

У ДК 621.923

Д.А. Каинов, доцент, канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

Студгородок, г. Севастополь, Украина, 99053

root@sevastopol.ua

ОЦЕНКА ФАКТИЧЕСКОЙ ГЛУБИНЫ РЕЗАНИЯ С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОФИЛЯ ИНСТРУМЕНТА И ВИБРАЦИЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

Статья посвящена установлению взаимосвязей состояния технологической системы с фактической глубиной резания при чистовом и тонком шлифовании.

Эксплуатационные параметры качества деталей существенным образом определяются на этапе финишных операций технологическими параметрами процесса обработки. Определение выходных технологических параметров шлифования с помощью математических моделей позволяет значительно упростить поиск оптимальных режимов и является актуальной задачей.

Обычно математические модели, характеризующие процессы шлифования, строятся на основании анализа поведения единичных срезов, которые определяют силы резания для единичного зерна, температуру в зоне контакта и другие параметры процесса обработки [1 – 3]. В свою очередь, все параметры микрорезания непосредственно зависят от фактической глубины микрорезания, которая и определяет конкретные условия работы формообразующих элементов шлифовального круга [2].

Целью данной работы является установление взаимосвязей режима обработки, параметров технологической системы, профилей шлифовального круга и заготовки с текущими значениями фактической глубины резания и выходными параметрами процесса шлифования.

Фактическая глубина резания $t_{\bar{r}}(j, x)$ на i -ом обороте определяется текущим радиус-вектором заготовки после i -го оборота $r_{i-13}(j, x)$, соответствующим значением радиус-вектора круга $R_{i3}(g, x)$ и величиной межцентрового расстояния A_{0i} . Исходя из геометрического анализа зоны контакта “шлифовальный круг – заготовка”, имеем

$$t_{\varphi_i}(j, x) = r_{i-13}(j, x) + R_{i3}(g, x) - A_{0i}. \quad (1)$$

В уравнении рассматриваются динамические радиус-векторы заготовки и круга, вычисленные с учетом температурных dr_{Ti-1} , dR_{Ti} и упругих dr_{yni-1} , dR_{yni} деформаций. Текущее значение радиус-вектора обрабатываемой поверхности описывается зависимостью:

$$r_{i-1e}(j, x) = r_{i-1}(j, x) + dr_{Ti-1} - dr_{yni-1}.$$

Радиус - вектор круга в данный момент времени t_i с учетом его износа в единицу времени $S_R(g, x, t)$ определяется выражением:

$$R_{i\varnothing}(\gamma, x, \tau) = R_0(\gamma, x) - \int_0^{t_i} S_R(\gamma, x, \tau) d\tau + \delta R_{Ti} - \delta R_{yni}. \quad (2)$$

Исходный профиль круга после правки вычисляется по формуле

$$R_{i\varnothing}(\gamma, x) = R_0(x) + \sum_{l=1}^P A_l(x) \cos(l\gamma + \psi_l(x)), \quad (3)$$

где $R_0(x)$ – радиус средней окружности на расстоянии x от базовой плоскости; $A_l(x)$ и $\psi_l(x)$ – амплитуда и фаза l -ой гармоники.

Слагаемые выражения (3) определяются точностью изготовления инструмента, режимом правки и жесткостью правящего приспособления. За период стойкости шлифовальный круг изнашивается. На его рабочей поверхности образуется волнистость. Учитывая неравномерность износа инструмента, его величину в единицу времени можно представить в виде функционала, подобно выражению (3):

$$S_R(\gamma, x, \tau) = \overset{-}{S}_R(x, \tau) + \sum_{j=1}^P A_{sj}(x, \tau) \cos(j\gamma + \psi_j(x, \tau)). \quad (4)$$

Текущее значение радиус-вектора круга (2) в момент времени t_i с учетом (3) и (4) запишется следующим образом:

$$R_{i\varnothing}(\gamma, x) = R_0(x) + \sum A_l(x) \cos(l\gamma + \psi_l(x)) - \int S_R(x, \tau) d\tau - \int S_R(x, \tau) d\tau - \sum \int [A_{sj}(x, \tau) \cos(j\gamma + \psi_j(x, \tau))] d\tau + \delta R_{Ti} - \delta R_{yni}.$$

Величина межцентрового расстояния рассчитывается по

зависимости:

$$A_{0i} = A_H - \int S_y(\tau) d\tau - \int S_y(\tau) d\tau + \Delta A_{yni} - (y_{ki} - y_{ui}) \cdot$$

