УДК 621.1.0.18

НАГРЕВ ЗАГОТОВКИ В ФОРМЕ ПРИЗМЫ ПО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ОГРАНИЧЕНИЯМ

Докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВСКИЙ В. Б., инж. РАДЖУХ М.

Белорусский национальный технический университет

Высокая температура и окислительная атмосфера печи вызывают окисление и обезуглероживание нагреваемого металла. Все эти явления – причина брака прокатного изделия. Процесс обезуглероживания поверхностного слоя, т. е. уменьшение содержания углерода, имеет большее значение при термической обработке, чем в прокатных печах. Тем не менее с этим явлением нельзя не считаться в прокатном производстве, особенно при нагреве легированных сталей. Обезуглероживание приводит к изменению механических свойств обезуглероженного слоя, что вызывает порчу металла [1].

На величину обезуглероженного слоя влияют многие факторы, основные из которых – температура поверхности металла, продолжительность нагрева, состав печной атмосферы, химический состав стали [2].

Предлагаемый подход к решению такого рода задачи основан на выделении наилучших режимов работы печи, с использованием которых определяется оптимальный режим ее функционирования, удовлетворяющий основным технологическим требованиям.

Рассмотрим задачу оптимального по минимуму обезуглероженного слоя нагрева заготовки в форме призмы в условиях радиационно-конвективного теплообмена с учетом ограничений на температуру печи. Согласно допущениям [3] математическая модель процесса нагрева металла посредством радиации и конвекции основывалась на двумерном уравнении теплопроводности с граничными и начальными условиями:

$$\rho C(T)\frac{dT}{dt}=\frac{d}{dx}\left[\lambda(T)\frac{dT}{dx}\right]+\frac{d}{dy}\left[\lambda(T)\frac{dT}{dy}\right], \quad (1)$$

$$0\le x\le R_1,\ 0\le y\le R_2,\ 0\le t\le t_k;$$

• начальные условия (холодный посад)

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

• граничные:

$$\lambda(T)\frac{dT(R_1,y,t)}{dx}=\alpha(T_{\text{пч}}(t)- -T(R_1,y,t))+\sigma(T_{\text{пч}}^4(t)-T^4(R_1,y,t)); \quad (3)$$

$$\frac{dT(0,y,t)}{dx}=0;$$

$$\lambda(T)\frac{dT(x,R_2,t)}{dy}=\alpha(T_{\text{пч}}(t)-T(x,R_2,t))+ +\sigma(T_{\text{пч}}^4(t)-T^4(x,R_2,t)); \quad (4)$$

$$\frac{dT(x,0,t)}{dx}=0,$$

где t – текущее время; t_k – время окончания процесса нагрева; R_1, R_2 – половина длины и ширины узкой грани призмы; x, y – текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от центра; $T_{\text{пч}} = T_{\text{пч}}(t)$ – температура печи (функция управления); $\lambda(T)$, $C(T)$, ρ – теплопроводность, теплоемкость и плотность материала; T_0 – начальное равномерное распределение температуры в призме; $T(x, y, t)$ – температура в точке (x, y) в момент времени t.

Таким образом, принято, что вдоль оси Z изменение температуры незначительно и им можно пренебречь. С учетом технологических ограничений на температуру печи $T_{\text{пч}}$ полагаем:

$$A_1\le T_{\text{пч}}(t)\le A_2,\ t\in[0,t_k], \quad (5)$$

где A_1, A_2 – максимальное и минимальное значения температуры печи соответственно.

Так как в конце нагрева заготовка должна иметь распределение температуры по сечению как можно ближе к заданному равномерному, имеем ограничение

$$\max\left|T(x,\ y,\ t_k)-T_k\right|\le\varepsilon; \qquad (6)$$

$$x\in[0,\ R_1];$$

$$y\in[0,\ R_2],$$

где $\varepsilon > 0$ – некоторая постоянная; T_k – желаемое распределение температуры в призме (ее значение зависит от марки стали и определяется из условий прокатки).

