

Thermal purification of natural mineral carbons / W. M. Goldberger, P. R. Carney, A. K. Reed; Applicant: SUPERIOR GRAPHITE CO. EP 0 274 165 A1; Date of filing: 05.01.1987; Date of publication: 13.07.1988 // Bulletin 1988/28. – 15 p.

2. Gupta C. K. Fluid bed technology in materials processing / C. K. Gupta, D. Sathiyamoorthy. – Boca Raton, Fla.: CRC Press, 1999. – 528 p.

3. Modeling the Operation Regimes in Ultra-high Temperature Continuous Reactors: (Brookhaven National Laboratory. U. S. Department of Energy's Office of Science, USA) [Электронный ресурс] / Sergiy S. Fedorov, Mykhailo V. Gubynskiy, Igor V. Barsukov та ін. Режим доступу до матеріалів: <https://www.bnl.gov/isd/documents/86110.pdf>.

4. Печи для производства высококачественных углеродных материалов / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, И. В. Барсуков, А. Г. Гогоци, Н. П. Бродниковский // Сборник докладов международной научно-практической конфе-

ренции «Теория и практика тепловых процессов в металлургии» 18-21 сентября 2012, Екатеринбург УрФУ. – С. 79-83.

5. Федоров С. С. Выбор размеров рабочего пространства электротермических печей кипящего слоя для переработки углеродных материалов / С. С. Федоров, М. В. Губинский, С. Н. Форись // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2014. – № 4. – С. 87-90.

6. Анализ энергетической эффективности печей для высокотемпературной обработки углеродных материалов / М. В. Губинский, С. С. Федоров, Н. В. Ливитан, А. Г. Гогоци, И. Барсуков, У. Рохатги // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2013. – № 2. – 8 с.

7. Ахметов М. М. Получение малосернистых коксов из сернистых нефтей. – Уфа: Изд-во ГУП ИНХП РБ, 2010. – 180 с.

Поступила 10.03.2015



УДК 669.18

Наука

Романько В. В., Романько Я. В. /к. т. н./,
Еремин А. О. /д. т. н./
НМетАУ

Определение теплового состояния сталеразливочного ковша при применении электронагрева

С помощью математического моделирования определено температурное поле сталеразливочного ковша при электрическом разогреве с последующей заливкой жидкого металла и его транспортировкой. Показано, что основным фактором определяющим снижение температуры металла в ковше является потери теплоты излучением с зеркала расплава, снижение которых возможно путем наведения шлака на его поверхности. Ил. 4. Библиогр.: 9 назв.

Ключевые слова: моделирование, разогрев, сталеразливочный ковш, распределение температуры

Temperature field of steel teeming ladle during electrical heating with further addition of a hot metal and its transportation is determined with the help of mathematical modeling. It is shown that the main factor determining reduction of metal temperature in the ladle is heat losses by emission from the melt mirror, reduction of which is possible by means of slag laying on int surface.

Keywords: modelling, heating, teeming ladle, temperature distribution

Сталеразливочный ковш обеспечивает транспортировку металла от сталеплавильного агрегата к машине непрерывного литья заготовок (МНЛЗ), в нем производят доводку стали по химическому составу и температуре перед переливом в промежуточный ковш. Равномерный разогрев ковша перед заливкой в него жидкой стали

позволяет продлить срок службы ковша и обеспечивает минимальное снижение температуры жидкого металла, что очень важно при длительной транспортировке стали к МНЛЗ. Исключается необходимость перегрева металла в сталеплавильном агрегате, что приводит к снижению энергозатрат при выплавке стали [1, 2].

Математическая модель сталеразливочного ковша. Постановка задачи

Целью моделирования явилось определение температурного состояния расплава и сталеразливочного ковша при его разогреве на стенде, заливке и транспортировке жидкого расплава.

Принято, что ковш имеет форму полого цилиндра с плоским дном и плоской крышкой (рис. 1). Стенка цилиндра имеет внутренний радиус R_1 и наружный радиус R_2 . Высота внутреннего пространства ковша – H . Дно и крышка ковша имеют, соответственно, толщину S_1 и S_2 . При разогреве на крышке расположен электронагреватель, который моделируется рядом одинаковых цилиндров диаметром d и высотой h , равномерно расположенных по окружности радиусом R_3 в центре крышки.

