

Создание системы комплексной диагностики тепловой обработки металла
в печах

И.К. Кольба

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ДНР, Украина

В работе предложены основы системы комплексной диагностики процессов тепловой обработки металла в печах, предполагающей параллельный анализ моментальных тепловых балансов печи и материальный баланс по кислороду в газообразных средах, участвующих в процессе. В настоящее время одним из самых распространенных аспектов повышения уровня энергоэффективности технологий является создание более эффективных управляющих алгоритмов систем АСУ ТП с включением в их состав компонентов диагностики и прогнозного управления. Целью создания комплексной системы диагностики заключается в том, что процесс формирования слоя окалины влияет на процесс тепловой обработки металла.

Ключевые слова: пламенная печь, окалинообразование, газоплотность, диагностика, прогнозная модель, моментальный тепловой баланс

В XXI веке продолжается развитие диагностики технологических процессов в различных отраслях промышленности, в том числе и в металлургии.

Современное металлургическое и машиностроительное производства характеризуется наличием высокопроизводительных технологических комплексов, потребляющих большое количество энергетических и сырьевых ресурсов, работающих в условиях быстро меняющихся технологических параметров и условий. В общей технологической цепи процессы тепловой обработки материалов являются важнейшими технологическими операциями, во многом определяющими качество и энергоемкость готовой продукции. В настоящее время одним из самых распространенных аспектов повышения уровня энергоэффективности технологий является создание более эффективных управляющих алгоритмов систем АСУ ТП с включением в их состав компонентов диагностики и прогнозного управления. Ключевыми процессами при тепловой обработке металла в печах, являются процессы горения топлива, течение газообразных сред в камере печи, передача тепла к поверхности нагреваемых заготовок и распространение тепла внутри них. Также тепловая обработка металла в высокотемпературных печах сопровождается образованием окалины, что приводит к прямым потерям металла и к изменению условий теплопередачи в камере печи.

В настоящее время при нагреве заготовок в нагревательных печах периодического действия руководствуются температурно-временными картами нагрева, разработанными при помощи расчетных методик, эмпирически или

комбинированным способом. Процесс разработки такой карты является достаточно трудоемким, при этом она предназначена только для работы с одним конкретным сочетанием конструктивных параметров печи и технологических параметров. Сущность управления сводится к тому, что нужно поддержать заданный закон изменения температуры в печной камере, определяемой при помощи термопары введенной в печное пространство через свод. Окончательное суждение о приемлемости показателей температурного поля заготовки, полученного в результате нагрева, выносится на основании замера температуры поверхности заготовки при помощи пирометра в момент выдачи заготовки. Таким образом, общепринятый способ управления процессом нагрева материала в нагревательных печах периодического действия имеет следующие недостатки [1,2] :

- на практике невозможно иметь набор температурно-временных карт, соответствующих всем возможным сочетаниям конструктивных и технологических параметров (может меняться геометрия заготовок, их количество, способ загрузки, параметры печи могут меняться в результате реконструкции и т.д.)

- установление значения температуры поверхности заготовки в момент выдачи не дает представления о температуре внутренних слоев заготовки, а значит и о качестве нагрева.

В работе [1] создана методология построения и анализа моментальных тепловых балансов работающей нагревательной печи периодического действия на основании расчетной обработки сигналов чувствительных элементов системы АСУ ТП, что позволяет с высокой точностью прогнозировать температурное поле обрабатываемых заготовок в любой момент времени, а значит создает предпосылки для повышения качества операций нагрева и повышения уровня энергоэффективности агрегата.

Сущность предложенной методологии заключается в использовании математического выражения для определения средней плотности теплового потока, падающего на поверхность материала, в течение короткого периода времени $\Delta\tau$ в зависимости от результатов замера характерных температур продуктов сгорания, расходов топлива и продуктов сгорания:

$$\bar{q} = \frac{\bar{V} \cdot Q_{nr} \cdot \Delta\tau - \bar{Q}_{pot} \cdot \Delta\tau - \bar{V} \cdot V_{yx} \cdot c_{t,yx} \cdot \bar{t}_{yx} \cdot (1-k) \cdot \Delta\tau - V_k \cdot c_{t,yx} \cdot \Delta\bar{t}_k}{F_m \cdot \Delta\tau} \quad (1)$$

Предложенное балансовое уравнение представляет собой моментальный тепловой баланс камеры печи, который уравнивается в результате определения текущего значения средней плотности теплового потока \bar{q} , усвоенного нагреваемым металлом.