На поверхности призмы образуется обезуглероженный слой с максимальной величиной ω на ребре (самая горячая точка). Его величина в данной точке определяется по закону [2]

$$\omega(t_k)=\int_0^{t_k} k\exp\left\{\frac{-\beta}{T(R_1,R_2,t)}\right\}dt, \qquad (7)$$

где k, β – положительные постоянные, характеризующие величину роста толщины выгоревшего слоя [2].

Задача оптимального управления нагревом заготовки заключается в выборе температуры печи $T_{\text{пч}}(t)$, $0 \le t \le t_k$ в классе кусочно-непрерывных функций, которая удовлетворяет ограничению (5) и на решениях задачи (1)–(5), отвечающих условию (6), доставляет минимальное значение величине $\omega(t_k)$.

Используя результаты [4], можно доказать, что оптимальная температура печи $T^*_{\text{пч}}(t)$ имеет вид

$$T^*_{\text{пч}}(t)=\begin{cases}A_1 & \text{при } 0\le t\le t^*;\\ A_2 & \text{при } 0<t\le t_k,\end{cases}$$

где момент переключения управления t^* определяется следующим образом.

Пусть $T(x, y, t)$ – решение задачи (1)–(4) при $t \in [0, t_1]$, $(x, y) \in [0, R_1][0, R_2]$; $T_{\text{пч}} \equiv A_1$. При этом дифференциальное уравнение (1) с граничными условиями (3), (4) и начальным условием

$$T(x, y, t_1) = T_1(x, y, t_1); \qquad (8)$$

$$T_{\text{пч}} \equiv A_2,$$

имеет решение $T_2(x, y, t_1)$ при $t_1 < t \le t_k$; $0 \le x \le R_1$; $0 \le y \le R_2$ и удовлетворяет ограничению (6), а при большем значении t_1 ограничение (6) не выполняется. Тогда $t^* = t_1$.

Следовательно, чтобы построить оптимальный температурный режим, необходимо найти момент переключения управления t^*.

В силу того что получить аналитическое решение температурной задачи (1)–(4) не представляется возможным, t^* приходится определять численно с применением ЭВМ.

Для решения данной задачи был разработан пакет программ для ЭВМ, позволяющий выполнить следующие функции:

- моделировать работу металлургических печей различных типов;
- идентифицировать процесс нагрева по заданным экспериментальным кривым;
- получать оптимальные температурные режимы металлургической печи по заданным технологическим параметрам для уменьшения величины окалины и обезуглероженного слоя, минимизации расхода топлива;
- сохранять и восстанавливать данные, полученные в результате расчетов и просматривать их в цифровом и графическом виде;
- производить расчеты при неоднородной начальной температуре (горячий посад).

Рассмотрим пример нагрева заготовки 0,125×0,125 м в проходной печи Белорусского металлургического завода [3, 5].

Параметры, характеризующие динамику нагрева и обезуглероживания, выбирались по справочным и экспериментальным данным [1, 2, 5–7]. Для малоуглеродистой стали имеем: R_1 = 0,0625 м; R_2 = 0,0625 м; T_k = 1200 °С; T_0 = 27 °С; t_k = 13800 °С; A_1 = 550 °С; A_2 = = 1250 °С; ρ = 7800 кг/м^3; α = 30 Вт/(м^2·°С); σ = = 2,7 · 10^{-8} Вт/(м^2·°С^4); ε = 20 °С.

По результатам расчетов, момент переключения составляет t^* = 8193,75 °С, обезуглероженный слой в конце процесса – 1,228 мм. Динамика изменения температуры в характерных точках сечения призмы и роста толщины обезуглероженного слоя в процессе нагрева приведена на рис. 1. Суммарный расход газа при этом равен 380 м^3.

