

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнигиёв /к.т.н./, Т.Г. Олешкевич
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

АДАПТАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ, УЧИТЫВАЮЩЕЙ ОКАЛИНООБРАЗОВАНИЕ

Для адаптации разработанной ранее математической модели процесса тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования разработаны методы начальной и оперативной подстройки. Для первого метода задача решается путем введения такого значения подстроечного коэффициента в формулу для определения константы окалинообразования, чтобы расчетное значение массы окалины совпало с величиной, определенной как разность исходной массы металла и его массы после тепловой обработки и зачистки от окалины. При использовании второго метода производится сравнение двух расходов кислорода, полученного в результате математического моделирования и полученного в результате работы системы диагностики и подбора подстроечных коэффициентов, позволяющих в пределах узких выделенных промежутков времени согласовать среднеинтегральные расходы кислорода, идущего на окисление.

Ключевые слова: *тепловая обработка, образование окалины, математическое моделирование, адаптация математической модели.*

Постановка проблемы

При высокотемпературном нагреве металла в пламенных нагревательных печах происходит образование окалины, что приводит к прямым потерям металла и к изменению условий теплопередачи в камере печи (с одной стороны, металл покрывается слоем материала со значительно меньшим коэффициентом теплопроводности; с другой стороны, происходит выделение теплоты по реакциям окисления железа).

Анализ последних исследований и публикаций

Достаточно эффективным инструментом для исследования тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования являются соответствующие математические модели [1-4]. Созданная в работе [2] математическая модель базируется на ряде упрощений (весь слой окалины представляется состоящим только из вюстита; темп нарастания окалины упрощенно описывается при помощи дифференциального уравнения первого порядка, для которого необходимо задание константы окалинообразования; термическое сопротивление слоя окалины учтено как внешнее термическое сопротивление). Использование названных упрощений позволило создать быстродействующую математическую модель со скоростью расчетов, превышающей темп реального времени.

Тестирование созданной модели для решения задач с учетом и без учета влияния слоя окали-

ны, а также с учетом и без учета тепловыделения по реакции окисления железа позволило получить результаты, хорошо согласующиеся с логикой процесса и практическими данными. Уточнение информации о необходимом времени протекания процесса и температурном поле металла при учете влияния окалинообразования составляет порядка 5 % [2].

Таким образом, если рассматривается только лишь задача определения теплового состояния металла, то в большинстве случаев справедливо производить решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для металла без учета окалинообразования. Основным интересом представляет не учет влияния слоя окалины на тепловое состояние металла, а прогнозирование потерь металла с окалиной для исследуемых сочетаний конструктивных и технологических параметров. Очевидно, что точность расчетных данных, получаемых при помощи математической модели, напрямую зависит от того, насколько точно используются константы окалинообразования описываемый процесс. Как известно, текущие значения констант окалинообразования зависят от температуры поверхности металла, парциального давления кислорода в продуктах сгорания, химического состава рассматриваемой марки стали.

При создании математической модели в работе [2] зависимость константы окалинообразования от температуры описана при помощи выражения, используемого в большинстве извест-

ных разработок [5]. Очевидно, что это уравнение, полученное на основании обработки экспериментальных данных в 70-е годы XX века, в полной мере справедливо только для определенных марок стали и типового узкого диапазона парциальных давлений кислорода в продуктах сгорания, характерного для технологий того времени.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка способов адаптации математической модели тепловой обработки металла в пламенных печах, учитывающей протекание процессов окисления, к реальным условиям протекания процесса.

Основной материал исследования

Детально все этапы построения модели, адаптация которой рассматривается в данной работе, приведены в работе [2], при этом ряд подходов к заданию условий однозначности выполнен с использованием опыта работы [6]. Ниже приведены только основные моменты, связанные с математической формулировкой и заданием условий однозначности.

