

# Металлургическая теплотехника и теплоэнергетика

УДК 669.046:536.24

DOI: 10.14529/met200407

## О РАСЧЕТНО-ИНСТРУМЕНТАЛЬНОМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА НАГРЕВА И ТЕРМООБРАБОТКИ МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

**В.И. Панферов**<sup>1, 2</sup>

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

<sup>2</sup> Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск, Россия

**Введение.** В условиях повышения требований к качеству нагрева металла перед прокаткой или при его термообработке задача создания и совершенствования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП) нагревательных и термических печей является вполне актуальной. **Цель исследования:** рассмотреть решение задачи контроля перепада температуры по сечению металла при его нагреве перед прокаткой или в процессе термообработки. **Материалы и методы.** Выполнен анализ литературных источников по проблеме. Проведено обобщение результатов ранее выполненных работ как для случаев выдержки при постоянной температуре рабочего пространства, так и при постоянной температуре поверхности заготовки, а также и для случая нагрева массивных тел произвольной формы. **Результаты.** Показано, что решение задачи контроля можно свести либо к измерению текущей плотности теплового потока внутрь металла, либо же к измерению разности температур печи и поверхности сляба. Исследовано влияние на структуру алгоритмов контроля различных особенностей реального процесса выдержки. Приведено решение задачи контроля для случая массивных тел произвольной формы. Получены соотношения для контроля, аналогичные алгоритмам контроля для слитков и слябов. Указан способ настройки алгоритмов контроля на реальный процесс по данным текущих измерений в регулярном режиме. Установлено, что для случая симметричного или одностороннего нагрева слябов в методических печах для настройки достаточно измерять температуру только одной из поверхностей, при несимметричном нагреве требуется измерять температуры обеих поверхностей. Для случая выдержки рулонов холоднокатаной ленты в колпаковых печах необходимо измерять температуру в трех различных по радиусу точках основания нижнего рулона с помощью контактных термопар. После настройки для контроля в любом случае достаточно измерять температуру лишь в одной точке поверхности. Исследовано влияние погрешностей измерения температуры поверхности металла на точность настройки алгоритмов контроля и на точность оценки максимального перепада температуры по его сечению. Приведены варианты реализации алгоритмов контроля в промышленных условиях. **Заключение.** Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании алгоритмического обеспечения АСУ ТП нагревательных и термических печей.

*Ключевые слова:* качество нагрева и термообработки металла, контроль перепада температуры по сечению, автоматизированная система управления, настройка алгоритмов контроля, допустимая погрешность измерения температуры поверхности, плотность теплового потока.

### Постановка задачи

При нагреве металла перед прокаткой, а также в процессе его термической обработки предъявляется требование завершения периода выдержки при определенном перепаде температуры в металле. Окончание периода выдержки при повышенном перепаде темпе-

ратуры снижает качество нагрева металла перед прокаткой или его термообработки. В противном случае низка производительность печей. Инструментальный контроль перепада температуры по ряду причин затруднен или невозможен и в промышленных условиях, как правило, не применяется. В связи с этим воз-

никает задача разработки и внедрения адаптивных систем косвенного контроля качества нагрева и термообработки металла в печах.

### Анализ известных решений

Отметим, что вопросы определения времени выдержки, необходимого для достижения заданного качества нагрева металла, в отечественной литературе рассматривались еще В.С. Костогрызовым, Э.М. Гольдфарбом, Б.Ф. Зобниным, М.П. Ревуном, В.И. Гранковским и др. [1–4], также известны и зарубежные работы по этой проблеме [5–7].

К месту заметим, что суть предложенного в работах [1; 2, с. 414–418] способа заключается в том, что для периода выдержки слитка при постоянной температуре поверхности полагают, что плотность поглощаемого металлом теплового потока изменяется во времени по экспоненте. Параметры экспоненты определяют по результатам измерения теплового потока в два и более различных моментов времени. Далее, по заданному конечному перепаду температуры по сечению слитка вычисляют конечное значение плотности теплового потока на металл, а по нему, используя настроенную на реальный процесс экспоненту, находят и требуемое время выдержки.

Способ работы [3, с. 106–108] базируется на том, что в период выдержки металла при постоянной температуре колодца расход топлива так же, как и плотность теплового потока, изменяется во времени по экспоненте. Поэтому получено аналогичное работам [1, 2] соотношение, только выраженное через расход топлива в период выдержки.

Способ [4] разработан для периода выдержки металла при постоянной температуре поверхности, реализуемой с помощью двухпозиционного регулятора. Подход к решению задачи по существу такой же, что и в работах [1–3], только в данном случае перепад температуры по сечению определяют по скважности импульсов, формируемых в процессе работы двухпозиционного регулятора.

В работах [5–7] для оценки температуры самой холодной точки сляба используются, как правило, динамические модели.

Тем не менее, как это отмечено в работе [8], проблема требует дальнейшей проработки и развития, успешное ее решение способствует энергосбережению и повышению качества нагрева и термообработки.

### Разработка алгоритмов контроля

Как известно, выдержка металла в печах может осуществляться при одном из следующих условий [2]: постоянной температуре печи, постоянной температуре поверхности, нулевом тепловом потоке через поверхность. Эти условия хотя и выполняются на практике достаточно приближенно, но вместе с тем отражают существо реализуемого в печи процесса выдержки [1–4, 8]. В частности, о разумности и практической значимости рассмотрения процесса при нулевом тепловом потоке через поверхность сообщается в работах [9, 10]. Поэтому практически значимо рассмотрение решения задачи контроля перепада температуры по сечению для всех данных условий.