где A_H – межцентровое расстояние в начальный момент времени ($i=0$), определяемое как сумма максимальных радиус-векторов заготовки (2) и круга (3); $S_y(\tau)$ – поперечная подача – скорость перемещения шлифовальной бабки; ΔA_{yni} – приращение межцентрового расстояния в результате упругих деформаций; y_{ki} и y_{ui} – координаты центра круга и изделия относительно их средних положений

Вследствие того, что в состав слагаемых для определения $t_f(\varphi, x)$ (1) входят как средние величины, так и их периодические составляющие, фактическую глубину резания можно представить в виде суммы

$$t_{fi}(\varphi, x) = t_{fi}(x) + \alpha \cdot \dot{t}_{fi}(\varphi, x), \quad (5)$$

где $t_{fi}(x)$ и $\alpha \cdot \dot{t}_{fi}(\varphi, x)$ – статическая и динамическая составляющие фактической глубины резания, соответственно

$$\begin{aligned} t_{\varphi i}(x) = & r_{i-1}(x) + \delta r_{Ti-1} - \delta r_{yni-1} + R_0(x) + \delta R_{Ti} - \delta R_{yni} - \\ & - \int S_R(x, \tau) d\tau - \int S_R(x, \tau) d\tau + \int S_y(\tau) d\tau - \Delta A_{yni} - A_H. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} t_{\varphi 0i}(\varphi, x) = & \sum A_{ki-1}(x) \cos(k_{i-1}\varphi + \psi_{ki-1}(x)) + \sum A_l(x) \cos(l_\gamma + \psi_l(x)) - \\ & \sum \int [A_{sjl}(x, \tau) \cos(j\gamma + \psi_i(x, \tau))] d\tau + (y_{ki} - y_{ui}). \end{aligned} \quad (7)$$

Статический компонент фактической глубины резания $t_f(x)$ в зависимости от упругих отжатий в технологической системе DA_{yni} , которые определяются податливостью в заданном поперечном

сечении заготовки w и нормальной составляющей силы резания. Величина последней непостоянна и существенно изменяется за период стойкости инструмента вследствие образования на абразивных зернах площадок износа.

Среднее значение нормальной составляющей силы резания $\bar{P}_{yi}$ может быть определено на основании использования известных расчетных зависимостей:

$$\bar{P}_{yi} = \pi d_n \cdot B \frac{\sigma_i \cdot \varepsilon_i \cdot \operatorname{tg} \beta}{V_k} \cdot S_{\varphi i} + \eta \cdot B \frac{\sigma_i}{C} \sqrt{\frac{D_{\varphi}}{f_u}},$$

где B – ширина зоны контакта; σ_i – средняя интенсивность напряжений для различных сталей по всей напряженной зоне действия единичного зерна, характеризующая сопротивляемость материала заготовки пластической деформации в температурно-скоростных условиях, присущих процессу шлифования; ε_i – интенсивность деформации; β – тангенс угла между вектором скорости круга и равнодействующей силой резания без учета сил трения на площадке затупления абразивных зерен; η – степень затупления инструмента, равная отношению суммарной площади площадок затупления всех зерен, находящихся на рабочей поверхности круга, к геометрической площади его рабочей поверхности; C – коэффициент, устанавливающий соотношение между σ_i и средним контактным давлением.

Фактическая подача $S_{\varphi i}$ соответствует радиальному съему металла

$$(S_{ji}/f_u = \Delta r_i).$$

Сила резания, с учетом приведенной жесткости контакта шлифовального круга и заготовки C_k и коэффициента сопротивления G_k , рассчитывается по зависимости:

$$P_{ywi} = C_k \cdot t_{fi}(x) + G_k \cdot \dot{x}_{fi}(\varphi, x). \quad (7)$$

В динамической системе круглошлифовального станка наименее устойчивым звеном является система «заготовка–центр».

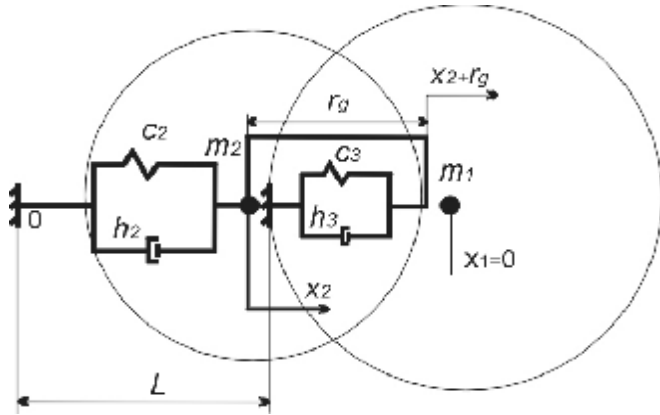


Рисунок 1 – Эквивалентная схема динамической системы круглошлифовального станка

При принятии в качестве допущений $c_1 \rightarrow \infty$, $h_1 \rightarrow \infty$ центр шлифовального круга становится неподвижен, т.е. координата $x_1 = 0$ (рисунок 1) и система уравнений, характеризующих динамические взаимодействия шлифовального круга и заготовки, сводится к виду