В основе математической постановки задачи лежит дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности, которое для заготовок в цилиндрической системе координат в одномерной постановке записывается как:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_m}{\rho_m c_m} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} \right); \quad (1)$$

и для футеровки в декартовой системе координат в одномерной постановке:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda_\phi}{\rho_\phi c_\phi} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right), \quad (2)$$

где индексы *m* и *φ* обозначают, что теплофизические характеристики взяты для металла и футеровки соответственно.

Геометрические условия для заготовки представлены произвольным радиусом заготовки в характерном поперечном сечении, а для футеровки – отрезком, нормальным к характерной плоскости, начало и конец которого лежат на наружной и внутренней поверхностях футеровки. В качестве начальных условий задается равномерное температурное распределение в «нулевой» момент времени и температура, равная температуре окружающей среды (для холодного посада). Для задания граничных условий тепло-

обмена используются граничные условия третьего рода на поверхности расчетных сечений. В общем случае в каждый новый момент времени производится пересмотр граничных условий.

Для круглого поперечного сечения и решения задачи в одномерной постановке заданы следующие граничные условия:

$$\begin{cases} r = r_3 : -\lambda \frac{\partial t}{\partial r} = k \cdot (t_{печь} - t_{нм}); \\ r = 0 : \frac{\partial t}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Для футеровки:

$$\begin{cases} y = 0 : t_{вф} = t_{кл}; \\ y = S : -\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{oc} (t_{нф} - t_{oc}), \end{cases}$$

где *k* – коэффициент теплопередачи от печи к поверхности металла через слой окалины, Вт/(м²·К); *α_{oc}* – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной поверхности футеровки в окружающую среду соответственно, Вт/(м²·К); *t_{печь}*, *t_{нм}*, *t_{вф}*, *t_{нф}*, *t_{кл}*, *t_{oc}* – температуры печи, поверхности металла, внутренней и наружной поверхностей волокнистой футеровки, кладки и окружающей среды соответственно, °С; *λ* – коэффициент теплопроводности футеровки, Вт/(м·К).

Условная температура кладки рассчитывается как:

$$t_{кл} = 100 \cdot \sqrt{\frac{q}{C_{печь-м}} + \left(\frac{t_{нок} + 273}{100} \right)^4} - 273,$$

где *q* – текущее значение плотности теплового потока, подводимого от печи к поверхности окалины и формируемого в основном по законам лучистого теплообмена, Вт/м²; *t_{нок}* – температура поверхности окалины, °С.

Коэффициент теплопередачи согласно принятой концепции исследований определяется как:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_\Sigma} + \frac{S_{ок}}{\lambda_{ок}}},$$

где *α_Σ* – итоговый коэффициент теплоотдачи от печи к поверхности окалины, Вт/(м²·К); *S_{ок}* – текущее значение толщины слоя окалины, м; *λ_{ок}* – коэффициент теплопроводности слоя окалины, Вт/(м·К).

При решении задачи внешнего теплообмена необходимо учесть тепловыделение по реакциям окисления металла, а также то, что часть теплоты, подводимой к поверхности окалины, затрачивается на повышение температуры окисленного слоя.

Тогда выражение для определения итогового коэффициента теплоотдачи к поверхности окалины записывается как:

$$\alpha_{\Sigma} = \frac{q - q_n + q_{ок}}{t_{печь} - t_{нок}},$$

где q_n – плотность теплового потока, затрачиваемого в каждый момент времени на повышение температуры слоя окалины, Вт/м²; $q_{ок}$ – текущее значение плотности теплового потока, выделяющегося в результате окисления металла, Вт/м².

Плотность теплового потока, подводимого от печи к поверхности окалины, определяется как:

$$q = C_{печь-м} \cdot \left(\left(\frac{t_{печь} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нок} + 273}{100} \right)^4 \right) + \alpha_k \cdot (t_{печь} - t_{нок}),$$

где $C_{печь-м}$ – приведенный коэффициент излучения в системе тел печь-металл, Вт/(м²·К⁴); α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи от продуктов сгорания к поверхности окалины, Вт/(м²·К).