В ранее выполненных работах [11–14] изложены теоретические основы построения систем контроля качества, учитывающие как *иррегулярную*, так и *регулярную* стадии периода выдержки. В данных работах, в частности, показано, что полученные алгоритмы контроля значительно упрощаются, если предположить, что в период выдержки наступает регулярный тепловой режим. В этом случае для контроля перепада температуры не требуются знания каких-либо характеристик температурного поля в начале стадии томления, а поэтому не требуется и достаточно затратный расчетно-инструментальный контроль температурного поля с самого начала процесса нагрева. Кроме того, не требуется учет и самого времени, прошедшего с начала периода выдержки.

К месту следует подчеркнуть, что разумность и практическая обусловленность использования закономерностей регулярного режима для периода выдержки отмечена в работах [1–4]. Эти закономерности достаточно просты (с точки зрения затрат времени на вычисления) и вместе с тем зачастую обеспечивают высокую точность расчета температурных полей, об этом, в частности, свидетельствуют многочисленные вполне успешные попытки описания процесса нагрева простой экспонентой, хорошая согласуемость экспериментальных данных с закономерностями регулярного теплового режима, да и вообще «опытное» происхождение самой теории.

В работе [11] получен алгоритм, позволяющий определять перепад температуры по сечению сляба в период выдержки при посто-

янной температуре поверхности. Реализация алгоритма в общем случае требует измерения времени выдержки и текущего теплового потока внутрь заготовки. Кроме того, необходима оценка коэффициента несимметрии температурного поля перед выдержкой.

Показано, что в случае регулярного теплового режима алгоритм существенно упрощается, в частности, устраняется необходимость контроля времени выдержки и вообще оценок каких-либо характеристик начального температурного поля.

Для углеродистых сталей приведена зависимость, позволяющая приближенно оценивать время наступления регулярного теплового режима в зависимости от толщины слябов.

В работе [12] получен алгоритм, позволяющий определять перепад температуры по сечению сляба в период выравнивания при нулевом тепловом потоке через поверхность. Реализация алгоритма в общем случае требует измерения времени выдержки и текущей скорости изменения температуры поверхности заготовки. Кроме того, так же, как и в предыдущем случае, необходима оценка коэффициента несимметрии температурного поля перед началом процесса выравнивания.

Показано, что в случае регулярного теплового режима алгоритм существенно упрощается, в частности, устраняется необходимость контроля времени выдержки и вообще оценок каких-либо характеристик начального температурного поля.

Также для случая регулярного теплового режима получена формула, позволяющая оценивать перепад температуры по результатам измерения температуры в два различных момента времени. Для углеродистых сталей приведена зависимость, позволяющая приближенно оценивать время наступления регулярного теплового режима в зависимости от толщины слябов.

В работах [13, 14] получены алгоритмы, позволяющие определять перепад температуры по сечению сляба в период выдержки при постоянной температуре рабочего пространства. Реализация алгоритмов на иррегулярной стадии периода выдержки требует измерения времени выдержки и текущей разности температур печи и поверхности заготовки. Нетрудно видеть, что разность температур печи и поверхности заготовки может быть выраже-

на через плотность поглощаемого телом теплового потока, т. е. контроль можно организовать, измеряя эту величину, что идентично предыдущему случаю выдержки при постоянной температуре поверхности. Указано также, что контроль можно организовать как по данным текущих измерений скорости изменения температуры поверхности сляба, так и по измерениям температуры поверхности в два различных момента времени. Кроме того, в данном случае также необходима оценка коэффициента несимметрии температурного поля металла перед его поступлением в зону выдержки.

Показано, что в случае регулярного теплового режима алгоритмы существенно упрощаются, в частности, устраняется необходимость контроля времени выдержки и вообще оценок каких-либо характеристик начального температурного поля.

### Обобщение результатов

Обобщая полученные результаты, можно заключить, что *как при выдержке металла при постоянной температуре поверхности, так и при постоянной температуре печи решение задачи контроля можно свести либо к измерению текущей плотности теплового потока внутрь заготовки или же к измерению разности температур печи и поверхности заготовки*. При этом, конечно, нужно иметь в виду, что разность температур печи и поверхности заготовки практически значительно проще измерить с помощью известных серийно выпускаемых технических средств, а с измерением плотности теплового потока имеются некоторые проблемы – нет серийно выпускаемых надежно работающих в условиях металлургических печей тепломеров. Вместе с тем при непосредственном применении тепломеров для контроля отпадает необходимость в настройке модели внешнего теплообмена на реальный процесс, т. е. в определении реального значения коэффициента теплоотдачи для стадии томления. Однако эту достаточно непростую задачу обязательно нужно решать, если для контроля использовать более простой в техническом плане подход – измерять разность температур печи и поверхности заготовки.