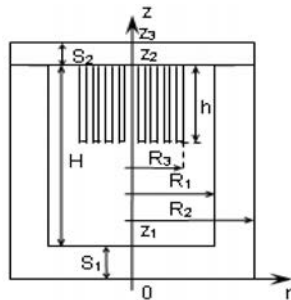


Рис. 1. Схема сталеразливочного ковша с электронагревателем

Расчет температурного поля ковша производился на основе решения дифференциального уравнения теплопроводности для цилиндрической стенки ковша

$$\frac{\partial t^{(i)}}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial t^{(i)}}{\partial r} \right), \quad i = 1, 2, \dots, N_z, \quad (1)$$

где $t^{(i)}(r, \tau)$ – температура стенки на участке зоны i , °С; r – радиальная координата, м; λ – теплопроводность стенки, Вт/(м·К).

Для донной части цилиндра и крышки уравнение теплопроводности имеет вид:

$$\frac{\partial t^{(i)}}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial t^{(i)}}{\partial z} \right), \quad i = N_z + 1, \dots, N_z + 4, \quad (2)$$

где $t^{(i)}(z, \tau)$ – температура стенки на участке зоны i , °С; z – координата по толщине стенки, м.

Изменение температуры металла в ковше рассчитывалось на основе уравнения теплового баланса:

$$E_m c_m \frac{dT_m}{d\tau} = Q_R + Q_F, \quad (3)$$

где E_m – масса металла в ковше, кг; c_m – теплоемкость расплава, Дж/(кг·К); τ – время процесса, с; Q_R – тепловой поток излучением в окружающую среду, Вт; Q_F – общее количество теплоты, передаваемой металлом футеровке ковша в единицу времени, Вт.

В зависимости от технологической операции изменяются граничные условия уравнений (1)–(3), которые представлены ниже.

Разогрев ковша

В начальный момент времени стенки, дно и крышка ковша (рис. 1) имеют начальную температуру T_0 . Температура электронагревателя в течение процесса нагрева остается постоянной и равной T_n . Передача теплоты от нагревателя к ковшу и крышке осуществляется исключительно излучением. Все поверхности системы теплообмена являются серыми и диффузными. С наружных поверхностей ковша теплота передается в окружающую среду конвекцией и излучением.

Для расчета теплообмена излучением внутри ковша применяется зональный метод. Внутренняя поверхность цилиндрической стенки ковша условно разбивается на N_z равных участков (зон) высотой $\Delta z = H / N_z$. На внутренней поверхности крышки и донной части ковша выделяется две зоны. Первая зона находится внутри окружности, образованной нагревателями радиусом R_n (рис. 1), а вторая занимает оставшуюся часть внутренней поверхности крышки. Внутренняя поверхность донной части ковша разбивается аналогично крышке на внутреннюю и внешнюю зоны, имеющие такие же размеры. Таким образом, внутренняя поверхность ковша разделена на $(N_z + 4)$ зон. Кроме этого в расчете добавляется зона, представляющая поверхность всех элементов электронагревателя.

Плотности результирующих тепловых потоков, падающих на расчетные зоны внутренней поверхности сталеразливочного ковша, определяются из уравнения

$$q_i = \sigma_0 \varepsilon_i \sum_{j=0}^{N_z+4} \varepsilon_j f_{ij} (T_j^4 - T_i^4), \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (4)$$

где q_i – плотность результирующего теплового потока излучением, падающего на зону i , Вт/м²; $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ – коэффициент излучения черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_i и ε_j – степени черноты зон i и j ; T_i и T_j – температуры зон i и j , К; f_{ij} – разрешающий угловой коэффициент излучения с зоны i на зону j .