Текущая плотность теплового потока, затрачиваемого на догрев окалины, определяется как:

$$q_n = \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot S_{ок} \cdot c \cdot \rho,$$

где c – теплоемкость слоя окалины, Дж/(кг·К); ρ – плотность слоя окалины, кг/м³.

Текущее значение плотности теплового потока, выделяющегося при окислении металла, определяется как:

$$q = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{ок}^2}{S_{ок}} \cdot q_{y0} \cdot \rho,$$

где $k_{ок}$ – текущее значение константы окалинообразования, м·с^{0,5}; q_{y0} – удельный тепловой эффект реакции окисления, отнесенный к 1 кг железа, Дж/кг.

Текущие значения константы окалинообразования определяются при помощи выражения (1).

Темп нарастания слоя окалины описывается

при помощи дифференциального уравнения первого порядка:

$$\frac{dS_{ок}}{d\tau} = \frac{1}{2} \cdot \frac{k_{ок}^2}{S_{ок}}.$$

В первом приближении $C_{печь-м}$ определяется на основании рекомендаций аналитических методик. Например, для печи с прямоугольной камерой можно использовать зависимость вида:

$$C_{печь-м} = C_0 \cdot \frac{\varepsilon_m \cdot \Phi_{mk}}{1 - \Phi_{km} \cdot (1 - \varepsilon_m)};$$

где $C_0=5,67$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_m – степень черноты поверхности металла; Φ_{km} , Φ_{mk} – угловые коэффициенты для систем тел кладка-металл и металл-кладка соответственно.

Для численной реализации математической модели используются метод конечных разностей, который является самым эффективным для тел простой формы, и неявная схема аппроксимации.

Вопросы адаптации модели с точки зрения изучения теплового состояния металла и футеровки общеизвестны и детально рассмотрены в работах [7-9]. Адаптацию модели с точки зрения процессов окалинообразования предложено провести по следующей схеме:

- заготовки перед тепловой обработкой проходят процедуру взвешивания;
- после прохождения высокотемпературной тепловой обработки поверхность заготовок зачищается от окалины и заготовки повторно взвешиваются;
- на основании сравнения массы металла до и после тепловой обработки определяется величина потерь металла с окалиной;
- при помощи математической модели (например, созданной в работе [2]) моделируется процесс окалинообразования и определяется величина потерь металла;
- на основании сравнения потерь металла, полученных в результате непосредственного измерения и численных экспериментов, выносится суждение об адекватности математической модели в плане описания процессов окисления металла в конкретных условиях.

При установлении довольно строгих требований в плане допускаемой погрешности определения потерь металла с окалиной (например, менее 5 %) очень вероятно, что при первой оценке адекватности модели заданный уровень точности не будет достигнут. В этом случае

необходимо прибегнуть к методу подстройки. Предложено два варианта подстройки модели (по начальной и оперативной схеме).

Начальная подстройка предполагает задание константы окалинообразования в виде:

$$k_{ок} = \frac{k_n}{60 \cdot 1000} \exp\left(\frac{-10125}{T_{нм}} + 7,25\right), \quad (3)$$

где k_n – подстроечный коэффициент.

Исходя из выражения (4) ожидаемым результатом по изучению влияния подстроечного коэффициента на количество окисленного металла является получение прямопропорциональной зависимости между ним и относительным количеством окалины ε_s (отношение массы окисленного металла, полученного при конкретном значении подстроечного коэффициента к массе окисленного металла, полученной при $k_n=1$) со свободным членом, равным нулю, и коэффициентом пропорциональности, равным единице. Однако это предположение нуждается в проверке, так как изменение толщины слоя окалины приводит к изменению термического сопротивления этого слоя и может вызвать изменение температуры поверхности металла, входящей в (4).