Следует заметить, что на практике из-за конструктивных особенностей томильных зон некоторых методических печей и по ряду дру-

гих причин рассмотренные условия томления выполняются не всегда и причем с различной степенью точности при различных режимах работы. Например, известны случаи, когда выдержка осуществляется несимметрично из-за влияния подовых труб, охлаждающее действие которых иногда пытаются компенсировать увеличением температуры нижних зон по сравнению с верхними зонами. Реализуются также такие режимы выравнивания, когда отчетливо проявляется линейное уменьшение температуры к окну выдачи металла из печи. Поэтому представляется целесообразным выяснить, как имеющиеся на практике особенности режимов выравнивания повлияют на структуру алгоритмов контроля и на саму возможность такого контроля.

В связи с этим в работе [15] исследовано влияние на структуру алгоритмов контроля и вообще на саму возможность такого контроля различных особенностей реального процесса выдержки (неравенство температур рабочего пространства и коэффициентов теплообмена для разных поверхностей слябов, линейное уменьшение температуры в зонах к окну выдачи металла на прокатный стан). Показано, что алгоритмы, как правило, могут быть применены и в данных случаях.

### Нагрев и термообработка тел произвольной формы

С момента возникновения теории теплопроводности и до настоящего времени всегда был и остается интересным вопрос об объединении и распространении частных решений и полученных на их основе алгоритмов на тела произвольной формы. Эти вопросы рассматривались в литературе Б.И. Китаевым, И.Д. Семикиным, Э.М. Гольдфарбом [2], а также другими исследователями. Поэтому, естественно, возникает вопрос о том, возможно ли получение алгоритмов, аналогичных вышеуказанным, и для тел другой формы, отличной от формы слябов и слитков.

Как известно [16], в регулярном тепловом режиме температура любой точки нагреваемого тела произвольной формы удовлетворяет уравнению

$$t(M_i, \tau) = t_{\text{п}} + A \cdot U(M_i) \cdot \exp(-\mu \cdot \tau), \quad (1)$$

где  $t(M_i, \tau)$  – температура в точке  $M_i$  в момент времени  $\tau$ ;  $t_{\text{п}}$  – температура рабочего

пространства печи, при которой осуществляется выдержка металла;  $U(M_i)$  – функция только координат точки  $M_i$ ;  $A$  – постоянная, не зависящая ни от координат, ни от времени, она определяется из начального температурного поля перед выдержкой;  $\mu$  – некоторый постоянный коэффициент. Величины  $A$  и  $\mu$  имеют одинаковое значение для любой точки тела [16].

Используя уравнение (1), с помощью несложных выкладок для произвольных точек  $M_1, M_2, M_3$  можно получить следующее соотношение

$$\frac{t_{\text{п}} - t(M_1, \tau)}{t(M_2, \tau) - t(M_3, \tau)} = \frac{U(M_1)}{U(M_2) - U(M_3)}. \quad (2)$$

Отсюда следует, что отношение разности температуры рабочего пространства и температуры некоторой точки  $M_1$  к разности температур каких-либо других точек  $M_2$  и  $M_3$  является постоянной во времени величиной, не зависящей также и от температурного поля тела в начале периода выдержки. Поэтому измерив одну из этих разностей, по соотношению (2) можно определить и другую.

В качестве точки  $M_1$  следует выбирать такую точку на поверхности, для которой наиболее просто измерить температуру. Координаты точек  $M_2$  и  $M_3$  при контроле наибольшего перепада должны соответствовать координатам точек с максимальной и минимальной температурами тела. При этом очень часто  $M_1 = M_2$ , т. е. наиболее просто измерить температуру точки, лежащей на поверхности, которая к тому же является и точкой с максимальной температурой. В этом случае формулу (2) можно переписать в виде

$$\frac{t_{\text{п}} - t(M_1, \tau)}{t(M_1, \tau) - t(M_3, \tau)} = \frac{U(M_1)}{U(M_1) - U(M_3)}. \quad (3)$$

Интересующий нас максимальный перепад температуры по сечению  $\Delta t_{\text{max}} = t(M_1, \tau) - t(M_3, \tau)$  будет равен

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{max}} &= \left(1 - \frac{U(M_3)}{U(M_1)}\right) \cdot [t_{\text{п}} - t(M_1, \tau)] = \\ &= \left(1 - \frac{U(M_3)}{U(M_1)}\right) \cdot \frac{q_{\text{пов}}}{\alpha}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $q_{\text{пов}}$  – плотность теплового потока на поверхности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи.

Таким образом, получили аналогичные соотношения, что и в работах [11–14] для слябов и слитков.

## Настройка алгоритмов контроля

Следует отметить, что функция  $U(M_i)$  в общем случае содержит ряд коэффициентов, численные значения которых зависят от параметров внешнего теплообмена металла. Поэтому необходима настройка уравнения (2) на реальный процесс. Эта задача может быть решена, например, за счет решения общей задачи идентификации математической модели конкретного процесса. Однако имеет смысл указать следующий способ настройки алгоритма (2) в регулярном режиме: для ряда точек, лежащих на поверхности, для которых наиболее просто организовать инструментальный контроль температуры, в процессе текущей выдержки определяется зависимость  $t(M_i, \tau)$  в отдельные моменты или на определенном отрезке времени. Далее, используя точечный или интегральный метод наименьших квадратов, для каждой такой точки  $M_i$  вычисляют значения величин  $A \cdot U(M_i)$  и  $\mu$ . Зная координаты точек, используемых для настройки, и структуру конкретных зависимостей  $A \cdot U(M_i)$  и  $\mu$  от координат точек и настроечных параметров, составляют соответствующее число уравнений (как правило, трансцендентных), решая которые, находят реальные численные значения настроечных параметров системы «печь – металл» [17].