Разрешающие угловые коэффициенты учитывают многократные отражения лучистых потоков от серых поверхностей системы и находятся из решения системы уравнений для всех зон, участвующих в теплообмене

$$f_{ij} = \varphi_{ij} + \sum_{k=0}^{N_z+4} \varphi_{ik} (1 - \varepsilon_k) f_{kj}, \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (5)$$

где φ_{ij} – угловой коэффициент излучения с зоны i на зону j .

Угловые коэффициенты рассчитываются в системе без учета электронагревателя. Для этого используются аналитические зависимости для простых геометрических форм и основные свойства угловых коэффициентов [4, 5]. Пропускательная способность ряда элементов электронагревателя определяется по зависимости

$$p = \frac{d \cdot N_e}{2\pi R_n}, \quad (6)$$

где N_e – число цилиндрических элементов нагревателя.

Значения угловых коэффициентов между зонами уточняются при наличии в ней электронагревателя

$$\varphi_{ij} = \varphi'_{ij} - \varphi_{i0}(1 - P_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \dots, N_z + 4, \quad (7)$$

где φ'_{ij} – угловой коэффициент излучения с зоны i на зону j в системе без электронагревателя; P_{ij} – пропускательная способность нагревателя между зонами i и j .

P_{ij} принимает значение p по формуле (6), когда луч проходит один ряд элементов нагревателя, и значение p^2 , когда луч проходит два ряда элементов. В остальных случаях $P_{ij} = 1$. Угловые коэффициенты с поверхностями футеровки и крышки на электронагреватель определяют как

$$\varphi_{i0} = 1 - \sum_{j=1}^{N_z+4} \varphi_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N_z + 4. \quad (8)$$

Полученные значения плотностей лучистых потоков (формула (4)) используются в качестве граничных условий второго рода для решения дифференциального уравнения теплопроводности (1) и (2). Для наружных поверхностей ковша в качестве граничного условия задается теплообмен с окружающей средой конвекцией и излучением.

Заполнение ковша расплавом и его транспортировка

После разогрева сталеразливочного ковша в него сливается сталь с температурой T_m . Под действием импульса струи в ковше возникают циркуляционные потоки жидкого металла, в результате чего происходит конвективный теплообмен между металлом и футеровкой ковша. В связи с этим при моделировании теплового состояния ковша в процессе его заполнения расплавом для уравнений (1) и (2) на внутренней поверхности ковша принимали граничные условия третьего рода

$$\frac{\lambda_i dT_i}{dr} = q_i = \alpha(T_m - T_i), \quad (9)$$

где q_i – плотность теплового потока каждой зоны, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²К); T_m – температура расплава, К; T_i – температура зоны кладки i , К.

Общее количество теплоты, передаваемой металлом футеровке ковша в единицу времени, будет равно

$$Q_F = \sum_{i=1}^{N_z+2} q_i F_i, \quad (10)$$

где суммирование ведется по всем зонам кладки.

При заливке имеют место потери теплоты металла в ковше излучением в окружающую среду. С учетом частичного покрытия металла шлаком тепловые потери можно определить по зависимости:

$$Q_R = \sigma_0 \varepsilon_{ms} F_m \left[\left(\frac{T_m}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c}{100} \right)^4 \right], \quad (11)$$

где Q_R – тепловой поток излучением в окружающую среду, Вт; F_m – площадь поверхности расплава, м²; T_c – температура окружающей среды, К; ε_{ms} – приведенная степень черноты поверхности ванны, определяемая как

$$\varepsilon_{ms} = \varepsilon_s \delta_s + \varepsilon_m (1 - \delta_s), \quad (12)$$

где ε_s и ε_m – степень черноты шлака и металла; δ_s – доля поверхности расплава, занятая шлаком.

При транспортировке расплава на внутренней поверхности ковша приняты граничными условиями третьего рода аналогично (9). Теплообмен излучением с зеркала металла рассчитывается с учетом степени черноты металла и шлака, экранирующего его поверхность по формуле (11).

