

УДК 621.79:536.2

И.А. СОСНОВСКИЙ

Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск

К.Е. БЕЛЯВИН, д-р техн. наук

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

О.О. КУЗНЕЧИК

Институт порошковой металлургии НАН Беларуси, г. Минск

РАЗРАБОТКА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В ИНДУКЦИОННОЙ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ НАПЛАВКЕ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведен анализ индукционной центробежной наплавки порошковых материалов и метода адаптивного управления технологическим оборудованием, обеспечивающего параметрическую стабилизацию режимов процесса. Сформулированы модельные допущения, получены аналитические зависимости и разработана идентификационная модель, позволяющая адаптивной системе параметрической стабилизации режимов индукционной центробежной наплавки не только поддерживать требуемые параметры процесса, но и определять условия его завершения. Показано практическое применение такой системы при получении подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями повышенной износостойкости для путевых машин.

Ключевые слова: идентификационная модель, центробежная индукционная наплавка, адаптивная система, параметрическая стабилизация, порошковая шихта

Введение. Наряду с индукционным нагревом [1], закалкой [2] и сваркой [3], индукционная центробежная наплавка порошковых материалов [4] используется в машиностроении для нанесения антифрикционных и износостойких покрытий на рабочие поверхности деталей узлов трения и сопряжения различных исполнительных механизмов. Для внедрения такого процесса используются имеющиеся в достаточном количестве на машиностроительных и ремонтных предприятиях установки индукционного нагрева [5] со встроенной адаптивной системой параметрической стабилизации режимов процесса [6]. В состав такой системы входят датчики (тока, температуры и вращения) контроля и регулятор, корректирующий работу технологического оборудования, оказывающего непосредственное влияние на изменение состояние объекта управления. В адаптивной системе параметрической стабилизации также используется идентификационная модель для распознавания текущего состояния объекта управления и оценки этого состояния с требуемым состоянием по рассогласованию между текущими показаниями датчиков контроля и эталонными значениями [7]. По величине этого рассогласования такая система способна за счет автоматической корректировки режима работы технологического оборудования и самостоятельно устанавливать и поддерживать в зоне обработки требуемый режим воздействия на объект управления. Повышению эффективности применения индукционной центробежной наплавки может способствовать разработка идентификационной модели, которая позволит имеющейся в составе установок индукционного нагрева адаптивной системе параметрической стабилизации не только более точно поддерживать в зоне наплавки требуемую температуру, но и определять момент окончания этого процесса. Отметим [6, 7], что в индукционной центробежной наплавке объектом управления выступает деталь вращения, представляющая, по сути, стальную основу, одна из поверхностей кото-

рой, обращена к индуктору, а другая — взаимодействует с порошковым материалом.

Целью данной работы является разработка идентификационной модели, которая позволит адаптивной системе параметрической стабилизации не только определять и поддерживать необходимую температуру в зоне индукционной наплавки порошкового материала с более высокой точностью, но и определять момент окончания этого процесса.

Идентификация температуры в зоне индукционной центробежной наплавки и момента окончания процесса по тепловому излучению и индукционному току. Как показано в работах [4, 8], в основе процесса центробежной индукционной наплавки лежат такие широко используемые в порошковой металлургии и сварочном производстве технологические операции, как формование порошкового материала, нагрев до температур наплавки и изотермическая выдержка. При этом длительность изотермической выдержки [4] устанавливается на основе расчетов или экспериментальным путем. Если операции нагрева и изотермической выдержки выполняются за счет действия индукционного тока, а также теплообмена внутри объекта управления, то выполнение операции формования порошкового материала на поверхности стальной основы обеспечивают центробежные силы. Действие этих сил приводит к образованию, как между самими частицами порошка, так и между ними и стальной основой, механических контактов, которые влияют на процесс теплопередачи внутри объекта управления.

