

12. Бельский, С.Е. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента / С.Е. Бельский, Р.Л. Тофпенец. – Минск: Наука и техника, 1984. – 128 с.
13. Суздаев, И.П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И.П. Суздаев. – М.: КомКнига, 2006. – 592 с.
14. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский [и др.]. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
15. Горелик, С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. – М.: Металлургия, 1970. – 107 с.
16. Научные основы повышения малоциклового прочности / Н.А. Махутов [и др.]; под ред. Н. А. Махутова. – М.: Наука, 2006. – 623 с.
17. Бойцов, В.Б. Технологические методы повышения прочности и долговечности: учеб. пособие / В.Б. Бойцов, А.О. Чернявский. – М.: Машиностроение, 2005. – 128 с.
18. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов / Г.П. Фетисов, Ф.А. Гарифуллин. – М.: Изд-во Оникс, 2007. – 624 с.
19. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасов [и др.]; под общ. ред. Б. Н. Арзамасова. – М.: МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 648 с.
20. Гусев, А.И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А.И. Гусев. – М.: Физматлит, 2009. – 416 с.
21. Наноструктурные материалы – 2008. (НАНО-2008): материалы Первой междунар. науч. конф. – Минск: Беларус. наука, 2008. – 765 с.

Материал поступил в редакцию 04.09.11

SHMATOV A.A., DEVOINO O.G. Thermo-hydrochemical treatment for hard alloys in the special aqueous suspensions of oxides

The structure and properties of the oxide solid-lubricant coatings, obtained by thermo-hydrochemical treatment of hard alloys, are examined in the paper. The process involves (1) the chemical treatment in an special aqueous suspension of nano-sized oxides and (2) subsequent heat treatment. Optimization of the thermo-hydrochemical process was performed. Treatment with optimal regime permits decreasing the friction coefficient of the hard alloy surface in 3,8 as compared with untreated. Developed technology permit increasing the wear resistance of cutting tools by the factor of 1.3 – 4.0 in comparison with traditional its.

УДК 621.941-529.004

Туромша В.И., Мищенко С.Н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА И СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЗАНИИ С ПОСТОЯННОЙ ПЛОЩАДЬЮ СЕЧЕНИЯ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ

Введение. При токарной обработке деталей сложной формы методом следа [1] на станках с ЧПУ процесс резания является нестационарным. Он характеризуется непрерывным изменением глубины резания, которая определяется формой заготовки (обычно цилиндром) и контуром готовой детали. Обработка с переменной глубиной встречается также при точении деталей из заготовок с неравномерным припуском, т.е. имеющих значительные отклонения по форме и размерам от заданных значений (например, заготовок, получаемых методом свободной ковки) [2]. Глубина резания при этом определяется сравнением двух виртуальных геометрических моделей. Первая модель представляет собой информационный массив «облако точек», получаемый сканированием заготовки или ее измерением на координатно-измерительной машине. Размерные параметры второй модели определяются конструкторской документацией.

Точение с переменной глубиной t может осуществляться с постоянной величиной подачи, но в этом случае неизбежна потеря производительности, поскольку изменяется нагрузка станка по мощности. В современных системах ЧПУ возможно управление подачей S_o (мм/об) в соответствии с изменением t (мм), например, за счет обеспечения постоянства площади сечения срезаемого слоя K (мм²/об), т.е.

$$K = t \times S_o = const. \quad (1)$$

Для математического моделирования таких процессов обработки деталей необходимым условием является аналитическое определение периода стойкости T и величины износа h_p режущего инструмента. Известные [3] степенные зависимости вида

$$T = C_T t^x S_o^y v^u; \quad h_p = V_h \tau = C_V t^q S_o^m v^m \tau \quad (2)$$

(C_T, C_V, x, y, u, q, m – эмпирические коэффициенты и показатели степени; V_h – скорость изнашивания инструмента (мкм/мин); τ – время резания; v – скорость резания (м/мин)) справедливы для стационарного резания. При нестационарном (переменном) резании

формулы (2) дают большую погрешность вычисления.

Исходные зависимости для определения T и h_p при обработке деталей с переменными t и S_o . В работе [4] для процессов обработки деталей с переменными параметрами режима резания получена математическая модель в общем виде, позволяющая определить T и h_p

$$T = C_T \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x S_o^y v^u}}; \quad h_p = C_V \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q S_o^m v^m, \quad (3)$$

где τ_n и τ_k – соответственно время начала и время конца обработки элементарной поверхности ($\tau = \tau_k - \tau_n$).