Для решения этого вопроса проведено исследование параметрической чувствительности модели по отношению к k_n для следующих произвольных исходных данных:

– нагреваются слитки из марки стали 40 с эквивалентным диаметром в наибольшем поперечном сечении 1 м;

– тепловая обработка состоит из двух этапов: подъема температуры печи от 900 °С до 1270 °С с постоянной скоростью в течение 3 часов, нагрева при постоянной температуре печи 1270 °С вплоть до достижения заданного значения среднemasсовой температуры 1225 °С;

– значение характерного приведенного коэффициента излучения принято $C_{печь-м}=3,552$ Вт/(м²·К⁴).

– для металла заготовок заданы следующие теплофизические характеристики:

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

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

– для футеровки коэффициент теплопроводности принят 0,1 Вт/(м·К), теплоемкость 1000 Дж/(кг·К), плотность 200 кг/м³;

– для окалины, учитывая ее состав, на основании данных работ приняты коэффициент теплопроводности 2,1 Вт/(м·К), теплоемкость 1000 Дж/(кг·К), плотность 4000 кг/м³. Удельное тепловыделение при окислении железа принято, как для реакции окисления до FeO, и составляет 4,7 МДж/кг.

Обработка результатов показала, что в допустимых пределах (погрешность 1-2 %) возможно использовать прямопропорциональную зависимость $\varepsilon_s=k_n$. Дополнительно исследован вопрос, не влияет ли процедура начальной подстройки модели по показателям окалинообразования на искажение результатов, связанных с динамикой нагрева. На рис. 1 показана зависимость относительного времени тепловой обработки металла до достижения заданного теплового состояния (отношение времени тепловой обработки при конкретном значении k_n к времени тепловой обработки при $k_n=1$) от значения подстроечного коэффициента.

Анализ представленных результатов показывает, что адаптация модели по показателям окалинообразования предложенным способом практически не искажает результатов определения теплового состояния металла (например, уменьшение k_n на 15 % уменьшает ε_t не более чем на 0,7 %).

Предложенный подход позволяет в условиях металлургического или машиностроительного предприятия, выбранного в качестве полигона для исследования, определить типовые значения k_n , соответствующие тепловой обработке различных марок стали с использованием различных технологических параметров.

Для проведения этой работы целесообразно производить систематизированный сбор данных. В качестве формы для этой цели может служить таблица.

Полученные, накопленные и систематизированные таким образом результаты позволят задавать значения k_n , соответствующие конкрет-

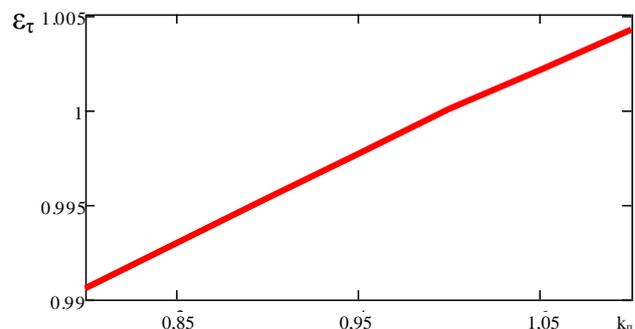


Рис. 1. Зависимость относительного времени, требуемого для тепловой обработки, от значения подстроечного коэффициента

Табл. 1. Форма для систематизации опытных данных, предназначенных для подстройки математической модели тепловой обработки стали, учитывающей окалинообразование

№ п/п	Среднее парциальное давление кислорода за период нагрева, в котором температура поверхности металла более 800 °С	Марка стали (среднее содержание основных компонентов)	Потери металла с окалиной, %	Продолжительность нагрева металла, ч	Параметры поперечного сечения заготовок	Значение подстроечного коэффициента к уравнению (1)
1						
2						

ным технологическим параметрам, для которых требуется произвести исследование процесса окалинообразования.