Анализ результатов показывает, что после момента переключения t^* = 8193,75 °С происходит интенсивный рост температуры на поверхности и, как следствие, увеличивается интенсивность обезуглероживания. До данного момента времени обезуглероживание было минимальным. При моделировании работы печи в соответствии с технологическим режимом, представленным на рис. 2, обезуглероженный слой составил 1,895 мм, суммарный расход газа – 500 м^3.

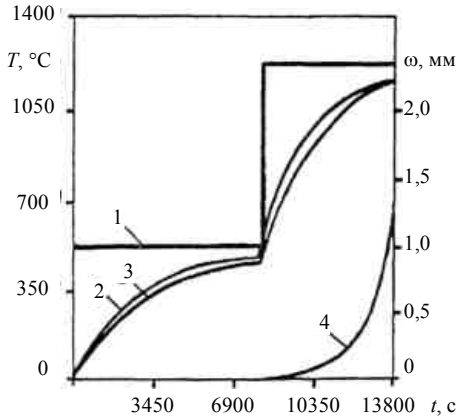

Рис. 1. Графики оптимального нагрева заготовок: 1 – температура среды; 2 – то же поверхности заготовки; 3 – то же центра заготовки; 4 – толщина обезуглероженного слоя

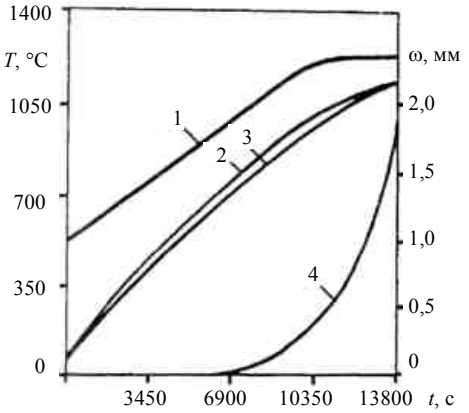

Рис. 2. Графики неоптимального нагрева заготовок: 1 – температура среды; 2 – то же поверхности заготовки; 3 – то же центра заготовки; 4 – толщина обезуглероженного слоя

Следовательно, режим работы печи $T_{пч} \equiv \equiv A_1$ – самый выгодный в том смысле, что если начальные условия одинаковы, то к любому моменту времени величина обезуглероженного слоя будет наименьшей по сравнению с другими режимами нагрева. Он является магистральным [4, 7].

ВЫВОД

Таким образом, на основании исследования магистральных свойств задачи управления нагревом металла в печи получен режим, обеспе-

чивающий выполнение основных технологических ограничений, состоящий из двух интервалов, на которых температура печи соответственно минимальна и максимальна. Достигнуто уменьшение обезуглероженного слоя в 1,5 раза. Суммарный расчетный расход газа при нагреве металла снижен на 120 м^3.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тайц, Н. Ю.** Нагрев металла и нагревательные печи / Н. Ю. Тайц. – Харков, 1939. – 263 с.

2. **Теплообмен** и тепловые режимы в промышленных печах / Ю. И. Розенгарт [и др.]. – Донецк: Вища школа, 1986. – 296 с.

3. **Теплотехнология** металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский [и др.]. – Минск: Наука и техника, 1992. – 158 с.

4. **Лисиенко, В. Г.** Анализ режимов нагрева металла в печах камерного типа с целью уменьшения окалинообразования / В. Г. Лисиенко, В. Б. Ковалевский, Ж. Хо // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1993. – № 7. – С. 86–89.

5. **Интенсификация** теплообмена и уменьшение окисления и обезуглероживания стали в проходных печах / В. Б. Ковалевский [и др.] // Сталь. – 1991. – № 11. – С. 50–52.

6. **Бутковский, А. Г.** Управление нагревом металла / А. Г. Бутковский, С. А. Малый. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1981. – 260 с.

7. **Ковалевский, В. Б.** Оптимизация режимов работы камерной печи / В. Б. Ковалевский, В. И. Панасюк // Техническая кибернетика. – 1993. – № 2. – С. 230–235.

Поступила 06.10.2009