

УДК 621.941-529.004

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА И СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ГЛУБИНОЙ РЕЗАНИЯ

**В. И. ТУРОМША, С. Н. МИЩЕНКО**

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск*

### Введение

Аналитическое определение периода стойкости  $T$  и величины износа  $h_p$  режущего инструмента является необходимым этапом математического моделирования технологических процессов обработки деталей. Большинство работ в данной области выполнено для условий стационарного резания [1], [2]. В то же время при обработке сложных контуров (конуса, сферы, эллипсоида, фасонной поверхности и т. д.) на станках с ЧПУ процесс резания характеризуется дискретным или непрерывным изменением параметров режима резания, рабочих углов инструмента и др., т. е. является нестационарным [3].

Большое распространение нестационарное резание имеет при точении деталей сложной формы методом следа. В этом случае непрерывно изменяется глубина резания, которая определяется простой формой заготовки (обычно цилиндром) и контуром готовой детали. Обработка с переменной глубиной резания 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 свободнойковки). Глубина резания 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.

При переменных параметрах режима резания известные степенные зависимости [1], предназначенные для стационарного резания, дают большую погрешность при вычислении  $T$  и  $h_p$ . В связи с этим представляет интерес получение математических моделей, позволяющих определить  $T$  и  $h_p$  при обработке деталей сложной формы с переменной глубиной резания.

### Определение $T$ и $h_p$ при обработке контура, заданного уравнением в общем виде

В работе [4] для нестационарных процессов резания получены математические модели в общем виде, позволяющие определить период стойкости  $T$  и величину износа резца  $h_p$ :

$$T = \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{C_T t^x(\tau) S_o^y(\tau) v^\mu(\tau)}}; \quad (1)$$

$$h_p = \int_{\tau_n}^{\tau_k} C_v t^q(\tau) S_o^u(\tau) v^m(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $C_T$ ,  $C_v$ ,  $x$ ,  $y$ ,  $\mu$ ,  $q$ ,  $u$ ,  $m$  – эмпирические параметры в степенных зависимостях для определения периода стойкости  $T$  и скорости изнашивания  $V_h$  инструмента при ста-

ционарном резании, т. е.  $T = C_T t^x S_o^y v^u$  и  $V_h = C_V t^q S_o^u v^m$  [1];  $\tau_k$  и  $\tau_n$  – соответственно время начала и конца обработки элементарной поверхности;  $t$ ,  $S_o$  и  $v$  – соответственно глубина резания (мм), подача (мм/об) и скорость резания (м/мин).

При условии, что подача и скорость резания не корректируются в процессе обработки деталей с переменной глубиной резания ( $S_o = \text{const}$  и  $v = \text{const}$ ), уравнения (1) и (2) можно представить в виде:

$$T = C_T S_o^y v^u \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x(\tau)}}; \tag{3}$$

$$h_p = C_V S_o^u v^m \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q(\tau) d\tau. \tag{4}$$

Время резания  $\tau$  равно

$$\tau = \frac{L}{n S_o}, \tag{5}$$

где  $L$  – длина перемещения вершины резца вдоль обрабатываемого контура;  $n$  – частота вращения шпинделя, равная

$$n = \frac{1000v}{\pi D_3}, \tag{6}$$

где  $D_3$  – диаметр заготовки.

При задании обрабатываемого контура в декартовых координатах уравнением  $Y = f(X)$  (рис. 1) длина  $L$  определяется зависимостью

$$L = \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx, \tag{7}$$

где  $x_n$  и  $x_k$  – координаты вершины резца по оси  $X$ , соответствующие началу и концу обработки контура;  $f'(X)$  – первая производная от функции  $f(X)$ .

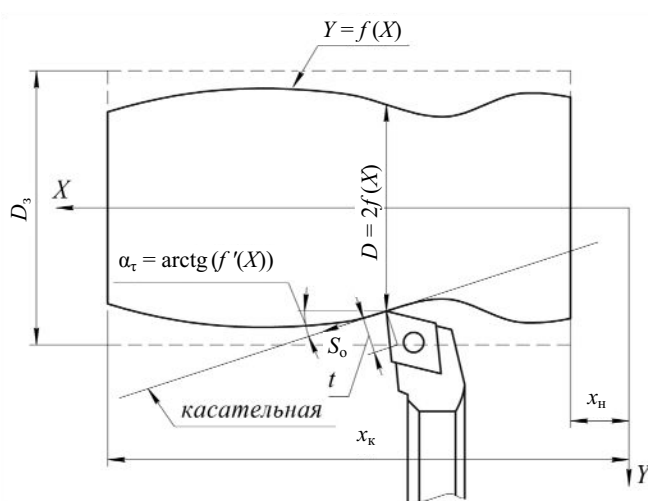


Рис. 1. Схема токарной обработки контура  $Y = f(X)$  с переменной глубиной резания  $t$