Предложенный алгоритм *оперативной подстройки* предполагает сравнение расходов кислорода на окисление металла, получаемых в процессе проведения численного эксперимента и выдаваемых системой диагностики, основанной на анализе моментальных материальных и тепловых балансов печной системы. В качестве системы диагностики рекомендуется использовать разработку авторов, предложенную в работе [10].

В результате работы системы диагностики в режиме реального времени происходит определение трех величин: текущие значения подсоса воздуха в топку и участок газохода от пламенного окна до рекуператора, $V_{под}^m$, $V_{под}^z$, и текущий расход кислорода на окисление металла, $V_{ок}^{O_2}$. В основе разработки лежит составление и решение системы из трех уравнений, представляющих собой тепловой баланс рекуператора и материальный баланс по кислороду на различных участках печной системы.

В данную систему уравнений в качестве аргументов входит следующий перечень измеряемых величин: температура воздуха до и после рекуператора (t_g^{ex} , $t_g^{бвх}$, °С); температура продуктов сгорания до и после рекуператора (t_{nc}^{ex} , $t_{nc}^{бвх}$, °С); концентрация кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором ($C_{O_2}^o$, $C_{O_2}^p$, дол. ед.).

Схема расстановки чувствительных элементов для реализации предложенного компонента диагностики процессов окисления металла на примере печи периодического действия приведена на рис. 2.

Система уравнений, решение которой на каждом временном шаге позволит определить искомые величины, записывается следующим

образом:

$$\left\{ \begin{aligned} &V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2} = \\ &V_g \cdot c_g \left(\frac{t_g^{ex} + t_g^{бвх}}{2} \right) \cdot (t_g^{бвх} - t_g^{ex}) \\ &= \frac{V_g \cdot c_g \left(\frac{t_g^{ex} + t_g^{бвх}}{2} \right) \cdot (t_g^{бвх} - t_g^{ex})}{(t_{nc}^{ex} - t_{nc}^{бвх}) \cdot \sum_{i=1}^n C_i^{КОМ} \cdot c_i^{КОМ} \left(\frac{t_{nc}^{ex} + t_{nc}^{бвх}}{2} \right)}; \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$C_{O_2}^o = \frac{V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{6a} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m - V_{ок}^{O_2}}; \quad (5)$$

$$C_{O_2}^p = \frac{V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{6a} + V_{под}^z \cdot C_{O_2}^{6a} - V_{ок}^{O_2}}{V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2}}, \quad (6)$$

где c_g – теплоемкость воздуха, идущего на горение, Дж/(м³·К); $C_i^{КОМ}$ – объемная концентрация i -го компонента газовой среды перед рекуператором; $c_i^{КОМ}$ – теплоемкость i -го компонента газовой среды при средней температуре его пребывания в рекуператоре, Дж/(м³·К); $C_{O_2}^{nc}$ – объемная концентрация кислорода в продуктах сгорания, определяемая на основании стандартных подходов теории горения топлива; $C_{O_2}^{6a}$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе; v_{nc} – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³.

Первое уравнение системы представляет собой выражение из теплового баланса идеализированного рекуператора, не имеющего потерь теплоты, а также перетоков воздуха и продуктов сгорания. Второе уравнение получено из рассмотрения баланса кислорода в районе пламенного окна, а третье – из баланса кислорода перед рекуператором.

Значения концентраций компонентов продуктов сгорания перед рекуператором для уравнения (1) определяются при помощи следующих выражений:

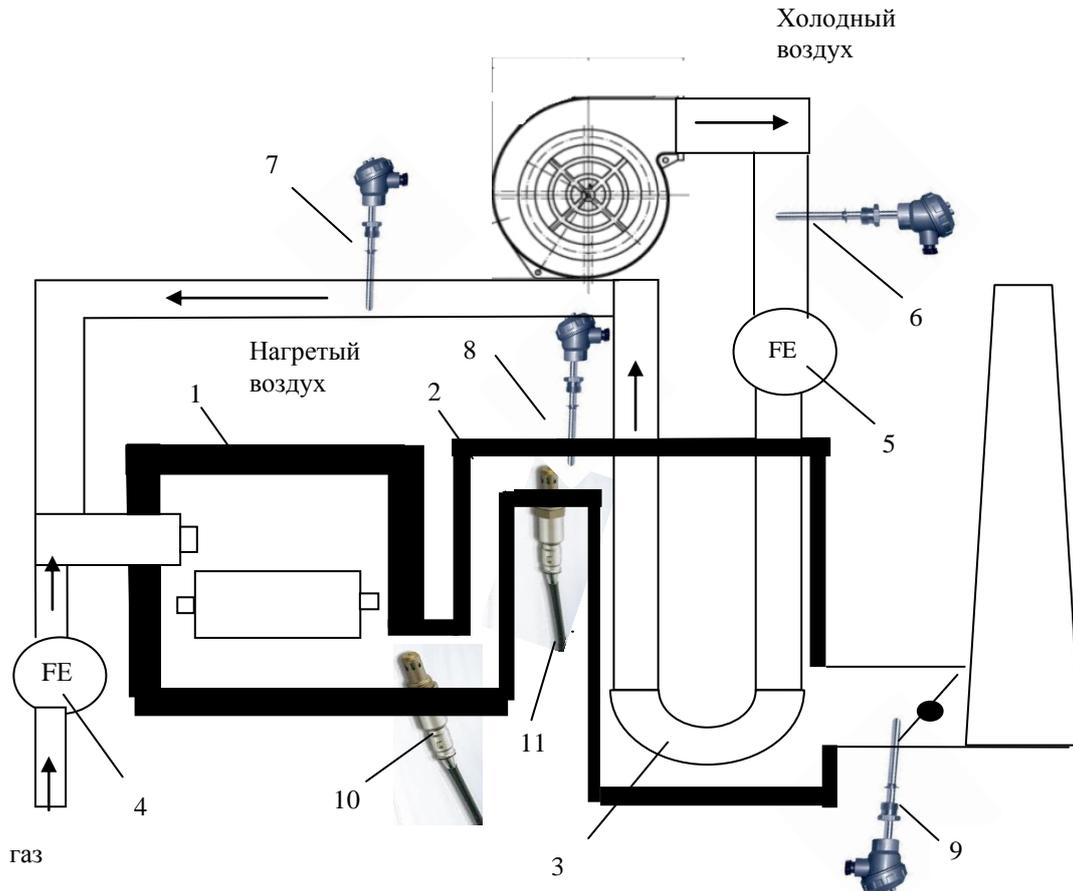


Рис. 2. Схема сбора информации от первичных датчиков для системы диагностики процессов окисления в печи периодического действия:

1 – камера печи; 2 – участок газохода от камеры печи до рекуператора; 3 – рекуператор; 4, 5 – расходомеры по топливу и воздуху соответственно; 6, 7 – термопары для измерения температуры холодного и нагретого воздуха соответственно; 8, 9 – термопары для измерения температуры продуктов сгорания до и после рекуператора соответственно; 10, 11 – датчики концентрации кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором соответственно

$$C_{CO_2}^{КОМ} = V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{CO_2}^{nc} / (V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{H_2O}^{КОМ} = (V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{H_2O}^{nc} + 0,00124 \times (V_{под}^m + V_{под}^z) \cdot d_v) / (V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z \cdot V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{O_2}^{КОМ} = (V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{O_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{O_2}^{6a} + V_{под}^z \cdot C_{O_2}^{6a} - V_{ок}^{O_2}) / (V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2});$$

$$C_{N_2}^{КОМ} = (V_m \cdot v_{nc} \cdot C_{N_2}^{nc} + V_{под}^m \cdot C_{N_2}^{6a} + V_{под}^z \cdot C_{N_2}^{6a}) / (V_m \cdot v_{nc} + V_{под}^m + V_{под}^z - V_{ок}^{O_2});$$

где d_v – абсолютное влагосодержание воздуха, г/м³; $C_{CO_2}^{nc}$, $C_{H_2O}^{nc}$, $C_{O_2}^{nc}$, $C_{N_2}^{nc}$ – объемные концентрации углекислоты, водяных паров, кислорода и азота в продуктах сгорания, определяемые на

основании стандартных подходов теории горения топлива.

