

Моделирование теплофизических процессов в футеровке сталеразливочного ковша

Я. В. ПАВЛОВ, В. В. БЕЛОУСОВ, В. В. МИХЕЕВ

В данной работе сформулирована математическая модель и результаты численного моделирования термодинамических процессов в футеровке сталь-ковша, с целью выяснения причин прогара. В результате численных экспериментов, определена основная причина прогара и даны рекомендации во избежание этой аварии.

У даній роботі сформульована математична модель і результати чисельного моделювання термодинамічних процесів в футеровці сталь-ковша, з метою з'ясування причин прогара. В результаті чисельних експериментів, визначена основна причина прогара і дані рекомендації щоб уникнути цієї аварії.

In this article was formulated mathematical model and results of numerical modeling of thermodynamical processes in lining of steel-teeming ladle, with objective to find the reasons of blowhole. In results of numerical experiments was founded the main reason of blowhole. Recommendations were formulated to avoid this damage.

Введение. Одной из наиболее распространенных аварий при работе сталеразливочных ковшей является прогар (например, 17.12.2011 на предприятии ООО «Электросталь» произошел прогар сталь-ковша с схемой футеровки, представленной на рис. 1а). Одной из причин, по нашему мнению, является конструкционные недоработки, например низкая температура размягчения материала, используемого в арматуре (слой №5 на рис. 1а), которые могут привести к разрушению рабочего слоя футеровки.

Целью работы является: формулировка математической модели и результатов численного моделирования термодинамических процессов в футеровке сталь-ковша для выяснения причин прогара.

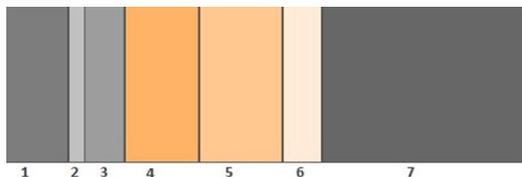


Рис.1а. Схема расчетной области прогоревшего сталь-ковша. 1-броня, 2-теплоизоляционная бумага, 3-теплоизоляционные маты, 4-теплоизоляционный кирпич, 5- арматурный слой, 6-магнезит, 7-рабочая ПУ футеровка

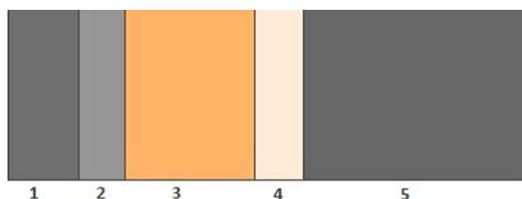


Рис.1б. Схема расчетной области сталь-ковша с запорожкой арматурой. 1-броня, 2-теплоизоляционная бумага, 3-арматурный слой, 4-магнезит, 5-рабочая ПУ футеровка

Постановка задачи. На предприятии используются сталь-ковши турецкой фирмы CVS, вместимостью 60т. На рисунках 1а, 1б представлены основные схемы футеровки. Рисунок 1б: слой 1-броня

сталь ковша, толщиной 25 мм., слой 2-теплоизоляционный картон alsiflex 1260 N-paiper (2 слоя по 5 мм.), слой 3- арматурный кирпич марки ШКУ 39-44, толщиной 65 мм., слой 4 – буферная масса ППФ-87, толщиной 5-10 мм., слой 5 – периклазоуглеродистый кирпич разных фирм производителей, толщиной 180 мм. Рисунок 1а отличается от вышеописанной схемы, добавлением дополнительного слоя теплоизоляции (keramik paper), добавлением перед арматурным слоем теплоизоляционного кирпича ТСВ 140-10, толщиной 30 мм и использованием арматурного кирпича марки pantal 53, толщиной 40 мм.

Процессы, протекающие в стенке ковша, описываются уравнением теплопереноса и краевыми условиями.