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2 + h_2 \cdot \dot{x}_2 + c_2 \cdot x_2 = h_3 \cdot (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_3 \dot{x}_1 + (L - r - x_2)$$

или с учетом принятых здесь обозначений

$$m_{шк} \cdot y_{ui}'' + G_u \cdot y_{ui}' + C_u \cdot y_{ui} = C_k \cdot t_{ф\omega i} + G_k \cdot t_{ф\omega i}' \quad (8)$$

Известно частное решение дифференциального уравнения (8) с учетом соотношения (7). Динамическая система круглошлифовального станка рассматривается как имеющая одну степень свободы, колебательный процесс в которой возбуждается волнистой рабочей поверхностью инструмента. С представлением отклонения формы, определяемой превалирующим периодическим компонентом

$$H_{bi} = A_{knp} \cos(n_b \cdot t + y_{np i}),$$

а движение центра заготовки характеризуется дифференциальным уравнением:

$$m_{шк} \cdot y_{ui}'' + G_u \cdot y_{ui}' + C_u \cdot y_{ui} = H_{bi} \cdot C_k + \dot{H}_{bi} \cdot G_k, \quad (9)$$

где f_k и j_{np} – частота вращения круга и число волн на его рабочей поверхности.

Амплитуда $A_{knp i}$ определяется отклонениями профиля заготовки на предшествующем $i-1$ обороте (первое слагаемое (6)) и отклонениями профиля инструмента на выполняемом i -ом обороте (второе и третье слагаемые (9)). Вследствие того, что профиль обрабатываемой поверхности на $i-1$ обороте рассчитывается по величине радиального съема металла Δr_{i-1} , с учетом соответственно и y_{i-1} , то выражение (9) является дифференциальным уравнением с отклоняющимся аргументом и для его решения целесообразно использовать численные методы. Однако, изменение $A_{knp i}$ в пределах одного оборота незначительно и поэтому его можно считать изменяющимся ступенчато на каждом обороте заготовки.

При этом необходимо решать задачу Коши для каждого оборота, считая результаты, полученные на предыдущем обороте очередной порождающей функцией – аналогом начальных условий для обыкновенных дифференциальных уравнений. Значение приведенной амплитуды $A_{knp i}$ и фазы $\psi_{knp i}$ для любой частоты вычисляется как для комплексных величин

$$A_{knp} = \sqrt{A_{ki-1}^2 + A_{li}^2 + 2A_{ki-1} \cdot A_{li} \cdot \cos(\psi_{li} - \psi_{ki-1})},$$

$$\operatorname{tg} \psi_{knp i} = \frac{A_{ki-1} \cdot \sin \psi_{ki-1} + A_{li} \cdot \sin \psi_{li}}{A_{ki-1} \cos \psi_{ki-1} + A_{li} \cos \psi_{li}},$$

где A_{ki-1} , A_{li} , ψ_{ki-1} , ψ_{li} – амплитуды фазы отклонений профиля на заготовке и шлифовальном круге равно

Известно, что число волн, образующихся на рабочей поверхности инструмента в процессе шлифования равно

$$j_{np} = \frac{v_c}{v_k} = \frac{v_c}{2\pi f_k},$$

где v_c – частота собственных колебаний системы “заготовка–центры; v_k – угловая частота вращения.

При допущении, что собственные колебания в системе быстро затухают, решением уравнения (9) является выражение [4]:

$$y_{ui} = \frac{A_{knp} \sqrt{C_k^2 + G_k^2 v_\epsilon^2}}{m \sqrt{(v_c^2 - v_\epsilon^2) + 4n^2 v_\epsilon^2}} \cos(v_\epsilon \cdot \tau + \psi_{knp i} + \alpha - \lambda).$$

