

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

УДК 623.53+62.503.56

ОПТИМАЛЬНЫЕ ТОПЛИВОСБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ НАГРЕВА НЕПРЕРЫВНОЛИТЫХ ЗАГОТОВОК В МЕТОДИЧЕСКИХ ПЕЧАХ

Парсункин Б.Н.¹, Андреев С.М.¹, Жадинский Д.Ю.², Ахметова А.У.¹¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия² ООО «Электроремонт», Магнитогорск, Россия

Аннотация. Рассматривается теоретическое обоснование целесообразности и необходимости для уменьшения удельных затрат топлива замены существующего общепринятого способа распределения расходов топлива по зонам методических печей на универсальный топливосберегающий способ, обеспечивающий гарантированное оптимальное автоматизированное управление нагревом металла с соблюдением всех технологических и конструктивных ограничений при производстве горячекатаного широкополосного листового проката.

Ключевые слова: оптимальный топливосберегающий нагрев, температурный режим, непрерывнолитая заготовка, нагревательная печь, температурная траектория, нагрев заготовок перед прокаткой.

Введение

Особенно актуальной проблема снижения удельного расхода условного топлива (УРУТ) становится при производстве широкополосного горячекатаного листового проката для выполнения больших намеченных программ в оборонной, судостроительной и трубной отраслях промышленности.

Решение поставленной задачи рассмотрено на примере рекомендуемой реализации топливосберегающего управления режимом нагрева непрерывнолитых заготовок в отечественных методических печах современного высокопроизводительного широкополосного стана горячей прокатки (ШСГП) 2000 ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ММК).

Замена общепринятого способа распределения расходов топлива на новый топливосберегающий режим, гарантирующий оптимальное автоматизированное управление нагревом металла

Своевременное и бесперебойное обеспечение прокатного стана гарантированно нагретыми до требуемого теплового состояния заготовками является приоритетной задачей отделения нагревательных печей ШСГП. Решение этой важной проблемы значительно усложняется существенно нестационарным режимом работы стана. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «ММК» в течение суток приведено на **рис. 1**.

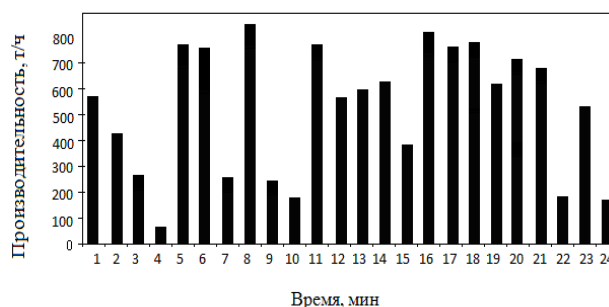


Рис. 1. Изменение часовой производительности стана 2000 ОАО «ММК» в течение суток

Анализ полученных данных показывает, что производительность стана изменяется от 50 до 800 т/ч.

В нестационарных условиях работы нагревательных печей проводимые на стане мероприятия, например подача на нагрев неостывших при разливке заготовок, способствуют снижению УРУТ. Однако эффективность проводимых мероприятий сдерживается наличием противоречия между используемым общепринятым способом распределения расходов топлива по зонам печи и топливосберегающим оптимальным способом, заключающимся в следующем.

Нагрев слабых непрерывнолитых заготовок в методических печах ШСГП можно представлять как нагрев по толщине плоской пластины, т.е. температурное поле в заготовке можно рассматривать как одномерное [1, 2].

$$C'(t) = \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(t) \frac{\partial t(x, \tau)}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где $t(x, \tau)$ – температура пластин по оси x , К; $C'(t)$ – удельная объемная теплоемкость, Дж/(м·К); x – пространственная координата, $0 < x < \sigma$, м; σ – половина толщины заготовки, м; τ – текущее время $0 \leq \tau \leq T$, с; T – заданное время нагрева, с.

При симметричном нагреве граничные условия в центре при $x = 0$ будут определены условием

$$\frac{\partial t(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (2)$$

где $t(0, \tau)$ – температура центра заготовки, К.