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{\partial}{\partial x} \lambda \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \lambda \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right]$$

где:

c – удельная теплоёмкость ;

ρ – плотность;

λ – коэффициент теплопроводности

Начальные условия задаются из соображение предварительного прогрева внутренней полости ковша до 800⁰С. Поэтому распределение начальной температуры в многослойной конструкции ковша представлена далее на рис. 3а.

Граничные условия записываются в следующем виде:

Броня – окружающая среда:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T_{\sigma} - T_{cp})$$

T_{σ} -- температура брони;

T_{cp} -- температура окружающей среды;

α – коэффициент теплообмена.

Коэффициент α был найден по формуле М. А. Михеева [1]:

$$Nu = C(GrPr)^a$$

где: $Pr = \frac{\nu}{\alpha}$ – число Прандтля; ν - кинематическая вязкость, м²/с; a – коэффициент

температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$; $Gr = \frac{\beta d^3 g \Delta T}{\nu^2}$ – число Грасгофа; [2]

C, n – эмпирические коэффициенты;

β – коэффициент объемного расширения, $1/\text{К}$;

d – диаметр ковша, выбранный как характерный размер, м ;

ΔT – разница температуры между броней и окружающей средой, С^0 ;

Найденный коэффициент теплообмена $\alpha=9,93$, $\text{Вт}/\text{м}^2\cdot\text{К}$.

На границе каждого слоя использовались внутренние граничные условия:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial n}, T_i = T_{i+1}$$

где λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя футеровки, $\text{Вт}/\text{м}\cdot\text{К}$ (рис.1).

Для описанных целей была создана компьютерная программа на базе среды разработки Visual Studio 2010, использующая в основе математического аппарата явный метод сеток для решения уравнения теплопроводности.

Полученный программный продукт способен прогнозировать температуры в каждом слое футеровки при заданной температуре среды внутри сталь-ковша (Жидкий металл или газ при просушивании и нагреве сталь-ковша) и заданной температуре окружающей среды в заданный момент времени.

Результаты численного эксперимента. Для оценки адекватности математической модели и вычислительного алгоритма были проведены сравнение результатов численного моделирования и натурного эксперимента. Для этого с помощью пирометра была измерена температура внешней поверхности брони сталь-ковша на высоте 1,5 метра от днища в различные моменты времени нахождения сталь-ковша на сушке. Для этого, с учетом конструктивных особенностей и температурных режимов был проведен численный эксперимент (рис. 2).

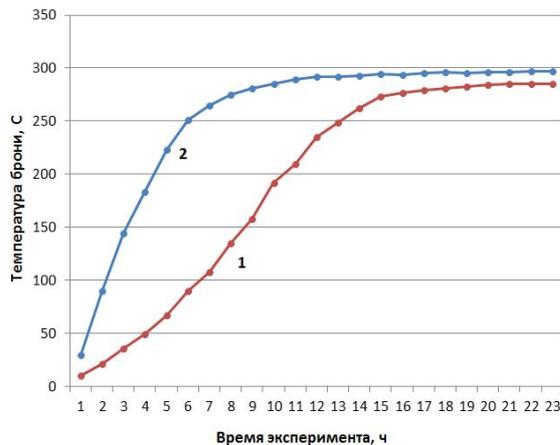


Рис. 2. Распределение температуры брони сталь-ковша в различные моменты времени. Кривая 1 – практические данные, кривая 2 – данные полученные при помощи математической модели

Как видно из рисунка наблюдается некоторое расхождение между результатами математического моделирования (кривая 2) и промышленным экспериментом (кривая 1). Это объясняется тем, что в первые 13 часов факел установки прогрева сталь-ковша не заполняет всю его полость и нагревание осуществляется потоками газа, которые соприкасаясь с холодными стенками охлаждаются. В модели температура всей полости принята постоянной и равной 800°C . Через 13 часов, в связи с прогревом стенок процесс нагревания выходит на стационарный режим и через 24 часа разница между результатами математического моделирования и производственным экспериментом составляет 14°C (4,6%), что подтверждает адекватность математической модели и вычислительного алгоритма.

