

$\Delta b = (101,6 - 97,09) = 4,51$ кг у. т./т; коэффициент полезного действия печи (технологический) увеличен на 4,05 %, окалинообразование снижено с 1,8 до 1,78 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. М а т е м а т и ч е с к о е моделирование нагрева заготовок в печи с шагающими балками (сопряженная постановка) / В. И. Завелион, Р. Б. Вайс, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 1–2. – С. 113–117.
2. И с с л е д о в а н и е технологии нагрева непрерывнолитых заготовок высокоуглеродистых сталей в печах с шагающими балками / В. И. Тимошпольский, И. А. Трусова, П. П. Петух и др. // Сталь. – 1995. – № 4.
3. А р у т ю н о в В. А., Б у х м и р о в В. В., К р у п е н н и к о в С. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Metallurgia, 1990. – С. 234.
4. А н д р и а н о в В. Н. Основы радиационного и сложного теплообмена. – М.: Энергия, 1972.
5. О ц и с и к М. Н. Сложный теплообмен. – М.: Мир, 1976.
6. И с с л е д о в а н и е нагрева металла в пятияzonных методических печах / В. В. Антонов, Г. Ф. Подольская, Н. А. Кияшко и др. // Сталь. – 1970. – № 1. – С. 81–84.

Представлена техническим советом
ОАО «Алчевский металлургический комбинат»

Поступила 2.04.2001

УДК 669.012.9

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНОЙ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА КОРДОВОЙ СТАЛИ В ПРОХОДНОЙ ПЕЧИ СТАНА 850 РУП «БМЗ»

**Инж. ФИЛИППОВ В. В., докт. техн. наук, проф. ТИМОШПОЛЬСКИЙ В. И.,
инж. ТИЩЕНКО В. А., канд. техн. наук КОЗЛОВ С. М.,
канд. техн. наук, доц. ТРУСОВА И. А., инж. РАТНИКОВ П. Э.**

*Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод»,
Белорусская государственная политехническая академия*

Флагман белорусской металлургии — Республиканское унитарное предприятие «Белорусский металлургический завод» (РУП «БМЗ») является общепризнанным мировым лидером в области выпуска высококачественного металлокорда со сверхпрочными характеристиками. На предприятии с 1999 г. в рамках научно-технического сотрудничества с Белорусской государственной политехнической академией возобновились комплексные экспериментально-теоретические исследования на сталеплавильных и прокатных агрегатах завода, в том числе по освоению кордовой стали с содержанием углерода более 0,85 % (90К, 85К, 100К).

Дуорeverсивный стан 850 Республиканского унитарного предприятия «Белорусский металлургический завод» предназначен для производства

горячекатаных круглых и квадратных заготовок из углеродистых, низко- и высокоуглеродистых сталей. Максимальная производительность (102 т/ч) достигается при прокатке блюмов сечением 0,3×0,4 м на круглый профиль диаметром 150 мм и горячем посаде металла с начальной температурой более 600 °С в нагревательную печь. Подробное описание теплотехнических характеристик агрегата приведено в [1].

Нагревательная печь стана 850 РУП «БМЗ», безусловно, является весьма энергоемким металлургическим агрегатом. Поэтому снижение себестоимости проката за счет рационального использования топливно-энергетических ресурсов позволит значительно повысить конкурентоспособность выпускаемой продукции. Вот почему, несмотря на то, что проблеме минимизации энергопотребления посвящено множество работ (например, [1–5]), задача оптимального использования топлива является крайне актуальной.

В данной работе представлен подход к решению задачи оптимального по критерию минимального расхода природного газа на нагрев призмы прямоугольным сечением 0,25×0,3 м от некоторой начальной температуры до заданной в проходной печи с шагающими балками стана 850 РУП «БМЗ», основанный на использовании метода магистральной асимптотической оптимизации [6].

Опыт авторов свидетельствует о том, что в основе разработки новых оптимальных технологических режимов работы промышленного оборудования должен лежать подход, использующий математическое моделирование исследуемых процессов.

