

УДК 536.2

ДИАГНОСТИКА ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ПРИ ЕГО ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКЕ В ПЕЧАХ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

© **Бирюков Алексей Борисович**¹, д-р техн. наук (birukov.ttf@gmail.com);

Иванова Анна Александровна², канд. техн. наук (ivanova.iamm@mail.ru)

¹ Донецкий национальный технический университет, г. Донецк

² Институт прикладной математики и механики, г. Донецк

Статья поступила 26.07.2017 г.

Разработан алгоритм диагностики теплового состояния металла при его тепловой обработке в печи непрерывного действия, базирующийся на использовании математической модели процесса, представленной одним дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности, и задании граничных условий теплообмена на основе текущих результатов измерения величин, определяющих параметры внешнего теплообмена. Создан способ оперативного контроля адекватности результатов, предоставляемых с помощью предложенного алгоритма диагностики, базирующийся на сопоставлении значений теплового потока, усваиваемого металлом, определенных разными способами.

Ключевые слова: печь непрерывного действия; процесс нагрева; поле температур; математическая модель; адекватность модели; внешний теплообмен.

Диагностика теплового состояния металла в ходе его тепловой обработки является важной задачей. Ее решение позволяет исключить ситуации (или, по крайней мере, снизить вероятность), при которых происходит необоснованное увеличение продолжительности тепловой обработки, или, наоборот, из печи выдается металл, не достигший заданного состояния по средне-массовой температуре или по температурному перепаду по толщине. Разработки, позволяющие реализовать такую систему диагностики на концептуальном уровне, появились достаточно давно. Одна из них, представленная в работе [1], ориентирована на работу печи периодического действия и даже учитывает тепловыделение при окислении металла.

Реализация системы диагностики печи периодического действия, способной работать в режиме реального времени и на основе оперативной обработки сигналов измерительных приборов, а также параллельного математического моделирования процесса тепловой обработки выдавать прогноз текущего теплового состояния металла, а также определять важные характеристики теплообменных процессов в печи, представлена в работах [2, 3]. Эта разработка основана на составлении моментальных тепловых балансов печной камеры и определении моментальных значений количества теплоты, усваиваемой нагреваемым материалом.

Для практической реализации системы диагностики работы печей непрерывного действия

необходима информация об изменении по длине печи приведенных коэффициентов излучения или плотности теплового потока, усваиваемого металлом. Для получения такой информации обычно идентифицируют условия теплообмена путем термометрирования печи [4–6]. Эта процедура предполагает продвижение в работающей печи заготовок, по толщине которых зачеканен ряд термопар. Совместная обработка информации о температурном состоянии заготовок и температуре по зонам печи (методическая, сварочная и томильная) позволяет определить характеристики внешнего теплообмена в камере печи. В общем случае такая задача идентификации классифицируется как некорректная, и для получения результатов приходится использовать процедуры регуляризации [4].

Проблема заключается в том, что после идентификации условий внешнего теплообмена по зонам печи, проведенной путем обработки результатов термометрирования печи с помощью зависимостей, представленных в [4], для эффективной работы прогнозной модели важно иметь дополнительный контрольный источник информации, который позволял бы проводить оперативную подстройку модели.

В работе [3] представлена концепция системы диагностики тепловой работы многозонного печного агрегата непрерывного действия, в основе которой лежит следующий подход – моментальные тепловые балансы определяются для каждой из зон печи, при этом учитывается обмен

потоками газов и энергии с соседними зонами. В результате для каждой из зон печи определяется значение средней плотности теплового потока, усваиваемого металлом.

Цель данной работы – разработка алгоритма диагностики тепловой работы печи непрерывного действия, готового к использованию в качестве информационного дополнения к системе АСУ ТП, и создание способа оперативного контроля адекватности результатов, предоставляемых с его помощью.