В работах [4, 6] показано, что индукционная центробежная наплавка достаточно широко реализуется согласно двум схемам (рисунок 1), одна (см. рисунок 1 а) из которых отражает условия протекания самого процесса, а вторая (см. рисунок 1 б) — адаптивную систему его параметрической стабилизации. Суть такой стабилизации заключается в минимизации за счет корректировки с помощью регулятора работы источника внешнего воздействия возможного отклонения (Δ_n) текущих значений

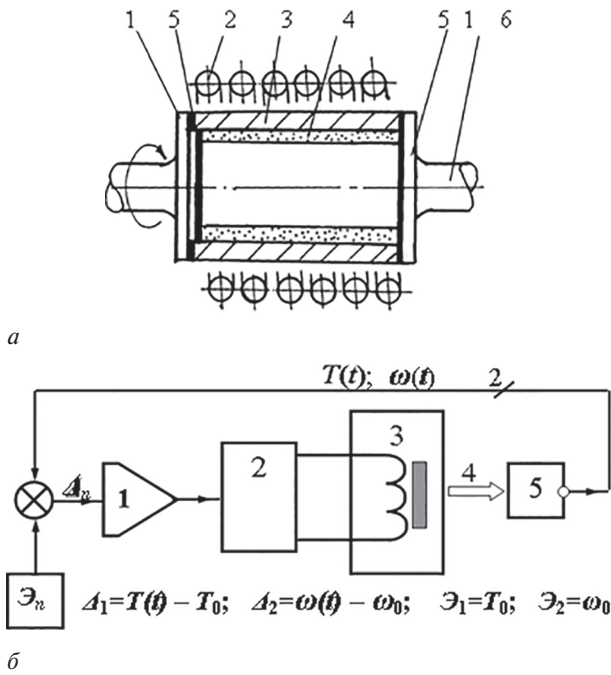


Рисунок 1 — Технологическая и функциональная схемы:
 а — индукционной центробежной наплавки (1 — прижимные крышки; 2 — индуктор; 3 — деталь; 4 — наплавляемый порошок; 5 — прокладки; 6 — ось вращения детали);
 б — системы адаптивного управления процессом (1 — регулятор; 2 — источник внешнего воздействия; 3 — объект управления; 4 — электромагнитное излучение; 5 — регистрационные датчики; Ξ_n — эталонные значения: температуры (T_0), угловой скорости (ω_0))

температуры нагрева $T(t)$ и угловой скорости $\omega(t)$ от заданных эталонных величин. Более подробный алгоритм действия такой системы рассмотрен в работе [9].

Часто [4, 9], для осуществления контроля текущих параметров $T(t)$ и $\omega(t)$, в состав адаптивной системы параметрической стабилизации включают пирометрический и растровый датчики.

Пирометрический датчик способен определять температуру только по электромагнитному излучению с внешней (см. рисунок 1 а) поверхности стальной основы при ее нагреве. Из-за толщины материала стальной основы определяемая таким образом температура может превышать значения температуры в зоне наплавки.

Растровый датчик способен определять скорость вращения вала электродвигателя, являющегося основным силовым элементом конструкции поворотного устройства, по частоте перекрытия создаваемого светодиода потока электромагнитного излучения растром оптически прозрачного диска. По результатам регистрации этого датчика, адаптивная система (см. рисунок 1 б) параметрической стабилизации задает и поддерживает требуемую (эталонную) частоту вращения этого вала.

Чтобы уменьшить погрешность, связанную с особенностью измерения температуры пирометрическим датчиком, сформулируем такие модельные допущения, которые позволят определить дополнительные датчики контроля, причем эти датчики не потребуются вводить в зону индукционной центробежной наплавки.

Известно [10], что магнитная проницаемость стальной основы при нагреве в определенном интервале температур, не превышающих точку Кюри, монотонно и линейно убывает до значений, позволяющих эту основу относить к классу ферромагнетиков. Вблизи точки Кюри

магнитная проницаемость основы стремительно падает до значений парамагнетика. Данное явление должно найти свое отражение в характере изменения при индукционном нагреве индуктивности (L) у системы «индуктор — стальная основа — порошковый материал», в которой стальная основа и наплавляемый порошковый материал по отношению к индуктору представляют своеобразный магнитный сердечник. С учетом закона Кюри–Вейса [10] оценить это изменение L можно следующим образом:

$$L = L(T) = \mu_0 \psi \mu(T), \tag{1}$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума;

$$\mu(T) = \begin{cases} \mu(T_0)[1 - \alpha_{\text{ТКМП}}(T - T_0)]; & T \leq T_Q; \\ \mu(T_Q) \frac{\kappa_Q}{T - T_Q}; & T > T_Q, \end{cases} \tag{2}$$

где μ — магнитная проницаемость стальной основы; $\alpha_{\text{ТКМП}}$ — температурный коэффициент магнитной проницаемости; T_0, T, T_Q — начальная температура, температура нагрева и Кюри; κ_Q — постоянная Кюри, зависящая от природы материала; ψ — коэффициент, учитывающий с позиции потокоцепления и существующего гистерезиса конструктивную особенность системы «индуктор — стальная основа — порошковый материал».