Процесс нагрева термически массивной стальной призмы прямоугольного сечения с учетом переменности теплофизических свойств нагреваемого металла описывается дифференциальным уравнением в частных производных [1]:

$$\rho c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right], \quad (1)$$

$$0 \leq x \leq R_1; \quad 0 \leq y \leq R_2; \quad 0 \leq \tau \leq \tau_k;$$

с начальными, конечными и граничными условиями:

$$T(x, y, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$T(x, y, \tau_k) = T_k; \quad (3)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R_1, y, \tau)}{\partial x} = \alpha (T_{\text{печ}}(\tau) - T(R_1, y, \tau)) + \sigma (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(R_1, y, \tau)); \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(0, y, \tau)}{\partial x} = 0;$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x, R_2, \tau)}{\partial y} = \alpha (T_{\text{печ}}(\tau) - T(x, R_2, \tau)) + \sigma (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(x, R_2, \tau)); \quad (5)$$

$$\frac{\partial T(x, 0, \tau)}{\partial y} = 0,$$

где τ — текущее время; τ_k — время окончания процесса нагрева; R_1, R_2 — соответственно половина длины и ширины грани призмы; x, y — те-

кущие координаты грани призмы, отсчитываемые от центра; $T_{\text{печ}}(\tau)$ — температура печи в момент времени τ ; α , σ — коэффициенты теплообмена конвекцией и излучением соответственно; $\lambda(T)$, $c(T)$, ρ — теплопроводность, теплоемкость и плотность металла; T_0 — начальное равномерное распределение температуры в призме; T_k — конечная температура металла; $T(x, y, \tau)$ — температура в точке (x, y) в момент времени τ .

Адекватность данной математической модели после проведения параметрической идентификации (когда определялись коэффициенты теплообмена α и σ) неоднократно подтверждалась результатами промышленных экспериментов на РУП «БМЗ».

В математической модели (1)—(5) в качестве функции, управляющей процессом нагрева металла, выступает температура печи.

Уравнение теплового баланса для печи непрерывного действия позволяет определить закон изменения температуры печи [7]

$$\begin{aligned} \frac{dT_{\text{печ}}(\tau)}{d\tau} = & A_1 B(\tau) - A_2 T_{\text{печ}}(\tau) - A_3 T_{\text{печ}}^4(\tau) - \\ & - A_4 \left(\int_0^{R_2} \left[\alpha (T_{\text{печ}}(\tau) - T(R_1, y, \tau)) + \sigma (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(R_1, y, \tau)) \right] dy + \right. \\ & \left. + \int_0^{R_1} \left[\alpha (T_{\text{печ}}(\tau) - T(x, R_2, \tau)) + \sigma (T_{\text{печ}}^4(\tau) - T^4(x, R_2, \tau)) \right] dx \right), \end{aligned} \quad (6)$$

$$T_{\text{печ}}(0) = T_{\text{печ}0}, \quad (7)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 — соответствующие коэффициенты; $B(\tau)$ — расход топлива в момент времени τ ; $T_{\text{печ}0}$ — температура печи в начальный момент времени.

Таким образом, представляется возможным управлять динамикой изменения температур греющей среды и металла посредством изменения величины мгновенного расхода топлива.

Предположим, что

$$B_1 \leq B(\tau) \leq B_2, \quad (8)$$

где B_1, B_2 — минимальный и максимальный расходы топлива, определяемые из технологических особенностей конструкции печи.

Тогда задачу о минимизации расхода топлива можно сформулировать следующим образом. Требуется выбрать такой закон изменения расхода топлива $B(\tau)$, удовлетворяющий ограничениям (8), который переводит решение уравнения с частными производными (1), (4), (5) из начального состояния (2) в конечное (3) за время τ_k . При этом температура печи удовлетворяет соотношениям (6), (7), а критерий качества оптимального процесса имеет вид

$$I(B) = \int_0^{\tau_k} B(\tau) d\tau \rightarrow \min_{B_1 \leq B(\tau) \leq B_2} \quad (9)$$

Удельный расход топлива b можно определить как

$$b = \frac{b_{\Sigma} Q_n^p}{7000P} 4,186,$$

где b_{Σ} — суммарный часовой расход топлива в печи; P — производительность печи; Q_n^p — теплота сгорания топлива.