Проведено четыре численных эксперимента, по два на каждый ковш с различными типами футеровки. Первый эксперимент проводился для получения распределения температур в футеровке сталь-ковша после нахождения его под сушкой (рис. 3а). Второй эксперимент непосредственно отражал условия, при которых сталь-ковш прогорел, т.е. присутствие металла в сталь-ковше на протяжении трех часов.

Распределение температуры, полученное в первом численном эксперименте было использовано для проведения следующего эксперимента, описывающего термодинамику футеровки сталь-ковша после трех часов нахождения с металлом. Результаты приведены на рисунке 3б. Как видно, броня сталь-ковша с арматурой представленной на рисунке 1а (кривая 1) при данных условиях прогрелась до $T_b=335^{\circ}\text{C}$, а изменение температуры между первым и последним узлом рабочей футеровки (узлы 143-161) составило $\Delta T=170^{\circ}\text{C}$

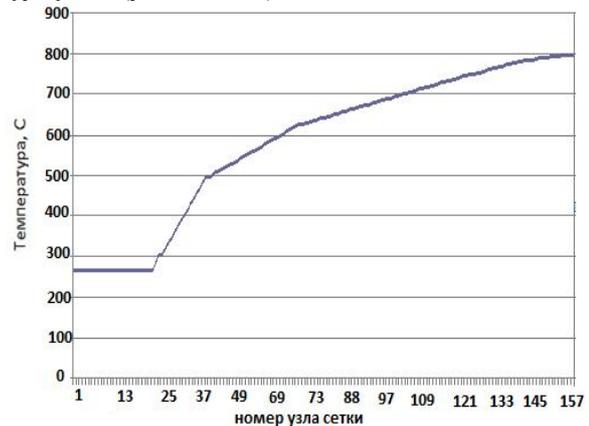


Рис. 3а. Распределение температуры в футеровке сталь-ковша после 24 часового прогрева на сушке

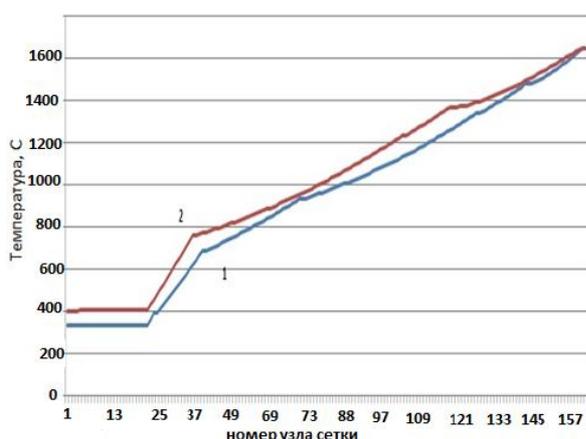


Рис. 3б. Кривая 1 – распределение температуры в футеровке сталь-ковша с схемой футеровки, представленной на рис. 1а, после трех часов нахождения с металлом; кривая 2 – Распределение температуры в футеровке сталь-ковша после трех часов нахождения с металлом, сталь-ковш с схемой футеровки представленной на рис. 1б.

В приведенных зависимостях видно отличие в теплоизоляционных свойствах двух видов ковшей. Сталь-ковш схема футеровки которого представлена на рис. 1б (кривая 2) продемонстрировал сравнительно худшую теплоизоляцию – броня прогрелась до $T_b=406\text{ }^\circ\text{C}$, что свидетельствует о более худших теплоизолирующих свойствах. Изменение температуры между первым и последним узлом рабочей футеровки (узлы 120-161) составило $\Delta T=282\text{ }^\circ\text{C}$. Зная коэффициент теплоотдачи α и температуры брони сталь-ковша получаем:

- потери в окружающую среду у ковша представленного на рисунке 1а составляют 77 кВт;
- потери в окружающую среду у ковша представленного на рисунке 1б составляют 94 кВт.