В частности, для индуктора (рисунок 1 а) этот параметр может быть оценен исходя из длины индуктора (l_n) внутреннего радиуса (R_0) стальной заготовки и ее толщины (h_0), а также величин удельного электрического сопротивления (ρ) и начальной магнитной проницаемости (μ_n):

$$\psi = \begin{cases} \pi \cdot \xi \cdot (2R_0 h_0 + h_0^2) \cdot \frac{N^2}{l_n} \cdot \frac{1}{h_0} \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_n \cdot \rho}}; & h_0 \geq \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_n \cdot \rho}}; \\ \pi \cdot \xi \cdot (2R_0 h_0 + h_0^2) \cdot \frac{N^2}{l_n}; & h_0 < \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu_n \cdot \rho}}; \\ \rho = \rho_0 (1 + \alpha_{\text{ТКС}} \Delta T), \end{cases} \tag{3}$$

где ξ — коэффициент пропорциональности, определяемый путем калибровки системы «индуктор — стальная заготовка»; $\alpha_{\text{ТКС}}$ — температурный коэффициент сопротивления.

Считаем, что при индукционной наплавке между установкой индукционного нагрева и стальной основой с порошковым материалом формируются два своеобразных эквивалентных электрических контура (рисунок 2), один из этих контуров (см. рисунок 2 а) связан с индуктором, магнитным сердечником которого является стальная заготовка с порошковым материалом, а второй (см. рисунок 2 б) — с электродвигателем устройства центробежного вращения.

Принимая во внимание вышеизложенные допущения учтем, что установки индукционного нагрева снабжены системой охлаждения, способной поддерживать разогрев ответственных элементов конструкции не выше определенных температур. Тогда, если приведенная на рисунке 1 б адаптивная система параметрической стабилизации, обеспечивает генератору индукционного тока постоянство в работе не только циклической частоты, но и амплитуды напряжения, фиксируемые амперметром изменения значений действующей силы тока будут связаны только с температурой нагрева стальной заготовки:

$$\dot{I}(\omega, T, t) = \frac{\dot{U}(\omega, t)}{\dot{Z}(\omega, T)}, \tag{4}$$

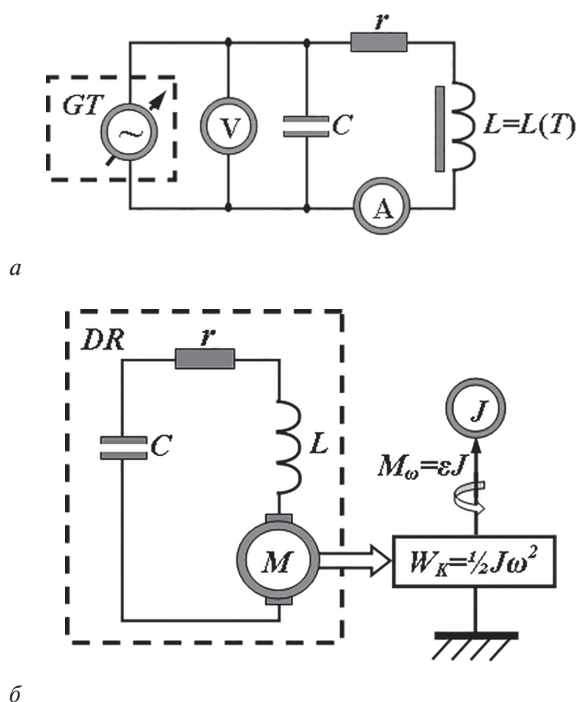


Рисунок 2 — Эквивалентные схемы электрических контуров индукционного нагрева (а) и центробежного вращения (б) порошкового материала: *GT* — генератор индукционного тока; *V* — вольтметр; *A* — амперметр; *C* — емкость; *r* — активное сопротивление; *L* — индуктивность; *T* — температура; *DR* — устройство вращения; *M* — электродвигатель; M_ω — вращательный момент; $W_k = \frac{1}{2} J \omega^2$ — энергия вращения; ϵ — угловое ускорение; *J* — момент инерции; *M* — электродвигатель

где I, U — сила и напряжение тока в электрической цепи; ω — циклическая частота; Z — электрический импеданс, который с учетом (1):

$$\begin{aligned} \dot{Z}(\omega, T) &= r + jX_{LC} = r + j(X_L(T) - X_C) = \\ &= r + j\left(\omega L(T) - \frac{1}{\omega C}\right). \end{aligned}$$