При граничных условиях третьего рода (задан закон теплообмена на поверхности) имеем [3]

$$\frac{\partial t(\sigma, \tau)}{\partial x} = \alpha(\tau) \cdot [t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau)], \quad (3)$$

где $t_{нов}(\tau) = t(\sigma, \tau)$ – температуры на поверхности пластины, К; $t_{гс}(\tau)$ – температура греющей среды (рабочего пространства), К; $\alpha(\tau)$ – коэффициент теплоотдачи (Вт/м²·град), определяется по формуле

$$\alpha(\tau) = \frac{\left[\left(\frac{t_{zc}(\tau)}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нов}(\tau)}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв}(t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau))}{t_{zc}(\tau) - t_{нов}(\tau)}, \quad (4)$$

где $\alpha_{конв}$ – коэффициент теплопередачи конвекцией, Вт/(м²·град); $\sigma_{прив}$ – приведенный коэффициент излучения, рассчитываемые по формуле В.Н. Тимофеева [4]:

$$\sigma_{прив} = \sigma_0 \varepsilon_m \cdot \varepsilon_{zc} \cdot \frac{k_{yzt}(1 - \varepsilon_{zc}) + 1}{k_{yzt}(1 - \varepsilon_{zc}) \cdot [\varepsilon_m + \varepsilon_{zc}(1 - \varepsilon_m)] + \varepsilon_{zc}}, \quad (5)$$

где σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К); ε_m – интегральная степень черноты поверхности нагреваемого металла; $\varepsilon_{гс}$ – интегральная степень черноты результирующего источника излучения, приведенная к температуре

греющей среды; k_{yzt} – угловой коэффициент излучения огнеупорной кладки на тепловоспринимающую поверхность заготовки.

Дополнительно известно начальное ($\tau = 0$) и конечное ($\tau = T$) распределения температуры по сечению заготовки:

$$t(0, x) = t^o(x); \quad t(T, x) = t^K(x), \quad (6)$$

где $t^o(x)$, $t^K(x)$ – параболического вида функции соответственно начального и конечного температурного распределения по сечению заготовки [1].

Управляющим воздействием в системе автоматизированного оптимального топливосберегающего управления нагревом является «расход топлива», а выходным управляемым параметром является «характеристическая температура греющей среды», пропорциональная расходу топлива.

Динамика процесса преобразования расхода топлива в температуру греющей среды можно выразить уравнением

$$\frac{t_{zc}(\tau)}{dt} = \frac{1}{T_0} [U(\tau) - t_{zc}(\tau)], \quad (7)$$

где $U(t) = K_n \cdot V_T(\tau)$ – характеристическая температура управления, К; $V_T(\tau)$ – текущий расход топлива, м³/ч; K_n – коэффициент передачи по каналу «расход топлива – характеристическая температура», К·ч/м³;

T_0 – постоянная времени, характеризующая инерционность процесса теплопередачи по каналу «управляющее воздействие – температура греющей среды $t_{гс}(\tau)$ ».

Для решения одномерного уравнения теплопроводности с соответствующими начальными, конечными и граничными условиями использован численный метод решения по неявной четырехточечной разностной схеме [3].

Используемый метод решения позволяет получить расчетные траектории изменения по времени $U(\tau)$; $t_{гс} = t_{гс}(\tau)$; $t_{нов}(\tau) = t(\sigma, \tau)$; $t_{ц}(\tau) = t(0, \tau)$, где $t_{ц}(\tau)$ – изменение температуры центра заготовки.

Критерием (целью) оптимальности топливосберегающего управления процессом нагрева металла является минимизация затрат топлива при нагреве заготовок от начального $t^0(x)$ до конечного $t^k(x)$ состояния за заданное время нагрева $0 \leq \tau \leq T$ [5].

Этот критерий можно выразить в виде функционала [5–8]:

$$I = \int_0^T U^2(\tau) d\tau \rightarrow \min. \quad (8)$$

Требуется определить такое управление $U(\tau)$, чтобы по окончании заданного времени нагрева T критерий (8) принимал наименьшее из возможных значений.

