

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НАГРЕВА МЕТАЛЛА В КАМЕРНОЙ ПЕЧИ ПРИ МИНИМИЗАЦИИ РАСХОДА ТОПЛИВА

Поливанчук А.С., студент; Василец С.В., доц., к.т.н.

(Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, Украина)

Термическая обработка слябов перед прокаткой или ковкой в печах камерного типа выполняется с целью доведения материала до требуемой температуры на поверхности и по сечению заготовки при соблюдении технологического режима нагрева [1, 2]. Актуальность исследования процесса нагрева заготовок определяется необходимостью минимизации брака готовой продукции и уменьшения себестоимости продукта (путем снижения затрат на топливо). Целью работы является определение зависимости $T_M(t)$ изменения температуры сляба T_M , находящегося в печи камерного типа, от времени t , а также выявление температурного режима в печи, при котором минимизируется расход химического тепла сжигаемого топлива ($Q_{хим}(t) \rightarrow \min$). Целесообразность нахождения указанного температурного режима обусловлена внедрением на металлургических предприятиях технических средств регулирования нагрева взамен устаревших горелок постоянной мощности.

Дифференциальное уравнение состояния нагреваемого сляба для граничных условий третьего рода имеет вид [1]:

$$dT_M/dt = m \cdot (T_\partial - T_M), \quad (1)$$

где $T_\partial = T_\partial(t)$ - температура дымовых газов в функции времени; T_M - температура металла;

$m = \frac{a \cdot k_1}{m \cdot R \cdot r \cdot c_M}$ - коэффициент, зависящий от вида граничных

условий, материала и геометрической формы сляба; a - коэффициент теплоотдачи; k_1 - коэффициент материальной нагрузки; R - радиус слитков; r - плотность металла; c_M - удельная теплоемкость металла; m - коэффициент массивности тела, определяемый зависимостью:

$$m = 1 + \frac{k_3 - 1}{k_2 \cdot k_3} \cdot B_i, \quad (2)$$

причем k_2 - коэффициент усреднения плотности теплового потока, который зависит от формы изделия и условий нагрева; $k_3 = (k_1 + 2) / k_1$ - коэффициент усреднения расслоения температуры; $B_i = a \cdot R / I$ - коэффициент Био; R - толщина прогреваемого слоя (размер тела); I - коэффициент теплопроводности материала.

Задача оптимизации температурного режима нагрева металла по минимуму расхода топлива заключается в выборе такого управляющего воздействия $T_\partial(t)$, которое за весь процесс нагрева заготовки обеспечит наименьшие затраты химического тепла сжигаемого топлива [1]:

$$Q_{хим}(t_k) = T_p \int_0^{t_k} \frac{q \cdot F_M + Q_{nom}}{T_p - T_\partial} dt = \min_{T_\partial} \quad (3)$$

где t_k - общая продолжительность нагрева; T_p - расчетная температура газов; F_M - площадь тепловоспринимающей поверхности слитков; $Q_{nom} = k \cdot F_{кл} \cdot (T_\partial - T_\partial)$ - тепловые потери печи, пропорциональные температуре греющей среды; T_∂ - температура окружающего воздуха; k - коэффициент теплопередачи через кладку; $F_{кл}$ - площадь наружной поверхности кладки; $q = \frac{a}{m} \cdot (T_\partial - T_\partial)$ - плотность теплового потока.

С учетом выражений для тепловых потерь печи и плотности теплового потока критерий оптимальности нагрева металла с наименьшими затратами химического тепла топлива имеет вид:

$$Q_{хим}(t_k) = M_0 \cdot \int_0^{t_k} \frac{(T_\partial - T_M) + k_{nom} \cdot (T_\partial - T_\partial)}{T_p - T_\partial} dt, \quad (4)$$

где $M_0 = \frac{a \cdot F_M \cdot T_p}{m}$; $k_{nom} = \frac{m \cdot k \cdot F_{кл}}{a \cdot F_M}$ - коэффициент относительных потерь тепла.

Моделирование процесса нагрева металла в камерной печи при нахождении оптимального температурного режима может быть осуществлено согласно зависимостям (1) и (4) с использованием компьютерной модели, представленной на рис. 1.

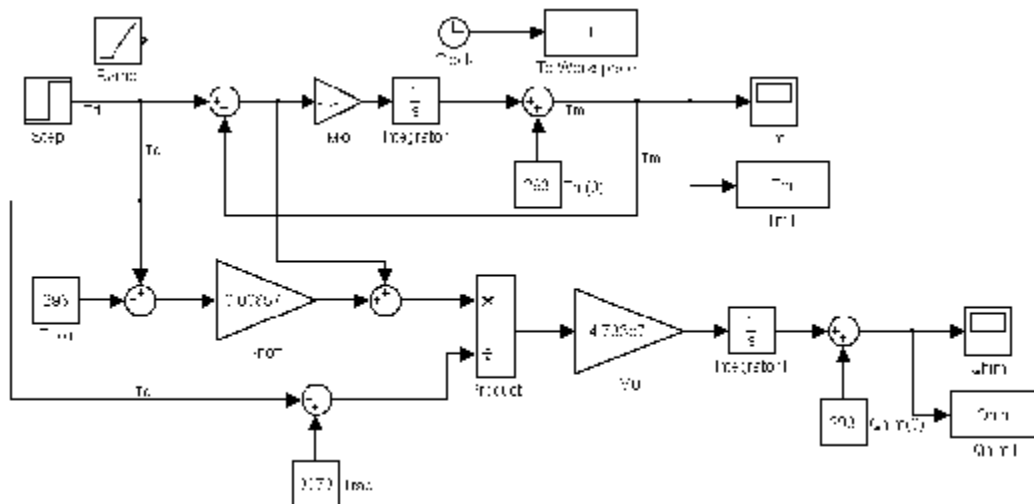


Рисунок 1 – Компьютерная модель процесса нагрева стали в камерной печи

При моделировании системы рассматривается печь камерного типа со следующими параметрами: количество нагреваемых слитков – 12шт; $R = 0,384$ м; начальная и конечная среднемассовая температура: $T_0 = 293$ К $T_{M.K.} = 1498$ К; $r = 7800$ кг/м³; $c_M = 0,7$ кДж/кг/К; $a = 406$ Вт/м²/К; $I = 45$ Вт·К/м;

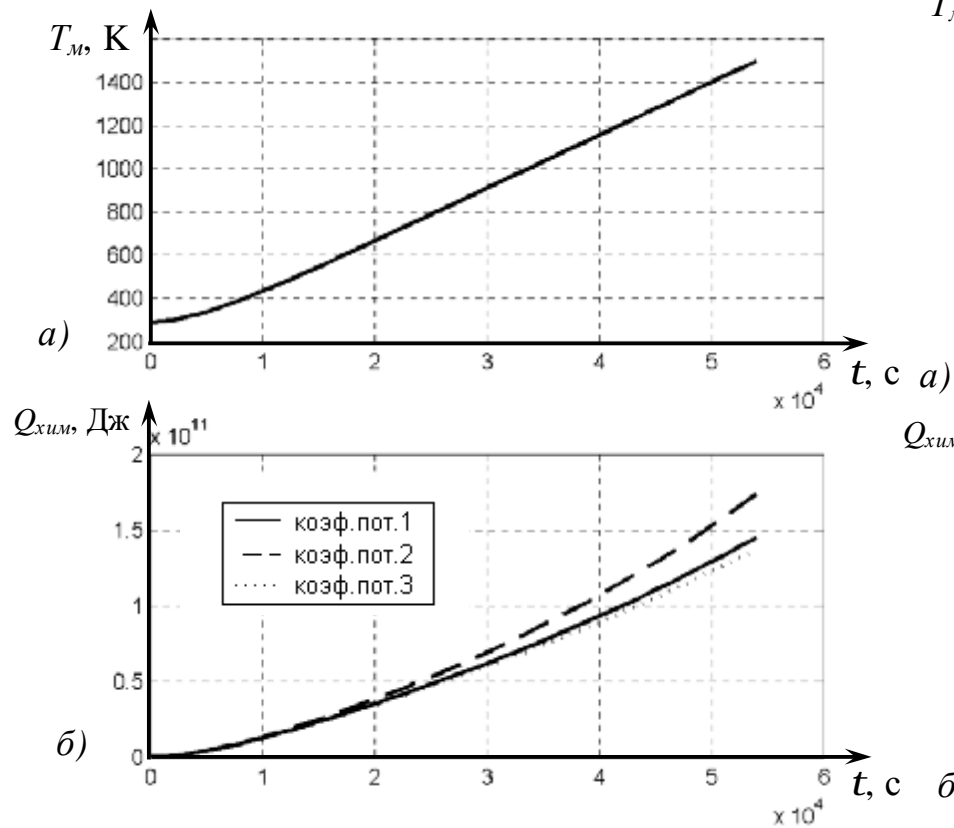


Рисунок 2 – Графики зависимостей $T_m(t)$ (а) и $Q_{хим}(t)$ (б) при линейном возрастании температуры дымовых газов для различных значений коэффициента потерь

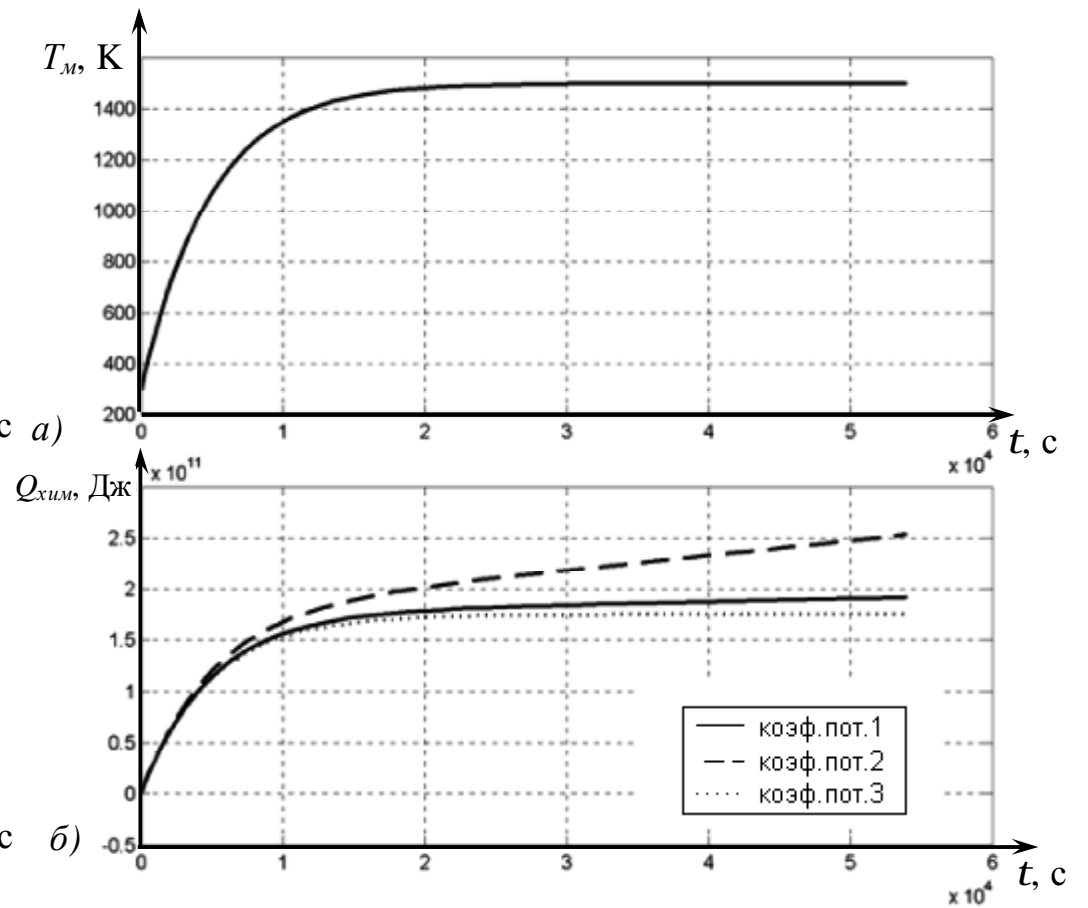


Рисунок 3 – Графики зависимостей $T_m(t)$ (а) и $Q_{хим}(t)$ (б) при ступенчатом возрастании температуры дымовых газов для различных значений коэффициента потерь

$T_g = 293 \text{ K}$; $T_p = 3073 \text{ K}$; $k = 2 \text{ Вт/м}^2/\text{К}$; $F_{кл} = 66 \text{ м}^2$; $F_M = 70,8 \text{ м}^2$; общая продолжительность нагрева составляет $t_k = 14,7 \text{ ч}$. Для таких условий: $B_i = 3,465$; $m = 1,866$; $m = 2,075 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; $M_0 = 4,73 \cdot 10^7 \text{ Вт}$; $k_{ном} = 8,57 \cdot 10^{-3}$.

С использованием обоснованной модели системы осуществлено моделирование нагрева заготовки в печи при линейном (рис. 2) и скачкообразном (рис. 3) повышении температуры дымовых газов для трех значений коэффициента потерь $k_{ном}$ (табл. 1).

Таблица 1 – Величины $Q_{хим}$ за время нагрева

№	$k_{ном}$	Температура дымовых газов нарастает		$\Delta Q_{хим}, \%$
		линейно	ступенчато	
		$Q_{хим.лин.}, \text{ Дж}$	$Q_{хим.ступ.}, \text{ Дж}$	
1	$8,57 \cdot 10^{-3}$	$1,452 \cdot 10^{11}$	$1,918 \cdot 10^{11}$	24 %
2	$4 \cdot 10^{-2}$	$1,739 \cdot 10^{11}$	$2,535 \cdot 10^{11}$	31 %
3	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,374 \cdot 10^{11}$	$1,752 \cdot 10^{11}$	22 %

Из анализа данных табл. 1 следует, что более экономичным является нагрев заготовки при линейном повышении температуры дымовых газов по сравнению со ступенчатым увеличением, поскольку в первом случае требуется меньше химического тепла сжигаемого топлива ($Q_{хим.лин.} < Q_{хим.ступ.}$ для трех рассмотренных значений коэффициента потерь). Для оценки эффективности линейного повышения T_g может быть использована зависимость:

$$\Delta Q_{хим} = \frac{Q_{хим.ступ.} - Q_{хим.лин.}}{Q_{хим.лин.}} 100\% . \quad (5)$$

Согласно результатам моделирования, экономия топлива в печи камерного типа достигается при линейном повышении температуры дымовых газов по сравнению со ступенчатым (для различных значений $k_{ном}$ экономия для заданных условий составила от 22% до 31%). В ходе дальнейших исследований целесообразно разработать технические предложения по автоматизации управления температурой в печи при использовании горелок со значительным коэффициентом регулирования или установке дополнительных горелок малой мощности, включаемых согласно специальному алгоритму.

Перечень ссылок

1. Высокотемпературные теплотехнические процессы и установки в металлургии: [учебн. пос.] / М.П. Ревун, Б.Б. Потапов, В.М. Ольшанский, А.В.Бородулин. – Запорожье: ЗГИА. – 2002. - 443 с.
2. Расчет автоматических систем контроля и регулирования металлургических процессов / Кравцов А.Ф., Зайцева Е.В., Чуйко Ю.Н. – К., Донецк: Вища школа. - 1981. - 320 с.