

УДК 621.923:621.90.17

РАСШИРЕННАЯ МОДЕЛЬ ОБЪЕКТА ДЛЯ ОПЕРАЦИИ ПЛОСКОГО ШЛИФОВАНИЯ

Братан С.М.

Рассматриваются вопросы построения динамической модели операции плоского шлифования с учетом статистических характеристик возмущений.

Повышение прочности, твердости и износостойкости конструкционных материалов определило общую тенденцию к снижению их обрабатываемости, что приводит к повышенному износу инструмента, увеличению сил резания, деформаций, а следовательно, к снижению точности обработки и качества обработанных поверхностей. В этих условиях особо актуальной становится задача создания и совершенствования высокоэффективных финишных методов обработки изделий, на которых формируются заданные параметры качества.

Одним из распространенных методов обработки деталей является плоское шлифование. Достижение заданных параметров качества при обработке возможно за счет учета динамики технологической системы.

На основе анализа взаимодействия элементов динамической системы с учетом представления процесса шлифования в форме [1] можно построить описание динамики процесса обработки в виде

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1(x_{10} + x_1) + h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3(x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - \\ - h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - c_3(x_{20} + x_2 - k - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2(x_{20} + x_2) + h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + c_3(x_{20} + x_2 - k - \Delta k) - \\ - h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3(x_{10} + x_1 + R + \Delta R) - h_2 \dot{L} - c_2(L + \Delta L) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1, m_2 – приведенные массы заготовки с приспособлением и круга со шпинделем; h_i – коэффициент сопротивления i -го звена; C_i – коэффициент жесткости i -го звена; x_{10}, x_{20}, x_1, x_2 – координаты центра вращения круга и базовой поверхности детали и их приращения соответственно; R – радиус круга; k – соответствующий линейный размер детали; $\Delta R, \Delta k$ – вариации радиуса круга и линейного размера заготовки, соответственно; $L, \Delta L$ – расстояние от базовой поверхности детали до центра вращения круга и его изменение по лимбу станка.

С учетом условий силового замыкания технологической системы при номинальных режимах обработки можно построить соотношения, характеризующие динамику процесса в вариациях:

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 + h_1 \dot{x}_1 + c_1 x_1 + h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) + c_3(x_1 + \Delta R) - h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) - c_3(x_2 - \Delta k) = 0, \\ m_2 \ddot{x}_2 + h_2 \dot{x}_2 + c_2 x_2 + h_3(\dot{x}_2 - \Delta \dot{k}) + c_3(x_2 - \Delta k) - h_3(\dot{x}_1 + \Delta \dot{R}) - c_3(x_1 + \Delta R) - \\ - h_2 \dot{L} - c_2 \Delta L = 0. \end{cases} \quad (2)$$

Систему (2) целесообразно представить в форме пространства состояний Фробениуса:

$$\dot{Z}_0 = A_0 Z_0 + B_0 W_0 + C_0 U_0$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_1}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_2}{\alpha_4} & -\frac{\alpha_3}{\alpha_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_1 \\ \gamma_2 \\ \gamma_3 \\ \gamma_4 \end{bmatrix} (R_1 + R_2) + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} S, \quad (3)$$

где $z_1 = x_1$, $z_2 = z_1 p = \dot{x}_1$, $z_3 = z_2 p = \ddot{x}_1$, $z_4 = z_3 p = \dddot{x}_1$, $z_5 = z_4 p = \ddot{x}_1$;

$R_1 = \Delta R$; $R_2 = \Delta k$; $\Delta L = S$; $\lambda_1 = \beta_2$; $\lambda_2 = \beta_1 - \alpha_3 \lambda_1$; $\lambda_3 = \beta_0 - \alpha_3 \lambda_2 - \alpha_2 \lambda_1$;

$\alpha_4 = (m_1 m_2)$; $\alpha_3 = (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)$;

$\alpha_2 = (h_2 h_3 + h_1 h_3 + h_1 h_2 + c_1 m_2 + c_3 m_1 + c_3 m_2 + c_2 m_1)$;

$\alpha_1 = (c_2 h_3 + c_1 h_2 + c_2 h_1 + c_3 h_2 + c_1 h_3 + c_3 h_1)$; $\alpha_0 = (c_1 c_2 + c_2 c_3 + c_1 c_3)$;

$\gamma_3 = h_3 m_2$; $\gamma_2 = (c_3 m_2 + h_2 h_3)$; $\gamma_1 = (c_3 h_2 + c_2 h_3)$; $\gamma_0 = c_2 c_3$;

$\beta_2 = h_2 h_3$; $\beta_1 = (h_2 c_3 + h_3 c_2)$; $\beta_0 = c_2 c_3$;

$\lambda_1 = h_2 h_3 = \beta_2$;

$\lambda_2 = (c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3 = \beta_1 - \alpha_3 \lambda_1$;

$\lambda_3 = c_2 c_3 - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3 \times$

$\times [(c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) h_2 h_3] = \beta_0 - \alpha_3 \lambda_2 - \alpha_2 \lambda_1$;

$\gamma_1 = -h_3 m_2 = -\gamma_3$;

$\gamma_2 = -(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2) = -\gamma_2 - \alpha_3 \gamma_1$;

$\gamma_3 = -(c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) \times [-(c_3 m_2 + h_2 h_3) -$
 $-(h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2)] = -\gamma_1 - \alpha_3 \gamma_2 - \alpha_2 \gamma_1$;