Для решения поставленной задачи использован метод максимума Л.С. Понтрягина. В соответствии с данным методом необходимое условие оптимальности управления определено специальной H -функцией следующего вида [6–12]:

$$H = \varphi_0 \cdot U^2(\tau) + \frac{1}{T_0} \varphi_{rc}(\tau) \cdot [U(\tau) - t_{rc}(\tau)] + \varphi(\tau, 0) + \frac{a}{\lambda} \cdot \varphi(\tau, \sigma) \cdot [t_{rc}(\tau) - t_{пов}(\tau)] + \frac{\lambda}{c'} \frac{\partial \varphi(\tau, x)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 t(x, \tau)}{dx^2}, \quad (9)$$

где $\varphi_0, \varphi(x, \tau), \varphi(\tau, \sigma), \varphi_{rc}(\tau), \varphi(\tau, 0)$ – сопряженные переменные, определяемые в процессе частного дифференцирования функции (9) по переменным, к которым вычисляются сопряженные [7,10].

Условие оптимальности управления определяется в соответствии с принципом максимума следующим выражением:

$$\frac{\partial H}{\partial U} = 2U(\tau) \cdot \varphi_0 + \frac{\varphi_{rc}(\tau)}{T_0} = 0, \quad (10)$$

где $\varphi_0 = -1$ по определению [7].

Значит, в итоге имеем

$$U_{opt}(\tau) = \frac{\varphi_{rc}}{2T_0}. \quad (11)$$

Существование решения следует из физического смысла задачи при $T \geq T_{мин}$, где $T_{мин}$ –

минимальное время необходимое для перевода теплового состояния заготовки из начального $t^0(x)$ в конечное $t^k(x)$.

В соответствии с принципом максимума Л.С. Понтрягина [5, 6] для оптимальности управления необходимо существование таких непрерывных функций $\varphi(x, \tau), \varphi(\sigma, \tau), \varphi_{rc}(\tau)$, при которых функция $H(\tau)$ в каждый момент времени достигает максимума.

Значительную трудность при определении $U_{opt}(\tau)$ представляет определение начальных значений отмеченных функций сопряженных переменных.

Для решения этой проблемы Андреевым С.М. предложен метод квадратичной интерполяции [7], позволивший перевести решения поставленной задачи из области интуитивно-вариационной в область обоснованного формализованного решения. Это обеспечивает определение оптимальной топливосберегающей температурной траектории используемого контролируемого параметра нагрева для каждой заготовки в темпе с реальным процессом [13].

Расчетные траектории изменения температурных параметров при оптимальном топливосберегающем режиме управления нагревом непрерывнолитой заготовки с учетом изменения теплофизических характеристик стали сляба толщиной 2500 мм за заданное время 150 мин от начального температурного состояния $t_{пов}(\tau=0)=t_{ц}(\tau=0)=100$ до конечного температурного состояния $t_{пов}(T)=t_{ц}(T)=1250^\circ\text{C}$ при среднемассовой температуре $t_{см}(T)=1250^\circ\text{C}$ без учета ограничения [12, 13] представлены на **рис. 2**.

Полученные траектории оптимального топливосберегающего управления процессом нагрева подчиняются общей закономерности: при наличии резерва времени на нагрев интенсификация нагрева должна происходить на конечном интервале назначенного времени.

Интенсивное снижение нагрева в конце назначенного времени объясняется жесткими условиями достижения конечного температурного состояния нагреваемой заготовки в рассматриваемом случае: $t_{пов}(\tau)=t_{ц}(\tau)=1250^\circ\text{C}$.

