



Тепловое состояние ковшей при внепечной обработке стали

Разработана математическая модель изменения теплосодержания футеровки сталеразливочного ковша при различных операциях на участке внепечной обработки стали. Исследовано изменение температуры расплава в ковше при различных вариантах его подготовки под разливку. Установлена зависимость величины снижения температуры расплава, разлитого в ковш, от времени остывания ковша. Результаты исследований полезны для экономии энергоресурсов при подготовке сталеразливочных ковшей. Ил. 3. Табл. 1. Библиогр.: 3 назв.

Ключевые слова: теплосодержание футеровки, сталеразливочный ковш, внепечная обработка стали

A mathematical model of heat content changes ladle linings for various operations in the area furnace steel processing. The change in temperature of the melt in the ladle at the different embodiments of preparation for pouring. The dependence of the value of reducing the temperature of the melt, spilled into the bucket, and then cooling the bucket. The research results are useful for saving energy in the preparation of steel ladles.

Keywords: heat content of the lining, steel ladle, ladle treatment of steel.

Введение

Внепечная обработка характеризуется значительными энергетическими затратами, связанными с поддержанием температуры стали в ковше в заданных пределах. Снижение температуры расплава связано с тепловыми потерями на нагрев футеровки ковша, теплопередачей через нее и излучением с открытой поверхности расплава.

С целью снижения тепловых потерь расплава на нагрев футеровки, а также уменьшения ее термического удара при наполнении сталью, ковш предварительно разогревают на специальных стендах, что также сопряжено с большими энергетическими затратами.

По принятой технологии, под выпуск могут также подаваться ковши после разливки, которые не требуют дополнительного разогрева. В таком случае возникает задача определения теплосодержания футеровки ковша, который после разливки назначен под выпуск стали, т.к. между двумя этими операциями проходит определенное время, за которое ковш частично остывает.

Существующие технические средства контроля не позволяют адекватно оценивать теплосодержание футеровки ковша, поэтому необходимо разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать изменение температуры футеровки ковша. Использование такой модели позволит судить о необходимости и длительности дополнительного разогрева ковша, что в конечном итоге уменьшит энергетические затраты на плавку.

Исследованию распределения температур внутри футеровки ковша при различном тепловом воздей-

ствии на нее посвящено много работ. В частности, в [1] описана математическая модель нестационарного теплопереноса через огнеупорную футеровку ковша, которая позволяет рассчитывать изменение температуры расплава в зависимости от толщины слоев футеровки ковша и состояния поверхности расплава.

С использованием этой модели рассмотрено влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава. В работе [2] предложена технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша.

Цель статьи - разработать математическую модель изменения теплосодержания футеровки и исследовать изменение температуры расплава в зависимости от предыдущего времени остывания ковша с целью рационального использования ковшей под выпуск стали после разливки.

Исходные данные для моделирования

В качестве объекта исследования были приняты 120-т сталеразливочные ковши, которые применяются для внепечной обработки. Наружный диаметр ковша по обечайке составляет 3,6 м, высота ковша 4,3 м.

После внепечной обработки по окончании разливки сталеразливочные ковши, не имеющие повреждений и дефектов, устанавливаются, как правило, на стенды для ожидания. По мере необходимости эти ковши затем разогревают под выпуск стали. Однако, ковши могут быть назначены непосредственно под следующий выпуск стали из печи. В этом случае важно оценить, насколько быстро будет остывать разлитая в них сталь.

Для моделирования теплового состояния сталеразливочный ковш принят цилиндром с плоским днищем. В математической модели учитывается те-

плообмен через боковую поверхность и днище ковша, которые состоят из нескольких слоев различных материалов, а также излучением с поверхности расплава, покрытого слоем шлака или теплоизолирующего материала.

Моделирование нестационарной теплоотдачи от расплава через многослойные стенку и днище сталеразливочного ковша производится по исходным данным и рассчитанному начальному полю температур с учетом изменения температуры расплава. Для расчета всего процесса нестационарного теплообмена при различных операциях со сталеразливочным ковшом используются следующие исходные данные:

- геометрические размеры ванны (высота 3,0 м, диаметр 2,57 м);
- плотность расплава (7500 кг/м³);
- начальная температура расплава (1620 °С) и внутренней поверхности футеровки ковша после его прогрева на стенде (1000 °С), а также температура окружающей среды – воздуха (20 °С);
- толщина и число слоев футеровки (приведены в таблице);
- коэффициенты теплоотдачи: от наружной стенки ковша к воздуху – 50 Вт/(м² × К), от внутренней стенки ковша к воздуху – 75 Вт/(м² × К), от расплава к стенке ковша – 5800 Вт/(м² × К);
- степень черноты излучающей поверхности: шлака – 0,40, теплоизолирующего материала – 0,04.

