

## К ВОПРОСУ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

*Могилевский государственный технический университет  
Могилев, Беларусь*

Целью данной работы является создание программного обеспечения анализа шероховатости поверхности при растачивании.

При растачивании на качество поверхности в направлении подачи режущего инструмента влияют следующие факторы: колебание резца, вызванное податливостью консольно закрепленного резцедержателя; глубина канавки оставляемой резцом при вращении заготовки и некоторые другие факторы [1, 2].

Целью настоящей работы явилось создание математической модели колебания резца, закрепленного в борштанге.

Для оценки влияния колебания резца можно воспользоваться динамической моделью консольно расположенного режущего инструмента, полученной в соответствии с рис. 1.

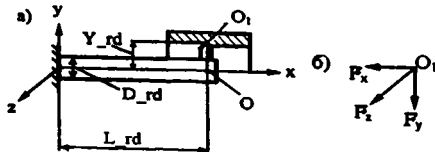


Рис.1. Динамическая модель процесса растачивания: а-схема растачивания:  $L_{rd}$  – длина резцедержателя,  $D_{rd}$  – диаметр резцедержателя,  $Y_{rd}$  – расстояние от оси резцедержателя до режущей кромки; б – схема действующих сил

Силы резания  $F_z$  и  $F_y$  вызывают соответственно перемещение  $Z$  и  $Y$  точки  $O$ , а изгибающий момент, образуемый силой  $F_x$  на плече  $Y_{rd}$ , вызывает перемещение  $Y_M$  точки  $O$ .

Для получения математической модели воспользуемся уравнениями Лагранжа второго рода [3].

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\delta T}{\delta \dot{q}_i} \right) - \frac{\delta T}{\delta q_i} + \frac{\delta \Pi}{\delta q_i} + \frac{\delta \Phi}{\delta q_i} = Q_i, \quad (1)$$

где  $T$ ,  $\Pi$ ,  $\Phi$  – соответственно кинетическая и потенциальная энергия, а также диссипативная функция Релея;  $q_i$  – обобщенная координата;  $Q_i$  – обобщенная сила.

В качестве обобщенных координат примем  $Y, Z, Y_M$ . Тогда потенциальная энергия системы будет определяться выражением:

$$\Pi = 0,5C_Y Y^2 + 0,5C_{Y_M} Y_M^2 + 0,5C_Z Z^2, \quad (2)$$

где  $C_Y, C_{Y_M}, C_Z$  – коэффициенты жесткости, значения которых можно определить по известным выражениям теории упругости:

$$C_Y, C_Z = 3EJ / L^3_{rd}; \quad C_{Y_M} = 2EJ / (L^2_{rd} Y_{rd}), \quad (3)$$

где  $E$  – модуль упругости 1 рода (для стали  $E = 2 \times 10^{11}$  Па);  $J = \pi D_{rd}^4 / 32$  – осевой момент инерции сечения.

Для определения кинетической энергии выделим элементарный элемент  $dl$ , расположенный от точки  $O$  на расстоянии  $l$ . Масса этого элемента равна:

$$dm = \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} dl.$$

Кинетическая энергия элементарного элемента равна:

$$dT = \frac{1}{2} dm \left\{ \left[ \dot{Y} f_1(l) - \dot{Y}_M f_2(l) \right]^2 + \left[ Z \dot{f}_1(l) \right]^2 \right\},$$

где  $f_1(l) = 1 - \frac{3}{2} \frac{l}{L_{rd}} + \frac{1}{2} \left( \frac{l}{L_{rd}} \right)^3$  и  $f_2(l) = 1 - 2 \frac{l}{L_{rd}} + \left( \frac{l}{L_{rd}} \right)^2$  – соответственно перемещения, вызванные силой и изгибающим моментом в долях перемещений точки  $O$  (известные выражения из теории упругости).

