

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

ПРИАЗОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

СИМКИН Александр Исаакович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТОВ И ТЕХНОЛОГИИ  
НАГРЕВА МЕТАЛЛА В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Специальность 05.16.02 - "Металлургия черных металлов"

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Мариуполь 1994

AB 29.223



00801470 (K)

Работа выполнена в Приазовском Государственном Техническом Университете.

- |                       |   |
|-----------------------|---|
| Научный руководитель  | - доктор технических наук,<br>профессор Капустин Е. А.  |
| Официальные оппоненты | - доктор технических наук,<br>профессор Ревун М. П.<br><br>- кандидат технических наук<br>Федюкин А. А. |
| Ведущее предприятие   | - Metallургический комбинат<br>"Азовсталь" ( г. Мариуполь )   |

Защита диссертации состоится "30" марта 1994 г.  
в 14-30 часов на заседании специализированного совета  
( Шифр К 068.03.01 ) при Приазовском Государственном Техническом  
Университете по адресу : 341000, г. Мариуполь Донецкой об-  
ласти, пер. Республики, д. 7 , корпус 5, ауд. 5-220.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Приазовского  
Государственного Технического Университета.

Автореферат разослан "\_\_\_" \_\_\_\_\_ 1994 г.

Ученый секретарь  
специализированного совета

### Актуальность работы.

Функционирование промышленности в условиях перехода к рыночной экономике требует повышения качества готовой продукции и улучшения технико-экономических показателей работы цехов металлургических предприятий. Особенно эти задачи актуальны для прокатного производства, работающего с неполной загрузкой в связи с дефицитом стальной заготовки и высокой ценой готовой продукции.

На листопрокатных и сортопрокатных станах нагрев металла перед прокаткой осуществляется в основном в методических печах двухстороннего нагрева толкательного типа и с валяющими балками, причем последние достигли большой единичной мощности, усложнились по конструкции и эксплуатации.

Наличие водоохлаждаемой опорной системы, с помощью которой транспортируют слябы внутри печей, приводит к повышенному расходу топлива и неравномерности нагрева по длине слябов. В этих условиях даже незначительные отклонения от заданного температурного режима приводят к ухудшению показателей качества готовой продукции.

Нагреваемые перед прокаткой стали разнообразны по маркам, механическим и теплофизическим свойствам, что определяет различные ограничения скорости их нагрева. Кроме того, при смене толщины нагреваемых заготовок и частых изменениях темпа работы прокатного стана тепловой режим работы методической печи должен изменяться.

Точное выполнение вышеуказанных задач невозможно без функционирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП), работающих в реальном масштабе времени.

Чтобы гарантировать стабильность управляемых параметров качества (среднемассовую температуру на выходе из печей, перепад температур центра и поверхности), необходимо иметь адекватную математическую модель, устанавливающую взаимосвязь между самими параметрами и влияющими на них факторами, в соответствии с которыми необходимо изменять режимы работы печи: темп выдачи, температуры зон, расходы топлива и воздуха, давление в печи.

др.).

В настоящее время практически не используются преимущества метода обратных задач, предполагающего воссоздание температурного режима печи во время нагрева сляба и сравнение полученных данных с опытными. Не исчерпаны возможности моделирования и оценки лучистого теплообмена в нижних зонах печей и влияние на него конструкций механизированного пода.

Все изложенное выше характеризует актуальность рассматриваемых в диссертационной работе вопросов.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ : дать теоретическое обоснование и получить экспериментальное подтверждение закономерностей распределения тепловых потоков в методических печах с шагающими балками и совершенствование на этой основе технологии нагрева металла, повышение эффективности работы систем управления печами, в том числе в условиях неполной загрузки стана.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы состоит в следующем :

1. Разработана геометрическая модель передачи теплового излучения в нижних зонах методической печи с шагающими балками с определением угловых коэффициентов излучения, учитывающее экранирующее влияние опорной системы.

2. Разработан инженерный численный метод решения обратной задачи теплопроводности и определены расчетным путем приведенные коэффициенты теплоотдачи, а также значения эффективной лучистой температуры по длине печи, в результате чего уточнены режимные параметры работы печи.

3. Разработан и внедрен метод и алгоритм адаптации модели нагрева, действующей в рамках АСУТП, по результатам обработки экспериментальных данных на математической модели.

Практическая и теоретическая значимость работы. Применение разработанной универсальной математической модели нагрева позволяет выполнить анализ теплофизических параметров технологического процесса в методических печах, идентифицировать внешний теплообмен, а также предсказывать влияние режимных и конструктивных изменений на тепловую работу печи.

В рамках модели предложен инженерный метод решения обратной задачи теплопроводности, отличающийся наглядностью, простотой и

легко реализуемый на современных ЭВМ, в т.ч. персональных.

Применение геометрической модели передачи теплового излучения позволяет выполнить анализ неравномерности нагрева по длине слябов для того, чтобы конструктивно или другими способами препятствовать образованию "темных пятен" на нижней поверхности сляба.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований нагрева слябов позволили скорректировать алгоритмическое и программное обеспечение АСУТП нагрева слябов.