Расчет нестационарной лучистой теплоотдачи с поверхности расплава в ковше производится для излучения в окружающее пространство с температурой $T_{окр}$. Общее изменение температуры расплава Δt_p на каждом шаге времени моделирования $\Delta \tau$ вычисляется по выражению

$$\Delta t_p = - \frac{(Q_{см} + Q_{дн} + Q_{нов})}{C_p \cdot M_p} \Delta \tau, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (1)$$

где $Q_{см}$ и $Q_{дн}$ – соответственно, тепловой поток от расплава к стенке и к днищу ковша, Вт; $Q_{нов}$ – тепловой поток с поверхности расплава, Вт; C_p – теплоемкость расплава, Дж/(кг × К); M_p – масса расплава, кг.

Изменение температуры Δt_i цилиндрических слоев футеровки стенки ковша вычисляются по выражению

$$\Delta t_i = (Q_{i-1} - Q_i) \cdot \Delta \tau / \left(C_i \cdot \rho_i \cdot \frac{\pi(d_i^2 - d_{i-1}^2)}{4} \cdot H_p \right), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2)$$

где C_i и ρ_i – соответственно, теплоемкость (Дж/(кг × К)) и плотность (кг/м³) материала i -го слоя футеровки; d_i^2 и d_{i-1}^2 – внутренний и наружный диаметры i -го слоя, м; H_p – высота ванны расплава в ковше, м; Q_{i-1} и Q_i – соответственно, тепловые потоки через внутреннюю и наружную поверхности i -го слоя.

Соответственно, тепловые потоки для (2) определяются по зависимостям

$$Q_i|_{i=1} = Q_{см} = \pi \alpha_p d_{вн} H_p (t_{вн} - t_1), \text{ Вт}$$

$$Q_i = \frac{2\pi \lambda_i H_p}{\ln(d_i / d_{i-1})} (t_i - t_{i+1}), \text{ Вт} \quad (3)$$

$$Q_i|_{i=n} = Q_{окр} = \pi \alpha_{окр} d_{нар} H_p (t_{нар} - t_{бр}), \text{ Вт}$$

где α_p и $\alpha_{окр}$ – коэффициенты теплоотдачи, соответственно, от расплава к футеровке и от брони ковша в окружающую среду, Вт/(м² × К); $d_{вн}$ и $d_{нар}$ – внутренний и наружный диаметры ковша, м; λ_i – теплопроводность i -го слоя футеровки, Вт/(м × К); n – число слоев футеровки стенки ковша; t_i, t_{i+1} – температура соответствующих слоев футеровки; $t_p, t_{вн}, t_{нар}, t_{бр}$ – температура расплава, первого (внутреннего) и последнего (наружного) слоев футеровки и брони, соответственно, °С.

Изменение температуры Δt_i плоских слоев футеровки - днища ковша определяется как

$$\Delta t_i = (Q_{i-1} - Q_i) \cdot \Delta \tau / (C_i \cdot \rho_i \cdot F_{дн} \cdot \delta_i), \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

где $F_{дн}$ и δ_i – площадь поверхности и толщина i -го слоя днища, м.

Тепловые потоки в (4) вычисляются по выражениям

$$Q_i|_{i=1} = Q_{дн} = \alpha_p F_{дн} (t_{вн} - t_1), \text{ Вт}$$

$$Q_i = \frac{\lambda_i}{\delta_i} F_{дн} (t_i - t_{i+1}), \text{ Вт} \quad (5)$$

$$Q_i|_{i=m} = Q_{окр} = \alpha_{окр} F_{дн} (t_{нар} - t_{бр}), \text{ Вт}$$

где m – число слоев футеровки днища ковша. Обозначения остальных параметров соответствуют аналогичным параметрам для стенки ковша.

Лучистый тепловой поток с поверхности расплава определяется в соответствии с законом Стефана-Больцмана

$$Q_{нов} = \varepsilon_{np} C_o S_p (T_p^4 - T_{окр}^4), \text{ Вт} \quad (6)$$

где ε_{np} – приведенная степень черноты системы «расплав-окружающая среда» с учетом доли открытой (свободной от шлака) поверхности металла

$$\varepsilon_{np} = \left(\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_{окр}} - 1 \right)^{-1}, \quad (7)$$

здесь ε_p и $\varepsilon_{окр}$ – степень черноты поверхности расплава и окружающей среды, соответственно; $C_o = 5,670 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² × К⁴) – постоянная Больцмана; S_p – площадь открытой поверхности расплава, м²; T_p и $T_{окр}$ – абсолютные температуры расплава и окружающей среды, соответственно, К.

Структура футеровки сталеразливочного ковша,

а также теплофизические свойства ее компонентов приведены в таблице. Зависимость теплоемкости и теплопроводности материалов от температуры t ($^{\circ}\text{C}$) учитывается в виде коэффициентов соответствующих линейных уравнений (см. таблицу).