Принтегрируем данное выражение в левой части от 0 до  $T$ , а в правой – от 0 до  $L_{rd}$  и введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_Z, m_Y &= \frac{33}{140} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}; \\ m_{Y_M} &= \frac{1}{5} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}; \\ m_{Y Y_M} &= \frac{13}{60} \rho \frac{\pi D_{rd}^2}{4} L_{rd}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Тогда получим

$$T = \frac{1}{2} m_Y (\dot{Y})^2 + \frac{1}{2} m_Z (\dot{Z})^2 + \frac{1}{2} m_{Y_M} (\dot{Y}_M)^2 - m_{Y Y_M} \dot{Y} \dot{Y}_M. \quad (5)$$

Выражение для диссипативной функции Рэлея аналогично выражению (2), только вместо коэффициентов жесткости  $C_Y, C_{Y_M}, C_Z$  необходимо использовать коэффициенты диссипативных сил  $\mu_Y, \mu_{Y_M}, \mu_Z$ , а вместо перемещений соответствующие скорости.

При определении обобщенных сил  $Q_i$  используется соотношение

$$Q_i = \sum_{j=1}^n \delta A_j / \delta q_i,$$

где  $\delta A_j$  – работа  $j$  силы на возможном перемещении.

Учитывая выбранные направления осей координат, работа обобщенных сил на возможных перемещениях будет:

$$\delta A_{F_Y} = -\delta Y F_Y; \quad \delta A_{F_Z} = \delta Z F_Z; \quad \delta A_{F_X} = -\delta Y_M Y_{rd} F_X. \quad (6)$$

Подставив полученные выражения в (1) получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} m_Y \ddot{Y} &= -C_Y Y - \mu_Y \dot{Y} - F_Y + m_{YY_M} \ddot{Y}_M; \\ m_{Y_M} \ddot{Y}_M &= -C_{Y_M} Y_M - \mu_{Y_M} \dot{Y}_M + F_X Y_{rd} + m_{YY_M} \ddot{Y}; \\ m_Z \ddot{Z} &= -C_Z Z - \mu_Z \dot{Z} + F_Z. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} m_\Delta &= m_Y m_{Y_M} - m_{YY_M}^2; \\ F_{YY_M} &= -C_Y Y - \mu_Y \dot{Y} - F_Y; \\ F_{Y_M Y} &= -C_{Y_M} Y_M - \mu_{Y_M} \dot{Y}_M - F_Y. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Решим первые два уравнения системы (7) относительно  $\ddot{Y}$ ,  $\ddot{Y}_M$ . Тогда система уравнений (7) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{Y} &= (F_{YY_M} m_{Y_M} + F_{Y_M Y} m_{YY_M}) / m_\Delta; \\ \ddot{Y}_M &= (F_{YY_M} m_{YY_M} + F_{Y_M Y} m_Y) / m_\Delta; \\ \ddot{Z} &= (-C_Z Z - \mu_Z \dot{Z} + F_Z) / m_Z. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Коэффициент диссипативных сил определяются по коэффициентам аperiodичности  $\psi$  (для сталей  $\psi$  можно принять равным 0.05), который в данном случае учитывает рассеивание энергии в материале резцедержателя:

$$\left. \begin{aligned} \mu_Y &= 2\psi \sqrt{m_Y / C_Y}; \\ \mu_Z &= 2\psi \sqrt{m_Z / C_Z}; \\ \mu_{Y_M} &= 2\psi \sqrt{m_{Y_M} / C_{Y_M}}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Составляющие силы резания при расстачивании  $F_Z, F_Y, F_X$  определяются по известным в теории резания выражениям [4]:

$$\left. \begin{aligned} F_Z &= 10C_{PZ} t^{Xz} S^{Yz} V^{Nz} K_{M-Fz} K_{\phi-Fz} K_{y-Fz} K_{\lambda-Fz} K_{r-Fz}; \\ F_Y &= 10C_{PY} t^{Xy} S^{Yy} V^{Ny} K_{M-Fy} K_{\phi-Fy} K_{y-Fy} K_{\lambda-Fy} K_{r-Fy}; \\ F_X &= 10C_{PX} t^{Xx} S^{Yx} V^{Nx} K_{M-Fx} K_{\phi-Fx} K_{y-Fx} K_{\lambda-Fx} K_{r-Fx}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

