

## ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ИНДУКЦИОННОЙ НАПЛАВКИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

<sup>1</sup>Сосновский И.А., <sup>2</sup>Кузнечик О.О., <sup>3</sup>Белявин К.Е., <sup>1</sup>Курилёнок А.А.

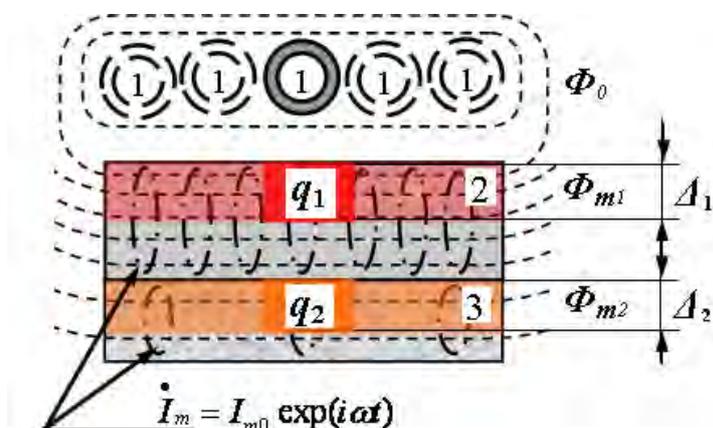
<sup>1</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь,

<sup>2</sup>Институт порошковой металлургии, г. Минск, Беларусь,

<sup>3</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь,  
[sos3@tut.by](mailto:sos3@tut.by)

Индукционная наплавка порошковых материалов достаточно широко [1,2] используется в машиностроении для нанесения износостойких и антифрикционных покрытий на рабочие поверхности изготовленных деталей узлов трения и сопряжения высоконагруженных механизмов. Стабилизация режимов индукционной наплавки порошковых слоев напрямую влияет на качество получаемых таким образом покрытий. Решение этой актуальной задачи может основываться на следующих допущениях.

Процесс индукционной наплавки включает в себя такие хорошо известные в порошковой металлургии [3,4] технологические операции, как формование, нагрев и изотермическая выдержка. При этом формование порошковых слоев может происходить, например, с использованием центробежных сил. Нагрев до температур плавления сформованных слоев осуществляется за счет электротермического действия токов Фуко [5], а также теплообмена и теплопередачи, характерной для порошковых материалов. Источником появления токов Фуко, как показано в работах [6] является электромагнитное излучение, поток которого зависит не только от геометрии и материала индуктора, но и от мощности протекающего в этом индукторе тока. Схематично процесс индукционного нагрева можно представить так, как показано на рис. 1.



**Рис. 1.** Схема формирования тепловых источников при индукционной наплавке порошковых слоев.

$\Phi_0, \Phi_1, \Phi_2$  – магнитные потоки индуктора, в материале основы и порошкового слоя;

$\Delta_1, \Delta_2$  – эффективная глубина проникновения индукционного тока;

$q_1, q_2$  – тепловые источники в материале основы и порошкового слоя

Формируемое в стальной основе и порошковом слое этими источниками (рис. 1) температурное поле определяется известной [6] системой уравнений нестационарной теплопроводности:

$$\Phi_{эм} = \eta \dot{I} \dot{U} = \int_V w_1 dV. \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial t} = a_1 \left[ \frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_1(r, z, t)}{c\gamma_1}, \quad (2)$$

$$r \in [r_2, r_1]; z \in [0, L]$$

$$\frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial t} = a_2 \left[ \frac{\partial^2 T_2(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, z, t)}{\partial z^2} \right] + \frac{w_2(r, z, t)}{c\gamma_2}, \quad (3)$$

где:  $\Phi_{эм}$  – магнитный поток;  $I, U$  – действующие в индукторе сила и напряжение электрического тока;  $\eta$  – коэффициент полезного действия;  $w_1, w_2$  – плотность индуцируемой энергии;  $a_1, a_2$  – коэффициенты теплопроводности стали и порошкового слоя;  $\gamma_1, \gamma_2$  – плотности стальной основы и порошкового слоя.

С учетом [7], граничные условия для уравнений (2) (3) следующие:

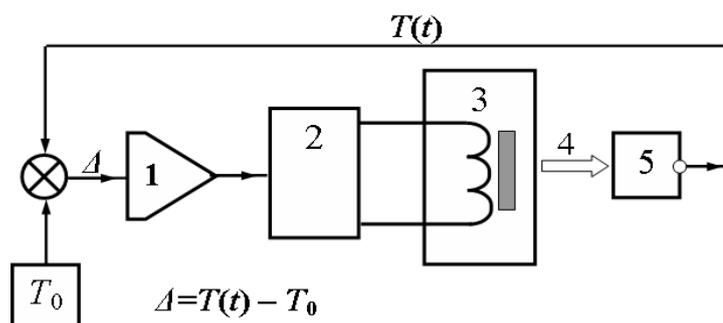
$$\lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_1 [T_1(r, 0, t) - T_c(r, 0, t)]; \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_1} = \alpha_1 [T_1(r_1, z, t) - T_c(r_1, z, t)] \quad (4)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = \alpha_2 [T_2(r, 0, t) - T_N(r, 0, t)]; \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{r=r_2} = \alpha_2 [T_2(r_2, z, t) - T_N(r_2, z, t)]. \quad (5)$$

Условия сопряжения температур на границе раздела двух сред:

$$\lambda_2 \frac{\partial T_2(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2} = \lambda_1 \frac{\partial T_1(r, z, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_2}; \quad T_1(r, z, t) \Big|_{r=r_2} = T_2(r, z, t) \Big|_{r=r_2} \quad (6)$$

Если уравнения (1)–(6) использовать для расчета эталонных значений температуры  $T_0$  на требуемом промежутке времени нагрева, включая изотермическую выдержку, тогда, параметрическая стабилизация индукционной наплавки порошковых слоев может достигаться с помощью системы адаптивного управления [8], схема которой приведена на рис. 2.