На основании моделирования рассчитан и внедрен температурный режим работы печей в случаях длительных отащювок и в связи с работой цеха в условиях дефицита стальной заготовки.

Практические и теоретические результаты диссертации могут быть использованы научно-исследовательскими и проектными организациями, теплотехническими службами металлургических предприятий, занимающимися вопросами эксплуатации и проектирования как самих нагревательных печей прокатного производства, так и системами управления этими агрегатами.

Результаты диссертационной работы использованы Мариупольским металлургическим комбинатом им. Ильича на печах с шагающими балками листопркатного цеха со станом "ЗСОС" для усовершенствования и уточнения температурно-тепловых режимов и адаптации АСУТП.

Внедрение работы обеспечило снижение расхода природного газа на 4 % в расчете на 1 т готового листа.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на отраслевом научно-техническом семинаре "Опыт работы служб автоматизации предприятий по созданию и внедрению средств и систем автоматизации ..." (Москва, 1988), семинаре "Опыт разработки, внедрения и эксплуатации АСУ на толстолистовых и непрерывных станах" (Киев, 1992), научно-технической конференции СНГ "Проектирование и эксплуатация нагревательных печей прокатного производства" (Запорожье, 1992).

#### Публикации.

Основное содержание и результаты диссертационной работы от-

режены в 4 работах.

#### Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения, библиографического списка и приложений.

Объем работы : 121 стр. машинописного текста, 24 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 155 наименований, приложений.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

#### Состояние вопроса и задачи исследования.

Анализ литературных источников, посвященных исследованиям тепловой работы печей прокатного производства показал, что в настоящее время можно выделить два основных направления улучшения экономических показателей их работы и качественных показателей нагрева. К первому направлению необходимо отнести исследования, связанные с совершенствованием конструкции рабочего пространства печей и способами их отопления. Второе направление представляют исследования по совершенствованию тепловых режимов нагрева, способов управления работой печей и их автоматизации. В данной работе рассматриваются вопросы, связанные со вторым направлением.

В рамках современных АСУТП нагрева металла в печах используются упрощенные модели нагрева для оперативной оценки теплового состояния садки, работающие в темпе с технологическим процессом. В настоящее время основные методы идентификации моделей основаны на определении коэффициентов модели либо по температуре раската, либо по результатам прогонки опытного сляба. Недостатком первого способа является наличие в сигнале пирометра, установленного за черновой клетью, значительных по величине помех, что весьма существенно влияет на точность определения коэффициентов модели нагрева. Хотя второй способ очень трудоемок и сопряжен с определенными затратами, экспериментальные нагревы заготовок периодически проводятся на всех печах, т.к. считается, что этот способ предоставляет более полную и точную информацию.

На основании экспериментальных данных, получаемых во время

прогонку опытного сляба через печь появляется возможность воссоздания картины нагрева, определения тепловых потоков на верхнюю и нижнюю поверхности и коэффициентов теплоотдачи, необходимых как для оценки работы печи, так и для настройки модели нагрева, действующей в рамках программного обеспечения АСУТП.

В соответствии с вышеизложенным определены следующие задачи исследования :

- исследовать тепловой режим и провести экспериментальные нагревы слябов в семизонных методических печах с шагающими балками ( далее - ПШВ ) ЛПЦ-3000 меткомбината им. Ильича;
- разработать модель лучистого теплообмена в нижних зонах печи для определения средних диффузных угловых коэффициентов излучения с поверхностями печи ( боковые стены, подина ) и факела на металл ;
- разработать математическую модель нагрева для класса методических печей одно - и двухстороннего нагрева ;
- исследовать процесс внешнего теплообмена в рабочем пространстве печей с помощью математической модели нагрева и решения обратной задачи теплопроводности ;
- внедрить усовершенствованную технологию нагрева металла в условиях действующего производства и скорректировать алгоритмы функционирования АСУТП нагрева металла в ПШВ ЛПЦ-3000.

#### Разработка математической модели нагрева слябов в методической печи.

Процессы, протекающие в рабочем пространстве печи, характеризуются совокупностью таких сложных явлений, как излучение и конвекция, массообмен и горение топлива, аэродинамика газовых потоков и теплопроводность. Строгое решение задачи, учитывающее в полной мере все эти явления, в настоящее время не представляется возможным. Поэтому анализу подвергаются как правило процессы, характеризующие в основном тепловую работу печи. Влияние остальных параметров не рассматривается или заменяется упрощенным описанием.

При разработке математической модели нагрева слябов стави-

дась задача создания модели, удовлетворяющей по точности и использующей реальную оперативную исходную информацию.

Разработка модели включила в себя постановку и решение следующих задач :

- описание системы тел, участвующих в теплообмене, и геометрической характеристики пространства печи ;
- расчет распределения средних диффузных угловых коэффициентов в ближних зонах печей для оценки влияния опорной системы печи на нагрев нижней поверхности заготовок ;
- расчет внешнего теплообмена ;
- расчет внутреннего теплообмена .