Очевидно, что магистральный режим для задачи (1)–(9) находится в результате интегрирования уравнения (1) с граничными условиями (4), (5) при температуре печи, определяемой соотношением (6) и $B(\tau) \equiv B_1$. Определим теперь управление из принципа максимума. Получим, что оно равно B_1 либо B_2 . Следовательно, исходя из минимизации функционала (9), мера множества, где управление $B(\tau)$ принимает значение B_2 , должна быть как можно меньше. Определим теперь решение задачи (1)–(8) при $B(\tau) \equiv B_1$, $\tau \in [0, \tau^*]$, которое обозначим через $T_1(x, y, \tau)$, $T_{\text{печ}}^1(\tau)$. При этом дифференциальные уравнения (1), (6) с граничными (4), (5) и начальными условиями:

$$T(x, y, \tau^*) = T_1(x, y, \tau^*), T_{\text{печ}}(\tau^*) = T_{\text{печ}}^1(\tau^*), B(\tau) \equiv B_2 \quad (10)$$

имеют решения $T_2(x, y, \tau)$; $T_{\text{печ}}^2(\tau)$, $\tau^* < \tau \leq \tau_k$; $0 \leq x \leq R_1$; $0 \leq y \leq R_2$, удовлетворяющие ограничению (3), а при большем значении τ^* ограничение (3) не выполняется. Тогда управление, построенное подобным образом, является оптимальным.

Следовательно, чтобы построить оптимальный температурный режим работы печи, необходимо найти момент переключения управления $B(\tau) — \tau^*$. Определить момент переключения τ^* можно каким-либо численным методом (например, методом дихотомии).

Таким образом, оптимальный режим работы печи является двухступенчатым: вначале идет монотонный нагрев металла с минимально возможной температурой греющей среды или наименьшим расходом топлива, а затем — форсированный нагрев до требуемой температуры.

Для решения поставленной задачи было разработано специальное программное обеспечение для ПЭВМ и выполнена серия расчетов для случая нагрева в печи заготовок из кордовой стали 80К при следующих исходных данных: сталь — 80К; $R_1 = 0,15$ м; $R_2 = 0,125$ м; $\alpha = 30$ Вт/(м²·К); $\sigma = 2 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); $\rho = 7800$ кг/м³; $T_0 = 27$ °С; $T_k = 1200$ °С; $T_{\text{печ}0} = 500$ °С.

На рис. 1 показаны изменения температуры печи и металла в характерных точках сечения прямоугольной призмы для заданного оптимального режима расхода топлива при производительности печи $P_1 = 45$ т/ч (а) и $P_2 = 70$ т/ч (б) соответственно. Расход топлива в печи при этом соответственно составил 1655 м³/ч и 2750 м³/ч. Другие результаты расчетов сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета оптимальных режимов нагрева заготовок

P , т/ч	τ^* , ч	B_1 , м ³ /ч	B_2 , м ³ /ч	b , кг у.т./т	A_1 , °С/м ³	A_2 , л/ч	A_3 , 1/(ч·°С ³)	A_4
45	1,08	585	1070	43,5	7,5	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-12}	$8 \cdot 10^{-6}$
70	0,29	980	1770	46,48	5	$5 \cdot 10^{-6}$	10^{-12}	$8 \cdot 10^{-6}$