Рассмотренная выше задача сопряженного теплообмена решалась с использованием метода расщепления по физическим процессам [6]. Задача включает два основных процесса: остывание жидкого металла в ковше и прогрев футеровки ковша. Каждый процесс рассчитывался в течение малого интервала времени Δt , значение которого подбиралось путем проведения вычислительных экспериментов. Для решения дифференциального уравнения теплового баланса (3) применялся метод Эйлера, а для дифференциальных уравнений теплопроводности (1) и (2) – метод конечных разностей [7]. Адаптация представленной математической модели была проведена по сравнению с данными работ других авторов [8, 9].

Результаты моделирования теплового состояния сталеразливочного ковша

Моделирование проводилось применительно к сталеразливочному ковшу емкостью 50 т. При этом были приняты следующие исходные данные: средний внутренний радиус ковша $R_1 = 1,04$ м; высота внутреннего пространства $H = 2,5$ м; толщина боковой стенки футеровки и днища, соответственно, $S = 0,22$ м и $S_1 = 0,4$ м;

толщина крышки $S_2 = 0,22$. Рабочие поверхности футеровки ковша выполнены из шамота, а крышка футерована волокнистыми огнеупорными блоками. На крышке установлены 10 U-образных карбидокремниевых нагревательных элементов, расположенных по окружности радиусом $R_3 = 0,5$ м. Температура нагревателей равна 1550 К. Время разогрева – 1-2 часа.

С помощью математической модели были рассчитаны различные варианты разогрева сталеразливочного ковша с последующей заливкой в него жидкого металла и транспортировкой. Начальная температура стали во всех вариантах принята равной 1620 °С.

На рис. 2 приведен график распределения температуры по толщине футеровки ковша в процессе его разогрева, а на рис. 3 – динамика изменения средней температуры металла в ковше после разливки.

Анализ полученных результатов показывает, что влияние изменения температурного поля ковша (рис. 2) практически не влияет на температуру расплава после заливки металла. То есть выбор режимов электроразогрева ковша в исследованном диапазоне определяется в основном стойкостью футеровки.

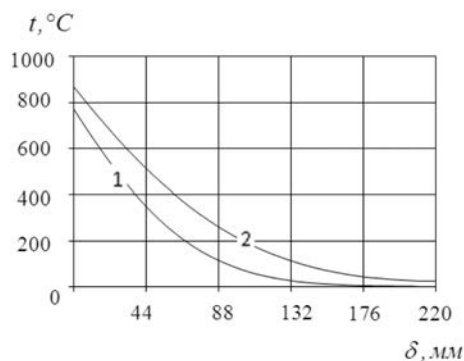


Рис. 2. Распределение температуры по толщине кладки ковша в конце процесса разогрева:

- 1 – длительность разогрева 1 час;
- 2 – длительность разогрева 2 часа

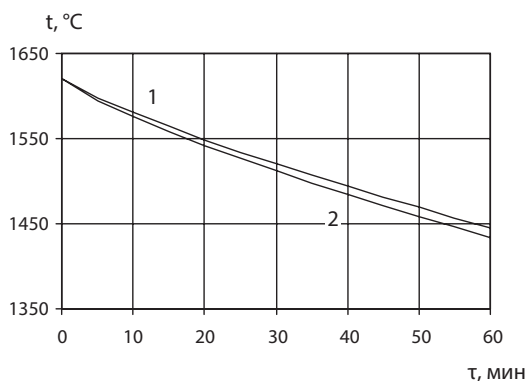


Рис. 3. Динамика изменения средней температуры металла в ковше после разливки:

- 1 – температура металла при разогреве 2 часа;
- 2 – температура металла при разогреве 1 час

Влияние количества шлака на поверхности металла в сталеразливочном ковше на процесс охлаждения стали при ее транспортировке исследовали при изменении $\delta_{шл}$ от 1, что соответствует случаю, когда металл полностью закрыт шлаком, до $\delta_{шл} = 0$ при отсутствии шлака на поверхности металла. Результаты расчета приведены на рис. 4.