Модель для прогнозирования теплового состояния металла. Основы построения математических моделей тепловой обработки металла в печах общеизвестны. Наиболее простой подход к решению таких задач заключается в рассмотрении только лишь дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности, и учете всех особенностей внешнего теплообмена при заданных граничных условиях [7, 8].

Включение математической модели в контур системы оперативной диагностики тепловой работы печи предполагает задание граничных условий теплообмена в зависимости от текущих результатов измерения величин, определяющих параметры внешнего теплообмена (температура по зонам печи, скорость перемещения материала в печи и т.д.).

При работе печи в установившемся режиме принято говорить о квазистационарном режиме, при котором тепловое состояние каждой заготовки меняется по мере ее перемещения в печи, но в привязке к продольной координате печи тепловое состояние металла можно считать неизменным. В этом случае достаточно проводить моделирование для одной заготовки и, учитывая пропорциональность времени и текущей координаты ее нахождения в печи, иметь представление о температурном состоянии каждой из заготовок, находящихся в печи.

Задание граничных условий теплообмена производится для каждой из поверхностей заготовки в произвольном поперечном сечении с координатой x , подверженных воздействию теплового потока, по следующей схеме:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial y} = \alpha_{\Sigma}(x) \cdot (t_{\text{печь}}(x) - t_{\text{пов}}(x)), \quad (1)$$

где y – координата по оси, перпендикулярной к тепловоспринимающей поверхности; $t_{\text{печь}}(x)$ – температура печи в соответствующем сечении, °C; $t_{\text{пов}}(x)$ – температура поверхности металла, определенная на ближайшем предыдущем по отношению к координате x временном шаге с помощью системы диагностики, °C; λ – коэффициент теплопроводности металла при температуре $t_{\text{пов}}(x)$,

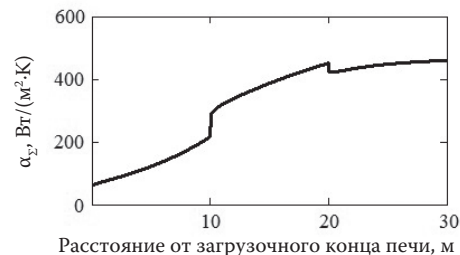


Рис. 1. Распределение итогового коэффициента теплоотдачи по длине методической печи для одного из режимов ее эксплуатации

Вт/(м·К); $\alpha_{\Sigma}(x)$ – итоговый коэффициент теплоотдачи от печи к поверхности заготовки, Вт/(м²·К).

Значение $t_{\text{печь}}(x)$ снимается с температурного профиля печи, устанавливаемого на основе текущих результатов измерения температуры по зонам печи. В частном случае, принимая температуру в пределах зон печи постоянной, температурный профиль можно представить ступенчатой функцией.

Итоговый коэффициент теплоотдачи определяется как

$$\alpha_{\Sigma}(x) = \alpha_{\lambda}(x) + \alpha_{\kappa}(x) = \frac{C_{\text{пр}} \left(\left(\frac{t_{\text{печь}}(x) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{\text{пов}}(x) + 273}{100} \right)^4 \right)}{t_{\text{печь}}(x) - t_{\text{пов}}(x)} + \alpha_{\kappa}(x), \quad (2)$$

где α_{λ} , α_{κ} – лучистая и конвективная составляющие итогового коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·К); $C_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴).

Распределение величины $\alpha_{\Sigma}(x)$ по длине печи может быть получено в результате обработки информации, полученной при термометрировании печи, однако нужно понимать, что это распределение будет справедливо только для конкретной печи и узкого диапазона изменения технологических параметров. Важной особенностью величины $\alpha_{\Sigma}(x)$ является ее существенная зависимость от температуры печи и температуры поверхности металла. Поскольку при изменении производительности печи меняется распределение температуры по зонам, установленное изменение $\alpha_{\Sigma}(x)$ не может быть универсальным. На рис. 1 приведен пример восстановления распределения $\alpha_{\Sigma}(x)$, полученный в результате обработки данных термометрирования методической печи, представленный в работе [4].

