



*The technology of chilling and drawing of metal allows to decrease the consumption of fuel by 10–15% and to improve the quality of the heated articles as well.*

В. Б. КОВАЛЕВСКИЙ, М. РАДЖУХ, БНТУ

УДК 621.783.231

## ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧИ С ЦЕЛЮ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА

В последнее время возрос интерес к экспериментальным и теоретическим разработкам по изучению теплотехнических аспектов работы закаочно-отпускных агрегатов машиностроительных производств. Весьма актуальной стала задача определения оптимальных условий термообработки металла в закаочно-отпускных устройствах кузнечного производства машиностроительных предприятий с целью управления формированием его структуры и свойств, а также снижения топливопотребления. Решение проблемы оптимизации основано на тщательном изучении процессов, происходящих при закалке и отпуске изделий, и математическом моделировании их с помощью ЭВМ. Цель оптимизации в этом случае заключается в соблюдении минимальности некоторых целевых функционалов, которые зависят от параметров управления (например, расхода природного газа, подаваемого на горелочные устройства).

Цель настоящей работы – разработка новой технологии закалки различного вида изделий кузнечного цеха Минского автомобильного завода, проведенная с применением методов магистральной оптимизации, которые хорошо себя зарекомендовали при решении проблем, связанных с энергосбережением в нагревательных устройствах прокатного производства.

Согласно [1], математическая модель процесса нагрева металла посредством радиации и конвекции основывалась на двумерном уравнении теплопроводности с граничными и начальными условиями:

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

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

$$\lambda(T) \frac{dT(R_1, y, t)}{dx} = \alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(R_1, y, t)), \quad (2)$$

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

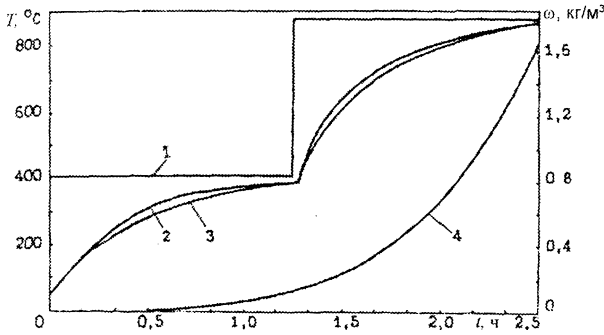
$$\lambda(T) \frac{dT(x, R_2, t)}{dy} = \alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(x, R_2, t)), \quad (3)$$

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

$$T(x, y, 0) = T_0, \quad (4)$$

где  $t$  – текущее время, с;  $t_k$  – время окончания процесса нагрева, с;  $R_1, R_2$  – половина длины и ширины узкой грани призмы, м;  $x, y$  – текущие координаты узкой грани призмы, отсчитываемые от центра, м;  $T_{\text{пч}}(t)$  – температура печи в момент времени  $t$ , °С;  $\alpha$  – коэффициент теплообмена конвекцией, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\sigma$  – коэффициент теплообмена радиацией, Вт/(м<sup>2</sup>·°С<sup>4</sup>);  $\lambda(T)$  – теплопроводность, Дж/(м·с·°С);  $C(T)$  – теплоемкость, Дж/(кг·°С);  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $T_0$  – начальное, равномерное распределение температуры в призме, °С;  $T(x, y, t)$  – температура в точке  $(x, y)$  в момент времени  $t$ , °С.

Доказано, что режимы, оптимальные по окислению, являются также оптимальными по обезуглероживанию и рациональными по топливоиспользованию [2]. Поэтому оптимизацию технологии нагрева проводили на основе асимптотической магистральной оптимизации по критерию окисления стальных заготовок:



Рациональный процесс нагрева заготовок в закалочной печи: 1 – температура печи, °С; 2 – температура поверхности заготовки, °С; 3 – температура центра заготовки, °С; 4 – толщина окалины, кг/м<sup>3</sup>

$$\omega(t_k) = \int_0^{t_k} \frac{\kappa}{T(R_1, R_2, t)} \exp \left\{ \frac{-\beta}{T(R_1, R_2, t)} \right\} dt \rightarrow T_{\min} \leq T_{\text{пч}}(t) \leq T_{\max}, \quad (5)$$

где  $T_{\max}$ ,  $T_{\min}$  – максимальная и минимальная температура печи, определяемые из технологических соображений, °С;  $\kappa$ ,  $\beta$  – положительные постоянные, характеризующие величину роста окалины;  $\omega(t_k)$  – величина окалины, кг/м<sup>3</sup>.

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

$$\max |T(x, y, t_k) - T_k| \leq \varepsilon, \quad (6)$$

$$0 \leq x \leq R_1,$$

$$0 \leq y \leq R_2$$

где  $\varepsilon \geq 0$  – некоторая постоянная, °С;  $T_k$  – желаемое распределение температуры в призме, °С.

Расход топлива в зависимости от динамики изменения температуры печи определяется по формуле

$$\frac{dT_{\text{пч}}(t)}{dt} = A_1 B(t) - A_2 T_{\text{пч}}(t) - A_3 T_{\text{пч}}^4(t) - A_4 \left( \int_0^{R_2} [\alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(R_1, y, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(R_1, y, t))] dy + \int_0^{R_1} [\alpha(T_{\text{пч}}(t) - T(x, R_2, t)) + \sigma(T_{\text{пч}}^4(t) - T^4(x, R_2, t))] dx \right), \quad (7)$$

где  $B(t)$  – расход газа в момент времени  $t$ , м<sup>3</sup>/с;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$  – некоторые постоянные.

По данным промышленного эксперимента, в кузнечном цеху Минского автомобильного завода была предложена новая ресурсосберегающая технология нагрева изделий в закалочной печи (см. рисунки).

### Вывод

Предложенная технология закалки и отпуска металла позволяет снизить расход условного топлива на 10–15%, а также улучшить качество нагреваемых изделий.

### Литература

1. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, А. Б. Стеблов, В. Б. Ковалевский и др. Мн.: Наука и техника, 1992.
2. Управление температурным режимом нагрева металла по минимуму окисления / В. Б. Ковалевский, Р. Б. Вайс, И. А. Трусова и др. // Энергетика... (Изв. высш. учеб. завед. и энерг. объедин. СНГ). 1993. № 5–6. С. 125–128.