Если адаптивная система параметрической стабилизации обеспечивает генератору индукционного тока режим работы постоянства циклической частоты и амплитуды силы тока, то тогда температуру нагрева стальной заготовки и порошкового материала будут отображать фиксируемые вольтметром изменения значений действующего напряжения:

$$\dot{U}(\omega, T, t) = \dot{I}(\omega, T, t) \cdot \dot{Z}(\omega, T). \quad (5)$$

Если известны необходимые параметры в зависимости (1), то после определенной калибровки датчиков силы тока и напряжения, согласно зависимостям (2) и (3), фиксируемые изменения действующих значений индукционного тока будут отображать температуру на границе раздела «стальная основа — порошок материал».

Контролируя процесс индукционного нагрева с помощью пирометрического датчика, датчиков силы и напряжения тока в индукторе (см. рисунок 2 а), адаптивная система параметрической стабилизации, дополненная эталонными значениями действующего тока и напряжения, способна более точно устанавливать и поддерживать требуемую температуру в зоне наплавки порошкового материала.

Известно [11], что момент инерции (J_Σ) системы «стальная основа — порошок материал» представляет собой сумму моментов ($J_\Sigma = J_0 + J_{\text{ПМ}}$). Эта сумма связана (см. рисунок 2 б) с угловой скоростью вращения вала

электродвигателя (ω_0) и его мощностью ($P_{\text{дв}}$) определенным соотношением:

$$\dot{P}_{\text{дв}} = \dot{I}_{\text{дв}} \cdot \dot{U}_{\text{дв}} = J_\Sigma \cdot \frac{\omega_0^3}{4\pi} = (J_0 + J_{\text{ПМ}}) \cdot \frac{\omega_0^3}{4\pi}, \quad (6)$$

где $I_{\text{дв}}, U_{\text{дв}}$ — сила протекающего тока и напряжение на электродвигателе.

Если индукционная наплавка осуществляется согласно схеме, приведенной на рисунке 1 а, то с учетом работ [6, 11] используемая в зависимости (6) величина J_0 связана с длиной (l_0) и толщиной (h_0) стальной заготовки, ее массой (m_0) и плотностью (γ_0), включая R_0 , соотношениями присущими твердым телам полый цилиндрической формы:

$$\begin{aligned} J_0 &= \frac{\pi \cdot l_0}{2} \gamma_0 R_0^4 \cdot (4\chi_0 + 5\chi_0^2 + 4\chi_0^3 + \chi_0^4) = \\ &= \frac{m_0 R_0^2}{2} \cdot (4\chi_0 + 5\chi_0^2 + 4\chi_0^3 + \chi_0^4), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\chi_0 = \frac{h_0}{R_0}$.

При учете влияния ΔT на величину J_0 , выражение (7) дополняется температурным коэффициентом объемного расширения ($\alpha_{\text{ТКОР}}$), т. е.

$$J_0(T) = J_0(1 + \alpha_{\text{ТКОР}} \Delta T). \quad (8)$$

Аналогичным образом величины $J_{\text{ПМ}}$ связаны с длиной ($l_{\text{ПМ}}$) и толщиной ($h_{\text{ПМ}}$) порошкового слоя, включая его массу ($m_{\text{ПМ}}$) и R_0 :

$$J_{\text{ПМ}} = \frac{m_{\text{ПМ}} R_0^2}{2} \cdot (4\chi_{\text{ПМ}} - 5\chi_{\text{ПМ}}^2 + 4\chi_{\text{ПМ}}^3 - \chi_{\text{ПМ}}^4), \quad (9)$$

где $\chi_{\text{ПМ}} = \frac{h_{\text{ПМ}}}{R_0}$.

Если требуется определить величину момента инерции (J_H), создаваемую наплавленными покрытиями, то выражение (8) будет иметь следующий вид:

$$J_H = \frac{m_{\text{ПМ}} R_0^2}{2 \cdot (1 - \Pi)} \cdot (4\chi_{\text{ПМ}} - 5\chi_{\text{ПМ}}^2 + 4\chi_{\text{ПМ}}^3 - \chi_{\text{ПМ}}^4), \quad (10)$$

где Π — пористость.

