

МОДЕЛИ НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ В ПЕЧАХ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМЕНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АВТОМАТИЗАЦИИ

**В.М. Белолипецкий (Институт вычислительного моделирования СО РАН),
Т.В. Пискажова, А.А. Портянкин (Сибирский федеральный университет),
Г.В. Зинченко (ООО «НТА»)**

Предложена модель нагрева материалов в печи скоростного конвективного нагрева, основанная на обыкновенных дифференциальных уравнениях, позволяющая при работе в составе АСУТП рассчитывать скорости и режимы нагревов, оценивать равномерности нагревов слитков для предоставления этих данных оператору или для автоматического принятия решения об изменении подводимой мощности или изменении времени нагрева. Отличительной особенностью этой модели является возможность использования ее в контроллере в отличие от известных ранее распределенных моделей. Выполнены расчеты нагрева материалов по новой модели, предложен способ управления на основе модели.

Ключевые слова: конвективный нагрев, моделирование нагрева материалов, АСУТП печей.

Введение

Как известно, термическая обработка слитков или литых деталей дает возможность улучшения их механических свойств или даже коррозионной стойкости. Существует несколько видов термической обработки, например: отжиг, стабилизирующий отпуск, гомогенизация, упрочнение старением [1].

Отжиг слитков проводят для устранения или уменьшения дендритной ликвации компонентов, снятия остаточных напряжений, возникающих в процессе литья, и формирования структуры, обеспечивающей наилучшие технологические свойства. Отжиг проводят при температуре 350... 430 °С в течение 2 ч.

Режимы гомогенизации плоских слитков должны обеспечивать достаточную технологическую пластичность при прокатке и необходимый уровень свойств. Гомогенизацию слитков основных алюминиевых сплавов проводят при температуре 480...630 °С продолжительностью 6...36 ч.

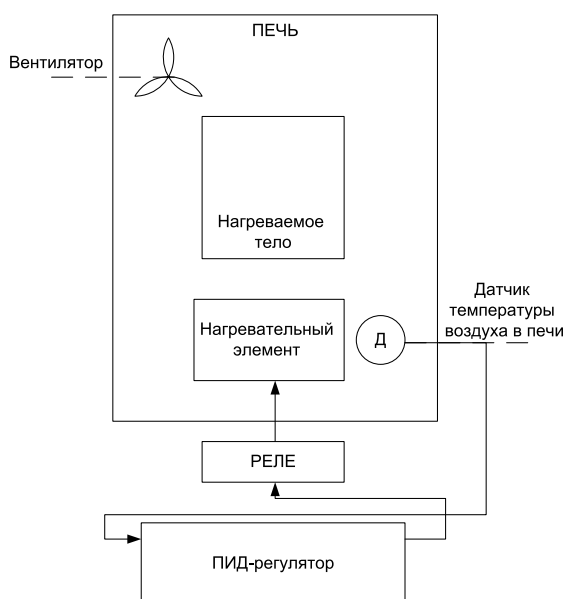


Рис. 1. Структурная схема автоматического управления электрической конвективной печью для гомогенизации алюминиевых слэбов

Широко используемым является конвективный нагрев материала в печах, осуществляемый за счет горячего воздуха, перемещаемого вентиляторами в электрической печи или газозооной смеси, выделяющейся при горении топлива [2].

Электрические печи сопротивления обычно используют для термической обработки изделий, которые должны изменять свою температуру в соответствии с заданным режимом обработки. На рис. 1 представлена простая структурная схема управления, используемая в большинстве эксплуатируемых на металлургических предприятиях печах. Эта схема не всегда может обеспечить качество нагрева материалов.

От условий нагрева зависит качество, количество и себестоимость готовой продукции.

С одной стороны, нагревать нужно быстро, так как с уменьшением времени нагрева повышается производительность печи и снижается угар металла, но с другой стороны необходимо избегать перегрева поверхностей, разрушения металла под действием температурных напряжений, оплавления поверхности.