$\gamma_4 = -c_2 c_3 - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) \times (-(c_3 h_2 + c_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1) \times$
 $\times [-(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2)] -$

$-(h_2 h_3 + c_1 m_2 + h_1 h_3 + c_3 m_1 + c_3 m_2 + c_2 m_1 + h_1 h_2) \times$

$\times (-(c_3 m_2 + h_2 h_3) - (h_3 m_2 + h_1 m_2 + h_2 m_1 + h_3 m_1)(-h_3 m_2)) -$

$-(c_2 h_3 + c_1 h_2 + c_2 h_1 + c_3 h_2 + c_1 h_3 + c_3 h_1)(-h_3 m_2) = -\gamma_0 - \alpha_3 \gamma_3 - \alpha_2 \gamma_2 - \alpha_1 \gamma_1$.

Управляемость по Калману системы (3) может быть проанализирована непосредственно, с использованием численных значений вышеуказанных параметров для матриц объекта A_0 и управления C_0 .

Анализ работ области исследования динамики процессов шлифования [2,3], показывает, что наиболее нестабильным звеном рассматриваемой динамической системы является шлифовальный круг. В соответствии с моделью (2) основными параметрами шлифовального круга, оказывающими влияние на динамику процесса обработки, являются статические и динамические вариации его профиля. Под статическими вариациями понимаются отклонения формы круга от идеальной в статическом режиме, а под динамическими – отклонения формы, вызываемые непосредственно процессом обработки. К последним можно отнести и отклонения траектории поверхности круга от заданных вследствие его дисбаланса. Эти отклонения имеют детерминированный характер и могут быть существенно уменьшены известными технологическими методами, например предварительной балансировкой круга. Отклонения формы шлифовального круга в статическом режиме имеют случайный характер и при анализе процесса обработки могут быть учтены путем введения в состав системы (3) дополнительного звена – соответствующего формирующего фильтра. Такой фильтр может быть построен, например, на основе анализа профиля для любого конкретного шлифовального круга с представлением воздействия на систему (3) в пространстве состояний в виде уравнений состояния (4) и наблюдения (5)

$$\dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 w_1, \quad (4)$$

$$y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \quad (5)$$

где $G_1 = \begin{bmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix}$, $A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{1}{T_1^2} & -\frac{T_2}{T_1^2} \end{bmatrix}$, $B_1 = \begin{bmatrix} KT_3 \\ -1 - KT_2 T_3 \end{bmatrix}$, $D_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}^T$, $E_2 = \rho$,

w_1, v_2 – некоррелированные единичные порождающие гауссовские белые шумы, $T_1 = \frac{1}{v^2(\alpha^2 + \beta^2)}$, $T_2 = \frac{2\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$, $T_3 = \frac{1}{v(\alpha^2 + \beta^2)}$,

$K = \sqrt{2} \sqrt{\frac{D\alpha}{v(\alpha^2 + \beta^2)}}$, D – дисперсия высот неровностей рельефа шлифовального круга, v – скорость его движения, α, β – соответствующие коэффициенты корреляции.

С учетом $w_0 = y_1$ при введении формирующего фильтра (4) система (3) приобретает вид:

$$\begin{cases} \dot{z}_o = A_o z_o + B_o y_1 + C_o u_o \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 W_1 \\ y_1 = D_1 G_1 + E_2 v_2 \\ y_o = D_o z_o + E_o v_o \end{cases}, \quad (6)$$

откуда непосредственно следует

$$\begin{cases} \dot{x}_o = A_o x_o + B_o D_1 G_1 + B_o E_2 v_2 + C_o u_o \\ \dot{G}_1 = A_1 G_1 + B_1 W_1 \end{cases},$$

что позволяет представить уравнения состояния процесса шлифования с учетом возмущений, определяемых статистическими характеристиками круга как состояния расширенного объекта в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_o \\ \dot{G}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_o & B_o D_1 \\ 0 & A_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_o \\ G_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_o E_2 & 0 \\ 0 & B_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_2 \\ W_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_o \\ 0 \end{bmatrix} \times u_o$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \\ \dot{z}_3 \\ \dot{z}_4 \\ \dot{\psi}_1 \\ \dot{\psi}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \gamma_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \gamma_3 & 0 \\ -\frac{\alpha_0}{\alpha_4} - \frac{\alpha_1}{\alpha_4} - \frac{\alpha_2}{\alpha_4} - \frac{\alpha_3}{\alpha_4} & \gamma_4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_1^2} - \frac{T_2}{T_1^2} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \psi_1 \\ \psi_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \rho \gamma_1 & 0 \\ \rho \gamma_2 & 0 \\ \rho \gamma_3 & 0 \\ \rho \gamma_4 & 0 \\ 0 & k_1 T_3 \\ 0 & -1 - k T_2 T_3 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_\phi \\ W_\phi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \times S. \quad (7)$$

Система (7) представляет стандартную форму описания динамической системы в терминах теории пространства состояний, что позволяет ее использовать для исследования характеристик и поведения процесса плоского шлифования, а также для синтеза систем управления этим процессом.

Библиография

- 1 Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. — 232 с.
- 2 Королев В.А. Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке. — Саратов: Изд-во Саратовск. ун-та. 1975.— 192 с.
- 3 Корчак С.Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей. — М.: Машиностроение, 1974. — 280 с.

Поступила в редакцию 20.10.1999 г.