\max} - \Delta t_{\min}}{\Delta P}, \quad (2)$$

где Δt_{\max} , Δt_{\min} – соответствующие значения снижения температуры расплава за время моделирования; ΔP – изменение исследуемого параметра.

Коэффициент чувствительности для теплоемкости расплава (рис. 1)

$$\bar{\Delta}t_c = 2,0 \cdot 10^{-4} C_m - 0,286, \text{ } ^\circ\text{C} / (\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})).$$

Коэффициент чувствительности для внутреннего диаметра ковша (рис. 2)

$$\bar{\Delta}t_D = 16,5D_{in} - 26,4, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{м}.$$

Коэффициент чувствительности для начальной температуры внутренней стенки футеровки (рис. 3)

$$\bar{\Delta}t_w = -2,0 \times 10^{-5} t_o - 0,041, \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}.$$

Коэффициент чувствительности для массы расплава (рис. 4)

$$\bar{\Delta}t_m = -1,0 \cdot 10^{-4} M_m^2 + 0,036 M_m - 2,96, \text{ } ^\circ\text{C}/\text{т}.$$

Коэффициент чувствительности для степени черноты расплава (рис. 5)

$$\bar{\Delta}t_\varepsilon = -13,55 \varepsilon_m + 83,14, \text{ } ^\circ\text{C} / \text{ед}.$$

Коэффициент чувствительности для теплоемкости корунда (рис. 6)

$$\bar{\Delta}t_{cor} = -6 \cdot 10^{-6} C_{cor} + 0,0253, \text{ } ^\circ\text{C} / (\text{Дж} / (\text{кг} \times ^\circ\text{C})).$$

Выводы

На основе анализа влияния вариативности конструктивных и теплофизических факторов на результаты моделирования процесса охлаждения расплава во время его нахождения в сталеразливочном ковше проведена классификация этих параметров по значимости.

Полученные коэффициенты чувствительности для наиболее влиятельных параметров (теплоемкости, массы и степени черноты поверхности расплава, внутреннего диаметра ковша, начальной температуры внутренней стенки футеровки, плотности и теплоемкости слоя корунда) позволяют повысить точность результатов моделирования теплового состояния конкретных ковшей в реальных производственных условиях.

Это обеспечивает создание адекватной модели теплового состояния ковшей, необходимых при разработке АСУ внепечной обработки стали.

