

УДК 669.184

Л. В. Камкина /д. т. н./, С. В. Бейцун /к. т. н./,
Н. В. Михайловский /к. т. н./,
В. И. Шibaкинский /к. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

Управление нагревом сталеразливочного ковша

Для эффективного управления процессом термической подготовки сталеразливочных ковшей разработана прогнозирующая модель изменения теплосодержания футеровки с учетом степени ее износа.

Ключевые слова: сталеразливочный ковш, теплосодержание футеровки, температура кожуха, износ рабочего слоя. (Илл. 2. Библиогр.: 5 назв.).

The predicting model of change of lining heat content taking into account degree of its wear is developed for effective management of thermal preparation process of steel teeming ladles.

Key words: steel teeming ladle, lining heat content, housing temperature, wear of working layer.

Введение

На современном этапе производства стали разливочный ковш используется не только как емкость для приема, хранения и транспортирования жидкой стали, но и как агрегат, в котором выполняются различные технологические операции – нагрев, перемешивание, десульфурация, вакуумирование расплава и др. [1]. Такие условия эксплуатации ковша сказываются на тепловом состоянии и стойкости футеровки.

Для снижения теплового удара футеровки ковша при выпуске и для уменьшения тепловых потерь расплавом при внепечной обработке стали осуществляют разогрев сталеразливочных ковшей на специальных стендах. Эта технологическая операция требует значительных затрат энергии, т. к. разогрев производится сжиганием природного газа, а время подготовки ковша может достигать суток и более.

Зарубежные и отечественные исследователи активно занимаются изучением термического и прочностного состояния ковшей. Эти работы связаны с учетом влияния структуры футеровки, свойств огнеупорных материалов и режимов эксплуатации на ее стойкость. Так, в работах [2; 3] представлены исследования, направленные на изучение температурных полей, возникающих в футеровке стенок и днища ковша.

Для управления процессом разогрева ковша необходимо оценивать теплосодержание футеровки. Современные технические средства не позволяют это осуществлять в производственных условиях. При разогреве ковша, как правило, периодически измеряют температуру внутренней поверхности футеровки [4]. На ряде

предприятий управление нагревом осуществляют по температуре кожуха ковша, которая постоянно контролируется пирометром. Однако такой способ управления приводит к недогреву ковша по мере увеличения износа его футеровки.

Постановка задачи

Определение степени нагрева футеровки сталеразливочного ковша перед подачей его под выпуск – важная технологическая задача, поскольку позволяет прогнозировать температуру стали в ковше после выпуска. Это, в свою очередь, является решающим фактором для обеспечения стабильности технологии внепечной обработки и, в конечном итоге, качества стали. Нагрев ковша сопровождается значительным изменением теплофизических свойств материалов футеровки. Тепловое состояние футеровки зависит также от геометрических размеров, емкости и конфигурации ковша, степени износа его футеровки.

Для адекватного управления процессом термической подготовки сталеразливочного ковша с контролем по температуре кожуха необходимо разработать прогнозирующую модель изменения теплосодержания футеровки при эксплуатации.

Обоснование критерия эффективности

Для оценки эффективности термической подготовки ковша целесообразно использовать отношение полученного теплосодержания многослойной футеровки ковша к максимальной его величине при стационарном режиме нагрева.

Удельное теплосодержание $I(x)$ стенки и днища ковша в характерных сечениях определяем как:

$$I(x) = \rho \delta C(T(x)) T(x), \text{ Дж/м}^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность материала футеровки, кг/м³; δ – толщина его слоя, м; $C(T(x)) = C_0 + b T(x)$ – теплоемкость материала в зависимости от его температуры, Дж/(кг × К); C_0 – теплоемкость материала при 0 °С; b – температурный коэффициент; $T(x) = ax + T_{in}$ – профиль температуры по толщине слоя, линеаризованный по результатам моделирования. Для каждого слоя футеровки координата x изменяется от 0 (внутренняя граница слоя) до δ (внешняя граница слоя). При этом коэффициент a линеаризации определяется как $a = (T_{out} - T_{in}) / \delta$, где T_{out} и T_{in} – соответственно, температура на внешней и внутренней границе слоя футеровки, °С.