При построении математической модели приняты следующие допущения :

- а) температурное поле в любом сечении по длине заготовки симметрично ;
- б) то теплообмен через боковые грани заготовок отсутствует ;
- в) теплоотдача на поверхности слябов происходит по закону Ньютона .

Условия внешнего теплообмена учитываются путем задания для каждой зоны приведенных коэффициентов теплоотдачи излучением и текущей температурой, соответствующей показаниям импульсной термопары той зоны, где находится сляб. Перемещение сляба задается графиком изменения координаты сляба в зависимости от времени нагрева. Текущее положение сляба в печи ( принадлежность к зоне нагрева ) определяется во время очередной итерации в соответствии с координатой сляба. Существует возможность задания постоянных температур в зонах печи для отображения стабильного режима нагрева при постоянной производительности печей.

Расчет удельных тепловых потоков на поверхность металла производится по следующим формулам

$$q = G \left[ \left( \frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t_3 - t_n) \quad (1)$$

где  $G$  - приведенный коэффициент теплоотдачи излучением для

- верхней или нижней зоны соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°С<sup>4</sup>);  
 $\alpha$  - приведенный коэффициент теплоотдачи конвекцией для  
 верхней или нижней зоны соответственно, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  
 $t_3$  - текущие температуры верхней или нижней зоны соот-  
 ветственно, град. С;  
 $t_A$  - температуры верхней или нижней поверхностей сляба,  
 ба, град. С

Постановка внутренней задачи формулируется следующим обра-  
 зом. Требуется определить температурную функцию  $t(x, \tau)$ , если:

$$c \rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) \text{ при } \lambda = \lambda(t), c = c(t) \quad (2)$$

$$0 \leq x \leq s \quad \tau \geq 0$$

при следующих граничных условиях II рода

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = Q^a(\tau) \quad t(x, 0) = f(x) = \text{const} \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial t(s, \tau)}{\partial x} = Q^k(\tau)$$

где  $\lambda(t)$  - коэффициент теплопроводности, Вт/(м<sup>2</sup>·град.С);

$C(t)$  - удельная теплоемкость, кДж/(кг·град.С);

$\rho$  - плотность стали, кг/м<sup>3</sup>;

$\tau$  - время, ч.

Т.к. решение внутренней задачи будет использовано в комп-  
 лексе решения обратной задачи теплопроводности, для рассматри-  
 ваемой модели наиболее приемлившей по точности вычислений и  
 удобства использования экспериментальных данных является конеч-  
 но-разностная схема.

#### Постановка обратной задачи теплопроводности.

Пусть задан закон распределения температуры в слябе

$$\rho c(t) \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (4)$$

при начальном условии  $t(x, 0) = t_0(x)$ .

Необходимо определить удельные тепловые потоки на верхнюю и  
 нижнюю поверхности сляба в дискретные моменты времени  $\tau_i$  в со-

ответствии с формулами

$$\begin{aligned} \varphi^B(\tau_i) &= \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=0} \\ \varphi^N(\tau_i) &= \lambda(t) \frac{\partial t}{\partial x} \Big|_{x=s} \end{aligned} \quad (5)$$

если известны данные измерений от внутренних датчиков температуры, расположенных вблизи поверхностей в точках с координатами  $x^B$  и  $x^N$ , причем измерения производятся дискретно в моменты времени  $\tau_1, \tau_2, \dots$  или в общем случае  $\tau_i$ , которым соответствуют измеренные значения температуры  $t_i^B$  и  $t_i^N$ :

$$\begin{aligned} t(x^B, \tau_i) &= t_i^B \\ t(x^N, \tau_i) &= t_i^N \end{aligned} \quad (6)$$

Инженерный метод решения обратной задачи теплопроводности.  
Задаем начальные значения коэффициента теплоотдачи сверху и снизу

В соответствии с температурным состоянием сляба в момент времени  $\tau_i$  и заданными значениями температуры в зоне и др. параметров решаем прямую задачу. В результате получаем расчетное температурное состояние в момент времени  $\tau_{i+1}$ . Если полученное состояние не соответствует опытным данным, т.е. не выполняется условие

$$\begin{aligned} \Delta t_{\kappa}^B &= |t_{i+1}^B \text{ расч.} - t_i^B| < \zeta \\ \Delta t_{\kappa}^N &= |t_{i+1}^N \text{ расч.} - t_i^N| < \zeta, \end{aligned} \quad (7)$$

то рассчитываются новые значения  $G_{np}^B$  и  $G_{np}^N$  по формулам

$$\begin{aligned} G_{np}^B &= G_{\kappa-1}^B + \Delta G_{np}^B \\ G_{np}^N &= G_{\kappa-1}^N + \Delta G_{np}^N, \end{aligned} \quad (8)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta G_{np}^B &= f(\Delta t_{\kappa-1}^B, t_i^B \text{ расч.}) \\ \Delta G_{np}^N &= f(\Delta t_{\kappa-1}^N, t_i^N \text{ расч.}) \end{aligned}$$

$\kappa$  - номер итерации.