Значения  $x_H$  и  $x_K$  соответственно равны:

$$x_H = F(d_H)/2; \quad x_K = F(d_K)/2, \quad (8)$$

где  $F$  – обратная функция от  $Y = f(X)$ ;  $d_H$  и  $d_K$  – диаметры обрабатываемой поверхности, соответствующие координатам  $x_H$  и  $x_K$  вершины резца.

Тогда

$$\tau_H = \frac{1}{nS_0} \int_0^{x_H} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx; \quad \tau_K = \frac{1}{nS_0} \int_0^{x_K} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx; \quad (9)$$

$$\tau = \tau_K - \tau_H = \frac{1}{nS_0} \int_{x_H}^{x_K} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx. \quad (10)$$

Глубину резания в любой момент времени  $\tau$  можно найти по формуле (рис. 1):

$$t = \frac{1}{2} (D_3 - d) \cos \alpha_\tau,$$

где  $d$  – диаметр обработки (обработанной поверхности);  $\alpha_\tau$  – угол наклона касательной к обработанной поверхности, проходящей через вершину резца.

В общем случае при обработке контура, заданного уравнением  $Y = f(X)$ , диаметр  $d$  равен

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

а угол  $\alpha_\tau$

$$\alpha_\tau = \arctg[f'(X)].$$

Тогда

$$t = \frac{1}{2} [D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)]. \quad (11)$$

Используя выражения (9), (11) в формулах (3), (4) после замены переменной по зависимости (10), окончательно получим математические модели в виде уравнений:

$$T = C_T S_0^y v^u \frac{\int_0^{x_K} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{2^x \int_{x_H}^{x_K} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{\{[D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)]\}^x}}; \quad (12)$$

$$h_p = C_v S_0^m v^m \frac{1}{2^q n S_0} \int_{x_H}^{x_K} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} \{[D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)]\}^q dx, \quad (13)$$

которые позволяют определить  $T$  и  $h_p$  для любой аналитически описываемой поверхности. Форма образующей линии детали может быть задана как в виде математического уравнения линии (прямой, окружности, эллипса, гиперболы и др.), так и в виде сплайна, что дает возможность создать универсальный алгоритм решения зада-

чи для поверхности любой сложности. Это облегчает также его практическое использование при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

Уравнение для определения  $T$  может быть также записано в виде:

$$T = C_T t_{\text{экв}}^x S_0^y v^\mu,$$

где  $t_{\text{экв}}$  – эквивалентная глубина резания, т. е. постоянная глубина резания, которая оказывает такое же влияние на износ инструмента и его период стойкости, как и переменная глубина.

Эквивалентная глубина резания  $t_{\text{экв}}$  в соответствии с моделью (12):

$$t_{\text{экв}} = \left[ \frac{\int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{2^x \int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{\{[D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)]\}^x}} \right]^{\frac{1}{x}}.$$

Рассмотрим решение задачи определения периода стойкости  $T$ , величины износа резца  $h_p$  и времени резания  $\tau$  с помощью моделей (12)–(13) при токарной обработке различных контуров, заданных как уравнением линии, так и в виде сплайна. Расчеты выполнены на примере токарной обработки деталей из чугуна марки СЧ21 с твердостью 190 НВ. Материал резца – твердый сплав ВК6. Геометрические параметры резца:  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 20^\circ$ ;  $\gamma = 7^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Параметры модели (12)–(13) [1]:  $C_T = 215^5$ ;  $C_v = 0,2 \times 10^{-3}$ ;  $x = -0,75$ ;  $y = -1$ ;  $\mu = -5$ ;  $q = 0,7$ ;  $u = 0,8$ ;  $m = 2,02$ . Подача принята равной  $S_0 = 0,8$  мм/об, частота вращения заготовки –  $n = 300$  мин<sup>-1</sup>.

Адекватность математических моделей оценивалась с помощью экспериментальных исследований.

### Обработка сферической поверхности

Образующей сферической поверхности является окружность (рис. 2, а), уравнение которой в декартовых координатах

$$R^2 = (x - a)^2 + (y - b)^2, \tag{14}$$

где  $a$  и  $b$  – смещение центра окружности соответственно по осям  $X$  и  $Y$ ;  $R$  – радиус.