Исходя из полученных зависимостей (9) и (10) получим соотношение, определяющее изменение момента инерции порошкового материала после его наплавки:

$$\Delta J_{\text{ПМ}} = J_{\text{ПМ}} \cdot \frac{\Pi}{1 - \Pi}. \quad (11)$$

Если адаптивная система параметрической стабилизации обеспечивает электродвигателю устройства центробежного вращения постоянство ω_0 , тогда, с учетом выражения (6), соотношение конечной мощности энергопотребления электродвигателем к ее начальной величине — $P_{\text{дв}}(н)$ будет прямо пропорционально соотношению конечного момента инерции системы «заготовка — порошок материал» к ее начальному значению. Это позволит установить прямую связь между изменением потребляемой мощности ($\Delta P_{\text{дв}}$) электродвигателем и окончанием процесса индукционной центробежной наплавки порошковых покрытий:

$$\Delta P_{\text{дв}} = \frac{\Delta J_{\text{ПМ}}}{J_0 + J_{\text{ПМ}}} P_{\text{дв}}(н). \quad (12)$$

Как только входящие в адаптивную систему параметрической стабилизации (см. рисунок 1 б) датчики изменения мощности зафиксируют изменение мощности энергопотребления электродвигателем на величину, определяемую зависимостью (12), контролируемый этой системой процесс можно завершить.

Идентификация момента окончания индукционной центробежной наплавки по уровню вибрации устройства центробежного вращения. Если устройству центробежного вращения имеет более сложную конструкцию, чем электродвигатель, вал которого жестко связан с устройством фиксации стальной основы с порошковым материалом (см. рисунок 1 а), то точность определения момента окончания индукционной центробежной наплавки по изменению мощности энергопотребления будет снижена. Такое снижение точности вызвано не только появлением в зависимости (6) дополнительного момента инерции вала двигателя, но также и других моментов инерции деталей вращения привода, передающих крутящий момент. На рисунке 3 представлены упрощенные кинематические схемы и ее аналог — динамические модели, отражающие упруго-инерционные связи элементов (c_i и J_i) привода, включая стальную основу и порошковый материал. Приведенные на этом рисунке динамические модели (см. рисунки 3 б и в) позволяют при передаче крутящего момента учесть сопровождающую вращательный процесс механическую вибрацию, появление которой обусловлено упруго-инерционными свойствами элементов динамической модели. При необходимости выявления вибраций, связанных исключительно с моментом инерции стальной основы и порошкового материала, количество элементов в такой модели может быть увеличено (рисунок 4) до числа деталей, передающих крутящий момент в устройстве центробежного вращения.

Согласно работам [11–13], рассчитать частотный диапазон, в котором существуют резонансные частоты, связанные исключительно с изменением момента инерции порошкового материала при индукционной центробежной наплавке, можно используя обобщенную динамическую модель (см. рисунок 4) для составления определенной системы уравнений:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\varphi} + 2b_1 \dot{\varphi} + c_1 \varphi = M; \\ J_2 \ddot{\varphi} + 2b_2 \dot{\varphi} + c_2 \varphi = M_2 = z_1 M_1; \\ \dots \dots \dots \\ J_{n-1} \ddot{\varphi} + 2b_{n-1} \dot{\varphi} + c_{n-1} \varphi = M_{n-1} = M_1 \left(\prod_{j=1}^{j=n-2} z_j \right); \\ J_n \ddot{\varphi} + 2b_n \dot{\varphi} + c_n \varphi = M_n = M_1 \left(\prod_{j=1}^{j=n-1} z_j \right). \end{cases} \quad (13)$$

Система уравнений (13) может также быть представлена и в матричной форме:

$$[J] \cdot [\ddot{\varphi}] + 2[b] \cdot [\dot{\varphi}] + [c] \cdot [\varphi] = [M], \quad (14)$$

где $[J]$, $[b]$, $[c]$, $[M]$ — матрицы моментов инерции, демпфирования, жесткости и передаваемых элементами динамической модели крутящих моментов.