При постоянной скорости резания с учетом формулы (1) модель (3) примет вид

$$T = C_T v^u K^y \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} t^{y-x} d\tau}; \quad h_p = C_V v^m K^u \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^{q-u} d\tau. \quad (4)$$

Для ее решения необходимо установить функцию $t = f(\tau)$ для различных форм обрабатываемой детали, а также определить пределы интегрирования.

Независимо от формы обрабатываемого контура, суммарная площадь сечения срезаемого слоя $\sum K$ за время резания τ равна

$$\sum K = nK\tau,$$

где n – частота вращения обрабатываемой детали (об/мин).

Отсюда можно выразить τ

$$\tau = \sum K / nK. \quad (5)$$

Туромша Вячеслав Иванович, к.т.н., доцент, зав. кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

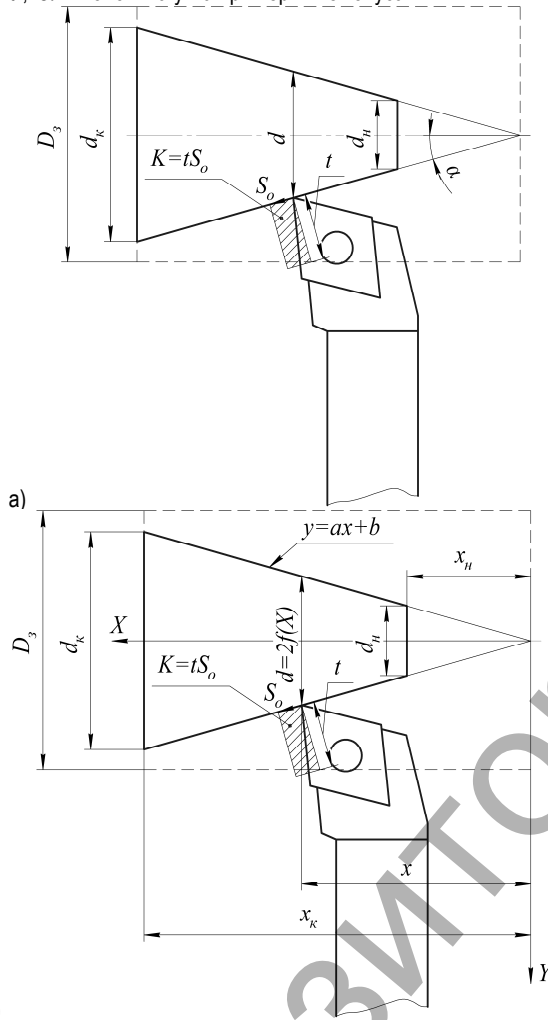
Мищенко Сергей Николаевич, аспирант кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

Точение конической поверхности. При токарной обработке конуса из исходной цилиндрической заготовки (рис.1, а) суммарная площадь сечения срезаемого слоя за время резания τ равна площади трапеции:

$$\sum K = \frac{ctg\alpha}{2} \left(\frac{D_3}{2} + t \cos \alpha \right) \left(\frac{D_3}{2} - t \cos \alpha \right), \quad (6)$$

где D_3 – диаметр заготовки, мм; t – глубина резания в момент времени τ ; α – половина угла при вершине конуса.



б)
Рис. 1. Токарная обработка конической поверхности с переменными t и S_0 : а – задание образующей углом α и диаметром d ; б – задание образующей уравнением прямой $y = ax + b$

Используя выражение (6), из уравнения (5) получим

$$\tau = \frac{D_3^2 \cos \alpha - t^2 \cos^3 \alpha}{4 \cdot 2nK \sin \alpha}. \quad (7)$$

Глубина резания t при этом определяется как

$$t = \frac{(D_3 - d)}{2 \cos \alpha}, \quad (8)$$

где d – диаметр обработки (обработанной поверхности) в любой момент времени τ .

Соответственно в начале и в конце участка обработки конической поверхности

$$t_H = \frac{(D_3 - d_H)}{2 \cos \alpha}; \quad t_K = \frac{(D_3 - d_K)}{2 \cos \alpha}. \quad (9)$$

где d_H и d_K – диаметр обработки соответственно в начале и конце обрабатываемого контура.

