

УДК 669.04

С.П. Барков, А.И. Туяхов /к.т.н./

ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

ИНЖЕНЕРНАЯ МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ФУТЕРОВКИ МЕТОДИЧЕСКОЙ ПЕЧИ, НАХОДЯЩЕЙСЯ В УСЛОВИЯХ ПРОСТОЯ

Рассмотрена проблема изучения теплового состояния футеровки печи непрерывного действия, находящейся в состоянии вынужденного простоя. Составлен расчетный алгоритм, позволяющий оценивать изменение остаточного теплосодержания футеровки во времени. Такая информация необходима для определения рациональных технологических параметров по выводу футеровки печи на заданное тепловое состояние после длительного простоя.

Ключевые слова: методическая печь, тепловые потери, огнеупорная кладка, динамика охлаждения, простои нагревательной печи.

Постановка проблемы

За последние пять-семь лет в мировой экономике резко сократилось потребление металлопродукции, особенно производимой мелкосортными станами металлургических заводов. На мировом рынке также упал спрос на такие виды прокатной продукции, как уголки разных размеров, швеллеры, круги, квадраты, шестигранники и другие виды, то есть практически большую часть востребованной ранее продукции сортового проката на постсоветском пространстве. В частности, на Донецком металлургическом заводе резко сократился объем больших заказов по всем видам прокатного ряда и составлял в 2013-2014 гг. от сотен до четырех-пяти тысяч тонн на конкретный вид продукции на единичный заказ. Велика вероятность, что и после перезапуска предприятия, в новых условиях, работа сортопрокатного цеха будет отличаться существенной неритмичностью. Вынужденные простои нагревательной печи, а значит, и прокатного стана могут достигать до 40 % календарного времени в год. Методическая нагревательная печь, эксплуатируемая на ДМЗ для нагрева квадратных заготовок под прокатку на стане 400, по сравнению с современными печами отличается повышенными тепловыми потерями.

Таким образом, важной производственной задачей является создание методики по определению остаточного теплосодержания футеровки печи.

Анализ последних исследований и публикаций

Задача определения теплосодержания футеровки может быть решена как с использованием

метода математического моделирования, так и с помощью оперативной диагностики на основе анализа моментальных тепловых балансов [1-4]. В этих работах показан ряд подходов, расширяющих информативность математических моделей и возможности использования данных, предоставленных с их помощью, для углубленного анализа теплового состояния. Однако в ряде случаев требуется создание быстродействующих, безусловно, устойчивых и значительно более простых вычислительных алгоритмов. Для этих целей более подходят инженерные методики.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка инженерной методики, позволяющей прогнозировать тепловое состояние футеровки печи при простое произвольной продолжительности.

Основной материал исследования

В данной работе создается упрощенная инженерная методика расчета теплосодержания футеровки при вынужденном простое печи. Для таких печей потери тепла формируются по трем принципиально различным направлениям: через огнеупорную кладку, на нагрев атмосферного воздуха, поступающего в рабочее пространство через неплотности конструктивных элементов и огнеупорной кладки, охлаждение глиссажных труб в сварочной и методической зонах печи.

Кроме того, имеют место такие трудно определяемые потери, как излучение через отверстия и щели в печи, более высокие потери через стенки крышек технологических и рабочих окон, в которых толщина обмуровки в 2 раза меньше,

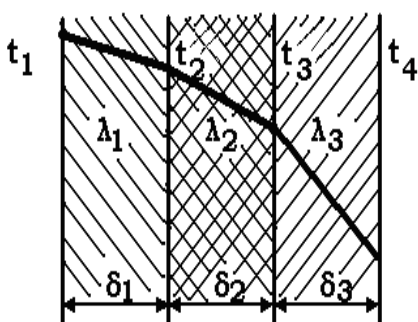


Рис. 1. Распределение температур в многослойной стенке:

λ_i – теплопроводность материалов i -тых слоев;
 δ_i – толщина i -тых слоев;
 t_i – температуры на границах i -тых слоев

чем основной кладки. Дополнительные тепловые потери также связаны с более интенсивным охлаждением свода печи, так как распорно-подвесной свод содержит значительное количество металлических крепежных деталей, являющихся стоком тепла в окружающую среду. К трудно определяемым потерям можно отнести охлаждающее действие металлического каркаса печи и проводимые обслуживающим персоналом технологические операции.