Прямая задача (при  $G_{np} = \text{var}$ ) решается до тех пор, пока не выполнится условие (7).

После выполнения условия (7) расчетные действующие тепловые потоки в момент времени  $\tau_{i+1}$  определяются по формуле

$$\varphi_{i+1} = G_{np}^p \left[ \left( \frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_n + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha (t_3 - t_n), \quad (9)$$

где  $t_3$  - температура соответствующей верхней или нижней зоны ;  
 $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи конвекцией ;  
 $G_{np}^p$  - приведенный коэффициент теплоотдачи излучением сверху или снизу, значения которого получены в ходе реализации метода.

Расчет распределения диффузных локальных угловых коэффициентов. Пусть F1 и F2 - две диффузно излучающие и отражающие плоские поверхности.

Если интенсивность излучения поверхности F2 не зависит от направления и постоянна по всей поверхности F2, то угловой коэффициент с поверхности F2 на элементарную площадку dF1

$$\varphi_{F_2-dF_1} = \frac{dF_1}{F_2} \int_{F_2} \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R^2} = \frac{dF_1}{F_2} \varphi_{dF_1-F_2} \quad (10)$$

где R - модуль вектора, соединяющего центры тяжести элементарных площадок ;

$\theta_1, \theta_2$  - острые углы между вектором R и нормальми к площадкам .

Заменяя в формуле (10) интегралы интегральными суммами, а дифференциалы - конечными, но малыми величинами, получим :

$$\varphi_{F_2-dF_1} = \frac{dF_1}{F_2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{\cos \theta_{1i} \cdot \cos \theta_{2j}}{\pi R_{ij}^2} \Delta F_2 \quad (11)$$

Для плоского варианта расчета :

$$\begin{aligned} \Delta F_2 &= \Delta l_2 \cdot l_1 & \Delta l_2 &= l_2 / N \\ F_2 &= l_2 \cdot l_1 & \Delta l_1 &= l_1 / N \\ \Delta F_1 &= \Delta l_1 \cdot l_2 \end{aligned} \quad (12)$$

В итоге формула расчета окончательно выглядит

$$\varphi_{l_2 - \Delta l_2} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \sum_{i=1}^N \frac{\cos \theta_1 \cdot \cos \theta_2}{\pi R_i^2} \Delta l_1 = \frac{\Delta l_2}{l_2} \varphi_{\Delta l_1 - l_2} \quad (13)$$

Условия экранирования.

Если прямая, определяющая вектор  $R_1$ , имеет общую точку с окружностью подвижных или неподвижных балок, то угловой коэффициент  $\Delta l_2 - l_2 = 0$

Экспериментальное исследование температурного поля в нагретых слябах в производственных условиях.

О целью уточнения технологических параметров нагрева слябов в ПНБ стана 3000, оценки тепловой работы печей и получения их теплообменных характеристик для корректировки расчетных моделей АСУТП печей были проведены (совместно с ВНИИМ) опытные нагревы слябов с измерением их характерных температур в процессе перемещения садки по печи. Была использована многократно опробованная на промышленных печах методика теплотехнических испытаний.

Было проведено два опытных нагрева слябов с измерением их температурного состояния в процессе перемещения садки по печи. В опытах были использованы хромель-алюмелиевые термопары длиной 50 мм каждая, горячие спаи которых были установлены в среднем сечении слябов через их переднюю (по ходу металла) грань вдоль вдоль предполагаемых изотерм. Последнее позволило устранить погрешность измерения, связанную с притоком (или стоком) тепла по электродам самих термопар к их рабочему спаю (или от него). В каждом из опытов было использовано по три термопары с установкой вблизи верхней и нижней поверхности сляба и в центре по его толщине.

В процессе измерения температуры металла синхронно выполнялись замеры оптическим пирометром типа "Проминь" яркостной температуры внутренней поверхности боковых стен печи. Замеры вы-

поднялись через рабочие окна в момент пересечения опытным слябом соответствующих сечений печи. Одновременно в ходе опыта фиксировались другие параметры температурно-теплого режима печи - показания зональных термопар ( температуры зон печи ), расход, давление и температура топлива и воздуха по зонам, давление в рабочем пространстве печи, параметры пара в системе охлаждения подовых балок и др.

В каждом из опытов динамика температурного состояния опытного сляба оценивалась также в протоколах, выдаваемых АСУТП нагрева металла.

В опыте N 1 исследовался нагрев слябов толщиной 300 мм при температурно-тепловом режиме печи, показанном на рис. 1. Общее время нагрева составило 4 часа ( удельное время 8,0 мин/см ).

В опыте N 2 исследовался нагрев сляба толщиной 300 мм при измененном температурном режиме печи. Температура первой нижней сварочной зоны была уменьшена на 70 градусов.

Перед проведением опыта был также расширен диапазон допустимых значений температуры в зонах при управлении от АСУТП, главным образом нижнего предела. Последний был принят равным температуре нагреваемого сляба на соответствующих участках по длине печи. Результаты измерения параметров металла и печи приведены на рис. 2.