Как видно из полученных зависимостей, температура в футеровке сталь-ковша при прогревании в течение пяти часов, отличается от температуры при прогревании в течение восьми – на 19%, а отличие восьми часового эксперимента от двадцати четырех часового – на 6%. Следовательно, можно сделать вывод о возможности сокращения минимального времени прогревания сталь-ковша перед введением его в работу с 14 до 10 часов.

Также, в целях рационализации производства, представляет интерес время необходимое на прогревание сталь-ковша на сушке перед введением его в работу. Были проведены четыре эксперимента с целью нахождения времени, по достижению которого температура в футеровке сталь-ковша достигает стационарного значения.

Также, в целях рационализации производства, представляет интерес время необходимое на прогревание сталь-ковша на сушке перед введением его в работу. Были проведены четыре эксперимента с целью нахождения времени, по достижению которого температура в футеровке сталь-ковша достигает стационарного значения.

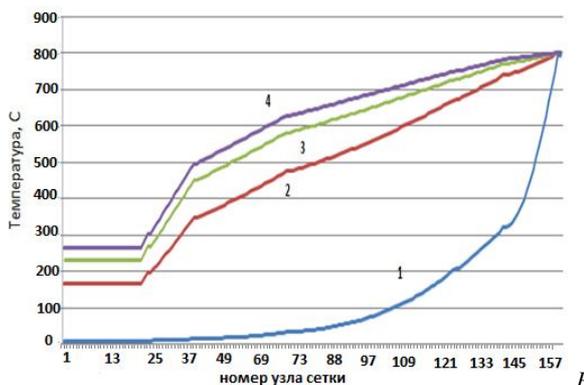


Рис. 4. Распределение температуры в футеровке сталь-ковша, при прогревании его на сушке. Кривая 1-после часа; кривая 2-после пяти часов; кривая 3-после восьми часов; кривая 4-после суток.

Выводы

- Теплоотвод отводимая от стенок сталь-ковша со схемой футеровки представленной на рис. 1а на 19 % меньше чем у сталь-ковша со схемой футеровки представленной на рис. 1б, эти потери для первого ковша составляют 3,9% , а для второго 4,8%, от потерь на нагревание остывшей футеровки. Следовательно, для снижения затрат электроэнергии и стабилизации температур разливки первоочередной задачей является максимально возможное сокращение, времени нахождения сталь-ковшей без металла. Стоит отметить, что при нахождении в обороте большого количества сталь-ковшей, находящийся без металла сталь-ковш, отставляется на сушку для поддержания температуры футеровки, что по нашему мнению ошибочно, т.к. температура до которой газ способен прогреть футеровку меньше температуры до которых футеровку прогрел жидкий металл. Следовательно, для снижение производственных затрат рекомендуется после разливки плавки не ставить ковш под сушку, а накрыть теплоизолирующей крышкой.
- Теплоизоляция в ковше со схемой футеровки представленной на рис. 1а привела к меньшему изменению температуры в рабочем слое футеровки чем в ковшах со схемой футеровки представленной на рис. 1б ($\Delta T_1=170\text{ }^\circ\text{C}$, $\Delta T_2=282\text{ }^\circ\text{C}$), меньшее падение температуры в рабочем слое снижает вероятность появления негативных механических напряжений способных привести к растрескиванию и последующему разрушению футеровки.
- Температура в футеровке сталь-ковша при прогревании в течение пяти часов, отличается от

температуры при прогревании в течение восьми – на 19%, а отличие в температуре при восьми часовом эксперименте от двадцати четырех часового – 6%, т.е. после восьми часов прогревания на сушке сталь-ковш близок к стационарному значению распределения температуры в футеровке. Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности снижения на 29% минимально рекомендуемого времени прогревания сталь-ковша перед вводом его в эксплуатацию.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов В. В., Болонов Н. И. Основы тепло-массопереноса и тепло-физика замкнутых объемов. Донецк : ДонНУ, 2003. 134 с.
2. Повх И. Л. Техническая гидромеханика. Л. Машиностроение. — 1976. 504 с.

пост. 07.06.12