**Рис. 2.** Схема адаптивного управления индукционной наплавкой

1 – регулятор; 2 – источник тока; 3 – индуктор и стальная основа с порошковым слоем; 4 – температурное излучение; 5 – пирометр

Повышение устойчивости такого типа управления может достигаться с помощью последовательного интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора, используемого, как правило, в цепи обратной связи систем адаптивного управления для формирования управляющего сигнала. Формирование такого управляющего сигнала ( $u = u(t)$ ) происходит с учетом суммирования трёх основных составляющих, первое из которых пропорционально входному сигналу, второе – является интегральной, а третье – производной от входного сигнала, поступающего в электрическую цепь от первичных преобразователей физических величин (датчиков). Если сигнал  $u(t)$  является детерминированным, тогда:

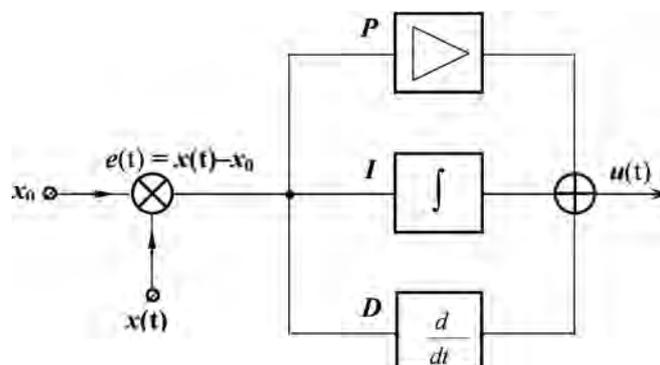
$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (7)$$

а если является цифровым, то:

$$U(n) = K_p E(n) + K_p K_{ip} T \sum_{i=0}^n E(n) + \frac{K_p K_{ip}}{T} [E(n) - E(n-1)], \quad (8)$$

где  $P, I, D$  – пропорциональная, интегральная и дифференциальная составляющие;  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной слагаемых, соответственно;  $E(n) = x_0 - x_i, E(k) = x_0 - x_m$ .

Функциональная схема такого ПИД-регулятора приведена на рис. 3.



**Рис. 3.** Функциональная схема ПИД-регулятора

$x_0$  – задаваемое значение уставки;  $x(t)$  – текущее значение уставки;  $e(t)$  – рассогласование

Как следует из анализа работ [1,2,5–7], применение ПИД-регулятора в цепи способно обеспечить повышение устойчивости стабилизации режимов индукционной наплавки за счет снижения восприимчивости приведенной на рисунке 2 системы адаптивного управления к случайным помехам, возникающим в электрической цепи, содержащей датчики, а также из-за воздействия электромагнитных полей. Появление таких полей, в частности, обусловлено электромагнитным излучением индуктора и работой источника высокочастотного тока в установке индукционной наплавки порошковых материалов.

### Список литературы

1. Белявин, К.Е. Индукционный нагрев в процессах центробежного нанесения покрытий / К.Е. Белявин, И.А. Сосновский, А.Л. Худолей // Научно-теоретический и информационно-методический журнал «Вестник Фонда фундаментальных исследований», № 3 (65), 2013. – С. 68-85.
2. Сосновский, И.А. Исследование закономерностей управления электромагнитными потоками при индукционной наплавке порошкового слоя / И.А. Сосновский, О.О. Кузнечик, К.Е. Белявин, А.А. Курилёнок // Актуальные вопросы машиноведения; сб.научн.тр./ Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. – Вып. 3. – Минск, 2014. – С. 377 – 383.
3. Порошковая металлургия и напыленные покрытия /под ред. В.Н. Анциферова. – М.: Металлургия, 1987. – 792 с.
4. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия. /С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. – М.: Металлургия, 1980. – 496 с.
5. Бабат, Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение. М.–Л.: Энергия, 1965. – 552 с.
6. Лыков, А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 599 с.
7. Петрунин, В.Ф. Ультрадисперсные порошки и нанокристаллы - два типа ультрадисперсных систем. [Текст] / В. Ф, Петрунин. // «Физикохимия ультрадисперсных систем»: сб. тр. V Всероссийской конференции. – Екатеринбург: Инст. Электрофизики УрОРАН, 2001. – С.12 – 21.
8. Александровский, Н.М. Адаптивные Системы Автоматического Управления Сложными Технологическими Процессами /Н.М. Александровский, С.В. Егоров, Р.Е. Кузин. – М.: Энергия, 1973. – 272 С.