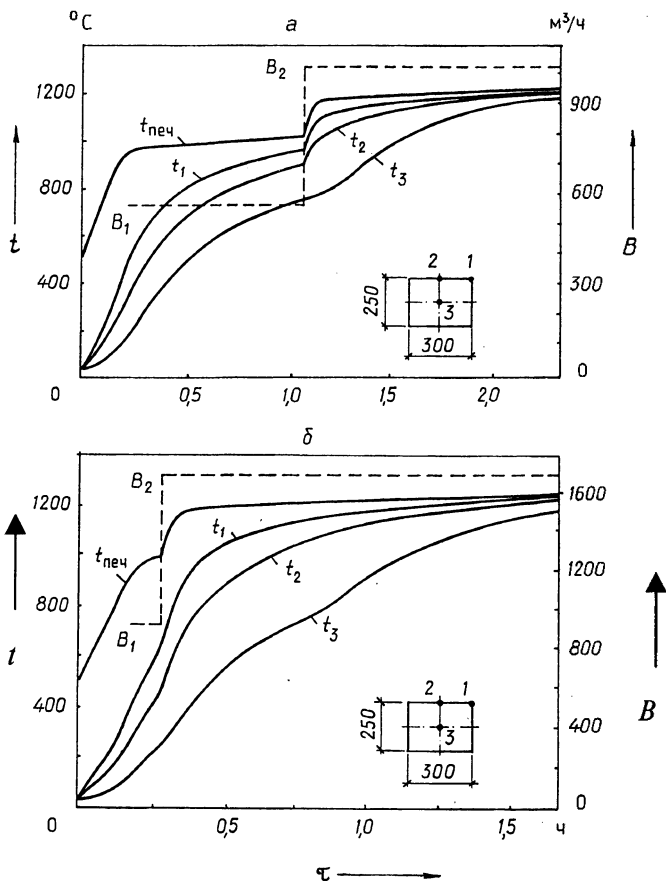


Рис. 1

Максимальное отклонение температуры металла от заданной в конце нагрева не превышает $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, что свидетельствует об удовлетворительном равномерном прогреве слитка.

При реализации оптимального режима нагрева в реальной печи необходимо учитывать ограничения на скорость изменения температуры греющей среды в каждый момент времени, поскольку технологические зоны печи не являются изолированными. Подобный прием позволяет получить рациональные режимы нагрева металла, которые легче реализуются на практике и с большей степенью точности соответствуют действительности.

На основе анализа режимов нагрева кордовых марок сталей на примере стали 80К, проведенных предварительных экспериментов и расчетных работ был разработан и апробирован в промышленных условиях новый режим нагрева металла, полученный за счет перераспределения в соответствии с теоретическими предпосылками расхода топлива в технологических зонах печи стана 850 (рис. 2). Тепловой баланс и технико-экономические показатели работы печи сведены в табл. 2. При этом суммарные расходы топлива, полученные в производственных условиях ($2765\text{ м}^3/\text{ч}$) и по методу магистральной оптимизации ($2750\text{ м}^3/\text{ч}$), практически совпадают. Сравнение технико-экономических показателей тепловой работы печи по действующему и предлагаемому режимам показывает значительное снижение удельного расхода топлива

(с 49,4 кг у. т./т до 46,7 кг у. т./т), а также уменьшение величины угара металла с 1,1 до 0,9 %.

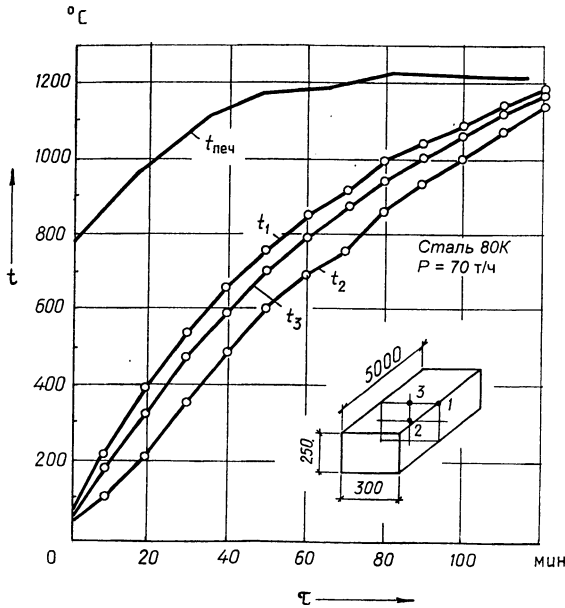


Рис. 2

Таблица 2

Тепловой баланс нагревательной печи при работе по рациональному режиму (производительность — 70 т/ч, суммарный расход топлива — 2765 м³/ч)