Как показал анализ работы [12], результатом решения системы уравнений (13), (14) для случая, когда $\{b_i\}=0$ и $\{M_i\}=0$, т. е. $[J] \cdot [\ddot{\varphi}] + [c] \cdot [\varphi] = 0$ является набор частот $\{\omega_{0i}\}$, представляющих собой матрицу $[\omega_{0i}]$ свободных колебаний. В остальных случаях $[J] \cdot [\ddot{\varphi}] + 2[b] \cdot [\dot{\varphi}] + [c] \cdot [\varphi] = 0$ и $[J] \cdot [\ddot{\varphi}] + 2[b] \cdot [\dot{\varphi}] + [c] \cdot [\varphi] = [M]$ решением данной системы уравнений (13), (14), будут являться наборы собственных и резонансных частот (ω_i), которые связаны со свободными колебаниями $\omega_i^2 = \omega_{0i}^2 - b_i^2$. Определяя с помощью зависимостей (9)–(11) возможное изменение момента инерции порошкового материала при центробежной индукционной наплавке, можно на основе решения системы уравнений (13) и (14) определить резонансные частоты,

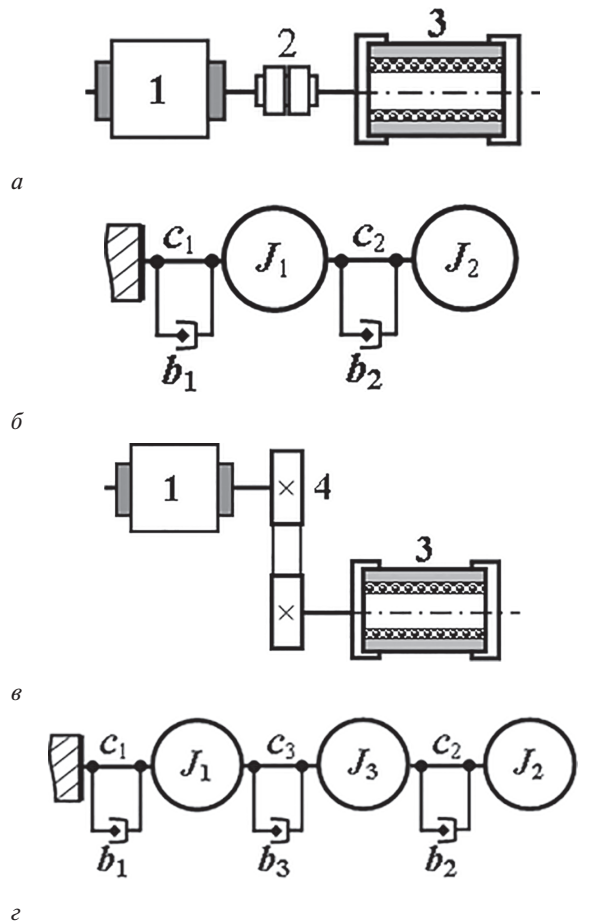


Рисунок 3 — Устройство центробежного вращения:
 а — кинематическая схема (1 — электродвигатель; 2 — соединительная муфта; 3 — система фиксации со стальной основой и порошковым материалом; 4 — шкив);
 б — динамическая модель (c_1, c_2 — жесткости вала и соединительной муфты; J_1, J_2 — приведенные моменты инерции вала с муфтой и системы фиксации со стальной основой и порошковым материалом; b_1, b_2 — коэффициенты демпфирования вала и системы фиксации);
 в — кинематическая схема; з — динамическая модель (c_3 — ременной передачи; J_3 — приведенный момент инерции шкивов; b_2 — коэффициенты демпфирования ременной передачи)

характеризующие момент завершения контролируемого процесса. Зная эти частоты и используя настраиваемые на них полосовые фильтры виброанализатора, с помощью акустического датчика, устанавливаемого на опору системы фиксации стальной основы и порошкового материала, можно определять момент завершения процесса наплавки порошковых покрытий.

Использование идентификационной модели в индукционной центробежной наплавке порошковых материалов. Разработанная идентификационная модель индукционной центробежной наплавки порошковых материалов за счет использования в ней полученных зависимостей (1)–(4), (8)–(12), а также решения системы уравнений (13), (14), позволяет определять условия достижения в зоне наплавки требуемой температуры и момент завершения контролируемого процесса. На практике эти условия могут определяться путем включения в адаптивную систему параметрической стабилизации установки индукционного нагрева, использующую пирометрический датчик температуры и растровый датчик угловой скорости, дополнительных датчиков тока (вольтметра и ампермет-