— Анализ работы АСУТП нагревом металла в печах ( опыты 1 и 2 ) показал существенную разницу в вычисляемой в системе математической модели ( разработчик - КИА ) температурном состоянии слябов и фактическим.

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования тепловой работы печей и процесса нагрева слябов показали, что:

1. Температура, соответствующая показаниям импульсных термопар первой по ходу пары сварочных зон не отражает действительный уровень температур в зонах, что существенно влияет на работу модели нагрева АСУТП, и, соответственно, на качество управления температурным режимом печей.

2. Предусмотренные в АСУТП пределы допустимого изменения температуры в зонах составляли лишь 20-60 градусов, что является недостаточным для стабилизации температурного состояния сля-

Температурный режим печи 4 и результаты измерения температуры экспериментального сляба (опыт 1)

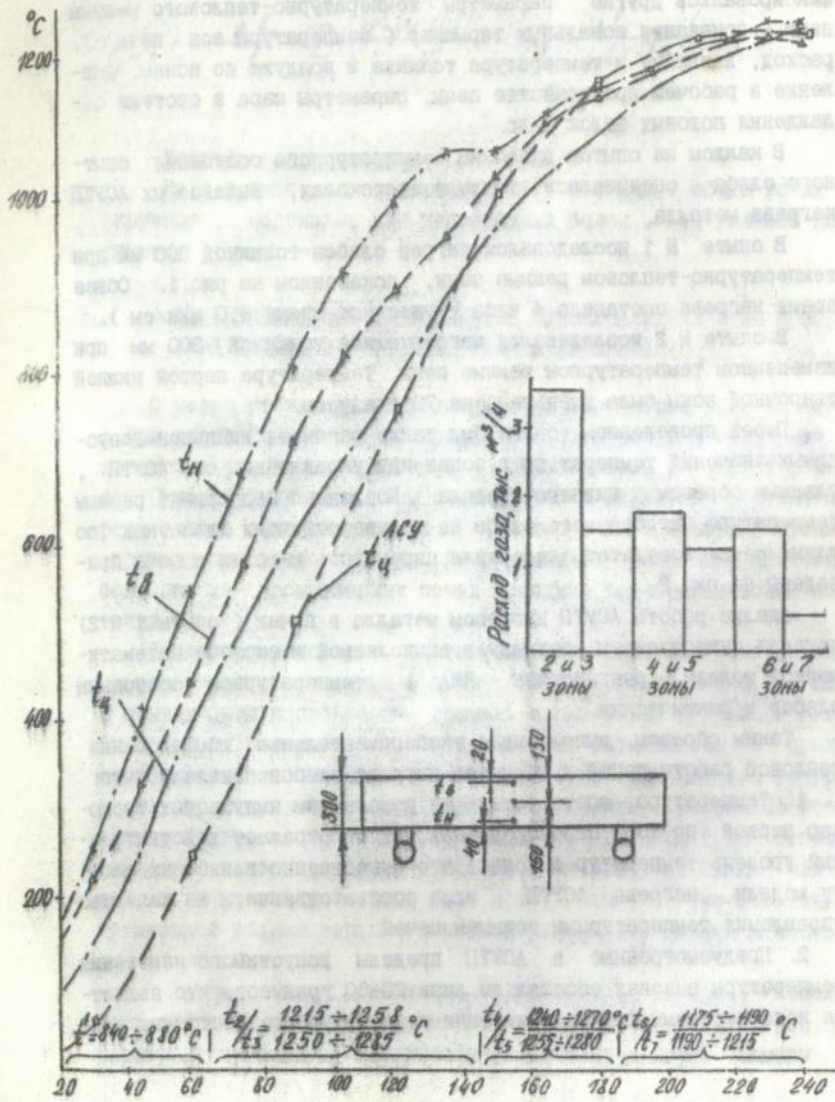


Рис. 1

Температурный режим печи №1 и результаты измерений температуры экспериментального слэба (опыт 2)

