

## 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:

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

$$0 \leq x \leq R_1, \quad 0 \leq y \leq R_2, \quad 0 \leq t \leq t_k;$$

• 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);  $\lambda(T), C(T), \rho$  – 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:

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

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

$$\begin{aligned} \max |T(x, y, t_k) - T_k| &\leq \varepsilon; & (6) \\ x &\in [0, R_1]; \\ y &\in [0, R_2], \end{aligned}$$

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  $\omega$  на ребре (самая горячая точка). Его величина в данной точке определяется по закону [2]

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

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

Задача оптимального управления нагревом заготовки заключается в выборе температуры печи  $T_{пч}(t)$ ,  $0 \leq t \leq t_k$  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  $T_{пч}^*(t)$  имеет вид

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

где момент переключения управления  $t^*$  определяется следующим образом.

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

$$\begin{aligned} T(x, y, t_1) &= T_1(x, y, t_1); & (8) \\ T_{пч} &\equiv A_2, \end{aligned}$$

имеет решение  $T_2(x, y, t_1)$  при  $t_1 < t \leq t_k$ ;  $0 \leq x \leq R_1$ ;  $0 \leq y \leq R_2$  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  $0,125 \times 0,125$  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;  $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\alpha = 30$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\sigma = 2,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С<sup>4</sup>);  $\varepsilon = 20$  °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<sup>3</sup>.

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<sup>3</sup>.

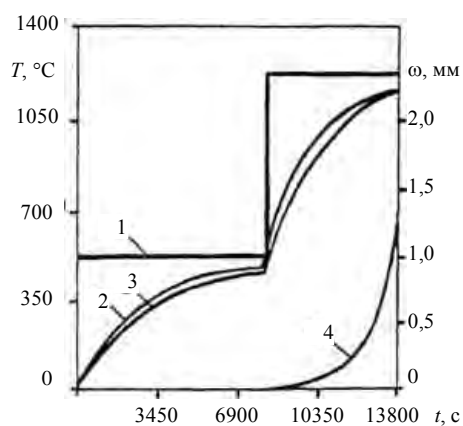


Рис. 1. Графики оптимального нагрева заготовок: 1 — температура среды; 2 — то же поверхности заготовки; 3 — то же центра заготовки; 4 — толщина обезуглероженного слоя

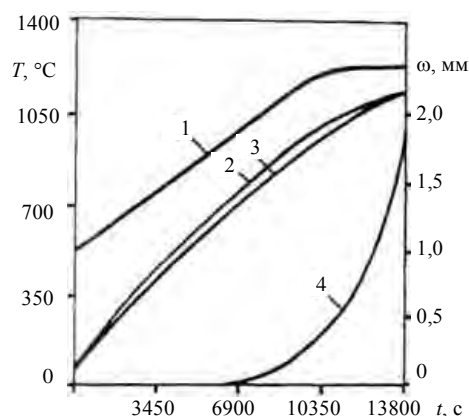


Рис. 2. Графики неоптимального нагрева заготовок: 1 — температура среды; 2 — то же поверхности заготовки; 3 — то же центра заготовки; 4 — толщина обезуглероженного слоя

Следовательно, режим работы печи  $T_{пч} \equiv A_1$  — 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, обеспечивающий 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  $120 \text{ м}^3$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Тайц, Н. Ю.** Нагрев металла и нагревательные печи / Н. Ю. Тайц. — Харьков, 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