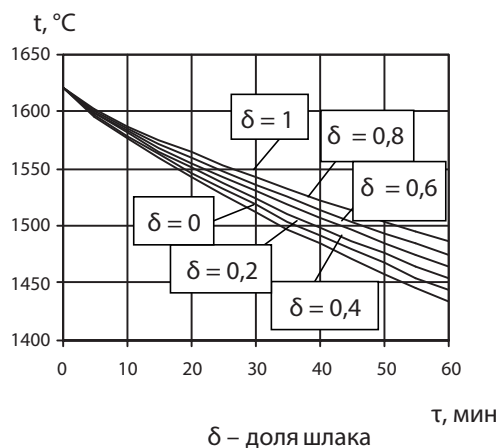


Рис. 4. Охлаждение металла в ковше при транспортировке при различных условиях разогрева и заполнения зеркала расплава шлаком

При длительности транспортировки ковша 1 час, при условии полностью закрытого шлаком металла ($\delta_{шл} = 1$), охлаждение металла составляет 134 °С. За то же время транспортировки ковша при отсутствии шлака на поверхности ($\delta_{шл} = 0$) металл остывает 186 °С. Снижение температуры расплава в 1,4 раза при отсутствии шлака на его поверхности существенно влияет на режим работы МНЛЗ и может привести к необходимости предварительного перегрева металла перед его выдачей. Другим способом уменьшения потерь теплоты при транспортировке жидкой стали является применение теплоизоляционных крышек, что связано с рядом организационных и технических трудностей на металлургических предприятиях.

Выводы

В данной работе представлена математическая модель разогрева сталеразливочного ковша с последующей заливкой жидкого металла и его транспортировкой. Разогрев ковша осуществляется при помощи электронагревателя. Разработанная модель использована для исследования процессов при работе электрических стенов сушки и разогрева сталеразливочных ковшей. С помощью модели можно выбирать оптимальную компоновку нагревателя и расположение нагревателей в ковше.

Исследование влияния режима разогрева на температуру металла показало, что изменение

продолжительности разогрева от 1 часа до 2 часов практически не сказывается на температуре расплава после его заливки в ковш.

Существенное влияние на процесс остывания жидкой стали в открытом ковше оказывает наличие шлака на его поверхности. Показано, что покрытие шлаком поверхности металла при его транспортировке снижают температуру охлаждения расплава в 1,4 раза, что существенно влияет на режим работы МНЛЗ и может исключить необходимость предварительного перегрева металла перед его выдачей.

Библиографический список

1. Вихлевщук В. А. Высокотемпературный нагрев футеровки сталеразливочных ковшей / В. А. Вихлевщук, А. С. Стороженко, А. П. Шкирмонтов [и др.] // Черная металлургия. – 1992. – № 9. – С. 13-21.

2. Ошовская Е. В. Моделирование работы футеровки сталеразливочного ковша с переменной тепловой нагрузкой / Е. В. Ошовская, И. Н. Салмаш, Д. А. Фоменко // Научные труды ДонНТУ, металлургия. – 2011. – С. 9-17.

3. Романько В. В. Математическое моделирование процессов теплообмена при электронегреве сталеразливочных ковшей / В. В. Романько, Я. В. Романько, А. О. Еремин // Международная научно-практическая конференция

«Творческое наследие В. Е. Грум-Гржимайло». – 2014. – С. 332-336.

4. Блох А. Г. Теплообмен излучением. Справочник / А. Г. Блох, Ю. А. Журавлев, Л. Н. Рыжков // М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

5. Michael F. Modest. Radiative heat transfer. An imprint of Elsevier Science. New York. Academic Press, 2003. – 822 p.

6. Андерсон Д. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Андерсон Д., Тannehill Дж., Плетчер Р. // В 2-х томах, т. 1. – М.: Мир, 1990. – 384 с.

7. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин // М.: Наука, 1978. – 512 с.

8. Бейцун С. В. Моделирование охлаждения расплава в сталеразливочном ковше / С. В. Бейцун, В. В. Кирсанов, Н. В. Михайловский, В. И. Шibaкинский // Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск, 2013. – С. 3-8.

9. Михайловский В. И. Влияние толщины футеровки сталеразливочного ковша на тепловые потери расплава / В. И. Михайловский, С. В. Бейцун // Металлургическая теплотехника: сборник научных трудов НМетАУ. – Днепропетровск, 2010. – С. 35-142.

Поступила 10.03.2015