Величина тепловых потерь камеры печи рассчитывается при помощи соответствующей математической модели, базирующейся на одномерной записи дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности в декартовой систем системе координат, в реальном времени на основании заданных параметров технологии с учетом измеренных значений t_{yx} и $\Delta\bar{t}_k$ при задании граничных условий теплообмена на внутренней поверхности

футеровки. При известном температурном состоянии футеровки в конкретный момент времени потери тепла теплопередачей и на аккумуляцию определяются как:

$$Q_{пот} = (t_{кл(n)} - t_{кл(n-1)}) \cdot \lambda_{ф} \cdot F_{кл} / \Delta x, \text{ Вт.} \quad (2)$$

Рассмотрение моментальных тепловых балансов работающих печи позволяет в реальном времени углубленно изучать процесс теплопередачи в камере печи.

Для восстановления температурного поля заготовок в течение нагрева при помощи созданной методики использованы сигналы расходомера по топливу и термопары печной камеры, соответствующие обозначенным выше конструктивным параметрам печи и типовой технологии нагрева.

Предложенная система диагностики позволяет отслеживать реальное тепловое состояние металла, осознанно корректировать режим тепловой обработки, достигая заданных параметров нагрева с более высокой точностью, затрачивая при этом, минимально необходимое количество времени. Предложенная разработка предоставляет также возможность более эффективного использования энергоресурсов и контроля расход топлива.

В работе [3] создана методика диагностики процессов окисления металла, базирующаяся на рассмотрении баланса кислорода в потоке продуктов сгорания на участке камера печи – участок газохода – рекуператор, которая позволяет определять расходы воздуха, подсасываемого в топку и на изучаемом участке газохода, а также расход кислорода на окисление металла в камере печи.

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть баланс кислорода в камере и газоходах печи.

Источниками поступления кислорода в печную систему являются:

- воздух, подаваемый вентилятором на горелочные устройства для организации процесса горения;
- атмосферный воздух, подсасываемый в камеру печи;
- атмосферный воздух, подсасываемый в газоходы.

Источники расходования кислорода:

- расходование кислорода по реакциям горения;
- расходование кислорода на окисление и обезуглероживание металла;
- выбивание из печи продуктов сгорания, содержащих некоторое количество кислорода.

Учитывая, что для многих современных печных агрегатов выбивание продуктов сгорания из печи практически сведено к нулю, при составлении баланса кислорода в данной работе этот процесс не учитывается по допущению.

Определение расхода кислорода, и соответственно воздуха, определяются при помощи стандартных подходов, используемых в теории горения топлива. Имеется три определяемых неизвестных величины: текущие значения подсоса воздуха в топку и участок газохода от пламенного окна до рекуператора, $V_{под}^T$,

$V_{\text{под}}^{\Gamma}$ и текущий расход кислорода на окисление металла, $V_{\text{ок}}^{O_2}$, необходимо составление системы из трех уравнений, в результате решения которой определялись бы текущие значения неизвестных величин.

$$V_{\text{т}} \cdot v_{\text{пс}} + V_{\text{под}}^m + V_{\text{под}}^z - V_{\text{ок}}^{O_2} = \frac{V_{\text{в}} \cdot c_{\text{в}} \left(\frac{t_{\text{в}}^{\text{вх}} + t_{\text{в}}^{\text{вых}}}{2} \right) \cdot (t_{\text{в}}^{\text{вых}} - t_{\text{в}}^{\text{вх}})}{(t_{\text{пс}}^{\text{вх}} - t_{\text{пс}}^{\text{вых}}) \cdot \sum_{i=1}^n C_i^{\text{КОМ}} \cdot c_i^{\text{КОМ}} \left(\frac{t_{\text{пс}}^{\text{вх}} + t_{\text{пс}}^{\text{вых}}}{2} \right)}; \quad (3)$$

$$C_{O_2}^o = \frac{V_{\text{т}} \cdot v_{\text{пс}} \cdot C_{O_2}^{\text{пс}} + V_{\text{под}}^{\Gamma} \cdot C_{O_2}^{\text{ва}} - V_{\text{ок}}^{O_2}}{V_{\text{т}} \cdot v_{\text{пс}} + V_{\text{под}}^{\Gamma}}; \quad (4)$$

$$C_{O_2}^p = \frac{V_{\text{т}} \cdot v_{\text{пс}} \cdot C_{O_2}^{\text{пс}} + V_{\text{под}}^{\Gamma} \cdot C_{O_2}^{\text{ва}} + V_{\text{под}}^{\Gamma} \cdot C_{O_2}^{\text{ва}} - V_{\text{ок}}^{O_2}}{V_{\text{т}} \cdot v_{\text{пс}} + V_{\text{под}}^{\Gamma} + V_{\text{под}}^{\Gamma}}; \quad (5)$$