Также важным показателем является равномерность нагрева — разность значений температуры поверхности и центра металла при выдаче из печи. В зависимости от вида дальнейшей обработки заготовок предъявляются определенные требования к этому показателю. Выравнивание температуры требует изменения режимов нагрева, используется естественное выравнивание после выхода из печи. В практических условиях температуру внутри металла измеряют лишь в порядке эксперимента и время нагрева заготовок с требуемой равномерностью подбирают опытным путем.

Основным направленно изменяемым параметром при управлении нагревом металла является температура рабочего пространства печи. Задачей локальной системы является обеспечение заданной температуры рабочего пространства в зоне отопления путем соответствующего изменения ее тепловой нагрузки.

На самом же деле, важнейшим параметром, характеризующим режим нагрева, является температура металла. Существенной является не только температура поверхности заготовки, но и ее распределение по толщине. Однако непрерывный замер этого распределе-

ния для всех нагреваемых заготовок в процессе нормальной эксплуатации печи невозможен. Еще более сложная задача возникает при переходе от систем регулирования температуры печного пространства к системе регулирования непосредственно температуры металла в процессе его нагрева. Автор работы [3] предложил распределенные измерения в зонах печи температуры среды и поверхности металла. Непрерывное определение распределения значений температуры по толщине заготовки может быть выполнено только расчетами с периодическим уточнением получаемых результатов путем измерения действительных значений температуры на поверхности и внутри контрольной заготовки с помощью специальных термопар.

Авторы работы [4] используют нейросети для предсказания температуры нагрева плиты в печи Roller Hearth Normalizing. В работе [5] описаны возможности применения искусственных нейронных сетей (ANN), которые могут быть использованы в будущем для прогнозирования оптимальной температуры термообработки стали без сложных металлургических и математических моделей, описывающих эволюцию микроструктуры во время закалки и отпуска.

В [6] представлена новая система управления Level-2-Computer, разработанная для тепловой печи в линии термообработки листовой стали, которая включает в себя систему контроля Level-2, сетевую структуру для Level-2, разработанное программное обеспечение и некоторые расчетные формулы математической модели тепловой печи, а также блок-схему основной программы для математической модели. Экспериментальные данные показывают, что предложенная система повышает не только эффективность работы печи, но и сокращает потребляемую объектом энергию.

В статье [7] осуществляется расчет температуры прогрева плиты на основании одномерного уравнения теплопроводности и измеренной температуры воздуха в печи.

В работе [8] предлагается решение для температурного моделирования и управления в туннельной печи термической обработки, используемой в металлургии. Математическая модель нагрева является системой обыкновенных дифференциальных уравнений и решается аналитически. На основании полученной математической модели простой ПИД-регулятор настраивается с использованием теории нелинейных систем. Для получения ограничительных контрольных характеристик, наложенных процедурой термообработки, ПИД-регулятор модифицируется с использованием теории систем дробного порядка. Результаты моделирования системы температурного контроля представлены сравнением расчетов с использованием контроллера целочисленного порядка и контроллера дробного порядка.

Математические модели для расчета нагрева материалов в конвективных печах

Расчет работы печи и нагрева материалов может состоять из нескольких блоков:

- расчет изменения температуры греющей среды в зависимости от изменения мощности в печи;
- расчет самого изменения мощности, расчет теплопотерь футеровкой печи;
- расчет нагрева материалов;
- выделение или поглощение тепла при сопутствующих реакциях или испарении влаги.

В целом теплообмен нагреваемых материалов с воздухом печи, а также стенок печи с внутренней и внешней средой может быть при некоторых допущениях записан следующей системой обыкновенных дифференциальных уравнений, приводимой, например, в работе [8]:

$$m_a c_a \frac{dT_a}{dt} = Q - k_a(T_a - T_w) - k_{a-m}(T_a - T_m), \quad (1)$$

$$m_m c_m \frac{dT_m}{dt} = k_{a-m}(T_a - T_m), \quad (2)$$

$$m_w c_w \frac{dT_w}{dt} = k_{a-w}(T_a - T_w) - k_{w-e}(T_w - T_e), \quad (3)$$

где T_a — средняя температура воздуха в печи, Q — приход тепла от электронагревателей или сгорания топлива, T_w — средняя температура стенок печи, T_m — средняя температура материала в садке, T_e — температура воздуха в цехе, m_i, c_i — массы и теплоемкости указанных сред, k_{i-j} — коэффициенты теплопередачи, включающие в себя коэффициенты теплообмена «поверхность-воздух» и теплопроводности твердых слоев.

