

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:

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

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

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

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

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

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

где k, β – 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/м³; $\alpha = 30$ Вт/(м²·°С); $\sigma = 2,7 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·°С⁴); $\varepsilon = 20$ °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 м³.

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 м³.

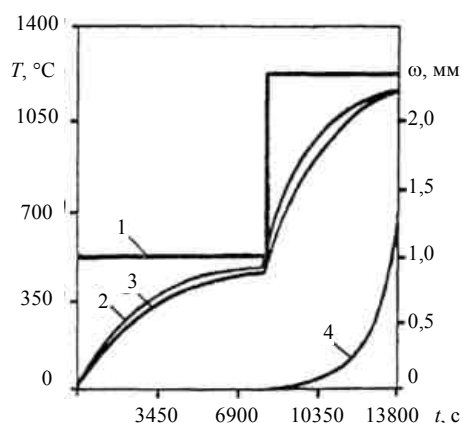


Рис. 1. Графики оптимального нагрева заготовок: 1 — температура среды; 2 — то же поверхности заготовки; 3 — то же центра заготовки; 4 — толщина обезуглероженного слоя

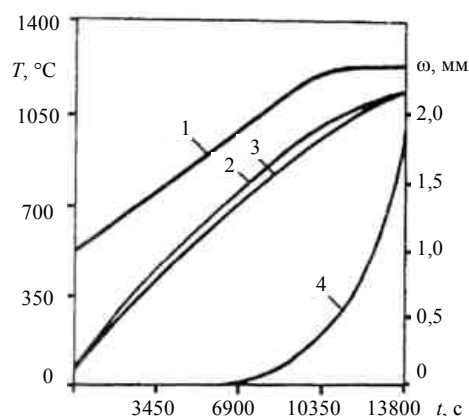


Рис. 2. Графики неоптимального нагрева заготовок: 1 — температура среды; 2 — то же поверхности заготовки; 3 — то же центра заготовки; 4 — толщина обезуглероженного слоя

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 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