где  $C_{PZ}, C_{PY}, C_{PX}, X_Z, X_Y, X_X, Y_Z, Y_Y, Y_X, N_Z, N_Y, N_X$  – постоянные коэффициенты и показатели степени;  $K_{M_{Fz}}, K_{M_{Fy}}, K_{M_{Fx}}$  – коэффициенты, учитывающие свойства материала заготовки;  $K_{\varphi_{Fz}}, K_{\varphi_{Fy}}, K_{\varphi_{Fx}}, K_{y_{Fz}}, K_{y_{Fy}}, K_{y_{Fx}}, K_{\lambda_{Fz}}, K_{\lambda_{Fy}}, K_{\lambda_{Fx}}, K_{r_{Fz}}, K_{r_{Fy}}, K_{r_{Fx}}$  – коэффициенты, учитывающие геометрические параметры режущей части резца;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/мин. Данные по коэффициентам приведены в таблицах [4]

Из выражений (4.1) видно, что изменение сил резания происходит за счет глубины резания  $t$ . Поэтому целесообразно выражения для составляющих сил резания представить в виде:

$$\left. \begin{aligned} F_Z &= C_{PPZ} t^{X_Z} \\ F_Y &= C_{PPY} t^{X_Y} \\ F_X &= C_{PPX} t^{X_X} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где

$$\left. \begin{aligned} C_{PPZ} &= 10 C_{PZ} S^{Y_Z} V^{N_Z} K_{M_{Fz}} K_{\varphi_{Fz}} K_{y_{Fz}} K_{\lambda_{Fz}} K_{r_{Fz}} \\ C_{PPY} &= 10 C_{PY} S^{Y_Y} V^{N_Y} K_{M_{Fy}} K_{\varphi_{Fy}} K_{y_{Fy}} K_{\lambda_{Fy}} K_{r_{Fy}} \\ C_{PPX} &= 10 C_{PX} S^{Y_X} V^{N_X} K_{M_{Fx}} K_{\varphi_{Fx}} K_{y_{Fx}} K_{\lambda_{Fx}} K_{r_{Fx}} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

На глубину резания оказывают влияние несоосность установки заготовки, колебание резца, а также предварительная шероховатость поверхности растачивания. С учетом данных соображений глубину резания можно определить:

$$t = t_0 + t_\lambda + t_{RZ} \quad (14)$$

где  $t_0$  – глубина резания, учитывающая несоосность расположения заготовки;  $t_\lambda$  – изменение глубины резания, вызванное колебаниями режущего инструмента;  $t_{RZ}$  – изменение глубины резания, вызванное предварительной шероховатостью поверхности заготовки.

Для определения величины  $t_0$  воспользуемся уравнением смещенной окружности, описывающей расстояние от начала координат до поверхности заготовки перед растачиванием:

$$\rho = \sqrt{R_{ZZ}^2 - \Delta_3^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0)} + \Delta_3 \cos(\varphi + \varphi_0), \quad (15)$$

где  $R_{ZZ}$  – радиус смещенной окружности (в нашем случае он определяется  $R_{ZZ} = D_{-z}/2 - t_{cp}$ );  $\Delta_3$  – смещение окружности относительно начала координат (в нашем случае это несоосность установки заготовки);  $\varphi$  – угол поворота заготовки;  $D_{-z}$  – диаметр детали после растачивания;  $t_{cp}$  – средняя глубина резания.

Тогда величина  $t_0$  будет равна:

$$t_0 = D_{-z}/2 - \rho. \quad (16)$$

Изменение глубины резания, вызванное колебаниями режущего инструмента можно определить следующим образом:

$$t_{\Delta} = \Delta - \Delta_0, \quad (17)$$

где  $\Delta$  – изменение глубины резания, вызванное перемещениями резца  $Y, Z, Y_M$ ;  $\Delta_0$  – изменение глубины резания, вызванное перемещениями резца  $Y, Z, Y_M$  под воздействием сил  $F_Y, F_Z, F_{Y_M}$  при средней глубине резания  $t_{cp}$ .