С помощью этой системы мы можем определить среднюю скорость нагрева всей садки, скорость изменения температуры воздуха при изменении мощности нагревателей, суммарные теплопотери печью в окружающую среду. Но как уже было отмечено выше, актуальным является вопрос определения скорости и температуры прогрева садки внутрь и прогрева отдельных элементов садки по толщине.

Этот вопрос может быть решен с помощью одно- или двухмерного нестационарного уравнения теплопроводности. В настоящее время в системах управления становится возможным использовать и многомерные модели, соединив их с алгоритмами управления и сосредоточенными моделями, например, на платформе SimInTech (<http://simintech.ru>). Но получение простых аналитических решений, легких в отладке и удобных для занесения в контроллер при использовании локальных АСУТП нижнего уровня по-прежнему актуально.

В работе [9] приводится модель конвективного нагрева сляба, основанная на одномерном нестационарном уравнении теплопроводности и граничных условиях 1 и 3 рода. Модель имеет численное и аналитическое решения и принимается за эталонную для проверки предлагаемой модели. В металлургической теплотехнике для определения температуры поверхностей и центра нагреваемых тел пользуются наборами специальных графиков для безразмерных значений температуры в зависимости от критериев Био

и числа F_0 . Следует отметить, что для алгоритмов автоматического управления нагревом набор графиков или аналитические решения не подходят не только в связи с громоздкостью, но также и в связи с возможным изменением режимов нагрева.

В статье [10] была представлена модель нагрева материалов на основе обыкновенных дифференциальных уравнений, учитывающая теплопроводность нагреваемого материала и позволяющая оценивать разницу температуры поверхности и середины сляба. В металлургической практике это называется «равномерностью нагрева». В настоящей статье мы хотели бы уделить больше внимания способу управления на основе этой новой модели.

Рассматриваем (как в работе [9]) половину сляба, считая, что он нагревается симметрично. Сляб по сечению (половина сечения) разбит на две зоны: основная (толстый слой) и пограничная (тонкий слой) (рис. 2).

Уравнения (4) — (5) определяют средние значения температуры в областях $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$ и $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$ и среднюю температуру всего тела:

$$\begin{cases} (\delta - \varepsilon) \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_1}{dt} = k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1) \\ \varepsilon \cdot c \cdot \rho \cdot \frac{d\bar{T}_2}{dt} = \alpha \cdot (T_0 - \bar{T}_2) - k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2 - \bar{T}_1); \end{cases} \quad (4)$$

$$\bar{T}_{cp} = \frac{(\delta - \varepsilon) \cdot \bar{T}_1 + \varepsilon \cdot \bar{T}_2}{\delta} \quad (5)$$

$$\bar{T}_1(0) = \bar{T}_1^0, \bar{T}_2(0) = \bar{T}_2^0,$$

где \bar{T}_1 — средняя температура сляба на участке $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$, \bar{T}_2 — средняя температура сляба на участке $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$, T_{cp} — средняя температура сляба на участке $0 \leq y \leq \delta$, $k_{1-2} = 2 \cdot \lambda / \delta$ — коэффициент теплопередачи, λ — теплопроводность тела.

Аналитическое решение получено путем сведения уравнений (4) к неоднородному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\frac{d^2 \bar{T}_1}{dt^2} + b_1 \frac{d\bar{T}_1}{dt} + b_2 \bar{T}_1 = b_2 T_0, \quad (6)$$

где $b_1 = \frac{\alpha}{a_2} + k_{1-2} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$, $b_2 = \frac{\alpha \cdot k_{1-2}}{a_1 \cdot a_2}$, $a_1 = (\delta - \varepsilon) \cdot c \cdot \rho$, $a_2 = \varepsilon \cdot c \cdot \rho$, c — теплоемкость тела, δ — толщина тела, ρ — плотность тела, ε — толщина тонкого слоя, α — коэффициент теплоотдачи.