Из выражений (9) и (7) получим

$$\tau_H = \frac{ctg\alpha}{8nK} (2D_3 d_H - d_H^2); \quad \tau_K = \frac{ctg\alpha}{8nK} (2D_3 d_K - d_K^2), \quad (10)$$

откуда

$$\tau = \tau_K - \tau_H = \frac{ctg\alpha}{8nK} [2D_3 (d_K - d_H) - (d_K^2 - d_H^2)]. \quad (11)$$

Подставив уравнение (8) в (4) и используя выражение (7) для замены переменной в модели (4) в виде

$$d\tau = -\frac{t \cos^2 \alpha}{nK \sin \alpha} dt,$$

получим зависимости для расчета T и h_p при обработке конической поверхности с постоянной площадью сечения срезаемого слоя:

$$T = C_T v^u K^y 2^{y-x-1} (y-x+2) \times \frac{(\cos \alpha)^{y-x} (2D_3 - d_K - d_H)(d_K - d_H)}{[(D_3 - d_H)^{y-x+2} - (D_3 - d_K)^{y-x+2}]}, \quad (12)$$

$$h_p = C_V v^m K^{u-1} \frac{1}{2^{q-u+2} (q-u+2)n} \times \frac{(\cos \alpha)^{u-q+1} [(D_3 - d_H)^{q-u+2} - (D_3 - d_K)^{q-u+2}]}{\sin \alpha}. \quad (13)$$

Рассмотрим реализацию полученных моделей на примере обработки конуса ($\alpha = 10^\circ$, $d_H = 32$ мм, $d_K = 50$ мм) из цилиндрической заготовки ($D_3 = 54$ мм). Материал заготовки – сталь 45 (прокат, 215 НВ, $\sigma_s = 750$ МПа), материал резца – твердый сплав Т15К6. Геометрические параметры резца: $\phi = 60^\circ$; $\phi_1 = 30^\circ$; $\gamma = 7^\circ$; $\lambda = 0^\circ$. Эмпирические параметры в формулах (12 – 13) [3]: $C_T = 310^5$; $x = -0,75$; $y = -1$; $\mu = -5$; $C_V = 0,515 \times 10^{-3}$; $q = 0,022$; $u = 0,49$; $m = 1,55$. Частота вращения заготовки $n = 1000$ мин⁻¹. Площадь сечения срезаемого слоя $K = 0,35$ мм²/об.

Из уравнений (10), (11) получим: $\tau_H = 4,93$ мин; $\tau_K = 5,87$ мин; $\tau = 0,94$ мин.

Скорость резания составляет

$$v = \frac{\pi D_3 n}{1000} = 169,6 \text{ м/мин.}$$

Тогда по формулам (12) и (13) рассчитаем T и h_p :

$$T = 310^5 \cdot 169,6^{-5} \cdot 0,35^{-1} \cdot 2^{-1+0,75-1} \cdot (-1+0,75+2) \times \frac{(\cos 10^\circ)^{-1+0,75} \cdot (2 \cdot 54 - 50 - 32)(50 - 32)}{[(54 - 32)^{-1+0,75+2} - (54 - 50)^{-1+0,75+2}]} = 94,8 \text{ мин;}$$

$$h_p = 0,515 \cdot 10^{-3} \cdot 169,6^{1,55} \cdot 0,35^{0,49-1} \times \frac{1}{2^{0,022-0,49+2} (0,022-0,49+2) \cdot 1000} \times \frac{(\cos 10^\circ)^{0,49-0,022+1} [(54-32)^{0,022-0,49+2} - (54-50)^{0,022-0,49+2}]}{\sin 10^\circ} = 0,34 \text{ мкм.}$$

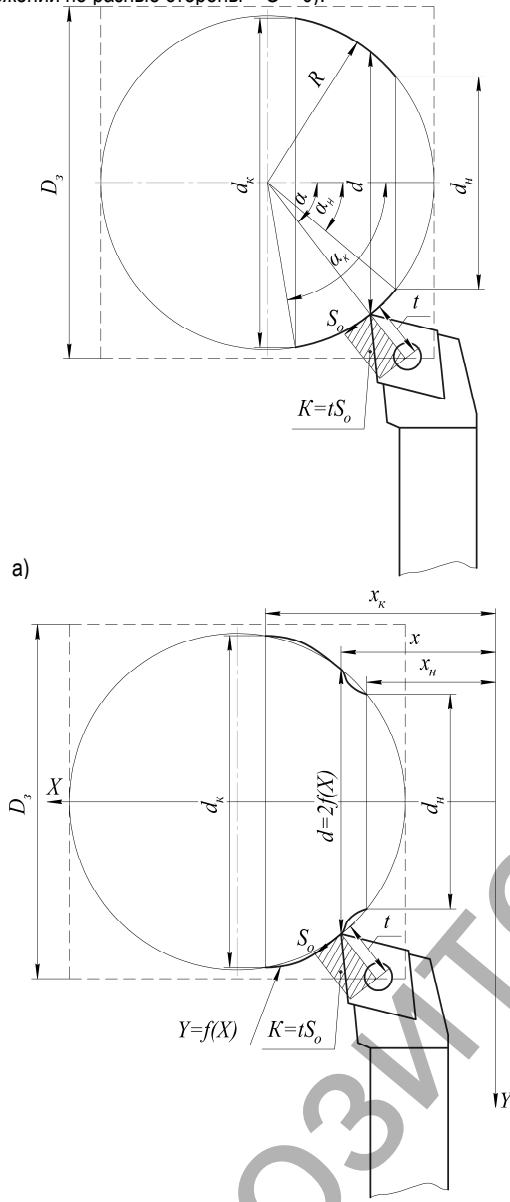
Расчет τ , T и h_p при обработке конической поверхности является одной из наиболее простых задач, поскольку образующей конуса является прямая линия. Поэтому получим математические модели, аналогичные (11)–(13), для более сложных поверхностей.