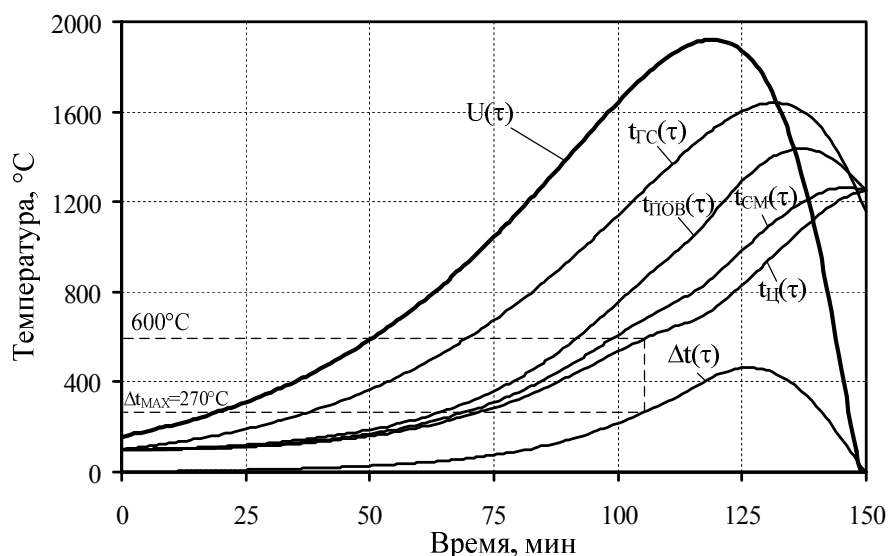


Рис. 2. Расчетные траектории изменения температурных параметров $U(\tau)$, $t_{гс}(\tau)$, $t_{пов}(\tau)$, $t_{см}(\tau)$, $t_{ц}(\tau)$, и $\Delta t(\tau) = t_{пов}(\tau) - t_{ц}(\tau)$ при энергосберегающем управлении режимом нагрева «холодной» непрерывной заготовки, без учета технологических ограничений

В производственных условиях при реализации топливосберегающих оптимальных режимов нагрева возникают проблемы, связанные с необходимостью учета различных технологических и конструкционных ограничений [14]. Это ограничения: на максимально и минимально возможные значения управляющего воздействия U_{max} и U_{min} ; на максимально допустимое значение температуры греющей среды (рабочего пространства) $t_{гс}^{max}$; на максимально допустимую температуру поверхности (точнее, поверхностного слоя окалины) нагреваемой заготовки $t_{пов}^{max}$; ограничение на максимально допустимый текущий перепад температуры по сечению $\Delta t_{max} = t_{пов}(\tau) - t_{ц}(\tau)$, действующее до достижения температуры центра $t_{ц} = 550 - 600^\circ\text{C}$.

Соблюдение ограничений снижает эффективность оптимального топливосберегающего управления нагревом, т.к. вынуждает на значительных интервалах текущего времени нагрева отказываться от реализации оптимальных температурных расчетных траекторий [7].

В производственных условиях существуют дополнительные причины, препятствующие эффективному использованию оптимальных энергосберегающих режимов нагрева. Основные из них следующие:

1. При существующей общепринятой концепции распределения расходов топлива по зонам печи, ориентированной на поддержание максимальной производительности, наличие на

выходе томительных зон (зон выдержки) с тепловой нагрузкой 10–12% от общей, принципиально, затрудняет реализацию топливосберегающего режима нагрева [15].

Принятая концепция, безусловно, правильная при работе ШГСП с производительностью 800–1000 т/ч сохраняется и при производительности стана 400–600 т/ч, приводя к неоправданно повышенным затратам топлива.

2. Соблюдение основополагающего условия оптимального топливосберегающего режима нагрева объективно увеличивает (в условиях нестационарного режима работы стана) вероятность выдачи на стан недогретой заготовки и возникновения аварийной ситуации, когда потери от остановки стана будут несравнимо большими, чем возможная экономия от снижения затрат топлива на нагрев [16].

3. В условиях нестационарной работы стана, когда производительность непредсказуемо изменяется от 50 до 800 т/ч (см. рис. 1) технологи просто вынуждены иметь в печи необходимый, но часто неоправданно повышенный запас нагретого металла. Поэтому для обеспечения этого запаса интенсивный нагрев переносится в первые отапливаемые зоны. Это приводит к повышенным затратам тепла с отходящими продуктами сгорания и повышенным потерям дорогостоящего металла с окислением при длительной выдержке, при высокой температуре [15].

Анализ результатов математического и физического моделирования программой и технической реализации топливосберегающего оптимального управления процессом нагрева [7] показал, что даже в условиях нестационарной работы высокопро-

изводительного ШСГП, когда в методических печах одновременно нагреваются различные партии заготовок, отличающиеся по теплофизическому состоянию, использование топливосберегающего оптимального управления нагревом возможно после реализации следующих мероприятий:

1. Улучшение информационного обеспечения процесса нагрева за счет: а) использования системы прогнозирования общего времени нагрева на момент подачи в печь очередной заготовки с точностью ± 8 мин и коррекции этого времени с учетом плановых, скрытых и аварийных простоев [7]; б) использования системы программно-инструментального контроля текущего теплового состояния и прогнозирования ожидаемой температуры раската каждой заготовки перед выдачей из печи с точностью $\pm 20^\circ\text{C}$ [6]; в) использования в качестве контролируемого температурного параметра вместо температуры греющей среды $t_{\text{гс}}(\tau)$ температуры поверхности нагреваемого металла (точнее, поверхностного слоя окалины) $t_{\text{пов}}(\tau)$ [16].