Рис. 2. Схематичный рисунок сляба, разбитого на участки $0 \leq y \leq \delta - \varepsilon$ (толстый слой) и $\delta - \varepsilon \leq y \leq \delta$ (тонкий слой)

Решение запишется в виде:

$$\begin{cases} \bar{T}_1 = A \cdot e^{\lambda_1 t} + B \cdot e^{\lambda_2 t} + T_0 \\ \bar{T}_2 = \bar{T}_1 + \frac{a_1}{k_{1-2}} \cdot (\lambda_1 \cdot A \cdot e^{\lambda_1 t} + \lambda_2 \cdot B \cdot e^{\lambda_2 t}), \end{cases} \quad (7)$$

где $\lambda_{1-2} = \frac{b_1 \pm \sqrt{b_1^2 + 4b_2}}{2}$, $A = \frac{k_{1-2} \cdot (\bar{T}_2^0 - \bar{T}_1^0) - \lambda_2 \cdot (T_0 + \bar{T}_1^0)}{\lambda_1 - \lambda_2}$, $B = \bar{T}_1^0 - T_0 - A$, T_0 — начальная температура тела.

Таблица 1. Исходные данные для сравнительного расчета нагрева сляба

Переменная	ср	α	$\delta_{\text{сляба}}$	ε	$\delta_{\text{т.с.}}$	k_{1-2}
Значение переменной	4375000	350	0,064	0,016	0,08	700
Единицы измерения	Дж·кг/(К·м³)	Вт/(м²·К)	м	м	м	Вт/(м²·К)
Переменная	t	dt	T_0	λ	a	$T_{\text{нач}}$
Значение переменной	4800	16	2000	28	0,0000064	1100
Единицы измерения	с	с	К	Вт/(м·К)	м²/с	К

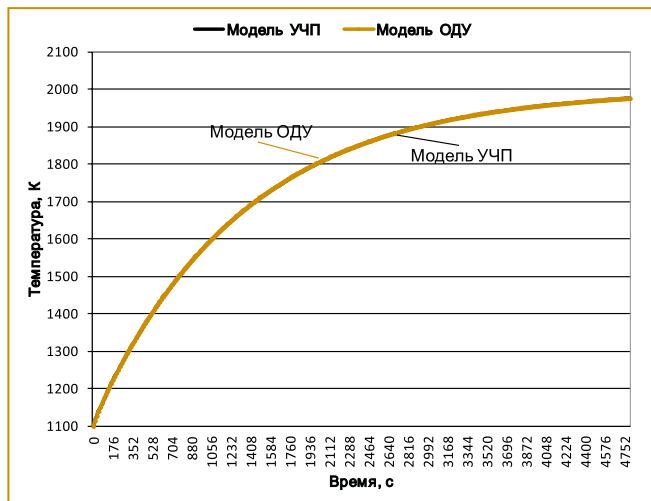
Аналитическое решение удобно для быстрого анализа зависимостей необходимых времен нагрева от свойств материала, а также для использования непосредственно в управляющем контроллере одноуровневого АСУТП.

Расчеты по эталонной модели, содержащей уравнения в частных производных (УЧП), проводились по явной четырехточечной схеме. По разработанным компьютерным программам проведена серия расчетов и выполнен сравнительный анализ полученных результатов. Моделируется ситуация, когда тело помещают в горячую печь. Исходные данные для тестового расчета приведены в табл. 1.