Точение сфероидной поверхности. При обработке поверхности сфероиды из исходной цилиндрической заготовки (рис. 2, а) суммарная площадь сечения срезаемого слоя равна площади криволинейной трапеции:

$$\sum K = \frac{R}{2} (D_3 - 2e)(1 - \cos \alpha) - \frac{R^2}{2} \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right), \quad (14)$$

где R – радиус образующей окружности сфероиды, α – угол между осью шпинделя и линией, проходящей через центр образующей окружности и вершину резца (углы α_H и α_K соответствуют началу

и концу обработки сфероидной поверхности); e – расстояние между осью шпинделя и осью сфероид (на рис. 2, а $e = 0$; при $e \neq 0$ сфера превращается в сфероид, причем при расположении образующей сфероид и его центра по одну сторону оси шпинделя $e > 0$, а при расположении по разные стороны – $e < 0$).



а – задание образующей углом α и радиусом R ;
б – задание образующей сплайном $Y = f(X)$

Рис. 2. Точение сферической поверхности с переменными t и S_o

Подставив выражение (14) в уравнение (5), получим зависимость τ от угла α , который определяет глубину резания t , т.е.

$$\tau = \frac{R}{2nK} \left[(D_3 - 2e)(1 - \cos \alpha) - R \left(\alpha - \frac{1}{2} \sin 2\alpha \right) \right], \quad (15)$$

откуда

$$\tau_H = \frac{R}{2nK} \left[(D_3 - 2e)(1 - \cos \alpha_H) - R \left(\alpha_H - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_H \right) \right]; \quad (16)$$

$$\tau_K = \frac{R}{2nK} \left[(D_3 - 2e)(1 - \cos \alpha_K) - R \left(\alpha_K - \frac{1}{2} \sin 2\alpha_K \right) \right]. \quad (17)$$

С учетом зависимости $\tau = \tau_K - \tau_H$, получим

$$\tau = \frac{R}{2nK} \left[(D_3 - 2e)(\cos \alpha_H - \cos \alpha_K) - R(\alpha_K - \alpha_H) + \frac{R}{2} (\sin 2\alpha_K - \sin 2\alpha_H) \right]. \quad (18)$$

Глубина резания при обработке сфероидной поверхности равна

$$t = \frac{[D_3 - 2(R \sin \alpha + e)]}{2 \sin \alpha}. \quad (19)$$

Подставив уравнение (19) в (4) и используя выражение (15) для замены переменной α вместо τ в модели (4) в виде

$$d\tau = \frac{R}{2nK} \left[(D_3 - 2e) \sin \alpha - R(1 - \cos 2\alpha) \right] d\alpha,$$

получим зависимости для расчета T и h_p при обработке сфероидной поверхности с постоянной площадью сечения срезаемого слоя:

$$T = \frac{C_T V^m K'}{2^{x-y}} \times \frac{\left[(D_3 - 2e)(\cos \alpha_H - \cos \alpha_K) - R(\alpha_K - \alpha_H) + \frac{R}{2} (\sin 2\alpha_K - \sin 2\alpha_H) \right]}{\int_{\alpha_H}^{\alpha_K} [D_3 - 2(R \sin \alpha + e)]^{y-x+1} (\sin \alpha)^{x-y+1} d\alpha}, \quad (20)$$

$$h_p = \frac{C_V V^m K^{u-1} R^{\alpha_K}}{n 2^{q-u+1}} \cdot \int_{\alpha_H}^{\alpha_K} [D_3 - 2(R \sin \alpha + e)]^{q-u+1} (\sin \alpha)^{u-q+1} d\alpha. \quad (21)$$

Рассчитаем T , h_p и τ при обработке сферической поверхности ($R = 30$ мм, $\alpha_H = 45^\circ$, $\alpha_K = 70^\circ$, $e = 0$ мм) из цилиндрической заготовки ($D_3 = 60$ мм). Остальные параметры те же, что и в рассмотренном выше примере обработки конической поверхности.