Число точек измерения температуры поверхности, необходимых для настройки, определяется числом настраиваемых параметров системы. Так, для случая симметричного или одностороннего нагрева слябов в методических печах для настройки достаточно измерять температуру только одной из поверхностей, при несимметричном нагреве требуется измерять температуру обеих поверхностей. Для случая выдержки рулонов холоднокатаной ленты в колпаковых печах достаточно измерять температуру в трех различных по радиусу точках основания нижнего рулона с помощью контактных термодатчиков. После настройки для контроля в любом случае достаточно измерять температуру лишь в одной точке поверхности [17].

Конкретизируем вышеизложенное для случая, когда настройка заключается в отыскании только одного параметра  $\mu$ . Следует отметить, что если по условиям задачи уравнение (1) содержит два неизвестных (неизмеряемых) параметра  $A \cdot U(M_i)$  и  $\mu$ , то для идентификации необходимо иметь результаты измерения температуры поверхности металла не менее, чем в два различных момента времени. При этом если определим параметр  $\mu$  по результатам измерения температуры поверхности в моменты времени  $\tau_1$  и  $\tau_2$  после наступления регулярного режима, то получим следующую формулу для нахождения этой величины

$$\mu = \frac{1}{\tau_2 - \tau_1} \ln \left( \frac{t_n - t(M_1, \tau_1)}{t_n - t(M_1, \tau_2)} \right). \quad (5)$$

При наличии измерительной информации о температуре поверхности металла более чем в двух точках задачу следует решать по методу наименьших квадратов, минимизируя величину

$$Q(A \cdot U(M_1), \mu) = \sum_{i=1}^N [\ln(t_n - t(M_1, \tau_i)) - \ln(-A \cdot U(M_1) + \mu \tau_i)]^2, \quad (6)$$

полученную путем записи уравнения (1) в логарифмическом масштабе с целью получения решения в явном виде относительно  $\mu$  и суммирования по точкам квадратов невязок. Формула для вычисления параметра  $\mu$  в этом случае имеет вид

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i \ln(t_n - t(M_1, \tau_i)) - \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \tau_i \sum_{i=1}^N \ln(t_n - t(M_1, \tau_i))}{\frac{1}{N} (\sum_{i=1}^N \tau_i)^2 - \sum_{i=1}^N \tau_i^2}. \quad (7)$$

Аналогично, при наличии измерительной информации о температуре поверхности металла на некотором отрезке времени  $[\tau_n, \tau_k]$ , где  $\tau_k > \tau_n$ , параметр  $\mu$  определяем из условия минимума по  $A \cdot U(M_1)$  и  $\mu$  критерия:

$$I(A \cdot U(M_1), \mu) = \int_{\tau_n}^{\tau_k} [\ln(t_n - t(M_1, \tau_i)) - \ln(-A \cdot U(M_1) + \mu \tau)]^2 d\tau. \quad (8)$$

В этом случае

$$\mu = \frac{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \tau \ln(t_n - t(M_1, \tau_i)) d\tau - \frac{1}{2} (\tau_n + \tau_k) \cdot \int_{\tau_n}^{\tau_k} \ln(t_n - t(M_1, \tau_i)) d\tau}{\frac{1}{4} (\tau_n + \tau_k) \cdot (\tau_k^2 - \tau_n^2) - \frac{1}{3} (\tau_k^3 - \tau_n^3)}. \quad (9)$$

Отметим также, что, определив с помощью любой из вышеприведенных формул числовое значение параметра  $\mu$ , по характеристическому уравнению задачи [16] можно вычислить непосредственно численное значение коэффициента внешнего теплообмена  $\alpha$ , вследствие неопределенности реального значения которого собственно и возникает задача настройки алгоритмов контроля.

Апробация алгоритмов (5), (7) и (9) проводилась с помощью компьютерного моделирования. При этом данные о численных значениях температуры поверхности в период выдержки брали из точного выражения температурного поля заготовки для этого периода [18]. В результате моделирования было установлено, что из-за погрешности установления регулярного теплового режима при конечных значениях времени выдержки алгоритмы (5), (7), (9) дают некоторую ошибку в определении параметра  $\mu$ . Причем эта ошибка уменьшается при использовании для идентификации более удаленных моментов времени. Так, например, для углеродистого сляба толщиной  $L = 0,1$  м, когда число Био равно 1,5, а температурное поле в начале периода выдержки описывается выражением  $1100 - 100 \left(1 - \frac{x^2}{L^2}\right)$ , °С ( $x$  – координата по толщине сляба),  $t_n = 1200$  °С, точное значение параметра  $\mu$  равно  $1,952 \text{ ч}^{-1}$ . Используя алгоритм (5) для данных о температуре поверхности при  $\tau_1 = 9$  мин и  $\tau_2 = 12$  мин, получим  $\mu = 1,805 \text{ ч}^{-1}$ ; если же будем использовать данные при  $\tau_1 = 11$  мин и  $\tau_2 = 14$  мин, то получим  $\mu = 1,933 \text{ ч}^{-1}$ . Как видно, погрешность определения  $\mu$  заметно уменьшилась. Кроме того, как и следовало ожидать, алгоритм (5) является более чувствительным к случайным погрешностям данных о температуре поверхности, чем алгорит-

мы (7) и (9), вследствие использования результатов измерения только в двух точках. Алгоритмы же (7) и (9) являются практически равноценными.