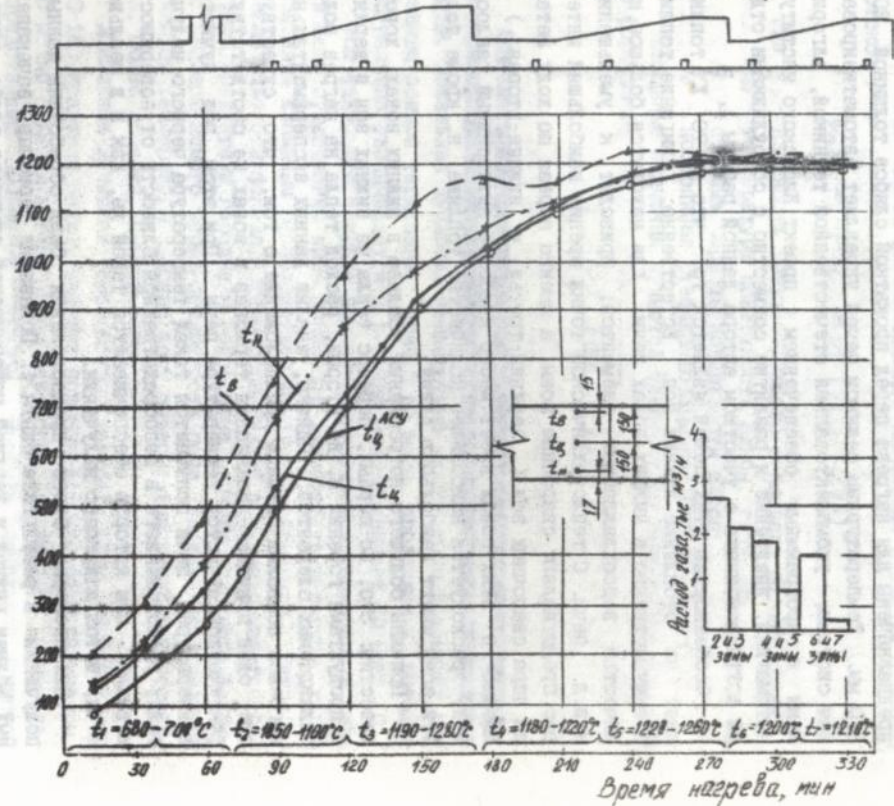


Рис. 2.

бов, особенно в периоды простоев печей.

3. Необходима существенная адаптация коэффициентов модели, работающей в рамках АСУТП.

Определение фактической интенсивности теплообмена путем решения обратной задачи теплопроводности.

Печи с шагающими балками ЛПЦ "3000" комбината им. Ильича предназначены для нагрева перед прокаткой слябов толщиной 200-310 мм. Температурным режимом печей управляет автоматизированная система, — укомплектованная отечественной техникой, алгоритмами и программным обеспечением ( проект Киевского института автоматики, внедрение и развитие совместно с сотрудниками отдела АСУТП комбината с участием автора данной работы ).

Особенностью этих печей является то, что до 70 % топлива идет на отопление нижних зон. Естественно, сжигание топлива преимущественно в нижних зонах печи, где находится большое количество водоохлаждаемых элементов, приводит к уменьшению к. п. д. печи. С теплотехнической точки зрения наибольший интерес представляют сварочные зоны, а именно первая по ходу металла пара сварочных зон ( верхняя-третья и нижняя-вторая ) . Именно в этих зонах имеет место наиболее интенсивный теплообмен, расходуется наибольшее количество топлива, и, кроме того, эти зоны имеют наибольшую длину.

Причины большего потребления топлива в нижних зонах хорошо известны. Это, во-первых, перенос тепла из нижних зон в верхние с продуктами горения и, во-вторых, расход тепла на нагрев водоохлаждаемых элементов. Однако, анализ данных экспериментальных нагревов позволил сделать предположение о том, что существует еще одна причина - показания термопар в зонах не соответствуют фактической лучистой температуре печи. При этом под лучистой температурой печи понимается такая температура черного излучателя, расположенного в непосредственной близости от поверхности металла, при которой обеспечивается такой же, как и в реальной печи, поток падающего излучения.

Для проверки этого предположения были обработаны данные, полученные в результате опыта 1. Показания термопар, зачеканенных вблизи нижней и верхней поверхностей опытного сляба, приве-

дены на рис. 1. Температура нижней поверхности более, чем на 100 градусов превышает температуру верхней поверхности, причем за время нахождения сляба в первой по ходу сварочной зоне этот перепад не только не уменьшился, но даже несколько вырос.

Путем решения обратной задачи теплопроводности были восстановлены результирующие тепловые потоки на верхнюю и нижнюю поверхности сляба. Затем рассчитывались локальные значения падающих потоков:

$$q_{\text{пад}} = \frac{1}{\xi} q_p + \sigma_0 (t_{\text{пов}} + 273)^4,$$

где  $q_p$  - плотность результирующего теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{\text{пов}}$  - температура поверхности сляба, град. С;

$\xi$  - степень черноты поверхности сляба;

$\sigma_0$  - постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup> · град С<sup>4</sup>).

Локальные значения лучистой температуры печи рассчитывались по формуле:

$$t_{\text{л}} = \sqrt[4]{\frac{q_{\text{пад}}}{\sigma_0}} - 273.$$

Локальная лучистая температура нижней зоны превышает показания зонной термопары, причем по мере продвижения металла эта величина увеличивается и в конце зоны превышает 70 град. С.

Тот факт, что текущие показания импульсной термопары в нижней зоне существенно выше локальной лучистой температуры, можно объяснить взаимным расположением факелов и термопары. Расположенная ниже оси факела, термопара нижней зоны не омывается горячими продуктами горения и подвержена влиянию холодного воздуха, подсосываемого через неплотности печи. Увеличение локальной лучистой температуры к концу зоны объясняется наличием соседней, более горячей, нижней зоны.