По формулам (16)–(18) получим: $\tau_H = 0,38$ мин; $\tau_K = 0,53$ мин; $\tau = 0,15$ мин.

Скорость резания составляет $V = 188,5$ м/мин. Тогда по формулам (20) и (21) рассчитаем период стойкости и величину износа инструмента: $T = 157,7$ мин; $h_p = 0,07$ мкм.

Аналогичным образом можно получить математические модели для определения T , h_p и τ при обработке с переменными глубиной резания и подачей любой поверхности (например, эллиптической, гиперболической и др.), образующая которой задана в виде уравнения линии.

Решение задачи определения T и h_p и τ в общем виде.

Определенный интерес представляет задание обрабатываемого контура в виде функции $Y = f(X)$ в прямоугольной системе координат (рис. 3). Это позволяет определить искомые параметры при обработке любой аналитически описываемой поверхности, включая поверхности, образующая которых аппроксимирована сплайном.

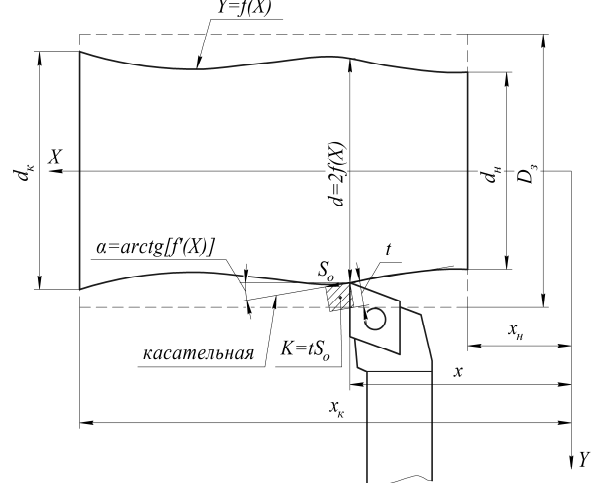


Рис. 3. Обработка сложного контура, заданного уравнением $Y = f(X)$, с переменными t и S_o

В этом случае диаметр обработки в любой точке определяется как

$$d = 2Y = 2f(X).$$

Отсюда диаметры d_H и d_K , соответствующие координатам вершины резца X_H и X_K в начале и конце обработки элементарной поверхности по оси X , равны

$$d_H = 2f(x_H); \quad d_K = 2f(x_K). \quad (22)$$

Суммарная площадь сечения срезаемых слоев за время резания τ составляет

$$\Sigma K = \tau nK \approx D_3(x_K - x_H) - \int_{x_H}^{x_K} f(X) dx = \int_{x_H}^{x_K} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right] dx,$$

откуда

$$\tau = \frac{1}{nK} \int_{x_H}^{x_K} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right] dx. \quad (23)$$

Глубина резания в любой момент времени определяется соотношением

$$t = \frac{(D_3 - d)}{2 \cos \alpha}, \quad (24)$$

где α – угол наклона касательной к обработанной поверхности, проходящей через вершину резца (рис. 3).

Угол α равен

$$\alpha = \arctg [f'(X)], \quad (25)$$

где $f'(X)$ – первая производная от функции $f(X)$.

Тогда из (24) и (25) получим

$$t = \frac{[D_3 - 2f(X)]}{2 \cos \arctg [f'(X)]}. \quad (26)$$

Используя уравнение (24), выполним замену переменной по выражению

$$d\tau = \frac{1}{nK} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right] dx$$

и из (4) и (26) получим окончательно математические модели для расчета T и h_p при обработке фасонной поверхности с постоянной площадью сечения срезаемого слоя в общем виде

$$T = C_T v^u K^y \frac{\int_{x_H}^{x_K} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right] dx}{\int_{x_H}^{x_K} \left\{ \cos \arctg [f'(X)] \right\}^{x-y} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right]^{y-x+1} dx}; \quad (27)$$

$$h_p = C_V v^m K^{u-1} \times \frac{1}{n} \int_{x_H}^{x_K} \left\{ \cos \arctg [f'(X)] \right\}^{u-q} \left[\frac{D_3}{2} - f(X) \right]^{q-u+1} dx. \quad (28)$$

Рассмотрим реализацию данных моделей при обработке конуса и сферической поверхности. В изложенных выше примерах зададим образующую обрабатываемой поверхности уравнением в виде сплайна и сравним результаты расчета.