### Влияние погрешности измерения температуры поверхности

Исследовали влияние погрешности результатов измерения температуры поверхности на точность оценки параметра  $\mu$  и наибольшего перепада по сечению сляба. Для этого на значение температуры поверхности, полученное из точного выражения температурного поля, накладывалась постоянная систематическая погрешность положительного или отрицательного знака. С практической точки зрения наибольший интерес представляет определение влияния положительной систематической погрешности, поскольку при нагреве поверхность неокисленного металла, как правило, покрыта слоем окалины, имеющим более высокую температуру. Исследование проводили для алгоритма (5), рассматривая период выдержки для вышеприведенных условий на отрезке времени [9; 16] мин. Результаты этих исследований приведены в таблице. Здесь  $k = (1 - U(M_3)/U(M_1))$  – коэффициент преобразования разности температур печи и поверхности металла в наибольший перепад температуры по сечению сляба.

Из приведенных данных видно, что если считать точность определения температурного поля заготовки (в том числе и наибольшего перепада) в 25 °С приемлемой [19, 20], то погрешность определения температуры поверхности металла для идентификации параметра  $\mu$  и контроля наибольшего перепада температуры по сечению должна быть порядка 20 °С. С увеличением погрешности измерения тем-

Влияние систематической погрешности измерения на точность оценки идентифицируемого параметра и максимального перепада температуры по сечению сляба

| Номер вычислительного эксперимента | Погрешность измерения температуры поверхности, °С | $\mu$ , $\text{ч}^{-1}$ | $k$ , отн. ед. | Максимальный модуль погрешности оценки $\Delta t_{\text{max}}$ , °С |
|------------------------------------|---|-------------------------|----------------|---|
| 1                                  | 0   | 1,92                    | 0,80           | 2   |
| 2                                  | 5   | 2,06                    | 0,90           | 3   |
| 3                                  | 10  | 2,23                    | 1,03           | 7   |
| 4                                  | 15  | 2,41                    | 1,21           | 13  |
| 5                                  | 20  | 2,65                    | 1,47           | 22  |
| 6                                  | 25  | 2,93                    | 1,85           | 37  |

пературы поверхности ошибка в определении  $\Delta t_{\max}$  начинает существенно возрастать. Погрешности в оценке  $\Delta t_{\max}$  при отрицательной систематической погрешности измерения температуры поверхности неокисленного металла получаются меньше: так, при погрешности в  $-25^\circ\text{C}$  максимальный модуль ошибки в определении наибольшего перепада температуры составляет всего  $13^\circ\text{C}$ .

В процессе моделирования было установлено, что погрешность оценки наибольшего перепада температуры монотонно убывает при увеличении времени выдержки. Так, для случая строки 6 таблицы модуль погрешности оценки наибольшего перепада при  $\tau = 9$  мин составляет  $37^\circ\text{C}$ , а при  $\tau = 16$  мин – уже только  $21^\circ\text{C}$ . Объясняется это тем, что взаимосвязь между погрешностью оценки наибольшего перепада  $\delta\Delta t_{\max}$ , погрешностью оценки коэффициента преобразования  $\delta k$  и погрешностью измерения температуры поверхности  $\delta t(M_1, \tau_i)$  представляется следующей формулой

$$\delta\Delta t_{\max} = \delta k \cdot (t_{\text{п}} - t(M_1, \tau)) + k \cdot \delta t(M_1, \tau) + \delta k \cdot \delta t(M_1, \tau), \quad (10)$$

где  $k, t_{\text{п}}, t(M_1, \tau)$  – истинные значения этих величин.

Из формулы (10) следует, что поскольку с увеличением времени выдержки величина  $(t_{\text{п}} - t(M_1, \tau))$  уменьшается, то и погрешность оценки наибольшего перепада  $\delta\Delta t_{\max}$  будет снижаться.

### О практической реализации алгоритмов

Варианты реализации алгоритмов контроля указаны в работах [21–23]. В частности, промышленная апробация алгоритма (5) осуществлялась на методических печах стана 2500 ПАО «ММК» [21]. Причем точная реализация алгоритма требует измерения поглощаемого металлом теплового потока, однако при апробации применялся достаточно упрощенный метод его измерения – по разности температур рабочего пространства и поверхности нагреваемых заготовок, причем температура поверхности измерялась и стабилизировалась по показаниям свизированных на металл радиационных пирометров; поправки, учитывающие влияние отраженного излучения кладки и продуктов сгорания, не вводились. Кроме того, на печи отсутствовал и ряд необ-

ходимых систем, в частности, не было системы слежения за продвижением металла в печи. Тем не менее, результаты практической проверки работоспособности алгоритма оказались достаточно успешными [21].

Была изготовлена и смонтирована система автоматического прогнозирования температуры раската металла за черновой группой клетей. Переход к использованию такого показателя качества нагрева слябов объясняется тем, что температура раската напрямую связана с перепадом температуры по сечению заготовки: чем меньше перепад температуры, тем выше при прочих равных условиях будет температура раската металла. Кроме того, такая оценка качества нагрева удобна и привычна для нагревателей металла.