Зададим  $R = 99$  мм;  $D_3 = 200$  мм;  $a = 99$  мм;  $b = 0$  мм;  $d_n = 179,45$  мм;  $d_k = 197,25$  мм.

Из уравнения (14) следует:

$$y(x) = \sqrt{R^2 - (x - a)^2} = \sqrt{R^2 - (x - 99)^2} \quad \text{и} \quad y'(x) = -\frac{2x - 198}{2\sqrt{9801 - (x - 99)^2}}.$$

По формулам (6), (8) получим:  $x_n = 57,17$  мм;  $x_k = 90,37$  мм;  $n = 127,3$  мин<sup>-1</sup>. После подстановки этих значений в уравнения (9), (10), (12), (13) будем иметь:

$$T = 57,3 \text{ мин}; \quad h_p = 1,12 \text{ мкм}; \quad \tau_n = 1,10 \text{ мин}; \quad \tau_k = 1,44 \text{ мин}; \quad \tau = 0,34 \text{ мин}.$$

Задание образующей обрабатываемой поверхности уравнением в полярных координатах (рис. 2, б) не влияет на точность моделирования стойкости и износа инструмента. Изменяется лишь форма представления уравнений в модели (12)–(13):

$$T = C_T S_o^y v^u \frac{\alpha_k - \alpha_n}{2^x \int_{\alpha_n}^{\alpha_k} \frac{d\alpha}{\{[D_3 - 2(R \sin \alpha + e)] \sin \alpha\}^x}};$$

$$h_p = C_v S_o^u v^m \frac{R}{2^q n S_o} \int_{\alpha_n}^{\alpha_k} \{[D_3 - 2(R \sin \alpha + e)] \sin \alpha\}^q d\alpha,$$

где  $\alpha$  – угол между осью шпинделя и линией, проходящей через центр сферы и вершину резца (углы  $\alpha_n$  и  $\alpha_k$  соответствуют началу и концу обработки сферической поверхности);  $e$  – расстояние между осью шпинделя и осью обрабатываемой поверхности (на рис. 2, б  $e = 0$ ; при  $e \neq 0$  сфера превращается в сфероид, причем при расположении образующей сфероида и его центра по одну сторону оси шпинделя  $e > 0$ , а при расположении по разные стороны –  $e < 0$ ).