где $c_{\text{в}}$ – теплоемкость воздуха, идущего на горение, Дж/(м³·К);

$C_i^{\text{КОМ}}$ – объемная концентрация i -го компонента газовой среды перед рекуператором;

$c_i^{\text{КОМ}}$ – теплоемкость i -го компонента газовой среды при средней температуре его пребывания в рекуператоре, Дж/(м³·К);

$C_{O_2}^{\text{пс}}$ – объемная концентрация кислорода в продуктах сгорания, определяемая на основании стандартных подходов теории горения топлива;

$C_{O_2}^{\text{ва}}$ – объемная концентрация кислорода в атмосферном воздухе;

$v_{\text{пс}}$ – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³.

Первое уравнение системы представляет собой выражение из теплового баланса 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.

Величина данного расхода воздуха на окисление $V_{\text{ок}}^{O_2}$ дает прямое представление о количестве металла, переведенного в окалину. Поскольку по своему составу слой окалины более, чем на 90% состоит из вюстита FeO, то моментальное количество окисляемого металла может быть определено как:

$$m_{\text{ок}} = V_{\text{ок}}^{O_2} \cdot \rho_{O_2} \cdot K_c,$$

где $\rho_{O_2} = 1,43$ – плотность кислорода н.ф.у., кг/м³;

$K_c = 3,5$ – коэффициент, характеризующий отношение атомных масс железа и кислорода.

На стадии отладки созданного компонента диагностики необходимо производить сравнение спрогнозированных потерь металла в окалину за весь период нагрева с разницей масс металла до тепловой обработки и после зачистки от окалины.

Поскольку при использовании разработанного компонента диагностики в режиме реального времени в тренде системы АСУ ТП накапливается информация об изменении во времени не только базовых величин, но и $V_{\text{под}}^{\Gamma}(\tau)$,

$V_{\text{под}}^{\Gamma}(\tau)$, $V_{\text{ок}}^{\text{O}_2}(\tau)$, $m_{\text{ок}}(\tau)$, то совместный анализ изменения базового набора величин и добавленного позволяет анализировать изменение состояния ограждающей конструкции печи, плотности газоходов, уточнять склонность различных марок стали к образованию окалины.

Целесообразным направлением использования разработанного компонента диагностики является работа в системе АСУ ТП в режиме реального времени и прогнозирование моментального образования окалины, накопление трендов и анализ изменения состояния во времени газоплотности печи и газоходов, а также поиск режимов, при которых окалинообразование может быть минимизировано[1,4].

Все эти разработки по отдельности достигают хороших результатов. Но для практики важна комплексная система диагностики, которая бы параллельно могла анализировать как тепловое состояние металла и футеровка, так и формирование слоя окалины. Важность создания комплексной системы диагностики заключается в том, что процесс формирования слоя окалины оказывает влияние на процесс тепловой обработки металла. Таким образом, мы предлагаем структурную схему комплексной системы диагностики, представленную на рис.1.