Эти мероприятия не требуют значительных капитальных затрат, но способствуют снижению величины УРУТ [9].

2. Использование вместо общепринятого способа распределения расходов топлива по зонам методической печи универсального топливосберегающего способа, обеспечивающего в зависимости от реальной производственной ситуации автоматический переход от режима минимальной продолжительности нагрева на режим оптимального топливосберегающего управления нагревом. Это мероприятие требует определенных затрат на реконструкцию системы трубопроводов распределения газа и воздуха по зонам печи и, возможно, приобретение новых технических средств автоматического контроля и управления [15, 17].

Суть этого мероприятия заключается в разбиении отапливаемой части печи на одинаковые по длине и производимой тепловой мощности индивидуально управляемые зоны. Применительно к отечественным печам стана 2000 ОАО «ММК» это мероприятие заключается в использовании в верхних зонах горелок ГР 750 вместо ГР 350. Для более точного соблюдения оптимальных топливосберегающих расчетных температурных траекторий контролируемого параметра для каждой нагреваемой заготовки целесообразно экономически обоснованное увеличение числа зон нагрева.

В реальных нестационарных условиях работы методических печей сложность реализации оптимального топливосберегающего управления процессом нагрева заключается в том, что при

фиксированной длине зоны на все расположенные в зоне заготовки, часто с различными оптимальными температурными расчетными траекториями, приходится одно управляющее воздействие – расход топлива $V_T(\tau)$ в зону.

Текущее значение расхода топлива поддерживается зонным автоматическим регулятором теплового режима путем стабилизации заданного значения температурного контролируемого параметра или «уставки регулятора». Для обеспечения гарантированного топливосберегающего режима нагрева заготовок с различным тепловым состоянием целесообразно в качестве уставки выбирать самую высокую требуемую температуру для самой «холодной» заготовки или для заготовки, нагрев которой должен быть осуществлен за самое меньшее прогнозируемое время.

В этом случае нагрев «горячих» заготовок в зоне будет осуществляться не по оптимальному топливосберегающему режиму, а по режиму с соблюдением всех технологических ограничений. В итоге это исключит возможную остановку стана на подогрев металла за счет некоторого увеличения общего расхода топлива на печи.

Характерное для начального этапа освоения печей стана 2000 ОАО «ММК» распределение во времени приведенного к длине зоны расхода топлива $V(\tau)$, температуры поверхности $t_{\text{пов}}(\tau)$ и центра $t_{\text{ц}}(\tau)$ для нагреваемой заготовки толщиной 250 мм с начальной температурой 200°C за время 240 мин приведено на **рис. 3** [7].

Заготовка при таком общепринятом способе распределения расходов топлива была нагрета практически за 150 минут, а остальное время – 90 минут до выдачи выдерживалась в печи, подвергаясь повышенному окислению при затратах топлива на поддержание высокого температурного состояния.

В результате проводимых мероприятий, в том числе и по уменьшению величины приведенного к длине 1 зоны расхода топлива с 330 до 140 ($\text{м}^3/\text{ч}/\text{м}$), удалось уменьшить величину УРУТ до 56,5 кг/т при 70% заготовок горячего посада.

Результаты расчета распределения уставок температуры греющей среды $t_{\text{гс}}^3$, измеряемой термомпарами, по зонам методической печи стана 2000 ОАО «ММК» при существующем способе распределения топлива по зонам представлены на **рис. 4**.

Результаты расчета распределения уставок $t_{\text{гс}}^3(\tau)$ по зонам печи при реализации оптимального топливосберегающего управления нагрева «холодных» заготовок представлены на **рис. 5**.