Поскольку на значение температуры раската влияет также и изменение условий охлаждения заготовок за время их нахождения на подающем рольганге, времени транспортирования, степени обжатия в черновой группе клетей и т. п., градуировка системы производилась экспериментально. Градуировочная характеристика была задана линейным уравнением, ее коэффициенты определялись методом наименьших квадратов, причем коэффициент корреляции характеристики составил  $0,85$ , что весьма удовлетворительно.

Следует заметить, что более широкие перспективы промышленного использования алгоритмов контроля открываются в термообработке [8], где периоды выдержки (выравнивания) имеют довольно продолжительную величину, являются ступенчатой функцией массы садки, что не является оптимальным решением, и поддерживаются с большей тщательностью, чем в нагревательных печах прокатного производства.

В [22] разработана система определения продолжительности выдержки металла при отжиге рулонов холоднокатаной ленты в колпаковых печах. В основу работы системы был положен алгоритм (2) [23], экономический эффект за счет экономии электроэнергии на отжиг и увеличения производительности печей составил существенную величину [22].

Известен также положительный практический опыт реализации алгоритма (4) [24, 25]. Однако, к сожалению, в работах [24, 25] ничего нового в теоретическом плане не предложено. Данные работы следует рассматривать как *обновленное техническое оформление* алгоритма контроля (4), теоретическая часть этих

работ представляет собой перефразированное изложение ранее известных результатов.

### Выводы

Рассмотрено решение задачи контроля максимального перепада температуры по се-

чению металла при нагреве его перед прокаткой или при его термообработке. Результаты работы могут быть использованы при разработке и совершенствовании алгоритмического обеспечения АСУ ТП нагревательных и термических печей.

### Литература

1. А.С. № 144866 СССР. Способ определения продолжительности выдержки слитков в нагревательных колодцах / Ю.А. Шакола, В.С. Костокрызов, Э.М. Гольдфарб. – 1962, Бюллетень изобретений № 4.

2. Гольдфарб, Э.М. Теплотехника металлургических процессов / Э.М. Гольдфарб. – М.: Металлургия, 1967. – 440 с.

3. Ревун, М.П. Интенсификация работы нагревательных печей / М.П. Ревун, В.И. Гранковский, А.Н. Байбуз. – Киев: Техника, 1987. – 136 с.

4. Метод контроля степени прогрева слитков по сечению / В.С. Костокрызов, С.Г. Львова, М.В. Мирошниченко, Н.М. Морехина // Промышленные печи / под. ред. В.И. Гладких. – 1979. – С. 53–60.

5. *Überwachung des Durchwärmungsgrades von blocken in Tiefofen mit dem erweiterten Kalman-Filter* / H.-J. Wick, H. Greiff // METEC'84: 2 Int. Walzwerkskongr., Dusseldorf, 22–28 Juni, 1984, Bd. 2. – Dusseldorf, 1984. – F 3/1–F 3/13.

6. A.P.C. computer model for the slab reheating furnace / P.V. Barr, A.W. Burgess // CIM Bull. – 1989. – Vol. 02, no. 926. – P. 116–117.

7. Klima, R. Ein einfaches mathematisches Modell für die Wärmeübertragung und seine Anwendung auf Durchlauf-Warmofen / R. Klima, A. Kuck, D. Sucker // Gas Wärme Int. – 1983. – Vol. 32, no. 4. – P. 138–143.

8. Ревун, М.П. Перспективные направления совершенствования тепловой работы нагревательных и термических камерных печей / М.П. Ревун, В.Ю. Зинченко // Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. Национальной металлургической академии Украины. – Днепропетровск: ПП Грек О.С. – 2006. – С. 294–302.

9. Specht Eckehard. Temperature compensation in heated solids / Specht Eckehard, Alt Rudiger // Steel Res. – 1990. – Vol. 61, no. 11. – P. 569–575.

10. Оптимизация режимов нагрева и термостатирования слябов при горячем посаде в нагревательные печи / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин, С.Е. Сидоренкова, А.А. Кочкин // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2016. – № 3. – С. 7–11.

11. Панферов, В.И. Об алгоритме косвенного контроля и особенностях температурных полей массивных тел в период выдержки при постоянной температуре поверхности / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 4. – С. 93–97.

12. Панферов, В.И. К контролю и анализу температурных полей массивных тел в период выравнивания при нулевом тепловом потоке через поверхность / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 3. – С. 123–126.

13. Панферов, В.И. О некоторых свойствах и об алгоритме косвенного контроля температурных полей массивных тел в период выдержки при постоянной температуре печи / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 6. – С. 114–116.

14. Панферов, В.И. К контролю температурных полей массивных тел в период выдержки при постоянной температуре печи / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1986. – № 7. – С. 157.

15. Панферов, В.И. Алгоритмизация контроля качества нагрева металла в печах / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1989. – № 4. – С. 140–144.

16. Карташов, Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел / Э.М. Карташов. – М.: Высш. шк., 2001. – 550 с.

17. Панферов, В.И. Адаптивные системы контроля качества нагрева металла в печах / В.И. Панферов // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1990. – № 7. – С. 110.