Образующая конуса может быть описана с помощью уравнения прямой $y(x) = 0,1763x$ (рис. 1, б). Тогда $y'(x) = 0,1763$. Из уравнений (22) получим $x_H = 90,75$ мм; $x_K = 141,80$ мм. После подстановки этих значений в формулы (23), (27), (28) будем иметь:

$$\tau_H = 4,93 \text{ мин}; \quad \tau_K = 5,87 \text{ мин}; \quad \tau = 0,94 \text{ мин};$$

$$T = 94,1 \text{ мин}; \quad h_p = 0,34 \text{ мкм}.$$

Образующая сферы может быть описана полиномом (рис. 2, б)

$$y(x) = 0,0007x^3 - 0,0589x^2 + 1,8566x + 8,9616.$$

Тогда $y'(x) = 0,0021x^2 - 0,1178x + 1,8566$. Аналогично предыдущему получим:

$$x_H = 8,79 \text{ мм}; \quad x_K = 19,74 \text{ мм}; \quad \tau = 0,15 \text{ мин};$$

$$T = 152,6 \text{ мин}; \quad h_p = 0,07 \text{ мкм}.$$

Таким образом, результаты расчета при использовании сплайн-функции практически совпадают с результатами при описании обрабатываемого контура математическим уравнением линии.

Отсюда следует, во-первых, что разработанные математические модели (27) и (28) стойкости и износа инструмента являются универсальными и позволяют использовать сплайн-функции для аппроксимации контура детали при обработке с переменными глубиной резания и подачей. Это также упрощает процесс подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ. Во-вторых, задание контура сплайном обеспечивает достаточно высокую точность вычислений T , h_p и τ . Величина погрешности расчета зависит от точности аппроксимации контура полиномом.

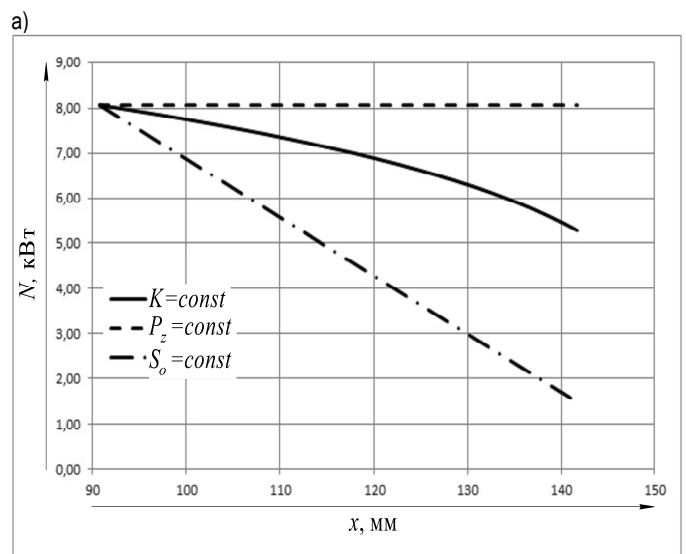
Оценка загрузки станка по мощности при обработке деталей с переменными t и S_o . Для расчета эффективной мощности резания N при обработке конуса, параметры которого приведены выше, использована зависимость [3]

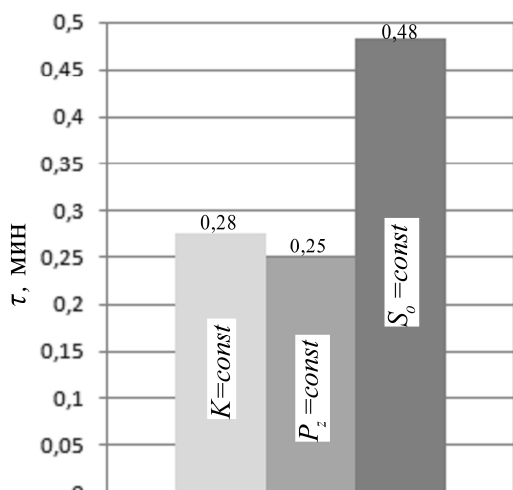
$$N(x) = \frac{P_z(x) \times v}{60 \times 1020} = \frac{C_p t^{x_p}(x) S_o^{y_p}(x) v^{\mu_p} \times v}{60 \times 1020},$$

где P_z – тангенциальная составляющая силы резания; C_p , x_p , y_p , μ_p – постоянный коэффициент и эмпирические показатели степени.

В соответствии с [3] принято: $C_p = 3000$; $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $\mu_p = -0,15$. Площадь сечения срезаемого слоя составляет $K = 1,2$ мм²/об, а максимальное значение мощности – $N = 8,07$ кВт.

Зависимость $N(x)$ при обработке с постоянной площадью среза K показана на рис. 4, а (сплошная линия).