Частота собственных колебаний системы “заготовка–центры” определяется следующим образом:

$$y_{ui} = \frac{A_{k \cdot p i} \sqrt{C_k^2 + G_k^2 \cdot v_{\%o}^2}}{m \sqrt{(v_c^2 - v^2)^2 + 4n^2 v_{\%o}^2}} \cos(v_{\%o} \cdot \tau + \psi_{\cdot p i} + \alpha - \lambda),$$

$$n = \frac{G_u + G_k}{2m_u},$$

$$\alpha = \arctg \frac{G_k \cdot v_{\%0}}{C_k}, \quad \lambda = \arctg \frac{2 \cdot n \cdot v_{\%0}}{v_-^2 - v_{\%0}^2}.$$

Жесткость зоны контакта шлифовального круга с заготовкой C_k рассчитывается

$$\frac{1}{C_l} = \frac{1}{C_z} + \frac{1}{C_{ш}} \quad \text{или} \quad C_k = \frac{C \cdot C_{ш}}{C + C_{ш}},$$

где C – коэффициент, определяемый как отношение среднего значения силы резания P_y к средней глубине резания за оборот заготовки, ($C = \frac{\bar{P}_y}{\bar{t}_\phi}$); $C_{ш}$ – коэффициент статической жесткости

зоны контакта шлифовального круга.

Динамическая составляющая фактической глубины резания $t_{\phi wi}(\varphi, x)$ (уравнение 7) с учетом ряда преобразований запишется в виде

$$t_{\phi wi}(\varphi, x) = \sum A_{ki-1}(x) \cos(k_{i-1}\varphi + \psi_{ki-1}(x)) + \sum A_l(x) \cos(l\gamma + \psi_l(x)) -$$

$$\sum \int [A_{sj}(x, \tau) \cos(j\gamma + \psi_j(x, \tau))] d\tau - F A_{k*pi} \cos(j_{gh}\gamma + \psi_{pi} + |\alpha - \lambda|)$$

, (10)

где

$$F = \frac{1}{m_u} \sqrt{\frac{C_k^2 + G_k^2 \cdot v_{\%0}^2}{(v_-^2 - v_{\%0}^2)^2 + 4n^2 v_{\%0}^2}},$$

Амплитуда, фаза, и частота динамической составляющей определяют траекторию относительного движения отдельных участков обрабатываемой поверхности и инструмента, форму зоны контакта “шлифовальный круг-заготовка”, длительность контакта отдельных абразивных зерен с обрабатываемым материалом и в конечном итоге – радиальный съем металла в целом в пределах зоны контакта. В качестве примера на рисунке 1 изображены расчетные кривые изменения глубины резания при различных частотах относительных колебаний и постоянной фазе. По своему абсолютному значению динамическая составляющая может превышать статическую.

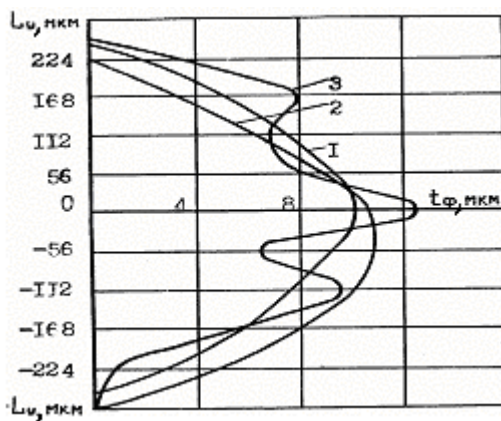


Рисунок 2 – Расчетные кривые изменения фактической глубины резания при различных частотах колебаний ($t_{\phi} = 10$ мкм; $t_{\phi 0} = 3$ мкм),
1) $f = 0$; 2) $f = 80$ Гц; 3) $f = 700$ Гц

Полученные расчетные зависимости для определения фактической глубины резания (5) – (7) и (10) позволяют вычислять в заданный момент времени для любого участка поверхности величину радиального съема металла с учетом режима обработки, параметров технологической системы, профилей шлифовального круга и заготовки, что может служить основой построения и исследования систем управления глубиной резания.

Библиографический список

1. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник. Под ред. А.Н. Резникова — М.: Машиностроение, 1977. — 391 с.
2. Филимонов Л.Н. О роли рельефа рабочей поверхности круга в процессе шлифования /Л.Н. Филимонов // Вероятностно статистические основы процессов шлифования и доводки. — 1974. — С. 125 – 128.
3. Королев А.В. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки / А.В. Королев, Ю.К. Новоселов. Взаимодействие инструмента и заготовки при абразивной обработке. Ч. 2. — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1989. — 160 с.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики / В.И. Смирнов. Т2 — М.: Наука, 1974. — 656 с.

Поступила в редакцию 22.02.2005 г.