Локальная лучистая температура верхней зоны наоборот на 100-150 градусов ниже текущих показаний импульсной термопары. Это можно объяснить тем, что термопара в верхней зоне непосредственно омывается факелом. Профиль локальной лучистой

температуры в верхней зоне также отражает определенную закономерность. Он связан с распределением температуры по длине факела.

Выявленные закономерности позволили сформировать в АСУТП нагревом металла более точное отображение температурного поля слябов в печи на основе сигналов тех же импульсных термодатчиков.

Можно также предположить, что наиболее представительным местом измерения температуры в зоне импульсной термодатчиком является то сечение зоны, где локальные лучистые температуры достигают максимума.

#### Расчет корректирующих коэффициентов для внесения в алгоритмы функционирования АСУТП

Анализ данных, полученных в ходе экспериментов, показал существенную разницу в вычисляемом температурном состоянии слябов и фактическим.

Всю стадию нагрева можно условно разделить на два участка: первый участок характеризуется заниженным значением расчетной температуры, второй - завышенным. В период томления металла в VI, VII зонах расчетные и измеренные температуры практически совпадают.

Управление нагревом, основанное на "ложной", т.е. не соответствующей истинной траектории температуры металла может привести к нарушению технологии нагрева, несмотря даже на совпадение конечной температуры с технологически заданной заданной. Кроме того, в случае резко выраженной неримичности работы печи существует возможность отклонения и конечной температуры нагрева от заданной. Например, при простое печи партия слябов, находящаяся на втором из упомянутых выше участке нагрева заданного значения, так как последний участок томления недостаточен для корректировки нагрева.

Модель нагрева, действующая в рамках АСУТП, учитывает только температуру верхних зон печей ( односторонний нагрев ), причем нагрев в печи считается симметричным ( упрощение модели вызвано необходимостью работы в режиме реального времени ).

Кроме того, предусмотренные в АСУТП пределы допустимого изменения температуры в зонах составляли лишь 20-60 градусов, что является недостаточным для стабилизации температурного состояния слэбов, особенно в периоды простоев печей.

Указанные недостатки системы приводили к тому, что управление тепловым режимом печи сводилось к поддержанию некоторых заданных по режимной инструкции значений температуры в зонах, т.е. АСУТП в рамках управления режимом нагрева фактически выполняла лишь функции обычных локальных систем регулирования температуры в печи. В результате, как показал анализ причин отсортировки металла по ударной вязкости, наибольшее количество случаев превышения допустимой по технологии контролируемой прокатки температуры нагрева слэбов приходилось на периоды простоев стана.

Для адаптации модели предложено и реализовано следующее:

1. Коэффициент несимметричности нагрева по длине печи неодинаков. На основании обработки результатов экспериментов получен график его изменения по длине печи. График введен в модель нагрева в виде таблицы.
2. Обоснован коэффициент коррекции температуры зоны для получения значения локальной лучистой температуры. На основании обработки результатов экспериментов получен уточненный график его изменения по длине печи.
3. Пределы допустимого изменения температуры в зонах изменены и составляют 150-200 градусов, причем в основном понижен нижний предел температур зон.

Режимные параметры работы печей с шагающими балками ЛПЦ-3000 в условиях неполной загрузки стана.

Разработанные ранее режимы тепловой обработки металла в методических печах в основном ориентировались на максимальную их производительность.

В условиях сложившейся обстановки отсутствия металла, необходимости экономии топлива возник вопрос о разработке комплекса теплотехнических мероприятий, позволяющих обеспечить быстрое

реагирование на различные нештатные ситуации (остановка линии стана, отсутствие металла, длительные ремонты и др.) и сохранность теплового оборудования ЛПЦ-3000.

Разработка таких мероприятий осложняется жесткой взаимозависимостью работы методических печей и паровых котлов, конструкция и технология работы которых не предусматривает холодной консервации на продолжительный период.

ЛПЦ-3000 укомплектован четырьмя сезонными методическими печами с шаровыми баллами конструкции "Сталь-проект".

В течение 1990-1992 годов ЛПЦ-3000 испытывает трудности с поставками металла для последующей прокатки. Так, например, загрузка стана за последний год не превышала 50-70% от полной производительности, а в некоторые месяцы опускалась ниже 40%.

Печью, производимый котлом-утилизатором ПКУ-100/45, используется для технологических процессов внутри ЛПЦ-3000 и для нужд завода, поэтому при любом температурном режиме печи необходимо обеспечить выработку пара соответствующих энергетических параметров, не нарушая технологическую инструкцию по нагреву слэбов.

Режимные параметры печей, устанавливаемые технологическим персоналом участка печей, определяются произвольно в соответствии с производственной ситуацией и практически не учитывают вышеуказанных параметров.

В данной главе рассматриваются причины, в соответствии с которыми необходимо поддерживать тот или иной режим, и определяем для каждого из этих режимов уровень температур в зонах печей.

На основании производственных исследований разработаны оптимальные, с точки зрения экономии топлива, температурные режимы работы печей в условиях неполной загрузки стана в зависимости от продолжительности остановок и характеристики садки.