б) **Рис. 4.** Изменение эффективной мощности резания N при обработке конуса (а) и время резания τ при различных алгоритмах управления подачей (б)

Степень снижения эффективной мощности по мере уменьшения глубины резания при этом значительно ниже, чем при обработке с постоянной подачей S_o (штрихпунктирная линия). Например, при $t \approx 2$ мм $N = 5,28$ кВт в первом случае, и только $N = 1,47$ кВт – во втором, т.е. нагрузка по мощности соответственно составляет 65 % и 18 %. Благодаря более полному использованию станка по мощности повышается к.п.д. привода и возрастает производительность обработки деталей за счет снижения времени резания с 0,48 мин до 0,28 мин, т.е. в 1,7 раза (рис. 4, б).

Обеспечение ограничения $K = const$ может быть использовано в качестве алгоритма управления параметрами режима резания при обработке деталей в условиях нестационарного резания на станках с ЧПУ. И хотя нагрузка станка по мощности при этом ниже, чем при обработке с постоянной силой резания P_z [5] (рис. 4, а - штриховая линия), но по производительности эти два алгоритма почти равноценны (рис. 4, б).

Обработка сложных контуров (совокупности элементарных поверхностей) с постоянной площадью сечения срезаемого слоя. Реальные поверхности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, обычно представляют собой совокупность нескольких элементарных поверхностей. Рассмотрим обработку одним инструментом сложного контура, часть которого задана сплайном, а другая часть включает образующие конической и сферической поверхностей (рис. 5).

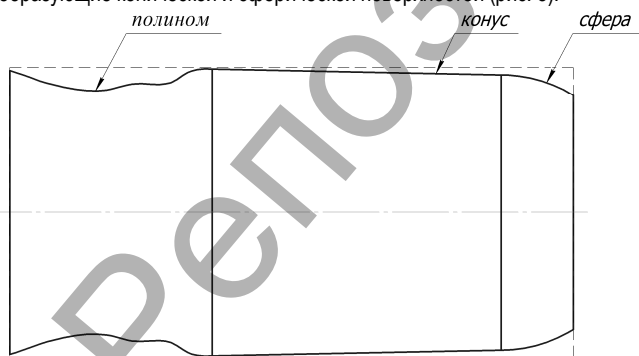


Рис. 5. Обработка сложного контура с переменными t и S_o

Математические модели, позволяющие определить T , h_p и τ , в этом случае имеют вид [6]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{\sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{T_i}}; \quad h_p = \sum_{i=1}^N h_{pi}; \quad \tau = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (29)$$

где T_i , h_{pi} и τ_i – соответственно период стойкости, величина износа резца и время резания при точении i -й элементарной поверхности; N – число элементарных поверхностей на детали.

Результаты расчета приведены в таблице 1.

Таким образом, разработанные математические модели позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и время резания при обработке с переменными t и S_o сложных контуров, включающих несколько элементарных поверхностей. Такие модели могут быть использованы как при нормировании операций обработки деталей на токарных многоцелевых станках, так и для оптимизации режима резания методами математического моделирования.

Оценка адекватности математических моделей износа и стойкости инструмента при обработке деталей с переменными t и S_o и с постоянной площадью сечения срезаемого слоя.

Для проверки адекватности математических моделей выполнялись экспериментальные исследования на примере токарной обработки с переменными глубиной резания и подачей деталей с наружной конической и сферической поверхностью. Эксперименты проводились на двухосевом токарном станке с ЧПУ мод. Hawk 200 фирмы Cincinnati с системой ЧПУ «GE-Fanuc 21i-TA», обеспечивающей обработку любых фасонных поверхностей вращения. Моделирование обработки и создание управляющей программы для станка производились в среде Pro/Engineer.

В соответствии с рекомендациями [7] в качестве критерия стойкости резца был принят размерный износ h_r .

Сравнение расчетных и экспериментальных данных осуществлялась по двум критериям – по величине предельного размерного износа H_r и по периоду стойкости T в соответствии с методикой, изложенной в [6, 8]. Погрешность расчета радиального износа δ_{Hr} и периода стойкости δ_T при обработке конических поверхностей с переменными глубиной резания и подачей составляет соответственно 9,5 % и 10,5 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