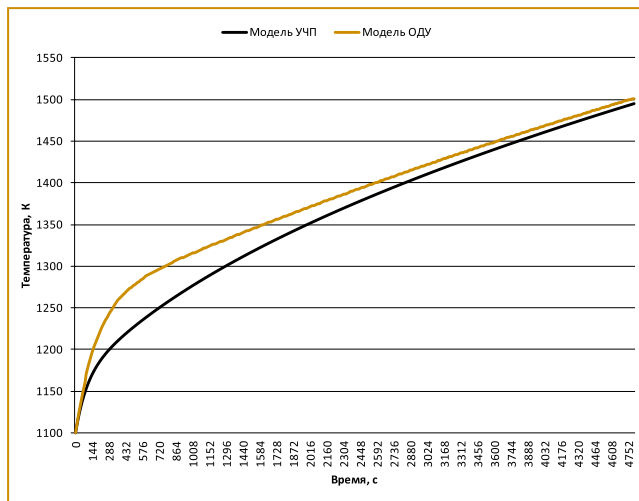
На рис. 3 приведены расчеты средней температуры сляба отмеченными выше способами при исходных данных из табл. 1. Введены обозначения: модель УЧП — эталонная модель, модель ОДУ — авторская модель.

Как видно из рис. 3а, решения практически совпадают, имеют отличия ≤ 3 °С. На 480 секунде с начала нагрева средняя температура сляба по эталонной модели составляет 1380,3 °С, по предложенной модели — 1382,2 °С, при $\varepsilon = 0,016$.

На рис. 3б наблюдается разница в расчетах эталонной моделью и предложенной при низкой теплопроводности нагреваемого материала ($\lambda=1$). На 480 секунде нагрева эталонная модель дает температуру 1224,9 °С, а предложенная модель — температуру 1274,8 °С. В этом случае за расчетное время 4800 с нагрев еще не вышел на стационарный режим, но уже наблюдается схождение расчетов по двум моделям. Тело разогревается до максимальной температуры, нагрев выходит на стационарный режим после 50 тыс. с с начала нагрева.



а



б

Рис. 3. Результаты сравнительных расчетов средней температуры сляба (а – при высокой теплопроводности материала, б – при низкой теплопроводности материала)

Следует отметить, что теплопроводности металлов не бывают ниже значения 15 Вт/(м·К). Случай с низкой теплопроводностью рассмотрен для выяснения границ применения модели. Более подробно сравнительный анализ моделей при различных теплопроводностях и с различными толщинами слоев представлен в [10]. Проведенный «спор моделей» позволил сделать вывод о том, что авторская модель ОДУ применима к объектам, обладающим достаточно высокой теплопроводностью, каковыми являются все металлы. При практическом использовании модели в алгоритмах осуществляется дополнительная «подстройка» за счет коэффициентов теплообмена.

Модельные расчеты для системы управления

На производстве скорости нагрева и охлаждения газовоздушной среды в печи чаще всего определяются экспериментально и обусловлены конструкцией печи и мощностью нагревателей. Можно их также определить из системы (1) – (3).

Авторами проведены численные эксперименты для разработки алгоритма управления. При реализации расчетов был запрограммирован экспериментальный закон изменения температуры воздуха в печи, (показан на верхних графиках рис. 4), заключающийся в том, что для разных диапазонов температуры в печи скорости нагрева и охлаждения среды различны. В качестве нагреваемых материалов рас-