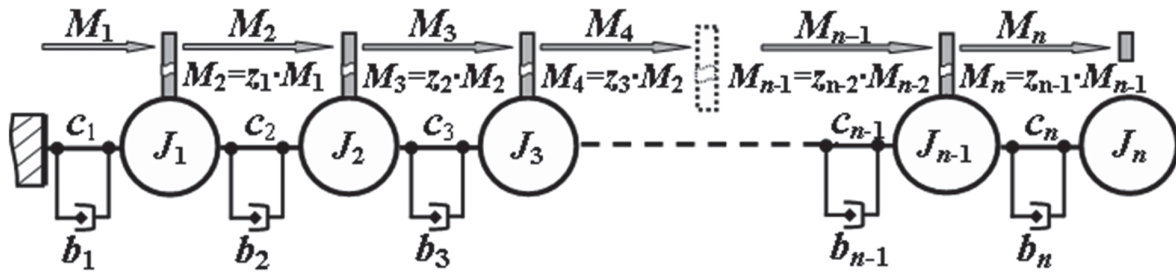


Рисунок 4 — Обобщенная динамическая модель устройства центробежного вращения:

c_i, b_i, J_i — жесткость, коэффициент демпфирования, момент инерции элементов модели; c_{n-1} — жесткость крепления системы фиксации к передающему элементу; b_{n-1}, J_{n-1} — коэффициент демпфирования, момент инерции системы фиксации; c_n — жесткость крепления стальной основы к системе фиксации; b_n — коэффициент демпфирования стальной основы и порошкового материала; J_n — момент инерции стальной основы и порошкового материала; M_i — крутящий момент, передаваемый от элемента к элементу модели; z_i — передаточное отношение

ра), и, при необходимости, акустического. С учетом этого, в состав разработанной Объединенным институтом машиностроения НАН Беларуси установки центробежной индукционной наплавки был включен виброанализатор «Топаз» (производитель — Беларусь). Кроме этого в составе установки генератор индукционного тока высокой (66 кГц) частоты с возможностью регулировки мощности до 60 кВт, устройство центробежного вращения с возможностью регулировки частоты вращения в пределах 1200–4500 об/мин, а также адаптивная система параметрической стабилизации, созданная на основе последовательного интегрально-дифференциального микропроцессорного многоканального регулятора «Овен». К входам этого регулятора подключались включенные в электрическую цепь индукторы датчиками тока (амперметр и вольтметр), растровый датчик угловой скорости ВЕ-178 и оптический пирометрический комплекс «АПИР-С». Перед началом процесса индукционной центробежной наплавки с помощью разработанной и вышеописанной идентификационной модели были рассчитаны параметры тока в электрической цепи индуктора, которые должны были определять условия создания в зоне наплавки требуемой температуры, а также условия завершения этого процесса. Эти условия определялись рассчитанными параметрами тока индуктора, включая частотный диапазон возможной вибрации на опорах устройства центробежного вращения.

Для сопоставления значений температуры наплавки в режиме изотермической выдержки, вместо порошкового материала через полый вал фиксирующих стальную основу крышек (см. рисунок 1 а) устанавливалась термопара. Результаты исследования показали, что использование в адаптивной системе параметрической стабилизации в качестве эталонных значений тока в цепи индуктора, полученные расчетным путем с использованием разработанной идентификационной модели, в сочетании с текущими показаниями пирометрического датчика и датчиков тока, позволяют получить разброс значений в зоне наплавки, не превышающий $\pm 10-15^\circ\text{C}$. При этом использование в адаптивной системе параметрической стабилизации только пирометрического датчика показало, что фиксируемая температура в зоне наплавки в режиме изотермической выдержки может быть на $70-90^\circ\text{C}$ ниже требуемой.

Были осуществлены сравнительные испытания процессов индукционной центробежной наплавки подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями повышенной износостойкости путевой техники (биме-

таллических втулок подбивочных блоков выправочно-подбивочно-разделочных машин ВПР). Сравнительные испытания отличались друг от друга тем, что в одном случае в адаптивной системе параметрической стабилизации режимов индукционной центробежной наплавки использовалась разработанная идентификационная модель, а в другом случае — нет. При этом использование разработанной идентификационной модели позволяло определять момент окончания индукционной центробежной наплавки по показаниям индукционного тока, потребляемой мощности электродвигателя установки центробежного вращения и вибрации. При проведении сравнительных испытаний установлено, что использование разработанной идентификационной модели обеспечивает, в среднем, сокращение длительности процесса получения каждого биметаллического изделия на 20–30 с. Результаты предварительных испытаний на надежность и долговечность работы полученных подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями повышенной износостойкости, в составе путевых машин ВПР и ВПО, показали их полную сопоставимость. На основании этого предложено разработанную идентификационную использовать в адаптивной системе параметрической стабилизации, входящей в состав установки центробежной индукционной наплавки Объединенного института машиностроения НАН Беларуси для получения покрытий из порошковых антифрикционных шихт повышенной износостойкости в процессе изготовления биметаллических подшипников скольжения узлов триботехнического назначения путевой и др. техники.