Температурные режимы работы печей классифицированы по продолжительности остановки стана на 3 режима: остановка стана на 2-8 часов, 8 часов - 2 суток, более 2-х суток. При этом разработанные режимы учитывают особенности поведения различных марок стали при высоких температурах. Так для ниобистых и трубных ма-

рок сталей температурные задания на 20-40 град. С ниже, чем для рядовых марок сталей.

Разработанные режимы работы печей в условиях горячей консервации паровых котлов позволяют производить выработку пара котлом-утилизатором при отсутствии металла на производство листового проката, т. е. использовать методическую печь как источник отопления котла-утилизатора в условиях острой потребности в выработке пара на внутренние нужды комбината.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в работе, состоят в следующем:

1. Предложена упрощенная математическая модель нагрева металла в методических печах, позволяющая оценить температурное состояние слывов в процессе нагрева с погрешностью, не превышающей по абсолютной величине 15 град. Наглядность и простота построения модели позволяют адаптировать ее в соответствии с возникающими с различными задачами, например, при настройке и проектировании печей непрерывного действия для нагрева заготовок.

2. Предложена надежная и практичная методика непрерывного замера температуры в слыве, которая обеспечивает получение данных о температурном поле заготовки с погрешностью не более чем 4 градуса.

3. Предложен легко программируемый, относительно простой и наглядный метод решения обратной задачи теплопроводности, обеспечивающий высокую точность определения тепловых потоков, определяемую лишь точностью измерения температур.

4. Использование предлагаемого инженерного метода для определения приращения приведенного коэффициента теплоотдачи излучением ускоряет процесс сходимости решения, что существенно снижает затраты машинного времени. В случае наличия нескольких датчиков температуры один из них может использоваться для контроля качества экспериментальных данных и предлагаемого метода.

5. На основании результатов решения обратной задачи теплоп-

роводности получена возможность восстановления картины нагрева опытного сляба, оценки условий нагрева и различных характеристик теплообмена в печи.

Распределение тепловых потоков, воспринимаемых верхней и нижней поверхностями опытного сляба, дало возможность качественно и количественно оценить условия и закономерности теплообмена в печи.

6. Определено, что температура, соответствующая показаниям импульсных термопар, не отражает действительный уровень температур в зонах, что существенно влияет на работу модели нагрева АСУТП, и, соответственно, на качество управления температурным режимом печей. На основании рассчитанных локальных значений лучистой температуры печи определены коэффициенты теплопередачи излучением для верхних и нижних зон печи, зависящие от расстояния текущего поперечного сечения печи от окна загрузки.

Показано, что наиболее представительным местом для измерения температуры в зонах предпочтительно выбирать то сечение, где наблюдается максимум локальной лучистой температуры.

7. На основании результатов решения обратной задачи теплопроводности скорректирован температурный режим нагревательных печей, что позволило снизить расход природного газа на 4 %.

8. На основании результатов решения ОУТ для модели нагрева АСУТП печей ЛПЦ-3000 научно обосновано использование поправочного коэффициента к показаниям зонных импульсных термопар и коэффициента несимметричности нагрева, значения которых зависят от расстояния от окна загрузки печи.

9. На основании производственных исследований разработаны оптимальные, с точки зрения экономии топлива, температурные режимы работы печей в условиях не одной загрузки стана в зависимости от продолжительности остановок, характеристики садки и учитывающие особенности поведения различных марок сталей при высоких температурах.

10. В связи с невозможностью осуществления химической консервации паровых котлов на работан режим работы котлов в условиях горячей консервации паровых котлов, позволяющий сократить энергетическое оборудование и производить выработку пара на внутрен-

ренные нужды комбината котлом - утилизатором при отсутствии металла на производство листового проката.

Основные положения диссертации изложены в следующих работах:

1. Шмачков П. Л., Симсин А. И. Экспериментально-расчетное исследование температурных полей в печи с шагающими балками стана 3000 / Сталь, 1993. - № 6. - С. 89-90.
2. Симсин А. И., Шмачков П. Л. Методика экспериментально-расчетных исследований для определения настроек модели нагрева, действующей в рамках программного обеспечения АСУП нагрева металла проходных нагревательных печей прокатного производства // Сборник тезисов докладов II региональной науч.-техн. конф. Мариуполь, май, 1993 / ММИ. - Мариуполь, 1993. - т. III. - С. 70.
3. Симсин А. И., Якимача А. В. Режимные параметры работы печей с шагающими балками в условиях неполной загрузки стана // Сборник тезисов докладов II рег. науч.-техн. конф. Мариуполь, май, 1993 / ММИ. - Мариуполь, 1993. - т. III. - С. 69.
4. Шмачков П. Л., Симсин А. И. Определение фактической интенсивности теплообмена путем решения обратной задачи теплопроводности // Сборник тезисов докладов II региональной науч.-техн. конф. Мариуполь, май, 1993 / ММИ. - Мариуполь, 1993. - т. III. - С. 70.



Подп. в печать 24.01.1994г.

ПГТУ, Ромашор, зак. 4

Тираж 100 экз.

Уч.-изд. Л I.2

Бесплатно

AB 29.223