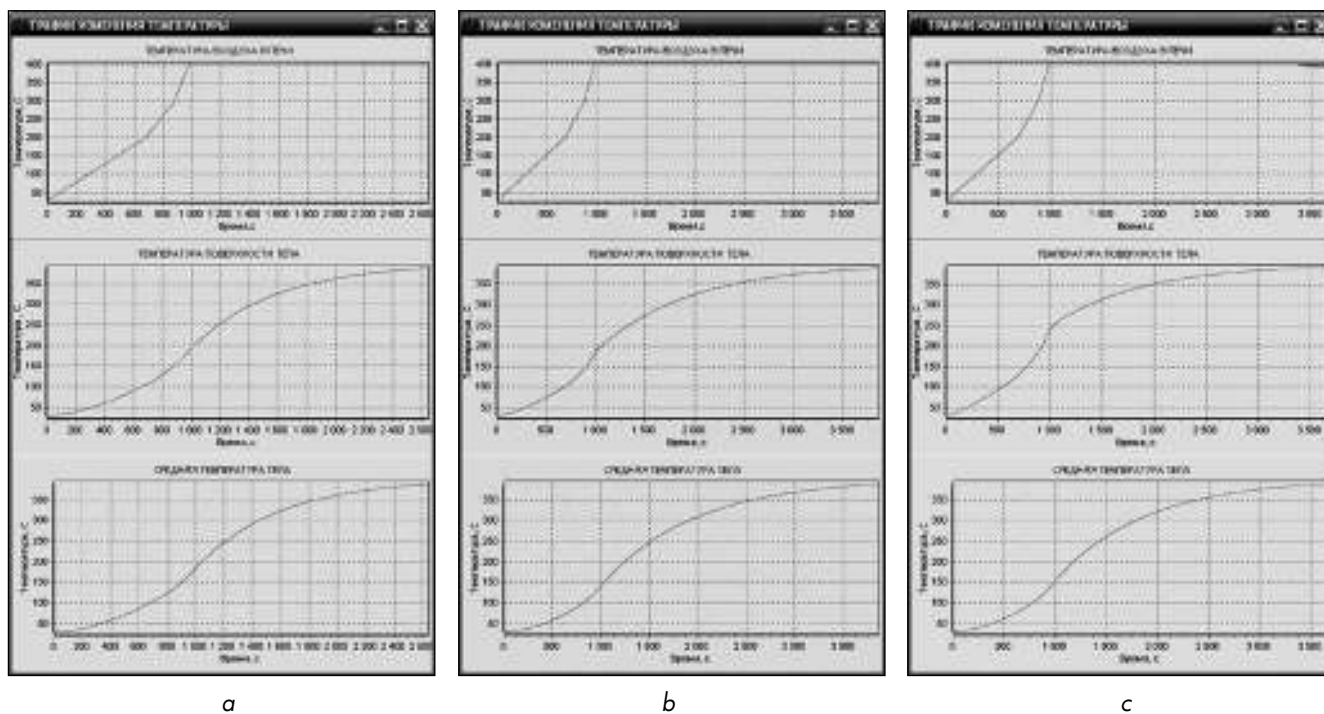


Рис. 4. Расчеты изменения температур в разных точках объекта (а – алюминиевый сляб, б – стальной сляб, с – титановый сляб)



Рис. 5. Алгоритм управления нагревом материалов в печи

Таблица 2. Данные для расчета нагрева алюминиевого сляба

Название	Значение
Толщина тела м	0,16
Толщина тонкого тела м	0,013
Плотность кг/м ³	2712
Теплоемкость Дж/(кг·К)	904
Температуропроводность м ² /с	9,38 · 10 ⁻⁵
Коэффициент теплопроводности Вт/(м·К)	230
Коэффициент теплоотдачи Вт/(м ² ·К)	350
Начальная температура тела, °С	30
Начальная температура среды, °С	30
Заданная температура поверхности тела, T _{з.п.} , °С	389
Заданная температура центра тела, T _{з.ц.} , °С	387

смагивались алюминиевый, стальной и титановый слябы. В табл. 2 приведены данные для алюминиевого сляба, для других материалов в расчете отличались теплоемкость, теплопроводность и плотность.

При исходных данных из табл. 2 проведен расчет переменных процесса гомогенизации алюминиевых пластин в конвективной печи. Графики переходных процессов изменения температуры в печи, поверхности сляба и средней температуры толстого слоя представлены на рис. 4.

Как видно из рисунков, температура воздуха в печи менялась программно с заданными скоростями

до момента достижения рабочей температуры. Параллельно нагреву печи происходил нагрев поверхности и центра тела. Существенные различия между переходными процессами вызваны теплофизическими характеристиками материалов. Так, например, у алюминиевого сляба за счет высокой теплопроводности и теплоемкости, низкой плотности алюминия перепад температуры между поверхностью и центром тела не превышал 3 °С. А при нагреве титанового сляба, переходные процессы которого показаны на рис. 4 с, максимальный перепад температуры составлял около 50 °С и постепенно снижался до 5 °С. Это можно объяснить низкой теплопроводностью и теплоемкостью титана, но его более высокой плотностью относительно алюминия. Также видно, что при заданных значениях температуры процесс перерегулирования происходит только при нагреве титанового сляба.