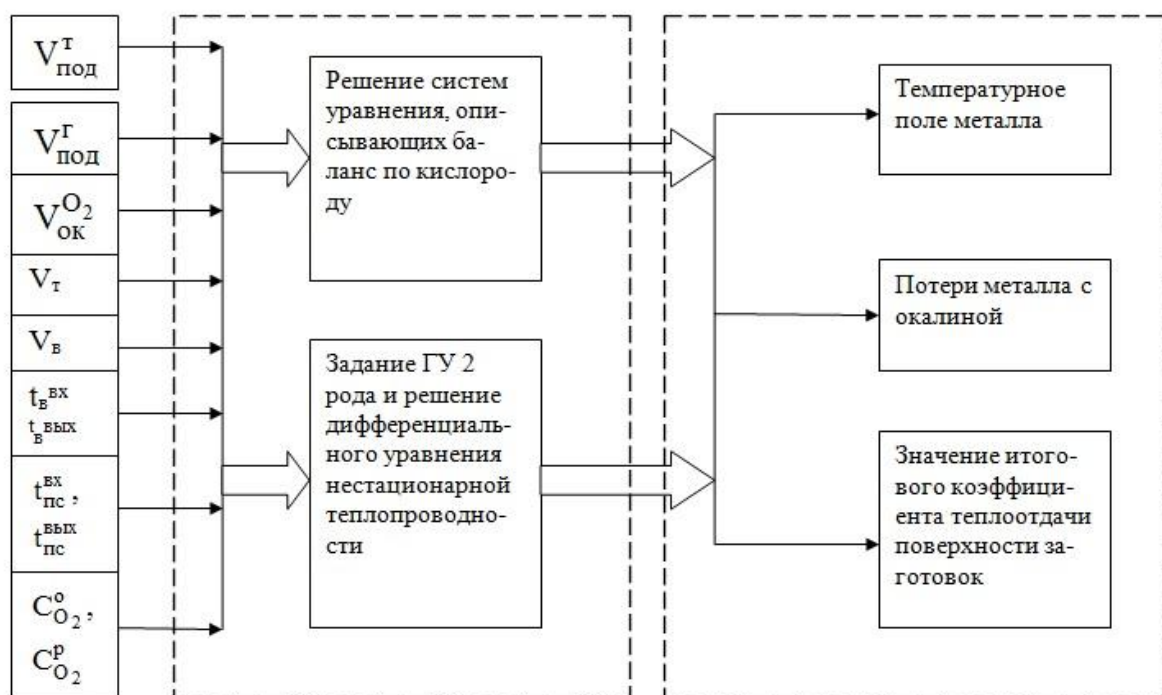


Рисунок 1 – Структурная схема комплексной системы диагностики

$V_{\text{т}}$ - текущий расход топлива на горение, $\text{м}^3/\text{с}$;

$V_{\text{в}}$ – текущий расход воздуха на горение, $\text{м}^3/\text{с}$;

$t_{\text{в}}^{\text{вх}}$, $t_{\text{в}}^{\text{вых}}$ - температура воздуха до и после рекуператора, $^{\circ}\text{C}$;

$t_{\text{пс}}^{\text{вх}}$, $t_{\text{пс}}^{\text{вых}}$ - температура продуктов сгорания до и после рекуператора, $^{\circ}\text{C}$;

$C_{O_2}^o, C_{O_2}^p$ - концентрация кислорода в районе пламенного окна и перед рекуператором, дол. ед.

При этом на основании сигналов датчиков на каждом выделенном узком промежутке времени решается система уравнений, описывающих баланс по кислороду, в результате чего определяется толщина корки окалины. Далее на основании решения уравнения (1), определяем моментальное значение плотности теплового потока, падающего на поверхность заготовок. Далее решается задача определения температурного поля металла, на базе дифференциальных уравнений нестационарной теплопроводности, с заданием ГУ 2 рода. При этом учитывается толщина слоя окалины на поверхности металла.

Выводы

1. Рассмотрены два компонента диагностики процессов тепловой обработки металла в печах, которые решают задачи: прогнозирования температурного поля обрабатываемой заготовки и определение толщины образующейся окалины.

2. Отработаны основы совместной работы компонентов диагностики, которые заключаются в учете параметров окалины при решении внутренней тепловой задачи металлозаготовок.

Библиографический список

1. Бирюков А.Б. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов/ Бирюков А.Б., Новикова Е.В., Олешкевич Т.Г.// Промышленная теплотехника. - Т. 36. № 2, 2009. – с. 29
2. Бирюков А.Б. Современные подходы к диагностике процессов тепловой обработки металла в печах/ Бирюков А.Б., Сафьянц С.М., Иванова А.А., Андриенко Е.Н. // Черная металлургия. - №1 (1381), 2015. – с. 50-55
3. Бирюков А.Б. Диагностика процесса окисления металла пламенных печей/ Бирюков А.Б., Новикова Е.В., Олешкевич Т.Г., Петренко Л.И. //Металлургические печи. – Выпуск 6(21), 2014. – с. 3-11
4. Скоробогатова И.В. Диагностика моментальных тепловых балансов печи для анализа эффективности теплотехнических параметров/ Скоробогатова И.В., Бирюков А.Б., Гавриленко Б.В. - Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. № 2 (25), 2005. – 57-63с.