Ситуация упрощается, если доля конвективного теплообмена низка и составляющей α_{κ} можно пренебречь. Тогда для более универсальной трактовки результатов термометрирования целесообразно на основе их обработки определить распределение приведенных коэффициентов из-

лучения по длине печи $C_{\text{пр}}(x)$:

$$C_{\text{пр}}(x) = \begin{cases} C_{\text{пр}1}(x) & \text{при } x \leq L_1; \\ C_{\text{пр}2}(x) & \text{при } L_1 < x \leq L_2; \\ \dots & \\ C_{\text{пр}i}(x) & \text{при } L_{i-1} < x \leq L_i; \\ \dots & \\ C_{\text{пр}n}(x) & \text{при } L_{n-1} < x \leq L_n, \end{cases} \quad (3)$$

где n – число характерных зон печи; L_i – координата конечного сечения i -той зоны печи, отсчитанная от места загрузки металла вдоль продольной оси печи.

Величина $C_{\text{пр}}$ также зависит от температуры печи (поскольку от температуры зависит степень черноты продуктов сгорания) и степени черноты поверхности металла. Однако, поскольку первая зависимость не носит ярко выраженного характера, а степени черноты поверхности металла в привязке к продольной координате печи практически не изменяются, полученное распределение $C_{\text{пр}}(x)$ может быть использовано для разных режимов эксплуатации печи.

В случае, если печь оснащена конвективными горелками скоростного нагрева, пренебрегать конвективной составляющей теплового потока недопустимо. В этом случае распределение α_k по длине печи и поверхности металла можно предварительно оценить с помощью математического моделирования, либо получить соответствующее критериальное уравнение при обработке результатов стендового испытания. В первом приближении можно ограничиться холодным испытанием. При наличии результатов интерпретации информации, полученной при термометрировании печи, можно перейти от $\alpha_k(x)$ к $C_{\text{пр}}(x)$.

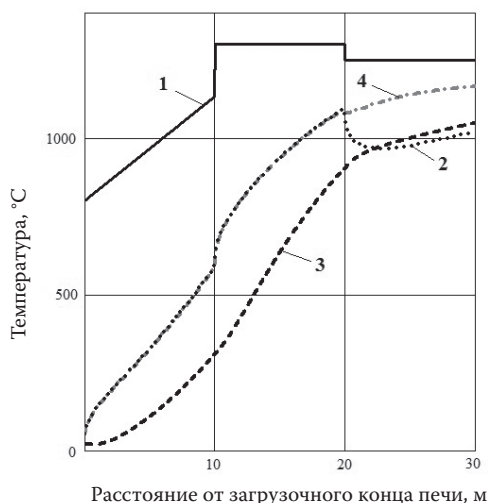


Рис. 2. Распределение температуры печи и изменение температурного состояния заготовки по длине печи: 1 – температура печи; 2 – температура нижней поверхности заготовки; 3 – температура центра; 4 – температура верхней поверхности заготовки

При равномерной скорости перемещения металла в печи v координата текущего положения заготовки (в момент времени t) определяется как $x = tv$. (4)

Поскольку в большинстве случаев перемещения носят циклический характер, в пределах элементарного цикла определяется усредненная скорость перемещения материала.

Алгоритм прогнозирования и оценки адекватности диагностики температурного состояния металла. В случае, если при изменении температурного режима по ходу работы печи в сигнале изменения температуры по длине печи имеется колебательная составляющая, можно использовать следующий прием: процессор отслеживает изменение температуры за некоторый промежуток времени, и при наличии существенного ее отклонения от заданной технологом величины система управления производит регуляризацию закона изменения температуры, после чего выполняется моделирование для данного временного промежутка.