Время нагрева до заданных значений температуры составило около 45 мин для алюминиевого сляба и около 1 ч для титанового. Далее температуру печи устанавливают, согласно регламенту, на несколько градусов ниже заданной температуры поверхности и выдерживают несколько часов до достижения необходимых значений температуры по всей толщине сляба.

Алгоритм управления заключается в переопределении искомым значений температуры на каждом временном шаге при подаче воздействий. При достижении поверхностью тела заданного значения температуры (T_{з.п.}) автоматически происходит запуск цикла управления нагревателями, основанный на экспериментальном законе, который прерывается, когда расчетная температура середины тела (T_{з.ц.}) достигнет заданного значения, обусловленного показателями качества для готового продукта.

Предлагаемый алгоритм управления, представленный на рис. 5, позволяет регулировать температуру воздуха в печи исходя из заданных значений поверхности и середины сляба.

Можно предложить модернизацию АСУТП действующей печи без затрат на установку распределенной системы измерений. Предлагаемая схема управления (рис. 6) включает ПК с предустановленным алгоритмом управления, содержащим модель, которая позволяет определять температуру на поверхности сляба и в его центре, что в свою очередь значительно повышает качество продукции. Контроллер может служить просто для передачи сигнала от датчика в компьютер и от компьютера на реле нагревателя, но может и заменить собой компьютер при наличии в нем возможностей для программирования сложных алгоритмов и подключения панелей визуализации процесса.

Следует отметить, что программа позволяет рассчитывать температуру тела и регулировать температуру воздуха в различных точках объекта, показанного на рис. 7. Это обусловлено тем, что модель опирается на показания датчика температуры воздуха в печи. Как следствие, при наличии нескольких нагревателей и датчиков алгоритм может параллельно рассчитывать

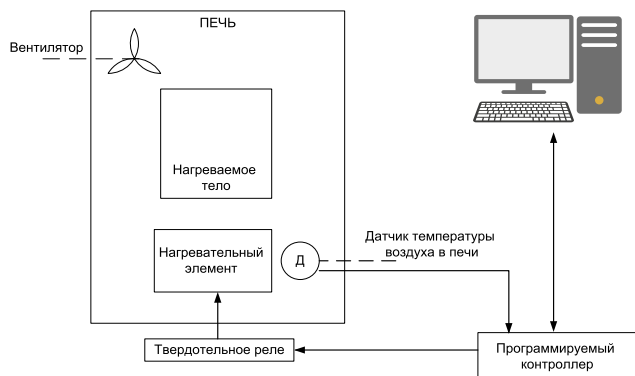


Рис. 6. Предлагаемая модернизированная структурная схема автоматического управления электрической конвективной печью для гомогенизации алюминиевых слэбов

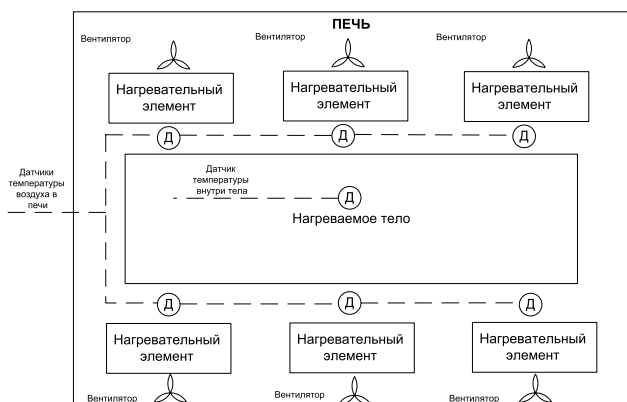


Рис. 7. Многоканальное регулирование

прогрев тела в разных точках и управлять температурой каждой зоны отдельно. Эта возможность позволяет рассчитывать поле распределения температуры нагреваемых материалов по всему объему садки и экономить на нагреве. Например, при открытии дверцы, когда температура воздуха в печи резко падает в ближайших к дверце зонах, мощность нагревателей будет распределяться неравномерно: так, нагреватели у дверцы поднимут мощность, а нагреватели у противоположной стенки оставят подаваемую мощность без изменений.