18. Тайц, Н.Ю. *Технология нагрева стали* / Н.Ю. Тайц. – М.: Металлургиздат, 1950. – 450 с.
19. Прядкин, Л.Л. *Автоматизация проходных нагревательных печей прокатного производства* / Л.Л. Прядкин // *Сталь*. – 1986. – № 2. – С. 103–106.
20. *Optimization of reheat furnace operation* / E. Kehlbery // *ABB Rev.* – 1992. – No. 3. – P. 13–18.
21. Парсункин, Б.Н. *Контроль прогрева металла* / Б.Н. Парсункин, В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 1981. – № 10. – С. 127–129.
22. *Разработка автоматизированной системы управления отжигом рулонов холоднокатаной ленты* / В.И. Панферов, И.М. Гельфанд, Г.П. Кулаченков, Е.М. Торчинский // *Ресурсосберегающие и экологически чистые технологии в метизном производстве: сб. науч. тр. ММ СССР*. – М.: Металлургия, 1991. – С. 53–57.
23. Панферов, В.И. *Некоторые проблемы автоматизации колпаковых печей* / В.И. Панферов // *Изв. вузов. Черная металлургия*. – 2002. – № 4. – С. 42–45.
24. *Исследование точности способа контроля температурного состояния нагреваемых непрерывнолитых заготовок перед выдачей* / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.У. Ахметов, А.У. Ахметова // *Электротехнические системы и комплексы*. – 2014. – № 4 (25). – С. 28–30.
25. Андреев, С.М. *Теоретические основы и практическая реализация энергосберегающего оптимального управления нагревом непрерывнолитых заготовок в печах проходного типа: дис. ... д-ра техн. наук* / С.М. Андреев. – Магнитогорск, 2019. – 310 с.

**Панферов Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры информационно-аналитического обеспечения управления в социальных и экономических системах, Южно-Уральский государственный университет; профессор кафедры авиационных комплексов и конструкций летательных аппаратов, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», филиал в г. Челябинске, г. Челябинск; tgsiv@mail.ru.

*Поступила в редакцию 8 июня 2020 г.*

---

DOI: 10.14529/met200407

## ABOUT DESIGN AND INSTRUMENTAL CONTROL OF QUALITY OF HEATING AND HEAT TREATMENT OF METAL IN FURNACES

**V.I. Panferov**<sup>1,2</sup>, tgsiv@mail.ru

<sup>1</sup> South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

<sup>2</sup> Russian Air Force Military Educational and Scientific Center “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin”, Chelyabinsk branch, Chelyabinsk, Russian Federation

**Introduction.** In conditions of increasing requirements for the quality of metal heating before rolling or during its heat treatment, the task of creating and improving the algorithmic support of automated process control systems (ACS TP) of heating and thermal furnaces is quite relevant. **Aim.** The solution to the problem of controlling the temperature drop over the cross section of a metal when it is heated before rolling or during heat treatment is considered. **Materials and methods.** An analysis of the literature on the problem. A generalization of the results of previous work is carried out both for cases of exposure at a constant temperature of the working space, and at a constant surface temperature of the workpiece, as well as for the case of heating massive bodies of arbitrary shape. **Results.** It is shown that the solution to the control problem can be reduced either to measuring the current density of the heat flux inside the metal, or to measuring the temperature difference between the furnace and the surface of the slab. The influence on the structure of control

algorithms of various features of the real aging process is investigated. The solution of the control problem for the case of massive bodies of arbitrary shape is given. Relations for control are obtained, similar to control algorithms for ingots and slabs. A method for tuning control algorithms to a real process according to current measurements in a regular mode is indicated. It has been established that for the case of symmetric or one-sided heating of slabs in methodological furnaces, it is sufficient to measure the temperature of only one of the surfaces for adjustment, while asymmetric heating requires the measurement of the temperatures of both surfaces. For the case of holding cold-rolled strip rolls in bell-type furnaces, it is necessary to measure the temperature at three radially different points of the base of the lower roll using contact thermocouples. After adjustment, for control in any case, it is enough to measure the temperature at only one point on the surface. The influence of errors in measuring the surface temperature of a metal on the accuracy of control algorithms and on the accuracy of estimating the maximum temperature difference over its cross section is studied. The implementation options for control algorithms in an industrial environment are given.

**Conclusion.** The results of the work can be used in the development and improvement of the algorithmic support of automated process control systems for heating and thermal furnaces.

*Keywords:* quality of metal heating and heat treatment, control of temperature drop across the cross section, automated control system, control algorithm settings, permissible error of surface temperature measurement, heat flux density.