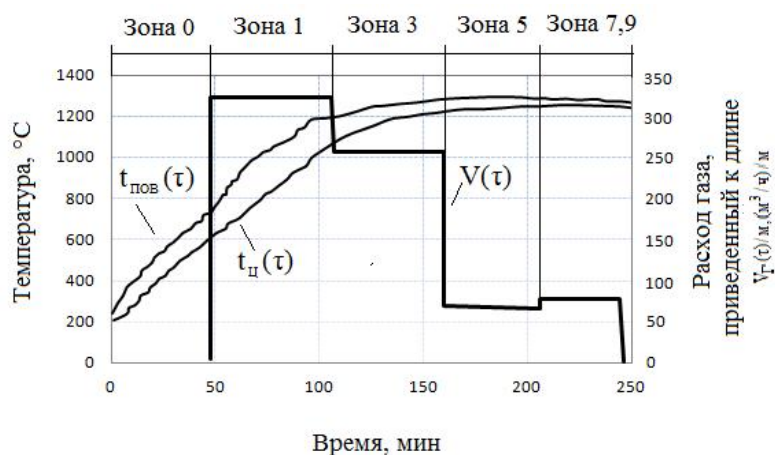


Рис. 3. Изменение во времени приведенного расхода топлива $V(\tau)$, $t_{пов}(\tau)$, $t_{ц}(\tau)$ при нагреве непрерывнолитых заготовок в печах стана 2000 ОАО «ММК» (при УРУТ 62,9 кг/т за 240 мин)

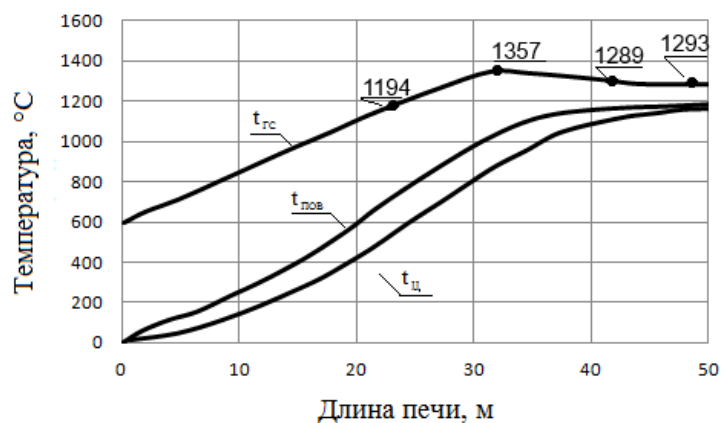


Рис. 4. Результаты расчета уставок температуры в зонах методической печи стана 2000 ОАО «ММК» для существующего способа распределения расходов топлива (время нагрева 220 мин, УРУТ 56,5 кг/т)

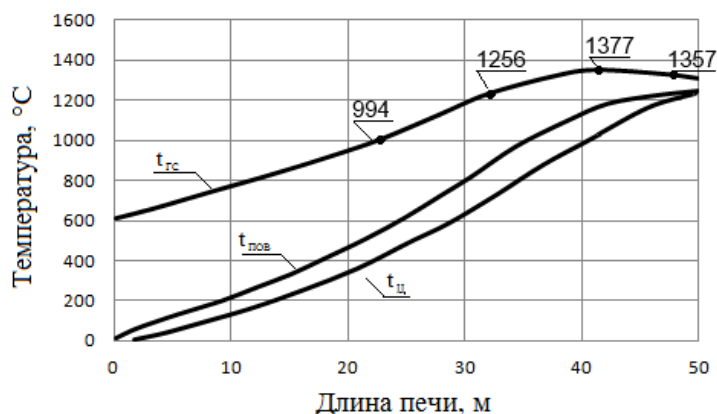


Рис. 5. Результаты расчета уставок температуры в зонах методической печи стана 2000 ОАО «ММК» для оптимального топливосберегающего нагрева заготовок холодного посада (время нагрева 220 мин, УРУТ 53,4 кг/т)

Расчет произведен при выполнении условия замены в зонах № 5, 7, 9 горелок ГР-350 на ГР-750 и использовании в качестве контролируемо-

го параметра температуры греющей среды $t_{гс}(\tau)$, измеряемой термопарой ТПР.

Использование в качестве контролируемого

параметра $t_{\text{пов}}^3(\tau)$ за счет повышения целесообразности, а главное – оперативности, управления позволит получить дополнительное снижение УРУТ на 1,5÷3% [9].

Точками на рис. 4 и 5 показаны места уставок датчиков температуры греющей среды (термопар) по длине рабочего пространства отечественных печей верхних зон стана 2000 ОАО «ММК».