С учетом вышеизложенного величина  $\Delta$  определяется:

$$\Delta = \sqrt{(0,5D_z + Y - Y_M)^2 + Z^2} - 0,5D_z. \quad (18)$$

Величина  $\Delta_0$  также определяется по формуле (18), но перед этим необходимо вычислить  $Y, Z, Y_M$ , решая систему уравнений (7) при значениях ускорений и скоростей равных нулю:

$$\left. \begin{aligned} Y &= F_Y / C_Y; \\ Z &= F_Z / C_Z; \\ Y_M &= F_{Y_M} Y_{rd} / C_{Y_M}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

Значение величины  $\varphi_0$  в формуле (15) подбирается таким образом, чтобы в начальный момент времени (т.е. при  $\varphi = 0$ ) величина  $t_0$  была равна  $t_{cp}$ :

$$\varphi_0 = -\arccos(0,5\Delta_y / R_{Zz}). \quad (20)$$

Для определения изменения глубины резания, вызванное предварительной шероховатостью поверхности заготовки  $t_{Rz}$  введем допущение, что высота неровностей изменяется случайным образом в соответствии с нормальным законом распределения. Тогда в соответствии с правилом “шести сигм” имеем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{Rz} &= R_z / 6; \\ t_{Rz} &= \sigma_{Rz} \text{RandF}; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где  $\sigma_{Rz}$  – среднее квадратическое отклонение высоты неровностей поверхности;  $R_z$  – значение шероховатости поверхности по  $Rz$ ;  $\text{RandF}$  – случайная функция, значения которой соответствуют стандартизованному нормальному распределению.

Приведенный выше анализ влияния колебаний системы совместно с анализом влияния геометрии режущей части инструмента на шероховатость растачиваемой поверхности был обеспечен программой для ЭВМ в среде программирования Delphi, которая является средством быстрой разработки приложений под Windows, что позволило разработать интерфейс программы. При использовании программы на ЭВМ, где не установлена Delphi, достаточно иметь файл `Rastach1.exe` и файл с динамической библиотекой `Bivbx11.dll`.

Математические модели и алгоритмы реализованы в модуле `Rastach` в виде отдельного блока из пяти процедур.

Программное обеспечение позволяет осуществлять ввод исходных данных на диск, запись и чтение их с диска, а также определять шероховатость поверхности. В состав программного обеспечения входят восемь файлов. Тестирование разработанного программного обеспечения показало его высокую эффективность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков. – М.: Машиностроение, 1967. – 367с. 2. Кудинов В.А. Информационный подход к проблеме малых перемещений в станках/ В.Э.Пуш, Л.И.Шутова / Тр. 3-го междунар. конгр. КТИ-96. – М., 1996. – С.82–84. 3. Тарасик В.П. Математическое моделирование технических систем. –Мн: ДизайнПро, 1997. – 640с. 4. Справочник технолога машиностроителя. Т.1, /Под ред. А.Г.Косиловой и Р.К.Мещерякова. –М.: Машиностроение, 1986. – 656с.

УДК 620.179.118.4

В.А. Зеленин, А.С. Сенько, С.Ф. Сенько

### **ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВЫСОКОГО КЛАССА ОБРАБОТКИ**

*Физико-технический институт Национальной Академии Наук  
Минск, Беларусь*

Современный уровень развития точного приборостроения, машиностроения, микроэлектроники, и др. отраслей промышленности предъявляет все более высокие требования к исходным материалам, в частности, к качеству обработки поверхностей ответственных деталей. Это, в свою очередь, обуславливает необходимость постоянного совершенствования и разработки новых методов контроля качества поверхностей, дефекты которых влияют на выход годных и параметры изготавливаемых изделий. Метрологическое обеспечение изготовления деталей с поверхностями высокого качества базируется в настоящее время в основном на применении узкоспециализированных методов контроля.

Критерием высокого качества поверхностей, наряду с соответствием требованиям к размерам и форме, является отсутствие на них дефектов. Наличие дефектов поверхности приводит к браку изделий, например, снижает процент выхода годных кристаллов при изготовлении ИС.

Общим недостатком существующих методов контроля качества поверхности является оценка интегральных ее характеристик, например, шероховатости, неплоскостности и др. [1]. Эти методы не позволяют установить природу и причины возникновения дефектов, что в ряде случаев приводит к необоснованному росту материальных