В данной работе исследовалась динамика охлаждения рабочего пространства печи в различных зонах при простое, позволяющая определить тепловое состояние каждой зоны для различных интервалов времени простоя печи. На основе законов теплообмена и с учетом экспериментальных данных составлена методика расчета тепловых потерь и разработана программа, позволяющая определить температуру внутренней поверхности кладки печи и остаточное аккумулированное тепло на любом временном интервале охлаждения печи.

Временной интервал охлаждения печи делится на элементарные временные отрезки, в которых печь принимается находящейся в стационарном тепловом состоянии. Данные расчета в первом интервале являются основой для расчета второго интервала, и по такой схеме производится расчет всех временных интервалов охлаждения зон и всей печи в целом. Расчетный алгоритм для определения теплового состояния футеровки на каждом выделенном временном интервале представлен ниже.

Определение начального теплового потока для типовой стенки, состоящей из трех слоев, представлено на рис. 1 [5].

$$q_{нач} = \frac{t_1 - t_{cp}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}}$$

где t_1 – температура на внешней границе слоя, °С; t_{cp} – температура окружающей среды, °С; δ_i – толщина футеровки печи, м; λ_i – теплопроводность материалов футеровки печи, Вт/(м·К).

Определение температур на границах слоев:

$$t_2 = t_1 - q_{нач} \frac{\delta_1}{\lambda_1},$$

$$t_3 = t_1 - q_{нач} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} \right),$$

$$t_4 = t_1 - q_{нач} \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha} \right).$$

Определение значения теплосодержания каждого слоя:

$$Q_{акi} = G_i C_i \frac{t_{ni} + t_{ki}}{2},$$

где G_i – масса i -того слоя, кг; C_i – теплоемкость i -того слоя, кДж/(кг·К); t_{ni} , t_{ki} – температуры на начале и конце i -тых слоев, °С;

Общее тепло аккумуляции 1 м² кладки печи в начальный отрезок τ :

$$Q_{общ}^{ак} = Q_{ак1} + Q_{ак2} + Q_{ак3}.$$

Это общее тепло аккумуляции в конце I периода охлаждения, уменьшающееся за счет теплопроводности через кладку, а также на нагрев подсосанного через неплотности печи атмосферного воздуха и при охлаждающем действии глиссажных труб в сварочной и методической зонах печи.

Потери тепла через кладку печи:

$$Q_{пот}^{кл} = q_{нач} F \Delta \tau,$$

где F – внешняя поверхность кладки, м²; $\Delta \tau$ – выбранный элементарный отрезок времени, с.

Определение потерь тепла на нагрев атмосферного воздуха, поступающего в рабочее пространство через неплотности печи:

$$Q_{пот}^{возд} = \alpha F_{уз} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_в}} c_в (t_{мек} - 100) \Delta \tau,$$

где α – коэффициент расхода для сужающего устройства. Для щелевых сужающих устройств при малых значениях критерия Re этот коэффициент находится в пределах 0,65-0,75; $F_{уз}$ – площадь всех щелевых неплотностей, м²; Δp – вели-

чина разряжения в рабочем пространстве, Па; ρ_v – плотность атмосферного воздуха, кг/м³; c_v – теплоемкость воздуха, кДж/(кг·К); $(t_{ст}^{тек} - 100)$ – выражение, показывающее, что атмосферный воздух, проникающий через неплотности, прогревается в среднем до температуры на 100 °С меньше температуры стенки в любой части печи и на любом интервале охлаждения. Этот перепад температур получен на основе расчета свободной конвекции с поправкой на время нахождения воздуха в данной зоне печи.

Общая площадь всех неплотностей определялась во время остановки печи и измерялась по степени неплотного прилегания крышек окон к направляющим рамам. Разрежение в печи измерялось показывающим дифманометром и практически не изменялось в процессе остывания печи.