Анализ полученных результатов показывает, что даже при использовании в качестве контролируемого параметра очень инерционной температуры греющей среды $t_{\text{гс}}^3(\tau)$ применение оптимального гарантированного топливосберегающего режима управления нагревом в условиях нестационарной работы ШСГП обеспечивает снижение УРУТ на 3.1 кг/т или на 5.5%, даже при нагреве «холодных» заготовок, и позволяет уменьшить потери дорогостоящего металла при его окислении.

Заключение

Использование универсального оптимального топливосберегающего способа распределения расходов топлива при нагреве непрерывнолитых заготовок в условиях нестационарной работы ШСГП позволит: сократить величину УРУТ на 4–6% ,обеспечить гарантированный нагрев заготовок за счет оптимального управления расходами топлива по зонам печи в зависимости от реальной производственной ситуации на стане, с одновременными снижением потерь дорогостоящего металла при окислении.

Список литературы

1. Тайц Н.Ю. Технология нагрева стали. М.: Металургиздат, 1962. 557 с.
2. Мальный С.А. Экономичный нагрев металла. М.: Металлургия, 1967. 192 с.
3. Арутюнов В.В., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. М.: Металлургия, 1990. 239 с.

4. Маковский В.А., Лаврентик И.И. Алгоритмы управления нагревательными печами. М.: Металлургия, 1977. 183 с.
5. Бутковский А.Г., Гольдфарб Э.М., Генкин Э.С. Применение принципа аксимума для оптимизации температурного режима печей // Изв. вузов. Черная металлургия. 1967. №3.
6. Математическая теория оптимальных процессов / Л.С. Понтрягин, В.Г. Болтянский, Р.В. Гамкрелидзе и др. М.: Наука, 1983. 393 с.
7. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Оптимизация режимов управления нагревом заготовок в печах проходного типа: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 376 с.
8. Болтянский В.Г. Математические методы оптимального управления. М.: Наука, 1969. 408 с.
9. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Ахметов Т.У. Энергосберегающий нагрев непрерывнолитых заготовок в нестационарных условиях работы методических печей // Сталь. 2014. №1. 48–52 с.
10. О реализации энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Д.Ю. Жадинский и др. // Сталь. 2005. №12. С. 44–46.
11. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Ахметов У.Б. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 122–128 с.
12. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Экспериментальное исследование эффективности энергосберегающих оптимальных режимов нагрева металла // Автоматизированные технологии и производства. 2014. №6. С. 134–143.
13. Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Бушманова М.В. Оптимизация управления тепловым режимом нагревательных печей // Сталь. 2003. №9. С. 65–67.
14. Парсункин Б.Н., Андреев С.М. Учет ограничений по термонапряжению при энергосберегающем нагреве непрерывнолитых заготовок // Изв. вузов. Черная металлургия. 2003. №4. С. 58–62.
15. Андреев С.М., Парсункин Б.Н., Жадинский Д.Ю. Информационное обеспечение энергосберегающих режимов нагрева непрерывнолитых заготовок перед прокаткой // Металлург. 2005. №2. С. 64–67.
16. Андреев С.М., Парсункин Б.Н. Система оптимального управления тепловым режимом промышленных печей // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. 2013. №2. С. 18–29.
17. Снижение удельного расхода топлива при управлении тепловым режимом по температуре поверхности нагреваемого металла / Б.Н. Парсункин, С.М. Андреев, Т.Г. Обухова и др. // Автоматизированные технологии и производства. 2013. №5. С. 302–309.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

OPTIMAL FUEL-EFFICIENT MODES OF HEATING CONTINUOUSLY CAST BILLETS IN CONTINUOUS REHEATING FURNACES

Parsunkin Boris Nikolaevich – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Andreev Sergey Mikhailovich – Ph.D. (Eng.), Head of the Automated Control System Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Zhadinsky Dmitry Yurievich – Engineer, LLC Elektromont, Magnitogorsk, Russia.

Akhmetova Aigul Uralovna – Student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Lbp40032@yandex.ru.

Abstract. This paper contains a theoretical rationale for feasibility of, and need for replacement of an existing conventional method of distribution of fuel consumption in zones of continuous reheating furnaces for a universal fuel-efficient method ensuring a guaranteed optimal automatic control of heating metal in compliance with all technological and design constraints, when manufacturing hot-rolled wide sheet products, to reduce the unit cost of fuel.