Величину удельного теплосодержания для k -го слоя футеровки определяем интегралом:

$$I_k = \int_0^{\delta_k} I_k(x) dx_k = \int_0^{\delta_k} \rho_k (C_{0k} + b_k (T_{0k} + a_k x)) (T_{0k} + a_k x) dx_k. \quad (2)$$

В результате интегрирования получаем:

$$I_k = \rho_k \left[T_{0k} (C_{0k} + b_k T_{0k}) \delta_k + a_k (C_{0k} + 2b_k T_{0k}) \delta_k^2 / 2 + a_k^2 b_k \delta_k^3 / 3 \right]. \quad (3)$$

Удельное теплосодержание стенки и днища равно, соответственно, сумме удельных теплосодержаний слоев футеровки в характерных сечениях: для стенки – на уровне шлакового пояса, а для днища – по оси ковша.

Исходные данные для моделирования

При проведении термического анализа, как правило, интерес представляют распределение температуры, температурные градиенты и тепловые потоки. Математическая модель содержит уравнение в частных производных, граничные условия, с которыми решаются эти уравнения, и модель теплофизических свойств материала.

Используемое в модели уравнение краевой задачи нестационарной теплопроводности для осесимметричного тела в цилиндрической системе координат r, z имеет вид:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) = c(T) \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (4)$$

где $\lambda(T)$, $c(T)$, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; T – температура; t – время.

Для нахождения частного решения задачи (4) должны быть заданы начальные и граничные условия.

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.

Исследование производилось на компьютерной модели [5] теплового состояния ковша, в которой учитываются тепловые потери через боковую поверхность и днище ковша.

В качестве исследуемого образца взят 120-тонный сталеразливочный ковш. Структура футеровки ковша, а также теплофизические свойства ее компонентов соответствуют приведенным в [5].

Последовательность моделирования

Для исследования влияния износа футеровки на тепловое состояние ковша рассматривались два варианта:

1) Нагрев вновь футерованного ковша с толщиной рабочего слоя футеровки из корунда 150 мм.

2) Нагрев ковша с наполовину выработанным рабочим слоем (толщина корунда 75 мм).

Для каждого варианта моделировались четыре стадии эксплуатации ковша:

стадия 1 – разогрев ковша в течение 24 часов при постоянной температуре внутренней стенки футеровки 1100 °С и окружающей среды 30 °С;

стадия 2 – пребывание расплава с начальной температурой 1620 °С в ковше в течение 60 минут;

стадия 3 – остывание ковша в течение шести часов при температуре окружающей среды 30 °С;

стадия 4 – подогрев ковша при постоянной температуре внутренней стенки 1100 °С до достижения теплосодержания футеровки при нагреве.

Результаты моделирования

На рис. 1 представлено изменение удельного теплосодержания футеровки стенки при разогреве (кривая 1) и подогреве (кривая 2) ковша по варианту 1, а также при подогреве ковша с наполовину выработанным рабочим слоем (кривая 3) – вариант 2. Пунктиром показаны максимальные величины теплосодержания футеровки при стационарном режиме нагрева (4 – для варианта 1 и 5 – для варианта 2).

На рис. 2 представлено изменение температуры кожуха при разогреве ковша по варианту 1 (кривая 1) и подогреве этих ковшей (кривая 2 – для варианта 1 и кривая 3 – для варианта 2).