Заключение. 1. Разработана идентификационная модель индукционной центробежной наплавки для адаптивной системы параметрической стабилизации режимов технологического процесса, которая позволяет в зоне обработки не только определять и поддерживать необходимую температуру, но и определять момент окончания контролируемого процесса. Основу этой модели составляют полученные расчетные зависимости для определения электрических параметров замкнутых контуров, образуемых системой «индуктор — стальная основа — порошковый материал», а также обмоткой электродвигателя устройства центробежного вращения, включая систему уравнений, позволяющих для этого устройства рассчитать собственные частоты крутильных колебаний, создающих вибрацию. С помощью этих зависимостей можно определить значения электрического тока в цепи индуктора и частотный диапазон, характеризующие момент окончания индукционной центробежной наплавки.

2. Показано, что использование разработанной идентификационной модели в адаптивной системе параметрической стабилизации режимов индукционной наплавки при получении подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями повышенной износостойкости для путевых машин способствует снижению разброса значений температуры в зоне наплавки в полтора–два раза и сокращению длительности процесса получения каждого изделия, в среднем, на 30–40 с.

Список литературы

1. Безручко, И.И. Индукционный нагрев для объемной штамповки / И.И. Безручко. — Л.: Машиностроение, 1987. — 126 с.
2. Вологдин, В.П. Поверхностная индукционная закалка / В.П. Вологдин. — М.: Оборонгиз, 1947. — 281 с.
3. Пейсахович, В.А. Оборудование для высокочастотной сварки металлов / В.А. Пейсахович. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 208 с.
4. Сосновский, И.А. Технология индукционного нагрева в процессах центробежного нанесения покрытий / И.А. Сосновский, К.Е. Белявин, А.Л. Худолей // Перспективные материалы и технологии: в 2-х т. / под ред. В.В. Клубовича. — Т.1. — Витебск: Изд-во ВГТУ, 2015. — Гл. 17. — С. 300–313.
5. Немков, В.С. Теория и расчет установок индукционного нагрева / В.С. Немков, В.Б. Демидович. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 280 с.
6. Параметрическая стабилизация индукционной наплавки порошковых материалов / И.А. Сосновский [и др.] // Перспективные материалы и технологии: сб. материалов междунар. симпозиума, Витебск, 27–29 мая 2015 г. — Витебск: УО ВГТУ, 2015. — С. 222–224.
7. Жиров, М.В. Идентификация и адаптивное управление технологическими процессами с нестационарными параметрами / М.В. Жиров, В.В. Макаров, В.В. Солдатов. — М.: МГТУ, 2011. — 203 с.
8. Кипарисов, С.С. Порошковая металлургия. / С.С. Кипарисов, Г.А. Либенсон. — М.: Металлургия, 1980. — 496 с.
9. К вопросу стабилизации технологических режимов индукционной наплавки порошковых материалов / И.А. Сосновский [и др.] // Новые материалы и технологии в машиностроении: сб. науч. тр. / под ред. Е.А. Памфилова. — Вып. 21. — Брянск: БГИТА, 2015. — С. 72–75.
10. Канер, Э.А. Электромагнитные волны в металлах / Э.А. Канер, В.Г. Скобов // Успехи физических наук. — 1966. — Т. 89, вып. 3. — С. 367–408.
11. Расчет динамических характеристик металлорежущих станков: учебное пособие / В.А. Ванин [и др.]. — Тамбов: ТГУ, 2007. — 104 с.
12. Бирюков, М.П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем / М.П. Бирюков. — Минск: Выш. шк., 1980. — 190 с.
13. Киселев, Ю.В. Вибрационная диагностика систем и конструкций авиационной техники / Ю.В. Киселев. — Самара: СГАУ, 2010. — 103 с.

Sosnovsky I.A., Belyavin K.E., Kuznechik O.O.

Development and use of identification models in the induction centrifugal surfacing powder materials

The analysis of the induction centrifugal surfacing powder materials and methods of adaptive control of technological equipment, providing a parametric process of stabilization regimes. Formulated model assumptions, analytical dependence and developed identity model allows adaptive system parametric stabilization modes induction centrifugal surfacing not only to maintain the required process parameters, but also to determine the conditions for its completion. Displaying the practical application of such a system in the preparation of anti-friction sliding bearings with increased wear resistance of coatings for track machines.

Поступил в редакцию 07.09.2015.