Для случаев, когда имеет место изменение производительности печи по ходу нагрева, моделирование (в идеале) должно выполняться для каждой заготовки, находящейся в печи в данный момент времени. Определяя по математической модели тепловое состояние каждой из заготовок в режиме реального времени, получаем информацию об их реальном температурном состоянии и теплосодержании. По опыту работы [3], тепловое состояние заготовки удобно описать с помощью двух величин: среднемассовой энтальпии и температурном перепаде по толщине. Кроме того, для меняющихся режимов работы есть возможность составить прогноз изменения теплового состояния каждой заготовки и методом прострела [3] подобрать рациональные значения температурного режима по зонам печи.

Пример использования системы диагностики температурного состояния сляба из стали 40 толщиной 200 мм, нагреваемого в толкательной методической печи под горячую обработку давлением, представлен на рис. 2. Распределение приведенных коэффициентов излучения по длине печи задано на основе работы [4]. В методической и сварочной зонах значения температуры верхней и нижней поверхностей сляба совпадают (кривые 2 и 4 сливаются). В большинстве случаев эти температуры отличаются, в частности, нижняя поверхность может иметь более высокую температуру, чем верхняя. При переходе в томильную зону температура нижней поверхности снижается и становится самой низкой по всей толщине расчетного сечения нагреваемого сляба.

Оценить корректность работы системы диагностики в режиме реального времени достаточно затруднительно. Если использовать для ее решения стандартные средства, можно прибегнуть либо к измерению температуры поверхности заготовок на выдаче, либо производить косвенную оценку на основе анализа текущих значений энергосиловых параметров прокатных клетей [9].

В данной работе для оценки корректности работы системы диагностики в режиме реального времени и выяснения необходимости выполнения ее оперативной подстройки определение текущего теплового потока, усваиваемого металлом, предложено производить двумя способами:

- на основе входных и выходных материальных и энергетических потоков применительно к печи в целом;

- на основе построения моментальных тепловых балансов для каждой зоны печи и суммирования тепловых потоков, усваиваемых металлом в пределах каждой зоны.

Согласованность этих результатов в пределах заданной погрешности будет служить признаком адекватной работы системы диагностики.

Если рассмотреть моментальный тепловой баланс печи непрерывного действия в целом, то тепловой поток, моментально усваиваемый металлом, подвергающимся тепловой обработке, может быть определен как

$$Q_{\text{усв}} = V_{\Sigma}^{\tau} Q_{\text{н}}^{\text{р}} - Q_{\Sigma}^{\text{пот}} - V_{\Sigma}^{\tau} V_{\text{А}}^{\text{уА}} c^{\text{тх}} t^{\text{тх}} (1 - k_r), \text{ кВт} \quad (5)$$

где V_{Σ}^{τ} – суммарный моментальный расход топлива по всем зонам печи, $\text{м}^3/\text{с}$; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая теплота сгорания топлива, $\text{кДж}/\text{м}^3$; $Q_{\Sigma}^{\text{пот}}$ – суммарная мощность тепловых потерь по всем статьям, кВт; $V_{\text{А}}^{\text{уА}}$ – удельный выход продуктов сгорания от 1 м^3 топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $c^{\text{тх}}$ – теплоемкость продуктов сгорания при $t^{\text{тх}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; $t^{\text{тх}}$ – температура продуктов сгорания, покидающих последнюю зону печи, $^{\circ}\text{C}$; k_r – коэффициент рекуперации, показывающий, какая доля теплоты продуктов сгорания, покидающих печь, используется для подогрева компонентов горения.