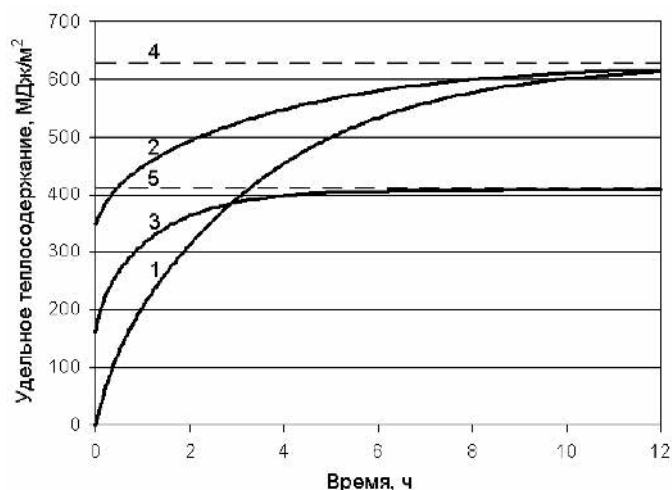


Рис. 1. Изменение удельного теплосодержания футеровки ковша при его нагреве

Исследование на компьютерной модели показало, что время достижения максимального теплосодержания футеровки зависит не только от стадии нагрева ковша, но и от степени износа рабочего слоя. При подогреве максимальное теплосодержание ковша с наполовину выработанным рабочим слоем корунда достигается в 2,4 раза быстрее, чем при подогреве вновь футерованного ковша.

Результаты моделирования показывают, что контроль степени нагрева ковша по температуре его кожура оправдывает себя для вновь футерованного ковша. Так, при его термической подготовке практически одинаковое теплосодержание футеровки достигается при одной и той же температуре кожуры.

Однако попытка использовать это же значение температуры для управления подогревом ковша с изношенным рабочим слоем приведет к существенному недогреву футеровки: отношение полученного теплосодержания к максимальному ее значению, реализуемому при стационарном режиме нагрева, составит всего 91 %.

Выводы

Продемонстрирована возможность достоверного контроля теплового состояния футеровки по температуре кожуры только для вновь отфутерованных ковшей. Настройка системы управления стендом нагрева на определенную температуру кожуры приведет к недогреву ковшей с изношенной футеровкой.

Для управления процессом термической подготовки сталеразливочного ковша с контролем по температуре кожуры необходимо исполь-

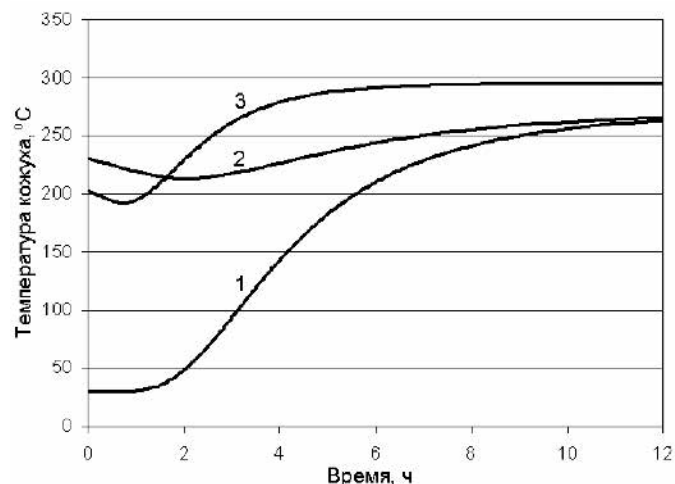


Рис. 2. Изменение температуры кожуры ковша при его нагреве

зовать прогнозирующую модель изменения теплосодержания футеровки, учитывающую ее износ.

Применение предложенного критерия эффективности дает возможность снизить энергозатраты на подготовку и эксплуатацию ковшей.

Библиографический список

1. Огурцов А. П. Производство стали от старта до финиша. Сталеразливочный ковш и внепечные технологии. Т. 2 / А. П. Огурцов. – Днепродзержинск: ДГТУ, 2011. – 275 с.
2. Volkova O. Modelling of temperature distribution in refractory ladle lining for steelmaking / O. Volkova, D. Janke // ISIJ International, 2003. – Vol. 43. – No. 8. – P. 1185–1190.
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. 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.
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.

Поступила 30.11.2015