Заключение

Предложена модель нагрева материалов в печи скоростного конвективного нагрева, построенная на обыкновенных дифференциальных уравнениях и позволяющая при работе в составе АСУТП рассчитывать скорости и режимы нагревов, оценивать равномерности нагревов слитков для предоставления этих данных оператору или для автоматического

изменения подводимой мощности или, изменения времени нагрева. Предложен алгоритм управления на основе модели в АСУТП печи взамен традиционного ПИД-регулирования. В настоящий момент описанный алгоритм не имеет внедрения. Этой статьей авторы хотели бы развить управление на основе моделей динамического теплообмена, не принятых пока еще в автоматизации и АСУТП, и привлечь внимание коллег к этому перспективному направлению.

Практическая проверка подхода осуществлялась на основе «спора» моделей. Качественное совпадение в расчетах имеется. Уточнение моделей за счет коэффициентов теплообмена должно производиться уже при внедрении, сравнением с измерениями на реальном объекте.

Список литературы

1. Кривандин В.А., Марков Б.Л. *Металлургические печи*. Изд. 2-е доп. и перераб. М.: *Металлургия*, 1977. 464 с.
2. *Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М.* Исследование конвективного теплообмена в проходной печи, оснащенной скоростными горелками // *Цветные металлы*. 2011. № 12. С. 89-93.
3. *Мокрушин С.А.* АСУ температурного режима электрических печей сопротивления // *Группа компаний Альфа-Пром [Электронный ресурс]*. http://alfa-prom.ru/art_3_aut_asu_tr_oven.html.
4. *Li Jing, Wang Jing, Hao Chunhui et al.*, Research and application of process control system for roller hearth normalizing furnace // *Metallurgical Industry Automation*, V. 33, № 2, pp. 16-23, 2009.
5. *Lahoucine-Abaih, L., Van Bennekom, A., Fathi, M.* Development of an ANN for the prediction of heat treatment temperatures for martensitic stainless steels, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics* 4374581, pp. 100-105, 2007.
6. *Li, H., Gong, X., Wang, J., Huang, Q.* Research on level-2-computer control system for heat-furnace in plate heat treatment line. *International Technology and Innovation Conference 2009 (ITIC 2009)*.
7. *Zhang, K., Shao, C.* Advanced control techniques for reheating furnace and their development in iron and steel industry [J] // *Metallurgical Industry Automation*. № 1, pp. 13-14. 2003.
8. *V. Muresan, M. Abrudean.* Temperature Modelling and Simulation in the Furnace with Rotary Hearth. *Proc. of 2010 IEEE AQTR 2010-17th edition*, pp. 147-152, May 28-30, 2010.
9. *Арутюнов В. А., Бухмиров В. В., Крупенникова С. А.* Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: *Металлургия*. 1990. 239 с.
10. *Белолипецкий В.М., Пискажова Т.В., Портянкин А.А.* Модель скоростного конвективного нагрева металла для использования в алгоритмах АСУТП // *Вестник СибГАУ им. ак/ М.Ф. Решетнева*. 2016. Т.17, № 3. С. 554-561.

Авторы выражают благодарность Тиньковой Светлане Михайловне за консультации по металлургической теплотехнике.

Белолипецкий Виктор Михайлович – д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник, Институт вычислительного моделирования СО РАН,

Пискажова Татьяна Валериевна – д-р техн. наук, зав. кафедрой автоматизации производственных процессов в металлургии; Портянкин Артем Александрович – аспирант Института цветных металлов и

материаловедения, Сибирского федерального университета,

Зинченко Григорий Валерьевич – ведущий программист ООО «НТА».

Контактный телефон

E-mail: belolip@icm.krasn.ru. E-mail: piskazhova@ya.ru