### References

1. Shakola Yu.A., Kostogryzov V.S., Goldfarb E.M. *Sposob opredeleniya prodolzhitel'nosti vyderzhki slitkov v nagrevatel'nykh kolodtsakh* [A method for determining the exposure time of ingots in heating wells]. Patent USSR, no. 144866, 1962.
2. Goldfarb E.M. *Teplotekhnika metallurgicheskikh protsessov* [Thermotechnology of metallurgical processes]. Moscow, Metallurgy Publ., 1967. 440 p.
3. Revun M.P., Grankovsky V.I., Baybuz A.N. *Intensifikatsiya raboty nagrevatel'nykh pechey* [Intensification of the operation of heating furnaces]. Kiev, Technique Publ., 1987. 136 p.
4. Kostogryzov V.S., Lviv S.G., Miroshnichenko M.V., Morekhina N.M. [A method for controlling the degree of ingot heating over a section]. *In the book: Gladkikh V.I. Industrial Furnace*, 1979, pp. 53–60. (in Russ.)
5. Wick H.-J., Greiff H. Monitoring of the degree of warming of blocks in deep furnaces with the extended Kalman filter. *METEC'84: 2 Int. Walzwerkkongr., Dusseldorf, June 22–28, 1984, vol. 2*. Dusseldorf, 1984, F 3/1–F 3/13.
6. Barr P.V., Burgess A.W. A.P.C. computer model for the slab reheating furnace. *CIM Bull.*, 1989, 02, no. 926, pp. 116–117.
7. Klima R., Kuck A., Sucker D. Ein einfaches mathematisches Modell für die Wärmeübertragung und seine Anwendung auf Durchlauf-Warmofen. *Gas Wärme Int.*, 1983, vol. 32, no. 4, pp. 138–143.
8. Revun M.P., Zinchenko V.Yu. [Promising directions for improving the thermal work of heating and thermal chamber furnaces]. *Metallurgicheskaya teplotekhnika: sb. nauch. trudov Natsional'noy metallurgicheskoy akademii Ukrainy* [Metallurgical heat engineering: Collection Scientific Proceedings of the National Metallurgical Academy of Ukraine]. Dnepropetrovsk, “PP Grek OS.” Publ., 2006, pp. 294–302. (in Russ.)
9. Specht Eckehard, Alt Rudiger. Temperature compensation in heated solids. *Steel Res.*, 1990, vol. 61, no. 11, pp. 569–575.
10. Lukin S.V., Kibardin A.N., Sidorenkova S.E., Kochkin A.A. [Optimization of heating and temperature control of slabs during hot planting in heating furnaces]. *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Cherepovets State University], 2016, no. 3, pp. 7–11. (in Russ.)
11. Panferov V.I. [About the indirect control algorithm and the features of the temperature fields of massive bodies during exposure at a constant surface temperature]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1985, no. 4, pp. 93–97. (in Russ.)
12. Panferov V.I. [To control and analysis of temperature fields of massive bodies during the leveling period at zero heat flux through the surface]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1986, no. 3, pp. 123–126. (in Russ.)

13. Panferov V.I. [About some properties and about the algorithm of indirect control of temperature fields of massive bodies during the exposure period at a constant furnace temperature]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1985, no. 6, pp. 114–116. (in Russ.)

14. Panferov V.I. [To control the temperature fields of massive bodies during the exposure period at a constant furnace temperature]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1986, no. 7, p. 157. (in Russ.)

15. Panferov V.I. [Algorithmization of quality control of metal heating in furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1989, no. 4, pp. 140–144. (in Russ.)

16. Kartashov Je.M. *Analiticheskie metody v teorii teploprovodnosti tverdyh tel* [Analytical methods in the theory of the thermal conductivity of solids]. Moscow, High School Publ., 2001. 550 p.

17. Panferov V.I. [Adaptive quality control systems for metal heating in furnaces]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 1990, no. 7, p. 110. (in Russ.)

18. Thayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1950. 450 p.

19. Pryadkin L.L. [Automation of continuous heating furnaces of rolling production]. *Stal'* [Steel], 1986, no. 2, pp. 103–106. (in Russ.)

20. Kehlbery E. Optimization of reheat furnace operation. *ABB Rev.*, 1992, no. 3, pp. 13–18.

21. Parsunkin B.N., Panferov V.I. [Control of metal heating]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija*, 1981, no. 10, pp. 127–129. (in Russ.)

22. Panferov V.I., Gelfand I.M., Kulachenkov G.P., Torchinsky E.M. [Development of an automated control system for annealing rolls of cold rolled tape]. *Resursosberegayushchiye i ekologicheski chistyye tekhnologii v metiznom proizvodstve: sb. nauch. tr. MM SSSR*. [Resource-saving and environmentally friendly technologies in hardware production: Sat. scientific Proceedings of the MM of the USSR]. Moscow, Metallurgy Publ., 1991, pp. 53–57. (in Russ.)

23. Panferov V.I. [Some problems of automation of hoods]. *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija* [The News of High Schools. Ferrous Metallurgy], 2002, no. 4, pp. 42–45. (in Russ.)

24. Parsunkin B.N., Andreev S.M., Akhmetov T.U., Akhmetova A.U. [Investigation of the accuracy of the method for monitoring the temperature state of heated continuously cast billets before issuing]. *Elektrotekhnicheskiye sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2014, no. 4 (25), pp. 28 – 30. (in Russ.)

25. Andreev S.M. *Teoreticheskiye osnovy i prakticheskaya realizatsiya energosberegayushchego optimal'nogo upravleniya nagrevom nepreryvnolitykh zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa: dis. d-ra tekhn. nauk* [Theoretical foundations and practical implementation of energy-saving optimal control of heating continuously cast billets in continuous furnaces. Doct. sci. diss.]. Magnitogorsk, 2019. 310 p.

*Received 8 June 2020*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Панферов, В.И. О расчетно-инструментальном контроле качества нагрева и термообработки металла в печах / В.И. Панферов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 56–66. DOI: 10.14529/met200407

### FOR CITATION

Panferov V.I. About Design and Instrumental Control of Quality of Heating and Heat Treatment of Metal in Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2020, vol. 20, no. 4, pp. 56–66. (in Russ.) DOI: 10.14529/met200407