Температура подогрева воздуха, поступающего в рабочее пространство во время остановки печи и уходящего из рабочего пространства, зависит только от температуры внутренней поверхности кладки. Определение температуры подогрева воздуха расчетным путем затрудняется тем, что воздух, нагретый томильной зоной, поступает в следующие зоны, смешиваясь с новыми порциями холодного воздуха и на выходе из печи образуя усредненную температуру.

Скорость движения воздуха в различных поперечных сечениях печи по расчетным данным не превышает 0,2 м/с, что обеспечивает достаточно большой временной интервал контакта воздушного потока с внутренней поверхностью печи, поэтому температура воздуха должна быть близка к температуре поверхности кладки. Расчеты по формулам свободной конвекции для вертикальных (стены печи) и горизонтальных

(свод) поверхностей показали сравнительно небольшую разницу температур между воздухом и нагретой поверхностью, которая не превышала 100 °С с небольшим уменьшением, а при длительном охлаждении, более 30 суток, разница температур должна быть незначительной. Для расчета охлаждения печи по разработанной программе принята разность температур между воздухом и стенкой 100 °С.

Определение потерь тепла через глиссажные трубы:

$$Q_{пот}^{вод} = Lq_{те} \Delta\tau,$$

где L – длина трубопровода, м; $q_{те}$ – тепловой поток с поверхности 1 м глиссажных труб к воде в первый момент остановки печи, Вт/м.

Общие потери тепла за один элементарный временной интервал охлаждения отдельной зоны или всей печи:

$$Q_{пот}^{общ} = Q_{пот}^{кл} + Q_{пот}^{возд} + Q_{пот}^{вод}.$$

Оставшееся аккумулированное тепло в кладке после одного интервала охлаждения:

$$Q_{ост}^{ак} = Q_{общ}^{ак} - Q_{пот}^{общ}.$$

Оставшееся тепло в кладке распределяется пропорционально доле аккумуляции каждого слоя. Однако для определения температуры внутренней поверхности кладки необходимо определить оставшееся тепло в первом слое:

$$Q_{ак1}^{ост} = Q_{общ}^{ак} \frac{Q_{ак1}^{ак}}{Q_{общ}^{ак}}.$$

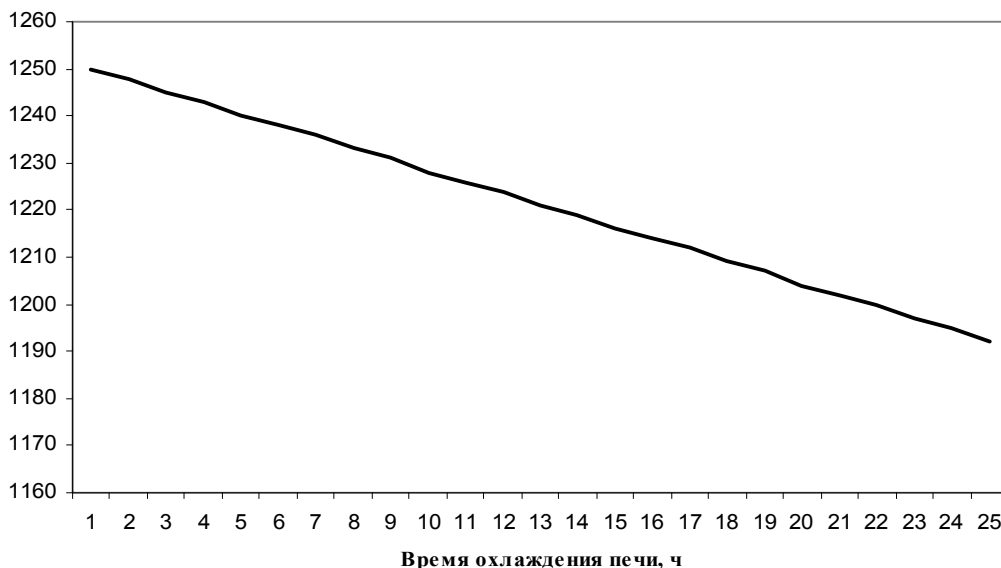


Рис. 2. Температурный график охлаждения печи

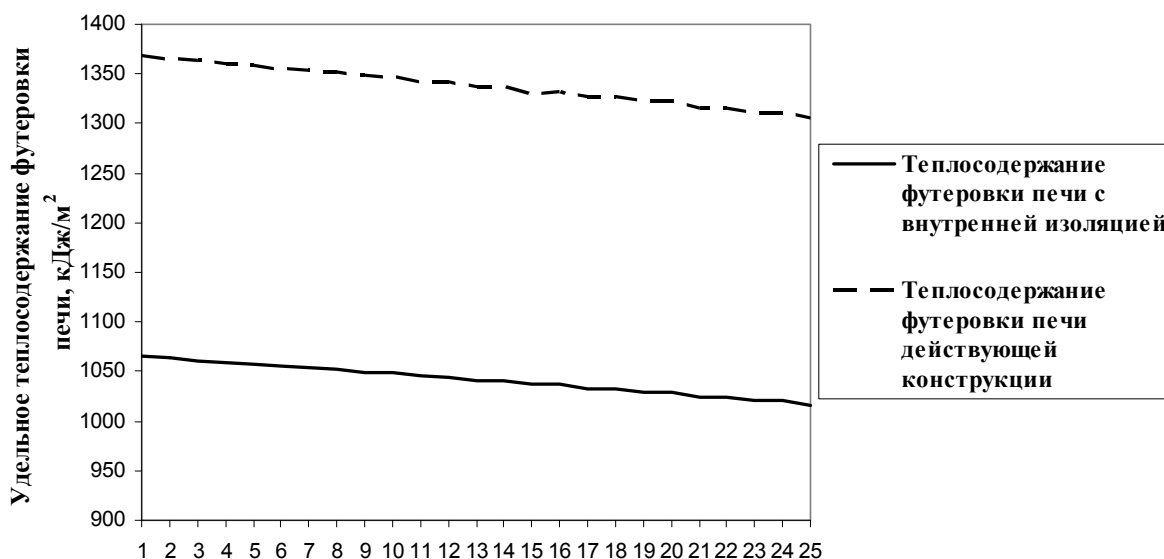


Рис. 3. Изменение теплосодержания футеровки печи в течение суток

Среднемассовая температура первого слоя после одного интервала охлаждения:

$$\bar{t}_1 = \frac{Q_{ак1}^{осм}}{G_1 c},$$

где G_1 – масса 1 м² первого слоя, кг; c – теплоемкость материала первого слоя, кДж/(кг·К).

Температура внутренней поверхности первого слоя после одного временного интервала охлаждения:

$$t_1 = t_1 \frac{\bar{t}_1}{\bar{t}_1},$$

где \bar{t}_1 – средняя температура основного слоя, °С.

Определение теплового потока через многослойную кладку при полученной температуре поверхности первого слоя:

$$q_2 = \frac{t_1 - t_{cp}}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha}}.$$

Полученный тепловой поток является началом расчета следующего интервала охлаждения печи.

В основу программы расчета было положено допущение о стационарности теплового состояния печи на малом временном интервале, что в первом приближении правомерно ввиду большой тепловой инерции в процессе охлаждения многослойной огнеупорной кладки. Так, расчеты показывают, что при охлаждении печи в течение одного часа количество первоначально накопленного аккумуляционного тепла уменьшается

на величину порядка 0,5 %.

Допущение о последовательном переходе печи от одного стационарного теплового состояния к следующему позволяет значительно упростить тепловые расчеты динамики охлаждения рабочего пространства без применения сложных уравнений Фурье для нестационарного нагрева или охлаждения различных тел. Тем более что на решение нестационарной теплопроводности для многослойной кладки оказывают влияние три статьи охлаждения: от подсосанного воздуха, охлаждающего действия глиссажных труб, которые функционально связаны с температурным состоянием внутренней поверхности кладки, и потери через обмуровку печи.

Полученная методика позволила определить температуру футеровки методической печи стана 400 Донецкого металлургического завода в период ее охлаждения. На рис. 2 представлен температурный график охлаждения печи действующей конструкции за первые 24 ч после остановки печи.