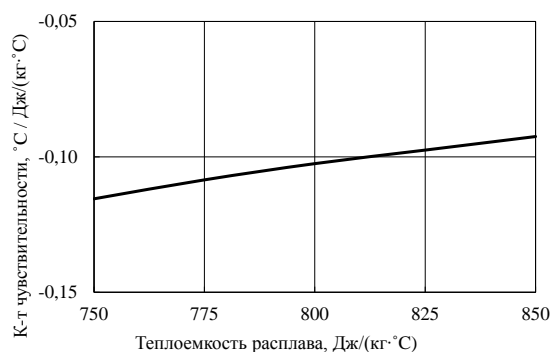


Рис. 1. Изменение коэффициента чувствительности для теплоемкости расплава

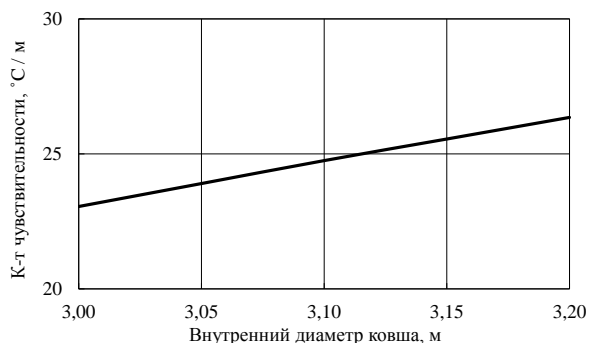


Рис. 2. Изменение коэффициента чувствительности для внутреннего диаметра ковша

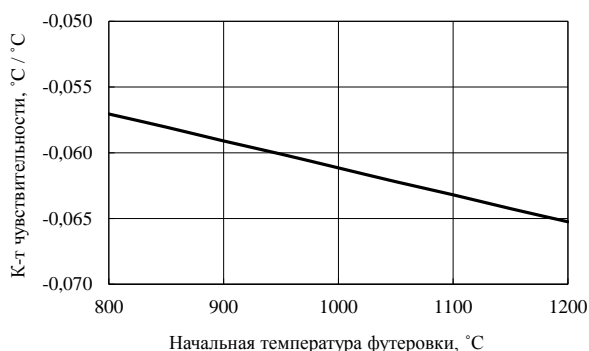


Рис. 3. Изменение коэффициента чувствительности для начальной температуры внутренней стенки футеровки

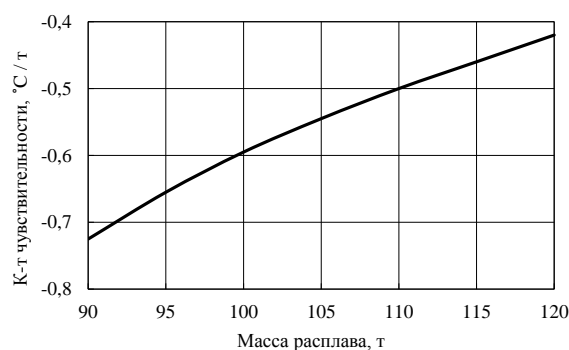


Рис. 4. Изменение коэффициента чувствительности для массы расплава

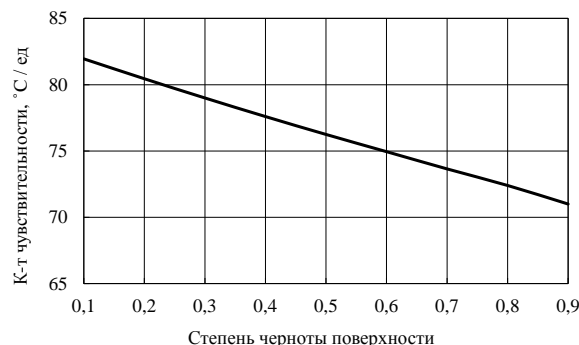


Рис. 5. Изменение коэффициента чувствительности для степени черноты расплава

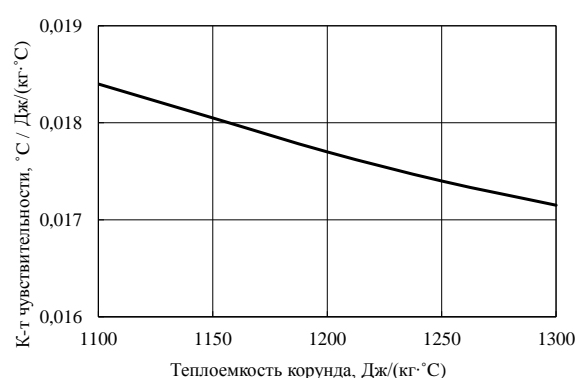


Рис. 6. Изменение коэффициента чувствительности для теплоемкости корунда

Библиографический список

1. Огурцов А. П. Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и внепечные технологии. Том 2. – Днепропетровск: ДГТУ, 2011. – 275 с.
2. 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.
3. Бейцун С. В. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше // С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. Ф. Сапов. – Металургійна теплотехніка: збірник наукових праць НМетАУ. – Дніпропетровськ: ПП Грек О. С., 2006. – С. 8-15.

4. Михайловский Н. В. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава // Н. В. Михайловский, С. В. Бейцун. – Металургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2010. – С. 135-142.

5. Бейцун С. В. Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали // С. В. Бейцун, Н. В. Михайловский, В. И. Шибакинский. – Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 4. – С. 104-107.

6. 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.

Поступила 30.09.2014