При использовании теплоты продуктов сгорания для нагрева только воздуха величина k_r определяется как

$$k_r = (V_{\Sigma}^{\tau} V_{\text{В}}^{\text{уА}} c_{\text{В}} (t_{\text{гВ}} - t_{\text{хВ}})) / V_{\Sigma}^{\tau} V_{\text{А}}^{\text{уА}} c^{\text{тх}} t^{\text{тх}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{В}}^{\text{уА}}$ – удельный расход воздуха (с учетом реального значения коэффициента расхода воздуха) для сжигания 1 м^3 топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $t_{\text{хВ}}$, $t_{\text{гВ}}$ – температура воздуха до и после рекуператора, $^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{В}}$ – средняя удельная теплоемкость воздуха в интервале температур $t_{\text{хВ}}$ и $t_{\text{гВ}}$, $\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Величина $Q_{\Sigma}^{\text{пот}}$ определяется путем идентификации и суммирования всех ее составляющих:

- потери теплопередачей через наружные ограждения

$$Q_{\text{т}} = \sum_{j=1}^m \alpha_j F_j (t_{\text{пов}j} - t_{\text{ос}}), \quad (7)$$

где α_j – коэффициент теплоотдачи от наружной поверхности j -того элемента ограждающей конструкции печи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; F_j – площадь поверхности j -того элемента ограждающей конструкции печи, м^2 ; $t_{\text{пов}j}$ – температура наружной поверхности j -го элемента ограждающей конструкции печи, $^{\circ}\text{C}$; $t_{\text{ос}}$ – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; m – число характерных элементов ограждающей конструкции печи с отличающимися условиями теплообмена (температура поверхности, особенности теплообмена) на наружной поверхности;

- потери теплоты в водоохлаждаемых элементах печи

$$Q_{\text{в.охла}} = G_{\text{в.охла}} c_{\text{в.охла}} \Delta t_{\text{в.охла}}, \quad (8)$$

где $G_{\text{в.охла}}$ – расход охлаждающей воды, $\text{кг}/\text{с}$; $c_{\text{в.охла}}$ – удельная массовая теплоемкость воды, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\Delta t_{\text{в.охла}}$ – повышение температуры охлаждающей воды после прохождения через водоохлаждаемые элементы, $^{\circ}\text{C}$.

Определение текущих значений величин, входящих в выражения (5)–(6), выполняется следующим образом:

- температуры продуктов сгорания, покидающих печь, воздуха до и после рекуператора измеряются с помощью термопар;

- моментальные значения расхода топлива определяются с помощью расходомера;

- величина $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ известна, поскольку работа ведется на топливе известного состава; в случае, если состав топлива существенно изменяется во времени, задача определения $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ решается путем непрерывного измерения концентрации основных компонентов топлива и определения $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ расчетным способом;

- величины $V_{\text{А}}^{\text{уА}}$ и $V_{\text{В}}^{\text{уА}}$ определяются на основе стандартного расчета горения топлива для топлива заданного состава и коэффициента расхода воздуха, в случае, если имеют место значительные и достаточно стабильные подсосы воздуха в печь, их можно учесть путем соответствующего увеличения расчетного значения коэффициента расхода воздуха, по сравнению с тем значением, которое относится к работе конкретных газогорелочных устройств.

Тогда средняя плотность теплового потока, усваиваемого обогреваемой поверхностью металла во всей печи ($\text{кВт}/\text{м}^2$), определяется как

$$\bar{q}_{\text{общ}} = Q_{\text{усв}} / F_{\text{общ}}^{\text{м}}, \quad (9)$$

где $F_{\text{общ}}^{\text{м}}$ – общая площадь поверхности металла, подверженной воздействию теплового потока, м^2 .

Определение текущих тепловых потоков, усваиваемых металлом в пределах каждой зоны, производится в соответствии с зависимостями, предложенными в работе [3]. Если обозначить средние плотности тепловых потоков на поверхности металла в пределах каждой зоны как $\bar{q}_i$ (кВт/м²), а площади поверхности металла, подверженные воздействию теплового потока, как F_i^M (м²), то должно выполняться соотношение:

$$\bar{q}_{\text{общ}} F_{\text{общ}}^M = \sum_{i=1}^n \bar{q}_i F_i^M. \quad (10)$$

Выполнение условия (10) в пределах заданной погрешности позволяет судить о корректности работы системы диагностики, в противном случае требуется ее подстройка.