Последовательность моделирования

Моделирование проводилось для двух вариантов технологии внепечной обработки стали. В первом варианте моделировалась подготовка (прогрев) ковша на стенде до температуры внутренней поверхности 1000°C с последующим наливом в него расплавленного металла, покрытого шлаком. После скачивания шлака (через 20 мин) поверхность расплава укрывалась теплоизолирующим материалом.

Во втором варианте моделировалось остывание пустого ковша по окончании разливки в течение определенного времени, а затем налив в него расплавленного металла с аналогичной первому варианту обработкой поверхности расплава. Сравнивались величины снижения температуры расплава за 1 ч в обоих вариантах.

Результаты моделирования

На рис. 1 представлены результаты моделирования по первому варианту. Кривая 1 представляет начальную температуру слоев футеровки стенки предварительно прогретого ковша, кривая 2 – температуру слоев через 60 мин после налива в ковш расплавленного металла. Аналогично изменяется температура слоев дна ковша.

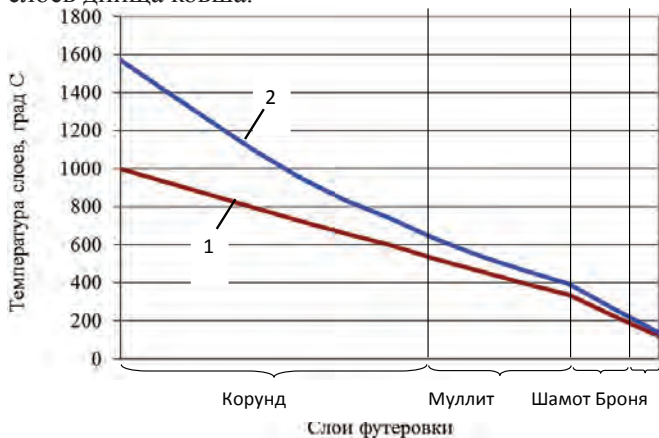


Рис. 1. Результаты моделирования динамики теплового состояния предварительно прогретого ковша

На рис. 2 представлены результаты моделирования по второму варианту. Кривые 1 и 2 соответствуют состояниям температур, указанных на рис. 1.

Таблица. Структура футеровки сталеразливочного ковша и теплофизические свойства ее материалов [3]

Материал	Толщина, мм		Число слоев		Плотность, кг/м ³	Тепло-емкость, кДж/(кг·°C)	Теплопро-водность Вт/(м·°C)
	стенка	дно	стенка	дно			
Корунд	150	150	6	8	3000	790 + 0,42 t	2,10 + 1,90 10 ⁻³ t
Муллит	65	65	4	4	2600	840 + 0,25 t	1,39 + 6,10 10 ⁻⁴ t
Шамот	32	–	2	–	2000	880 + 0,23 t	0,69 + 3,14 10 ⁻⁴ t
АССБ	–	85	–	6	1400	840 + 0,20 t	0,48 + 1,40 10 ⁻⁴ t
Сталь	20	28	1	1	7800	500	33,1

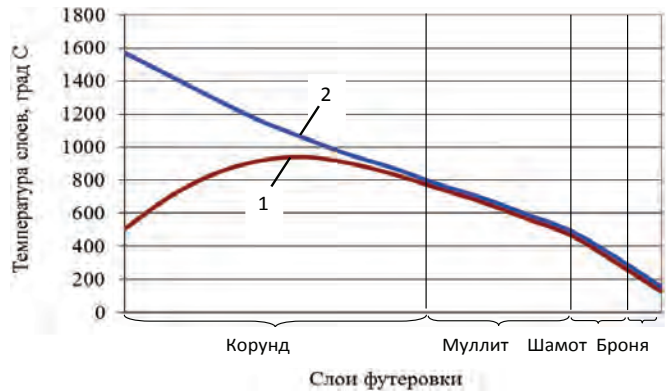


Рис. 2. Результаты моделирования динамики теплового состояния остывшего ковша

Начальный профиль температуры футеровки зависит от времени остывания ковша. На рис. 3 представлены результаты исследования зависимости величины снижения (в течение 1 ч) температуры разлитого расплава от времени предыдущего остывания ковша.