Keywords: Optimal fuel-efficient heating, temperature, fuel distribution, continuously cast billets, heating zones, temperature trajectory, length of the furnace area.

References

1. Taits N. Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Steel heating technology]. Moscow: Metallurgizdat, 1962, 557 p.
2. Maly S. A. *Ehkonomichnyj nagrev metalla* [Low-energy heating of metals]. Moscow: Metallurgy, 1967, 192 p.
3. Arutyunov V. V., Bukhmirov V. V., Krupennikov S. A. *Matematicheskoe modelirovanie teplovoj raboty promyshlennykh pechej* [Mathematical modeling of industrial furnace thermal performance]. Moscow: Metallurgy, 1990, 239 p.
4. Makovsky V.A., Lavrentik I.I. *Algoritmy upravleniya nagrevatel'nymi pechami* [Heating furnace control algorithms]. Moscow: Metallurgy, 1977, 183 p.
5. Butkovsky A.G., Goldfarb E.M., Genkin E.S. Application of the maximum principle to optimize temperature conditions of furnaces. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 1967, no. 3, 173 p.
6. Pontryagin L.S., Boltyansky V.G., Gamkrelidze R.V. et al. *Matematicheskaya teoriya optimal'nykh protsessov* [A mathematical theory of optimum processes]. Moscow: Science, 1983, 393 p.
7. Andreev S. M., Parsunkin B. N. *Optimizatsiya rezhimov upravleniya nagrevom zagotovok v pechakh prokhodnogo tipa: monografiya* [Optimization of billet heating control modes in conveyor furnaces: monograph]. Magnitogorsk: Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2013, 376 p.
8. Boltyansky V. G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya* [Mathematical methods of optimum control]. Moscow: Science, 1969, 408 p.
9. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Akhmetov T.U. Energy-saving heating of continuously cast billets in non-stationary operating conditions of continuous reheating furnaces. *Stal'* [Steel]. 2014, no. 1, pp. 48-52.
10. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Zhadinsky D.Yu. et al. On implementation of energy-saving modes of heating of continuously cast billets before rolling. *Stal'* [Steel]. 2005, no. 12, pp. 44-46.
11. Andreev S. M., Parsunkin B. N., Akhmetov U.B. Development and research of operation of the energy-saving billet heating control system in continuous reheating furnaces of sheet rolling mills. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2014, no. 1, pp. 122-128.
12. Andreev S. M., Parsunkin B. N. Pilot study of efficiency of energy-saving optimum metal heating modes. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Computer-aided technologies and manufacturing]. 2014, no. 6, pp. 134-143.
13. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Bushmanova M. V. Optimization of heating furnace thermal mode control. *Stal'* [Steel]. 2003, no. 9, pp. 65-67.
14. Parsunkin B. N., Andreev S. M. Factoring into thermal stress constraints at energy-saving heating of continuously cast billets. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of higher educational institutions. Ferrous metallurgy]. 2003, no. 4, pp. 58-62.
15. Andreev S. M., Parsunkin B. N., Zhadinsky D.Yu. Information support of energy-saving modes of heating of continuously cast billets before rolling. *Metallurg* [Metallurgist]. 2005, no. 2, pp. 64-67.
16. Andreev S. M., Parsunkin B. N. A thermal mode optimum control system for industrial furnaces. *Mashinostroenie: setevoy ehlektronnyj nauchnyj zhurnal* [Mechanical engineering: network electronic scientific journal]. 2013, no. 2, pp. 18-29.
17. Parsunkin B. N., Andreev S. M., Obukhova T.G. et al. Decrease in specific fuel consumption when controlling the thermal mode based on the temperature of the heated metal surface. *Avtomatizirovannye tekhnologii i proizvodstva* [Computer-aided technologies and manufacturing]. 2013, no. 5, pp. 302-309.

Оптимальные топливосберегающие режимы нагрева непрерывнолитых заготовок в методических печах / Парсункин Б.Н., Андреев С.М., Жадинский Д.Ю., Ахметова А.У. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2015. №3. С. 89–96.

Parsunkin B.N., Andreev S.M., Zhadinsky D.Yu., Akhmetova A.U. Optimal fuel-efficient modes of heating continuously cast billets in continuous reheating furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 3, pp. 89–96.