Решение системы уравнений (4-6) необходимо производить для исследуемого момента времени на основании текущих значений величин аргументов. Для использования созданного компонента в отрыве от АСУ на ПК, находящейся под управлением обычной ОС, данная система элементарно решается при помощи стандартных вычислительных пакетов. Для режима работы в рамках АСУ составляется программный модуль, реализующий стандартные способы решения систем уравнений. Для рассматриваемой системы более удобными оказываются стандартные численные методы решения систем уравнений.

На рисунке 3 показан пример сравнения изменения расходов кислорода, идущего на окисление металла, полученных при помощи математической модели и с использованием системы диагностики. На каждом выделенном временном промежутке производится выбор значения

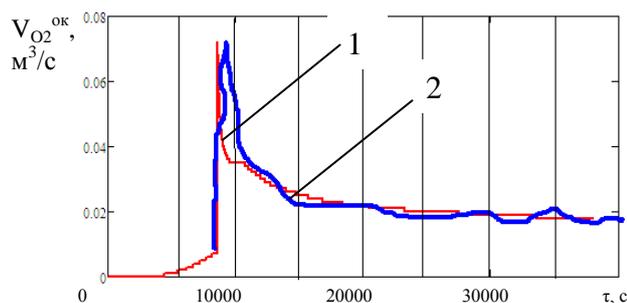


Рис. 3. Изменение во времени расхода кислорода, идущего на окисление металла:
 1 – результат численных экспериментов;
 2 – результат работы системы диагностики

подстроечного коэффициента (таким же образом, как в методе начальной подстройки) для достижения равных значений среднеинтегральных расходов кислорода в пределах выделенных промежутков времени. Приведенные на рисунке 3 результаты численных экспериментов получены для набора исходных данных, ранее использованного в данной статье. Кривая, соответствующая результатам работы системы диагностики, нанесена произвольно, так как на данный момент эта система диагностики, разработанная теоретически и алгоритмически, только готовится к внедрению.

Выводы

Обосновано, что для решения вопроса об адекватности математической модели процесса тепловой обработки металла в печах, учитывающей динамику процессов окисления поверхности металла, целесообразно сопоставлять массу окисленного металла, полученную в результате численных экспериментов, с изменением массы металла после тепловой обработки и зачистки от окалины по сравнению с исходной массой металла.

Для адаптации математической модели отработано применение методов начальной и оперативной подстройки. В первом случае задача решается путем введения подстроечного коэффициента в формулу для определения константы окалинообразования. Исследование параметрической чувствительности модели относительно подстроечного коэффициента показало линейную зависимость массы окисленного металла от значения данного коэффициента. При этом доказано, что адаптация математической модели по показателям окалинообразования практически не приводит к искажению результатов определения температурного состояния металла.

Для оперативной подстройки в режиме реального времени производится сравнение теку-

щего расходования кислорода на окисление металла, прогнозируемого при помощи математической модели, с текущим расходом кислорода на окисление, полученным в результате работы системы диагностики, и подбор подстроечных коэффициентов, позволяющих в пределах узких выделенных промежутков времени согласовать среднеинтегральные расходы кислорода, идущего на окисление.

