УДК 662.9:536.332

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ВОЗДУХА НА МЕХАНИЗМ ОХЛАЖДЕНИЯ МЕТАЛЛА В КАМЕРНЫХ ПЕЧАХ

Гнитиев П.А., Бирюков А.Б.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, Украина

АННОТАЦИЯ

В работе, на основании созданной математической модели, исследован механизм охлаждения металлических цилиндрических заготовок при расходе воздуха в 5, 10, 15 и 20 тыс. м3/ч в камерных печах. В основе математической модели заложено решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. Особенностью данной математической модели является учет различной компоновки футеровки, которая состоит из двух частей: плотный шамот и керамоволокно. Показано влияние расхода воздуха на величину конвективной составляющей в общем количестве отводимого от металла тепла. Установлено, что доля конвективной составляющей в общем количестве отводимого тепла находится в пределах 10-30% в зависимости от расхода охлаждающего воздуха.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании реальных промышленных процессов, с теплотехнической точки зрения, важно определить какие виды теплообмена преобладают при нагреве либо охлаждении материалов. Для этого необходимо провести исследование механизма теплообмена материала с рабочей средой при помощи математического моделирования.

НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбрана типовая камерная печь с выкатным подом, с размерами рабочей камеры: 5x4x10 метров, в которой реализуются операции термической обработки металлов. В качестве исследуемого процесса выбрана типичная процедура термической обработки валков – нормализация [1]. Предметом исследования выступают теплотехнические процессы при воздушном охлаждении металла в данной печи.

Исследуемыми телами служат цилиндрические заготовки радиусом 1 метр и длиной 6 метров. Рассматривается процесс воздушного охлаждения четырех таких заготовок от температуры 650 до 450 °С как завершающий этап нормализации.

Для исследования составлена математическая модель, основанная на решении дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности. При этом в модель закладывается различный тип футеровки. Исследование проводится для современной компоновки: плотная подина, толщиной один метр; керамоволокнистое покрытие стен и свода, толщиной 0,2 метра. Моделирование осуществляется для расходов воздуха от 5 до 20 тыс. $м^3$/ч с шагом 5 тысяч. Компоновка цилиндрических заготовок приведена на рисунке 1.

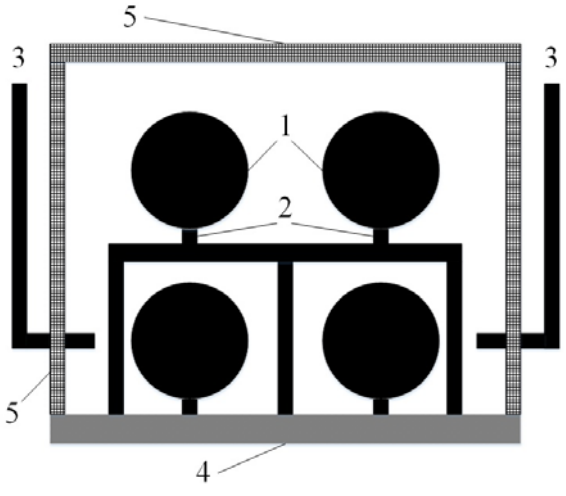

Рис. 1 Схема компоновки заготовок в печи: 1 – цилиндрические заготовки; 2 – опоры; 3 – устройства для подачи воздуха; 4 – подина из шамотного кирпича; 5 – керамоволокно стен и свода

© Гнитиев П.А., Бирюков А.Б.

Целью данной работы является установление доли конвективной составляющей в общем количестве отводимого от металла тепла при воздушном охлаждении, а также получение зависимости конвективной составляющей от расхода охлаждающего воздуха.

Для математической модели выделены следующие начальные условия:

- *геометрические условия*, в которых характерным размером цилиндрической заготовки выступает радиус, то есть используется одномерная постановка задачи. Для футеровки – выбран отрезок, перпендикулярный к поверхности футеровки.

- *начальные условия*, характеризующие начальное распределение температуры в теле и футеровке. Предполагается, что предшествующей операцией был нагрев с последующей выдержкой, то есть тело имеет равнораспределенную начальную температуру. Температура поверхности футеровки равна температуре металла.

- *зависимость теплофизических свойств* металла, футеровки и воздуха от температуры. Для этой цели аппроксимированы табличные значения для каждого материала и полученные уравнения включены в математическую модель в виде функций температуры. В качестве примера приведена аппроксимация следующих величин для стали 40 [2,3]:

- коэффициента теплопроводности:

$$\lambda(t) = 51{,}7 - 3{,}76 \cdot 10^{-4} \cdot t - 8{,}576 \cdot 10^{-5} \cdot t^2 + 5{,}979 \cdot 10^{-8} \cdot t^3;$$

- теплоемкости:

$$Cp(t) = 392 + 0{,}937 \cdot t - 3{,}163 \cdot 10^{-4} \cdot t^2 - 2{,}308 \cdot 10^{-7} \cdot t^3.$$

Для воздуха аппроксимированы такие величины:

- коэффициент теплопроводности:

$$\lambda(t) = 0{,}025 + 7{,}457 \cdot 10^{-5} \cdot t - 1{,}929 \cdot 10^{-8} \cdot t^2;$$

- кинематическая вязкость:

$$\nu(t) = 1{,}247 \cdot 10^{-5} + 1{,}02 \cdot 10^{-7} \cdot t + 6{,}302 \cdot 10^{-11} \cdot t^3;$$

- число подобия Прандтля:

$$Pr(t) = 0{,}707 - 0{,}245 \cdot t + 5{,}605 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 - 3{,}049 \cdot 10^{-10} \cdot t^3.$$

- *граничные условия* теплообмена для металла и для футеровки. ГУ для металла имеют вид:

$$\begin{cases} r = r_з : -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial r} = \alpha_{конв}^{мет}\left(t_м - t_{ср}\right) + \alpha_{луч}^{мет-ф}\left(t_м - t_ф\right), \\ r = 0 : \lambda \dfrac{\partial t}{\partial r} = 0, \end{cases}$$

и для футеровки:

$$\begin{cases} y = 0 : \lambda \dfrac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{конв}^{ф}\left(t_ф - t_п\right) - \left[\alpha_{луч}^{мет-ф}\left(t_м - t_ф\right)\right]\dfrac{F_м}{F_ф}; \\ y = s : -\lambda \dfrac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{ос} \cdot \left(t_{нар}^{ф} - t_{ос}\right), \end{cases}$$

где $\alpha_{конв}^{мет}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи от металла к охлаждающему воздуху, Вт/(м^2·К); $t_{ср}$ - температура среды, омывающей металл, °С; $\alpha_{луч}^{мет-ф}$ - лучистый коэффициент теплоотдачи от металла к футеровке, Вт/(м^2·К); $t_м$ - температура поверхности охлаждаемого металла, °С; $t_ф$ - температура внутренней поверхности футеровки, °С; $\alpha_{конв}^{ф}$ - коэффициент конвективной теплоотдачи от футеровки к охлаждающему воздуху в печи, Вт/(м^2·К); $t_п$ - средняя температура в камере печи, °С; $\alpha_{ос}$ - коэффициент итоговой теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в атмосферу, Вт/(м^2·К); $t_{нар}^{ф}$ - наружная температура футеровки, °С; $t_{ос}$ - температура окружающей среды, °С; $F_м$ – площадь поверхности металла, м^2; $F_ф$ – полная площадь поверхности футеровки, м^2.

Значение температуры $t_{ср}$ определено на основании теории турбулентных струй с учетом смешивания свежего воздуха с атмосферой печной камеры, имеющей температуру $t_п$ [4].

Для исследования механизма отвода тепла от заготовок использованы традиционные зависимости для расчета коэффициентов конвективной [5]:

$$\alpha_{конв} = 0{,}28 \cdot Re^{0{,}6} \cdot Pr_ж^{0{,}36} \cdot \left(\frac{Pr_ж}{Pr_{ст}}\right)^{0{,}25};$$

и лучистой теплоотдачи:

$$\alpha_{луч} = \frac{C_{пр}\left(\left[\frac{t_м+273}{100}\right]^4 - \left[\frac{t_ф+273}{100}\right]^4\right)}{t_м - t_ф},$$

где $C_{пр}$ – приведенный коэффициент излучения в системе «металл-футеровка», Вт/(м^2·К^4), в котором учтены соответствующие угловые коэффициенты, степени черноты поверхности металла и внутренней поверхности футеровки.

В связи со сложной компоновкой футеровки в математическую модель закладывался учет лучистого теплообмена между:

- металлом и керамоволокнистой футеровкой;
- металлом и плотной футеровкой;
- различными частями футеровки.

Для каждого из элементов лучистого теплообмена были определены соответствующие приведенные коэффициенты излучения. Для вычисления этих коэффициентов используются стандартные зависимости [3], при этом степени черноты поверхностей металла, керамоволокнистой футеровки и плотной футеровки приняты на уровне 0,8. Для определения угловых коэффициентов используются геометрические параметры камеры печи и металла, указанные выше.

Исходя из полученных значений коэффициентов рассчитаны тепловые потоки для лучистого и конвективного теплообмена, а общее количество отводимой теплоты $q_{общ}$ представлено суммой $q_к + q_{луч}$.

Искомая доля конвективной составляющей может быть определена как:

$$E_к = \frac{q_к}{q_{общ}}.$$

Более детально математическая модель описана в работе [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В результате проведения численного эксперимента получены следующие данные:

- распределение температуры в цилиндрических заготовках (рис. 2). Условно принято, что охлаждаемые цилиндры находятся в одинаковых условиях;
- распределение температур по толщине керамоволокнистой футеровки (рис. 3);
- графические зависимости конвективной составляющей от расхода охлаждающего воздуха в общем количестве отводимого от металла тепла. График изменения представлен на рис. 4.

Такое распределение позволяет установить тот факт, что при охлаждении металла в камерных печах преобладает лучистый теплообмен между изделием и футеровкой, откуда тепло удаляется конвективным способом при помощи охлаждающего воздуха.

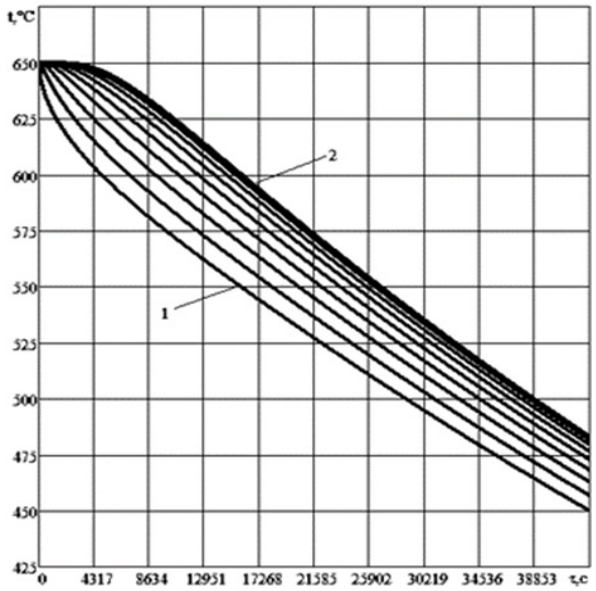

Рис. 2 Распределение температур по сечению цилиндра: 1 – температура поверхности металла; 2 – температура центра металла

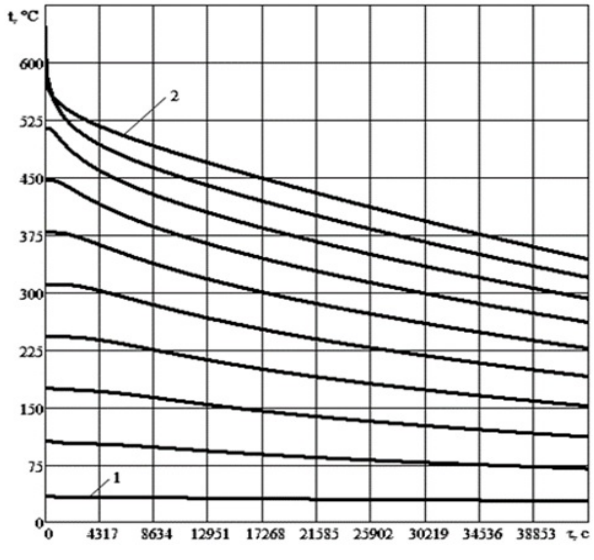

Рис. 3 Распределение температур по толщине керамоволокнистой футеровки: 1 – температуры наружной части футеровки; 2 – температуры внутренней части футеровки

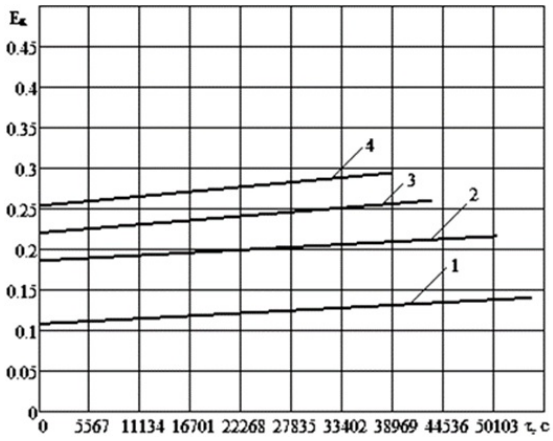

Рис. 4 Доля конвективной составляющей в общем количестве отводимой теплоты: 1, 2, 3, 4 – кривые, соответствующие изменению конвективной доли для расходов охлаждающего воздуха 5, 10, 15 и 20 тыс. м^3/ч соответственно

ВЫВОДЫ

В работе представлена математическая модель процесса охлаждения, учитывающая различную компоновку футеровки. В результате проведения численного моделирования исследован процесс охлаждения металла в камерных печах. Установлена доля конвективной составляющей в общем количестве отводимой теплоты, которая находится в диапазоне 10-30% в зависимости от расхода охлаждающего воздуха для диапазона 5-20 тыс. м3/ч при охлаждении четырех цилиндрических заготовок от 650 до 450 °С. Остальное тепло в количестве 90-70%, соответственно, передается излучением на футеровку, откуда снимается конвекцией охлаждающим воздухом. В работе впервые показано влияние расхода охлаждающего воздуха на механизм отвода тепла от металла.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бирюков А.Б. Анализ современного состояния технологии воздушного охлаждения металла в печах / А.Б. Бирюков, С.М. Сафьянц, П.А. Гнитиев // Бюллетень научно-технической и экономической информации "Черная металлургия". – 2014. – №11. – С.42-47.

   Biryukov A.B. Analiz sovremennogo sostoyaniya tekhnologii vozdushnogo okhlazhdeniya metalla v pechakh / A.B. Biryukov, S.M. Saf'yants, P.A. Gnitiev // Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii "Chernaya metallurgiya". – 2014. – №11. – S.42-47.

2. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. / Е.И. Казанцев // - М.: Металлургия, 1975. - 368 с.

   Kazantsev E.I. Promyshlennye pechi. Spravochnoe rukovodstvo dlya raschetov i proektirovaniya. 2-e izd., dop. i pererab. / E.I. Kazantsev // - M.: Metallurgiya, 1975. - 368 s.

3. Недопекин Ф.В. Теоретические и прикладные аспекты теплопереноса / Ф.В. Недопекин, С.И. Гинкул, Е.В. Новикова // Донецк: ДонНУ. – 2013. – 321 с.

   Nedopekin F.V. Teoreticheskie i prikladnye aspekty teploperenosa / F.V. Nedopekin, S.I. Ginkul, E.V. Novikova // Donetsk: DonNU. – 2013. – 321 s.

4. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй: репринтное воспроизведение издания 1960 г. / Г.Н. Абрамович. – М.: ЭКОЛИТ. – 2011. – 720 с.

   Abramovich G.N. Teoriya turbulentnykh struy: reprintnoe vosproizvedenie izdaniya 1960 g. / G.N. Abramovich. – M.: EKOLIT. – 2011. – 720 s.

5. Румянцев В.Д. Теория тепло- и массообмена: Учебное пособие. / В.Д. Румянцев // – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.

   Rumyantsev V.D. Teoriya teplo- i massoobmena: Uchebnoe posobie. / V.D. Rumyantsev // – Dnepropetrovsk: Porogi, 2006. – 532 s.

6. Бирюков А.Б. Математическая модель для изучения процессов воздушного охлаждения металла в печах / А.Б. Бирюков, А.И. Волошин, П.А. Гнитиёв // Сталь. – 2015. - №7. – С. 77-81.

   Biryukov A.B. Matematicheskaya model' dlya izucheniya protsessov vozdushnogo okhlazhdeniya metalla v pechakh / A.B. Biryukov, A.I. Voloshin, P.A. Gnitiev // Stal'. – 2015. - №7. – S. 77-81.