Статья прихода	кВт	%
1. Теплота от горения топлива	26632,77	82,91
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	4465,57	13,91
3. Теплота, вносимая топливом	23,21	0,07
4. Теплота экзотермических реакций окисления железа	988,75	3,08
ВСЕГО:	32110,30	100,00
Статья расхода	кВт	%
1. Теплота, затраченная на нагрев металла	16039,33	51,80
2. Теплота, уносимая уходящими продуктами сгорания	9731,83	31,40
3. Потери теплоты теплопроводностью через кладку	2300,00	7,40
4. Потери теплоты излучением через открытые отверстия	577,46	1,86
5. Потери теплоты с окалиной	284,97	0,92
6. Потери теплоты с охлаждающей водой	1370,20	4,42
7. Неучтенные потери	637,20	2,05
ВСЕГО:	30941,00	100,00

Удельный расход условного топлива $b = 46,7$ кг у. т./т, КПД — 60,22 %.

Полученные результаты исследований подтвердили априорное предположение авторов об имеющихся резервах при нагреве кордовых марок сталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тимошпольский В. И. Теплотехнологические основы металлургических процессов и агрегатов высшего технического уровня. — Мн.: Наука і тэхніка, 1995. — 256 с.
2. М а л ы й С. А. Экономичный нагрев металла. — М.: Металлургия, 1967. — 191 с.

3. Г о л ь д ф а р б Э. М., И б р я е в В. С. Оптимальный режим нагрева металла по критерию минимума суммарной стоимости расходуемого топлива и потерь металла на окисление // Изв. вузов. Черная металлургия. — 1971. — № 12. — С. 144–148.

4. В ы б о р режима нагрева металла с минимальным расходом топлива / Н. Ю. Тайц, Л. А. Гузов, В. М. Ольшанский, Ю. С. Борбоц // Изв. вузов СССР. Черная металлургия. — 1975. — № 4. — С. 164–167.

5. О п т и м а л ь н ы й нагрев металла в колодцах контролируемого охлаждения с минимальным расходом газа / Ю. В. Дьяченко, А. А. Терлеев, В. И. Тимошпольский и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). — 1993. — № 11–12. — С. 126–130.

6. Т е п л о т е х н о л о г и я металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. — Мн.: Наука и техника, 1992. — 158 с.

7. К о в а л е в с к и й В. Б., П а п к о в и ч В. Н., К о з л о в С. М. Определение расхода топлива на основе теплового баланса для печей непрерывного действия // ИФЖ. — 1996. — Т. 69. — № 2. — С. 285–290.

Представлена техническим советом
РУП «Белорусский металлургический завод»

Поступила 4.04.2001

УДК 621.311.22

АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ КРИТЕРИЕВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ ВЫБОРЕ СТРУКТУРЫ ЭНЕРГОИСТОЧНИКА

Докт. техн. наук, доц. КАРНИЦКИЙ Н. Б.

Белорусская государственная политехническая академия

На современном этапе развития топливно-энергетического комплекса страны в условиях ограниченных ресурсов повышение надежности и экономичности теплоэнергетического оборудования тепловых электрических станций путем замещения и совершенствования устаревших технологий и оборудования является актуальной научно-технической проблемой отрасли.

Решение возникающих перед энергетикой задач, связанных с эффективным использованием мощности электростанций, реализацией программы технического перевооружения и реконструкции теплоэнергетического оборудования ТЭС, встречает серьезные затруднения из-за недостаточной методической разработанности проблем надежности тепловых электрических станций на стадии их проектирования и в процессе эксплуатации. Это в значительной мере сказывается на глубине разработки подходов к обоснованию и принятию решений по оптимизации структурной надежности энергоблоков и агрегатов ТЭС в условиях их эксплуатации, техперевооружения, реконструкции и продления срока их службы и, как следствие, вызывает нерациональное расходование ресурсов.