Также было определено изменение теплосодержания в футеровке методической печи в течение суток для двух случаев (рис. 3): при охлаждении печи действующей конструкции и для печи, внутреннюю поверхность футеровки которой предлагается покрыть волокнистыми материалами толщиной 0,03 м с коэффициентом теплопроводности 0,06 Вт/(м·К) [6].

Наличие такой информации поможет определить рациональные параметры (время и расход топлива) для вывода печи в рабочее состояние.

Выводы

Разработанная методика позволяет с достаточной точностью прогнозировать тепловое состояние футеровки печи после простоев произ-

вольной продолжительности. Эта информация необходима для определения рациональных технологических параметров по выводу печи в рабочее тепловое состояние.

Список литературы

1. Бирюков А.Б. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов / А.Б. Бирюков, Е.В. Новикова, Т.Г. Олешкевич // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т.36, №2. – С. 29.
2. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах / А.Б. Бирюков [и др.] // Черная металлургия. – 2015. – №1(1381). – С. 50-55.
3. Litvinchev I.S. Investigation of multi-

dimensional problems in the control of heat transfer // Mathematical modeling and computational experiment. – 1993. – Vol.1, Issue 2. – P. 119-129.

4. Biryukov A.B. Mathematical model for studying of metal air-cooling process in furnaces / A.B. Biryukov, A.I. Voloshin, P.A. Gnitiev // Steel in Translation. – 2015. – Issue 7. – P. 77-81.
5. Heat and Mass Transfer / S.I. Ginkul [et al.]. – Donetsk, 2006. – 291 p.
6. Бирюков А.Б. Методика для оценки влияния параметров реконструкции футеровки печей на энергосбережение при нагреве материалов / А.Б. Бирюков, И.С. Некрасов // Научные труды SWorld. – 2011. – Т.7, №4. – С. 29-31.

**S.P. Barkov, A.I. Tuyahov /Cand. Sci. (Eng.)/
Donetsk National Technical University (Donetsk)**

THE ENGINEERING METHODS FOR PREDICTING THE LINING THERMAL STATE OF CONTINUOUS FURNACES IN DOWNTIME

Background. In the market economy, it is often necessary for metallurgical plants to perform individual orders for delivery of relatively small volumes of metallurgic products. The period of waiting for the next order may be for several days. At the Donetsk metallurgical plant, one of the continuous heating furnaces of the small-section rolling mill operates in periodic mode. To save fuel consumption of the heating and reduce the time of reaching the operating mode of the furnace, engineering methods had been used for prediction of the thermal state of the furnace lining.

Materials and/or methods. The paper presents the algorithm of heat losses through the heating furnace lining, which allowed estimating the influence of the lining parameters on the cooling dynamics of the furnace. Heat losses are due to transfer of heat from the furnace space through the lining into the environment, heating of the ambient air which is drawn into the working space of the furnace, and heat loss through pipe skids. It is proposed to use the thermal insulation on the inner surface of the furnace, which will reduce the thermal inertia and scale formation on the heated metal surface.

Results. The analysis of the thermal state of the cooled furnace was carried out for two cases: for the current furnace design (fireclay and silica refractories); for the furnace the internal surface of which is lined with ceramic fiber. The temperature graph of cooling the inner surface of the furnace is obtained. For the second case - heat content of the furnace lining reduced.

Conclusion. The proposed method allows predicting the thermal state of the lining of a cooled furnace. It is proved that thermal insulation materials usage allows reducing energy consumption and the time of reaching the operational temperature of the furnace, as well as reducing the furnace cooling time.

Keywords: continuous furnace, heat loss, refractory masonry, cooling dynamics, heating furnace downtime.

Сведения об авторах

С.П. Барков

Телефон: +380 (99) 348-77-03

Эл. почта: barkovsp16@gmail.com

А.И. Туяхов

Статья поступила 28.11.2016 г.

© С.П. Барков, А.И. Туяхов, 2016

Рецензент д.х.н., проф. А.Б. Бирюков