Анализ влияния точности измерения величин, характеризующих процесс, на результаты работы системы диагностики может быть выполнен в режиме эмуляции, когда к реальным результатам измерения добавляются и вычитаются максимальные погрешности, значения которых устанавливаются на основе класса точности приборов и используемой методики измерения. Полученный диапазон результатов показывает интервал нахождения реальных значений диагностируемых величин.

Выводы. Разработан алгоритм диагностики теплового состояния металла при его тепловой обработке в печи непрерывного действия, базирующийся на математической модели процесса, использующей дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности. Граничные условия теплообмена задаются на основе текущих результатов измерения величин, определяющих параметры внешнего теплообмена. Для оперативного контроля адекватности результатов, предоставляемых с помощью предложенного алгоритма диагностики, создан способ, предполагающий сравнение значений тепловых потоков, усваиваемых металлом, определенных разными способами: на основе входных и выходных материальных и энергетических потоков печи в целом, с одной стороны, и полученного путем суммирования тепловых потоков, усваиваемых в каждой зоне печи.

Использование предложенного алгоритма диагностики теплового состояния металла и способа оценки адекватности полученных результатов позволят производить оперативную оценку теплового состояния заготовок в рамках системы автоматического управления производственным процессом для оптимизации производительности агрегатов и энергозатрат, а также получения максимально возможного качества выпускаемой продукции.

Библиографический список

1. Ревун М.П., Гранковский В.И., Байбүз А.Н. Интенсификация работы нагревательных печей. Киев : Техніка, 1987. С. 133–136.
2. Бирюков А.Б., Новикова Е.В., Олешкевич Т.Г. и др. Диагностика нагревательных печей периодического действия на основании построения и анализа моментальных тепловых балансов // Промышленная теплотехника. 2014. Т. 36, № 2. С. 29–35.
3. Бирюков А.Б. Теплотехника непрерывной разливки стали и тепловой обработки заготовок. Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2015. 444 с.
4. Ткаченко В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов. Т. 13. Сер. «Задачи и методы: математика, механика, кибернетика». Киев : Наукова думка, 2008. 244 с.
5. Улановский А.А., Тимофеев Л.И. Современные системы диагностики для повышения тепловой эффективности печей термообработки // Мир металлов. 2011. № 2. С. 8–11.
6. Томилин Е.М., Чичикало Н.И. Методология определения температурного состояния проходных печей. Донецк : Ноулидж (Донецкое отд.), 2011. 222 с.
7. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование промышленных печей: учебник для вузов. М. : Металлургия, 1990. 239 с.
8. Бирюков А.Б., Волошин А.И., Олешкевич Т.Г. Математическое моделирование процесса тепловой обработки металла в печах // Сталь. 2016. № 1. С. 71–75.
9. Перерва В.Я., Бергеман Г.В., Губинский М.В., Шевченко Г.А. Рациональные температурные режимы на участке нагревательная печь – прокатный стан // Металл и литье Украины. 2008. № 5. С. 35–37.

DIAGNOSTICS OF METAL TEMPERATURE STATE AT ITS THERMAL PROCESSING IN CONTINUOUS FURNACES

© Biryukov A.B., Ivanova A.A.

The algorithm for diagnosing metal thermal state at its heat processing in continuous furnace is developed. It bases on the use of the mathematical model of the process represented by one differential equation for non-stationary heat conductivity and specifying the boundary conditions for heat exchange based on current measurement results for the values determining external heat transfer parameters. The method for operational control of the adequacy of the results provided by the proposed diagnostic algorithm is created. It bases on comparison of the values of heat flux assimilated by the metal, determined in different ways.

Keywords: continuous furnace; heating process; temperature field; mathematical model; adequacy of the model; external heat exchange.