Список литературы

1. Майстер, Ф. Уменьшение образования окалины в нагревательных печах / Ф. Майстер, Х. Эртель // Черные металлы. – 2007. – № 2. – С. 44-48.
2. Математическое моделирование процессов тепловой обработки металла в печах с учетом окалинообразования / А.Б. Бирюков [и др.] // Сталь. – 2016. – № 8. – С. 85-90.
3. The effect of heat treatment on the structure of scale layer and its removing by pickling in reducing melt / P. Váňová [et al.] // 22d Int. Metallurgical & Material Conf. METAL 2013, 15 - 17.5.2013, Brno, Czech Republic, EU. – 8 p.
4. Steel Heat Treatment. Metallurgy and Technologies. Edited by George E. Totten, Ph.D., FASM, Portland State University, 2007. – 837 p.
5. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования / 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Metallurgia, 1975. – 368 с.
6. 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. – No.7. Vol. 45. – P. 534-538.
7. Арутюнов, В.А. Математическое моделирование промышленных печей: учебник для вузов / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Metallurgia, 1990. – 239 с.
8. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов / В.Н. Ткаченко // Серия «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». Т.13. – Киев: Наукова думка, 2008. – 244 с.
9. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов / А.Б. Бирюков [и др.] // Промышленная теплотехника. – 2014. – № 2. Т.36. – С. 29-35.

10. Диагностика процесса окисления металла в
пламенных печах / А.Б. Бирюков [и др.] //

Металлургические печи. – 2014. – Выпуск
6(21). – С. 3-11.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/, T.G. Oleshkevich
Donetsk National Technical University (Donetsk)

ADAPTATION OF THE MATHEMATICAL MODEL OF METAL HEAT TREATMENT IN FURNACES CONSIDERING SCALE FORMATION

Background. High-temperature heating of metal in the flame furnaces is accompanied by scale formation. This causes metal loss and change of conditions of heat transfer in the furnace chamber. There are a number of mathematical models that allow simultaneous considering the high-temperature thermal processing of metal and scale formation. However, an important task is the adaptation of these models to the specific conditions of furnaces and steel grades subjected to heat treatment, which determined the objective of this paper.

Materials and/or methods. To adapt the mathematical model of heat treatment of metal considering scale formation, the methods developed for its initial and operational adjustment. The idea of initial adjustment is based on the introduction of the adjustment coefficient in the formula to determine the scale formation constants. The value of this coefficient is determined so that the calculated mass value of the scale coincides with the value defined as the difference between the initial mass of the metal and its mass after heat treatment and descaling. Operational adjustment in real time is based on comparing the current oxygen consumption for oxidation of the metal, predicted with the help of the mathematical model, with the current oxygen consumption for oxidation, resulting from the operation of the diagnostic system. With this, the adjustment coefficients were selected so that within the narrow allocated time slots average integral oxygen consumptions obtained by different methods were equal within the maximum permissible errors.

Results. Study of parametric sensitivity of the model relative to adjustment coefficient showed a linear dependence of the mass of oxidized metal on the value of this coefficient. It is proved that the adaptation of the mathematical model in terms of scale formation almost does not distort the results of determination of the thermal condition of the metal.

Conclusion. Obtained under different conditions, accumulated and systematized the results of the adaptation of the model of heat treatment of metals, considering scale formation, will in the future allow setting the values of adjustment coefficients without the procedure of adaptation.

Keywords: heat treatment, scale formation, mathematical modeling, adaptation of the mathematical model.

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
Scopus ID: 7006918782
Orcid ID: 0000-0002-8146-2017
Телефон: +380 (62) 301-08-61
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

П.А. Гнитиёв

SPIN-код: 1943-4196
Scopus ID: 56916104300
Orcid ID: 0000-0001-9266-7969
Телефон.: +380 (62) 301-08-65
+380 (66) 671-34-71
Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

Т.Г. Олешкевич

SPIN-код: 4349-1090;
Orcid ID: 0000-0001-9308-065X
Телефон: +380 (62) 301-08-65
+380 (50) 630-57-65
Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

Статья поступила 18.07.2017 г.

© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, Т.Г. Олешкевич, 2017
Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров