

УДК 621.785.52

Г.Г.Тюхай, ассистент;

Д.А.Липницкий, аспирант

**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТНЫМ НАГРЕВОМ  
ДЕРЕВООБРАБАТЫВАЮЩЕГО ИНСТРУМЕНТА С ЕГО  
МИНИМАЛЬНЫМ НАУГЛЕРОЖИВАНИЕМ**

The mathematical model of speed heating of woodworking tools is given in the article the work. The choice of regulation system parameter is made and its stability is estimated.

Среди таких прогрессивных методов обработки металлических изделий, как нагрев в газовых печах, нагрев токами высокой частоты и нагрев прямым пропусканием тока, особое место занимает электротермический псевдооживленный слой (ЭПОС) частиц графита. Данный метод сочетает в себе особенности вышеперечисленных методов, и, кроме того, процесс дополнительно интенсифицируется благодаря перемешиванию дисперсных частиц и газа, а также наличием микроразрядов различной частоты и длительности. При этом значительно сокращается объем последующей механической обработки, уменьшается окисление поверхности изделия и снижается его деформация из-за более благоприятного распределения остаточных напряжений.

Особенно важное значение имеет то обстоятельство, что ЭПОС создает возможности для полной автоматизации и программирования не только отдельных операций, но и всего комплекса термической обработки изделий.

Управление процессом скоростного нагрева в ЭПОСе связано с теплообменом между поверхностью изделия и частицами слоя. При этом мощность, выделяемая в "тонком" слое окружающих изделие микроразрядов, достигает сотен ватт на  $1 \text{ см}^2$  поверхности и скоростной нагрев проходит в неизотермических условиях. В этой связи температурный режим необходимо выбрать таким, при котором будет достигнута оптимально возможная по условиям технологии скорость нагрева изделия. Для получения оптимальной скорости нагрева изделий различной толщины и химического состава необходимо осуществить гибкое управление интенсивностью теплообмена в достаточно широких диапазонах.

Задача определения оптимальной интенсивности нагрева изделия, обеспечивающей минимальное время нагрева и эффективное ис-

пользование электрической энергии, заключается в выборе плотности теплового потока как функции времени.

Скоростной нагрев изделия предполагает наличие математической модели, которая учитывает бы процессы, происходящие в "тонком" слое "изделие-частица". При описании процесса целесообразно во избежание насыщения поверхности изделия выбрать в качестве управляющего параметра плотность тока на поверхности изделия, а возмущающего параметра - скорость газового потока, при которых насыщение стали углеродом было бы сведено к минимуму. За выходные параметры принимаем температуру и массовое содержание углерода в поверхностном слое изделия. В качестве изделия используется образец-электрод из Ст.3 [1]. Потерями тепла через верхнюю и нижнюю поверхности образца можно пренебречь. Нагрев всех точек боковой поверхности идет идентично. Аксиальный градиент температуры отсутствует.

Управляющее воздействие - удельный тепловой поток на поверхности образца, являющийся только функцией времени. Необходимо обеспечить скоростной нагрев образца до заданной температуры, соответствующей минимальному отклонению от исходного содержания углерода в образце.

Задачу запишем в виде

$$\frac{\partial T(r, \tau)}{\partial \tau} = a \cdot \left( \frac{\partial^2 T(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right);$$

$$\frac{\partial C(r, \tau)}{\partial \tau} = D [T(R, \tau)] \left( \frac{\partial^2 C(r, \tau)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial C(r, \tau)}{\partial r} \right);$$

$$T(r, 0) = T_0;$$

$$\frac{\partial T(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial r} = g_0 (1 - e^{-k\tau});$$

$$C(r, 0) = C_0;$$

$$\frac{\partial C(0, \tau)}{\partial r} = 0; \quad -D [T(R, \tau)] \frac{\partial C(R, \tau)}{\partial r} = \beta (C_n - C(R, \tau)),$$

где

$$D [T(R, \tau)] = D_0 \exp \left( - \frac{E}{RT(R, \tau)} \right);$$

$$0 < r < R, \quad 0 < \tau < t.$$

Удельный тепловой поток  $g_0(1 - e^{-k\tau})$  пропорционален плотности тока на поверхности образца. Нагрев образца следует вести таким образом, чтобы в момент окончания процесса  $\tau = t$  среднее аддитивное отклонение массового содержания углерода от исходного было минимальным:

$$I_1 = \int_0^R [C(r, t) - C_0(r)]^2 dr.$$

Температура образца в момент времени  $\tau = t$  пропорциональна:

$$I_0 = \int_0^R [T(r, t) - T^*(r)]^2 dr + \varepsilon \int_0^t [g_0(1 - e^{-k\tau})]^2 d\tau,$$

где  $g_0 = a_0 + a_1j + a_2w + a_3dr$ ;

$C_0(r)$  - исходное массовое содержание углерода;

$T^*(r)$  - заданное значение температуры.

Адекватность разработанной модели реальному процессу определялась сопоставлением экспериментальных данных с расчетными, полученными с помощью ЭВМ.

Для образца диаметром 17 мм и длиной 36 мм получены значения параметров: плотность тока на поверхности образца 3,61 А/см<sup>2</sup>, скорость газового потока 0,26 м/с, оптимальное время нагрева 231 с. Для частиц графита с эквивалентным диаметром 127 мкм температура образца составила 1049,9°C, а с диаметром 250 мкм - 777,43°C при изменении удельного потока соответственно 145 и 160 кВт/м<sup>2</sup>. Массовое содержание углерода, согласно полученным расчетным данным, практически оставалось исходным. Результаты же экспериментального исследования свидетельствуют о росте массового содержания углерода в поверхностном слое образца из Ст.3. Возможно, при длительности микроразрядов порядка 5-40 мкс локальный удельный тепловой поток достигает 1010 Вт/м<sup>2</sup> и металл в этой зоне расплавляется, что приводит к увеличению содержания углерода до 0,4÷0,6%, а в отдельных случаях до 4,3%.

Автоматизированная система управления скоростным нагревом может быть представлена такими составными звеньями управляющих устройств, как усилители, тиристорные источники питания, двигатель постоянного тока, газодувка (рис.1). Ввиду того, что их быстродействие во много раз выше, чем реакция ЭПОСа, инерционностью этих устройств можно пренебречь. Передаточную функцию объекта

(образца), нагреваемого в ЭПОСе, представим состоящей из инерционного звена первого порядка и звена запаздывания в виде

$$W_{об} = \frac{K}{1 + \nu T} e^{-\nu \tau}$$

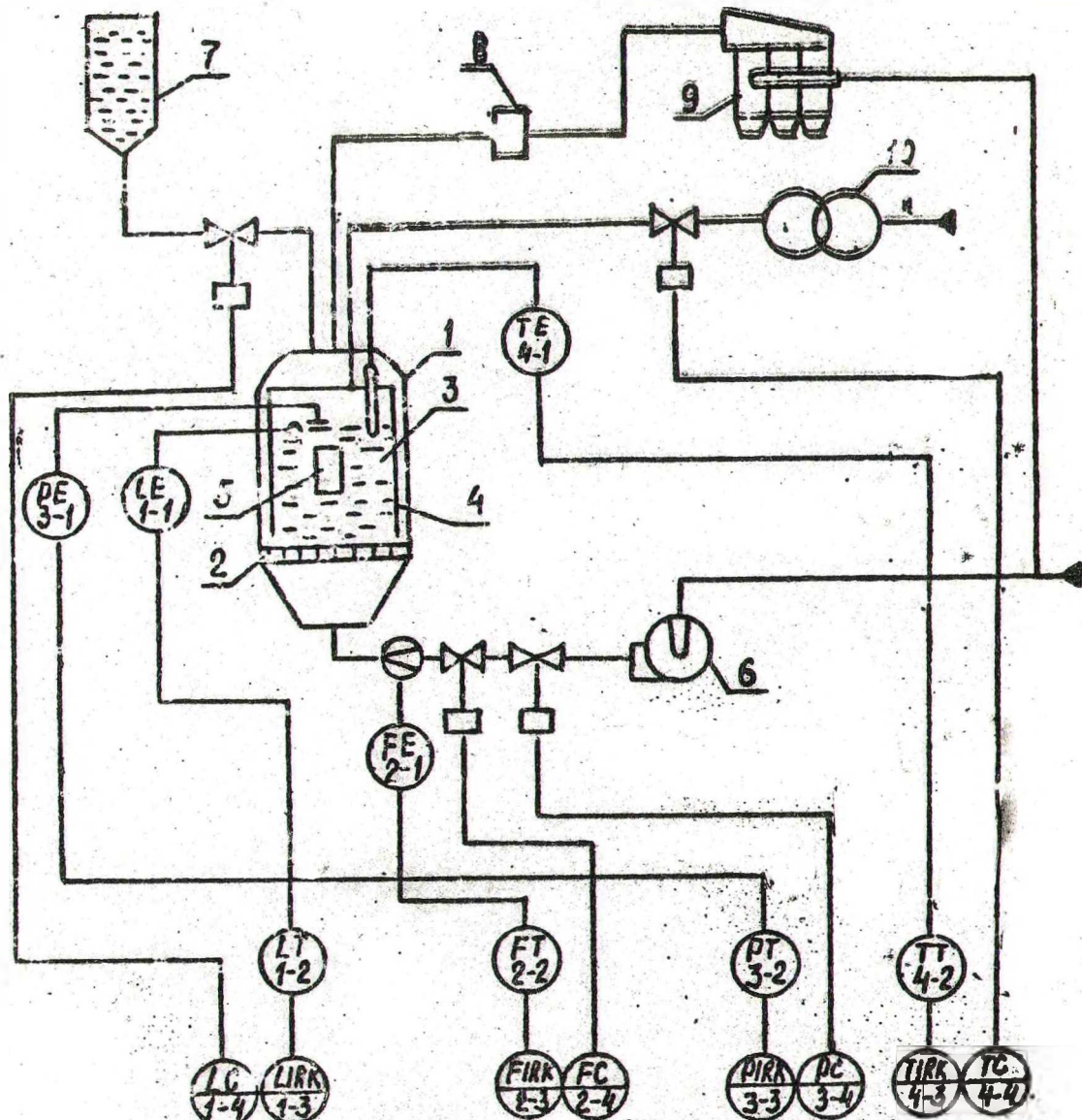


Рис.1. Функциональная схема автоматизации установки с ЭПОС: 1 - камера; 2 - газораспределительная решетка; 3 - частицы графита; 4 - электроды 5 - изделие; 6 - нагреватель газа; 7 - бункер с частицами графита; 8 - фильтр очистки газов; 9 - циклон; 10 - трансформатор.

Установка состоит из ЭВМ, крейта КАМАК с набором функциональных модулей общего назначения (2ЦАП-10, МК-1, АЦП-14, РУР-1р) и аналоговой ЭВМ (тип МН-10). По набранной АВМ модели, полученной из передаточной функции объекта, и экспериментальным данным из работы [1], введенным в ЭВМ, производилась минимизация целевой функции

$$F(k, T, \tau) = \int_0^{\tau} (T_{ак} - T_{рас})^2 dt$$

и определялись оптимальные параметры объекта. Коэффициент усиления составил 280, постоянная времени - 70 с и время запаздывания - 20 с.

Для оценки устойчивости системы регулирования моделирование процесса нагрева выполняли на ЭВМ. Структурная схема ЭВМ состояла из нелинейного элемента с периодом квантования по времени и импульсного элемента  $1(\tau)$ , включенных последовательно с объектом (рис.2). На объект воздействует возмущающий газовый поток, изменяющийся по синусоидному закону.

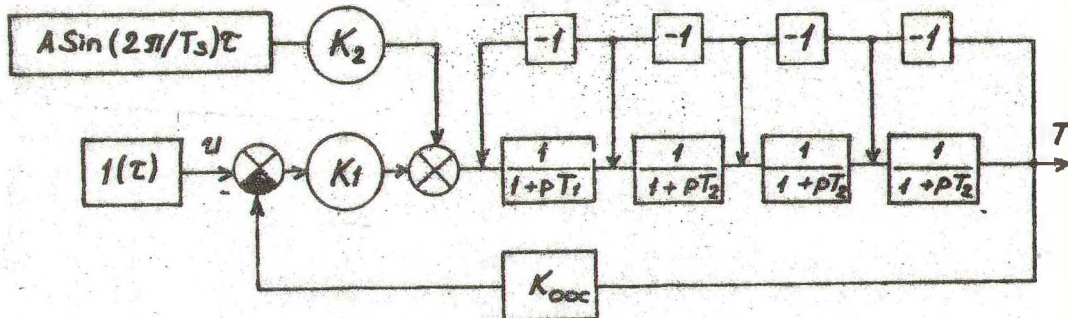


Рис.2. Обобщенная структурная схема скоростного нагрева изделия

Изменение коэффициента отрицательной обратной связи ( $K_{оос}$ ) приводило к тому, что на выходе системы получали отличные друг от друга временные характеристики (рис.3). В отдельных случаях регулятор не всегда стабилизирует процесс и может привести систему к расходящимся колебаниям. При увеличении амплитуды возмущающего воздействия от 0,1 до 0,2 м/с, периоде квантования  $3 \div 10$  с и  $K_{оос} = -0,75 \div 5$  имеем затухающий колебательный процесс, параметры качества которого составили  $400 \div 600$  с, перерегулирование от 6 до 81% и точность регулирования от 4 до 5. Апериодическому процессу регулирования соответствовал  $K_{оос} = -0,75 \div 1$ , отсутствовало

возмущающее воздействие, а период квантования составлял 1 с. Коэффициент усиления находился в пределах 139+158, время переходного процесса составило 250 с.

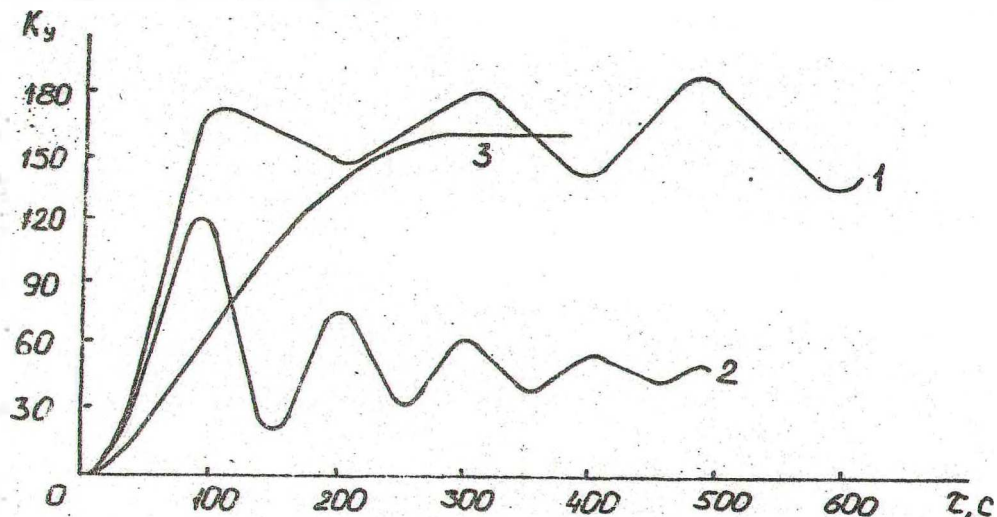


Рис.3. Переходные процессы:

- 1 -  $K_{оос}=-5$ ,  $K_1=K_2=280$ ,  $T_1=140$  с,  $T_2=10$  с,  $T_3=5$  с,  $\Delta\tau=10$  с;  
 2 -  $K_{оос}=-5$ ,  $K_1=K_2=280$ ,  $T_1=140$  с,  $T_2=10$  с,  $T_3=10$  с,  $A=10$ ,  $\Delta\tau=10$  с; 3 -  $K_{оос}=-0,75$ ,  $K_1=280$ ,  $T_1=140$  с,  $T_2=10$  с,  $\Delta\tau=1$  с,

Таким образом, применение электротермического псевдооживленного слоя для скоростного нагрева дегазующего инструмента дополнительно за счет автоматизированной системы управления увеличивает производительность, уменьшает расход энергии, сокращает количество оборудования и, следовательно, снижает себестоимость продукции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Забродский С.С., Бородуля В.А., Тюхай Г.Г. Особенности скоростного нагрева металлических изделий в электротермическом псевдооживленном слое // Изв. АН БССР, серия физико-энергетическая. - 1970, №4, С.109-113.