Заключение

1. Разработанные математические модели позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и время резания при обработке деталей с переменными глубиной резания и подачей, определяемой из условия постоянства площади сечения срезаемого слоя, для любого аналитически описываемого контура, включая контуры, заданные сплайнами. Разработаны также математические модели для деталей, представляющих собой совокупность нескольких элементарных поверхностей.
2. Экспериментальные исследования показали, что погрешность расчета радиального износа и периода стойкости инструмента при обработке конических и сферических поверхностей деталей с постоянной площадью сечения срезаемого слоя составляет соответственно 9,5 % и 10,5 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.
3. Задание контура обрабатываемой детали сплайном обеспечивает высокую точность вычислений радиального износа и периода стойкости инструмента. Величина погрешности расчета зависит от точности аппроксимирующего полинома. Применение сплайн-функций позволяет использовать разработанные модели стойкости и величины износа инструмента при программировании обработки сложных контуров средствами современных систем ЧПУ.
4. Условие постоянства площади сечения срезаемого слоя может быть использовано в качестве алгоритма управления параметрами режима резания при нестационарных процессах обработки деталей на станках с ЧПУ с целью повышения степени загрузки привода главного движения по мощности и производительности станочного оборудования.

Таблица 1. Результаты моделирования износа и стойкости инструмента при обработке сложного контура

Элементарная поверхность	Уравнение образующей	Параметры	τ_i , мин	T_i , мин	h_{pi} , мкм
Сфера	$y(x) = \sqrt{R^2 - (x-a)^2}$	$x_H = 22,5$ мм $x_K = 47,5$ мм $d_H = 80,78$ мм $d_K = 95,0$ мм $R = 47,5$ мм $a = 47,5$ мм	0,34	171,5	0,17
Конус	$y(x) = 0,016x + 47,5$	$x_H = 0,0$ мм $x_K = 125,0$ мм $d_H = 95,0$ мм $d_K = 99,0$ мм	0,54	61,0	0,47
Контур, заданный сплайном	$y(x) = 1,68992 \times 10^{-5} \times x^4 - 0,001756183 \times x^3 + 0,056556083 \times x^2 - 0,639741667 \times x + 49,5$	$x_H = 0,0$ мм $x_K = 50,0$ мм $d_H = 99,0$ мм $d_K = 90,0$ мм	0,28	115,3	0,45
Суммарная величина			τ	T	h_p
			1,16	92,0	1,09

Диаметр заготовки $D_3 = 100$ мм. Материал заготовки – сталь 45 ($\sigma_B = 750$ МПа). Материал реза – твердый сплав Т15К6. Частота вращения заготовки – $n = 500$ мин⁻¹. Площадь сечения срезаемого слоя $K = 0,7$ мм²/об.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Бушуев, В.В. Станочное оборудование автоматизированного производства: в 2 т. / В.В. Бушуев. – М.: Станкин, 1993. – Т. 1. – 584 с.
- Каштальян, И.А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания / И.А. Каштальян. – Минск: БНТУ, 2008. – 311 с.
- Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / Редкол.: под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
- Ящерицын, П.И. Период стойкости и износ резцов при нестационарном резании на токарных станках с ЧПУ / П.И. Ящерицын, В.И. Туромша, Чан Ким Тоан // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1993. – №4. – С. 40–47.
- Туромша, В.И. Анализ алгоритмов управления параметрами режима резания при обработке деталей с переменной глубиной резания на станках с числовым программным управлением / В.И. Туромша, С.Н. Мищенко // Вестник БрГТУ. – 2010. – №4(64): Машиностроение – С. 2–6.
- Туромша, В.И. Моделирование стойкости инструмента при обработке с переменной скоростью резания контуров, заданных сплайнами / В.И. Туромша, С.Н. Мищенко // Вестник БрГТУ. – 2010. – №4(64): Машиностроение – С. 84–89.
- Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
- Туромша, В.И. Моделирование стойкости инструмента при нестационарном резании с учетом технологических ограничений / В.И. Туромша, С.Н. Мищенко // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – №1. – С. 48–55.

Материал поступил в редакцию 13.05.11

TUROMSHA V.I., MISHCHENKO S.N. Modelling of Tool Wear and Durability in Non-stationary Cutting with Constant Section Area of the Cut

The mathematical models that allow to determine the durability period, the amount of tool degradation and the chip-cutting time in cutting workpieces with irregular depth of cut and feed for any analytically described contour including contours given by splines are developed. The feed is determined such that the section area of the cut is constant. The analysis of modelling results using as an example spherical and conical surfaces given by the equation and the approximating spline demonstrates high precision of mathematical models developed.

The error of calculating radial wear and durability period in relation to experimental data does not exceed 9,5% and 10,5% respectively, which confirms the adequacy of mathematical models developed.

УДК 621.791.92

Стефанович А.В.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННЫХ ОТХОДОВ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

В настоящее время существует ряд методов и технологических процессов нанесения покрытий на порошки, обеспечивающих решение различных задач. Диффузионное легирование металлических порошков применяется для целенаправленного изменения химиче-

Стефанович Александр Васильевич, младший научный сотрудник научно-исследовательской части Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.