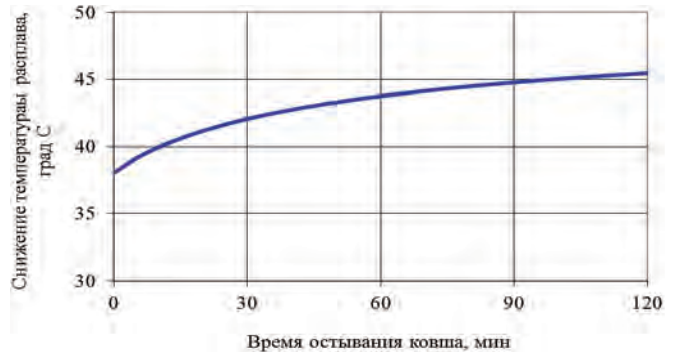


Рис. 3. Зависимость снижения температуры расплава от времени предыдущего остывания ковша

В результате моделирования первого варианта технологии внепечной обработки стали установлено, что температура расплава, разлитого в предварительно прогретый ковш (до температуры внутренней поверхности 1000°C), в течение одного часа снижается на $43,5^{\circ}\text{C}$ (базовое значение).

Анализ полученной на модели зависимости снижения температуры расплава, разлитого (по второму варианту технологии) в остывший ковш, от промежутка времени между его опорожнением и следующим заполнением расплавом, показывает, что базовая величина снижения температуры расплава ($43,5^{\circ}\text{C}$)

достигается через 55 мин.

Следует заметить, что при времени остывания ковша до 2 ч, снижение температуры разлитого в него расплава не превышает 45,5 °С, что всего на два градуса больше базового значения для предварительно прогретого ковша.

Выводы

Разработана математическая модель теплового состояния сталеразливочного ковша на участке внепечной обработки стали. На этой модели исследовано изменение температуры расплава в ковше при различных вариантах его подготовки под разливку. Установлена зависимость величины снижения температуры расплава, разлитого в ковш, от времени остывания последнего. Результаты исследований могут быть полезны для экономии энергоресурсов при подготовке сталеразливочных ковшей.

Библиографический список

1. Математическая модель процесса охлаждения расплава в сталеразливочном ковше / С.В. Бейцун, Н.В. Михайловский, ВФ. Сапов // Металургійна теплотехніка: зб. наук. пр. НМетАУ. – Дніпропетровськ: ПП Грек О.С. – 2006. – С. 8-15.
2. Технология автоматического определения теплосодержания сталеразливочного ковша / С.В. Агеев, А.Д. Чернопольский, И.А. Петушков и др. // Металлург. – 2011. – № 5. – С. 48-52.
3. Промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования: 2-ое издание, перераб. и доп. / Е.И. Казанцев. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

Поступила 27.05.2013

УДК 661.666: 66.096.5

Федоров С.С. /к.т.н./

Национальная металлургическая Академия Украины

Наука

Анализ эффективности применения высокотемпературных секционных утилизаторов теплоты с кипящим слоем. Результаты исследований. Сообщение II

С целью повышения тепловой эффективности электротермических печей кипящего слоя при высокотемпературной переработке углеродных материалов изучена тепловая работа секционных утилизаторов теплоты готового продукта, предназначенных для нагрева исходного сырья. На основе математического моделирования исследовано влияние гранулометрического состава материала, рабочих температур, числа секций, тепловых потерь через футеровку и отношения расходных теплоемкостей теплоносителей. Ил. 3. Табл. 3. Библиогр.: 6 назв.

Ключевые слова: переработка углеродных материалов, высокотемпературная электротермическая печь, кипящий слой, повышение тепловой эффективности, секционный утилизатор теплоты готового продукта, нагрев сырья, математическое моделирование

In order to improve the thermal efficiency of electrothermal fluidized bed furnaces at high temperature processing of carbon materials studied thermal performance of heat recovery boilers sectional final product intended for heating the feedstock. On the basis of mathematical modeling studied the effect of particle size distribution of the material, operating temperature, number of sections, heat loss through the lining and the expenditure heats heat transfer fluids.

Keywords: recycling of carbon materials, high-temperature electrothermal furnace, fluidized bed, increasing thermal efficiency, heat recovery sectional final product, the heating of raw materials, mathematical modeling.

Важным аспектом организации кипящего слоя является обеспечение его устойчивой работы при минимальном уносе материала. При этом снижение уноса может достигаться как увеличением высоты надслоевого пространства, расширением сечения камеры, так и установкой улавливающих циклонов [1]. Как показал анализ гидродинамических режимов кипения слоя частиц материала (графита и антрацита) полифракционного состава 0,8-5 мм, проведенный ранее на «холодной» экспериментальной модели [2], при переходе из плотного состояния в псевдоожи-

женное наблюдается некоторый переходный режим, соответствующий постепенному включению в процесс кипения более тяжелых фракций. Выполненные расчеты критических скоростей витания частиц графита [3] при температурах потока азота до 3000 °С [4] показали, что такая тенденция сохраняется. При неоднородном составе материала, когда «тяжелые» фракции только включаются в режим кипения, «легкие» фракции на порядок меньшего размера уже достигают второй критической скорости начала уноса (рис. 1, 2). Таким образом, на основе полученных