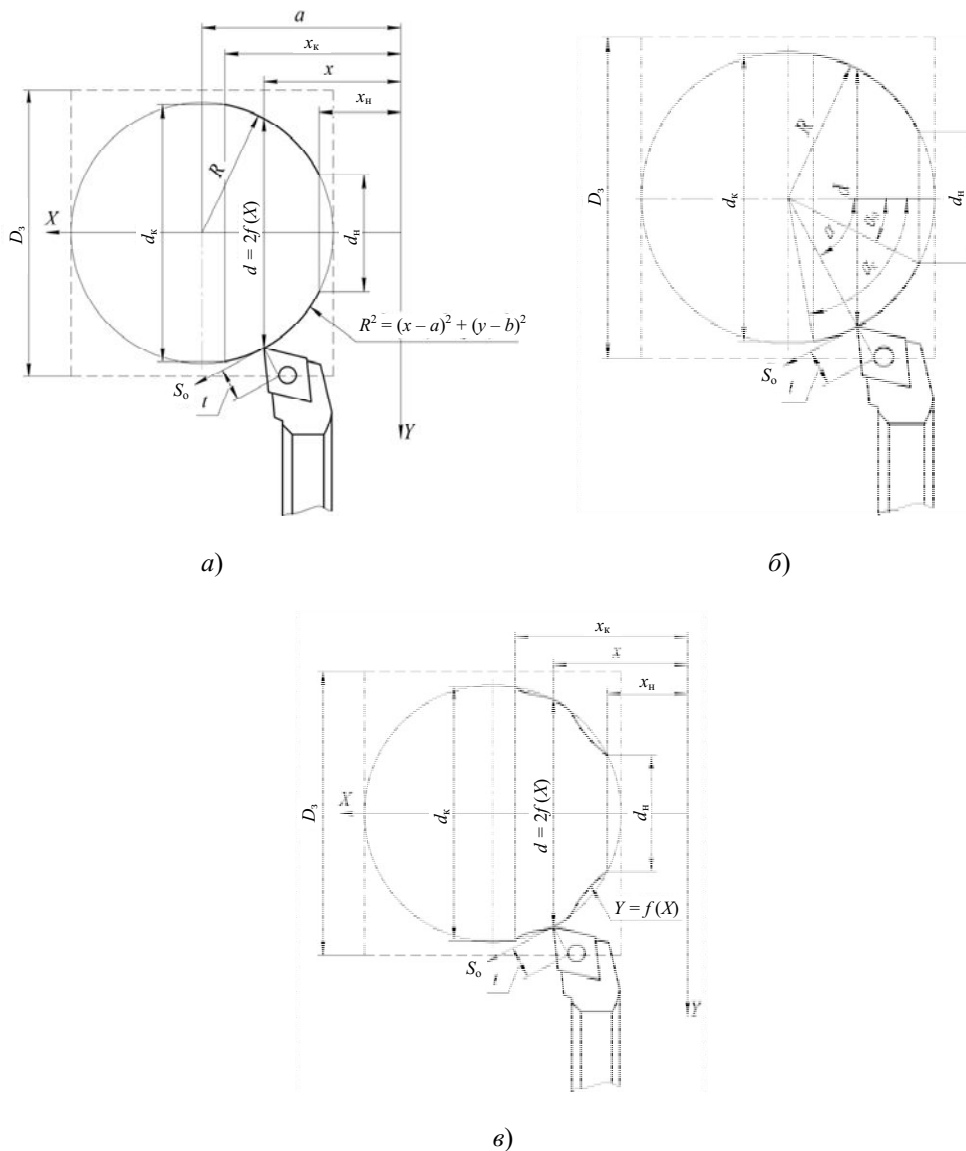


Рис. 2. Точение сферической поверхности с переменной глубиной резания:  
 а – задание образующей уравнением окружности в декартовых координатах;  
 б – задание образующей уравнением окружности в полярных координатах;  
 в – задание образующей сплайном

Соответственно уравнения (9) после преобразования приводятся к виду:

$$\tau_n = \frac{R}{nS_0} \arcsin \frac{d_n - 2e}{2R}; \quad \tau_k = \frac{R}{nS_0} \arcsin \frac{d_k - 2e}{2R},$$

где  $d_n$  и  $d_k$  – диаметры обрабатываемой поверхности, соответствующие началу и концу обработки сфероида.

Аппроксимация теоретического профиля контура полиномом позволяет оценить точность моделирования при использовании сплайн функций. Окружность (14) может быть заменена полиномом (рис. 2, в) вида

$$y = -0,0057x^2 + 1,1054x + 45,119.$$

Тогда  $y'(x) = -0,0114x + 1,1054$ . По формулам (8) получим:

$$x_n = 57,17 \text{ мм}; \quad x_k = 90,37 \text{ мм},$$

а из уравнений (10), (12), (13):

$$T = 56,36 \text{ мин}; \quad h_p = 1,14 \text{ мкм}; \quad \tau = 0,34 \text{ мин}.$$

Полученный результат показывает, во-первых, что разработанная математическая модель износа и стойкости инструмента позволяет использовать сплайн функции для аппроксимации контура детали при обработке с переменной глубиной резания. Во-вторых, задание контура сплайном обеспечивает достаточно высокую точность вычислений. Кроме того, это упрощает процесс подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

### Обработка конической поверхности с переменной глубиной резания

Образующей конической поверхности является прямая линия и это существенно упрощает решение модели (1). Уравнение образующей (рис. 3, а) может быть задано в виде

$$y = ax + b,$$

где  $a$  – угловой коэффициент;  $b$  – длина отрезка, отсекаемого прямой на оси  $Y$ .

Зададим  $a = 0,087$  и  $b = 0$  мм, а также  $D_3 = 85$  мм;  $d_n = 65$  мм;  $d_k = 80$  мм. Тогда  $f'(X) = 0,087$  и по формулам (6), (8) получим;  $x_n = 371,48$  мм;  $x_k = 457,20$  мм;  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ . После подстановки этих значений в зависимости (9), (12), (13) будем иметь:

$$T = 44,7 \text{ мин}; \quad h_p = 1,49 \text{ мкм}; \quad \tau = 0,36 \text{ мин}.$$

Для сравнения рассчитаем  $T$  и  $h_p$  по приведенным выше зависимостям для стационарного резания, т. е. без учета переменной глубины резания (по ее максимальной величине  $t = 10$  мм). По формулам (5) и (7) получим:

$$L = \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1 + [f'(x)]^2} dx = 86,05 \text{ мм} \quad \text{и} \quad \tau = \frac{L}{n \times S_0} = 0,36 \text{ мин}.$$

Тогда

$$T = 215^5 \cdot 10^{-0,75} \cdot 0,8^{-1} \cdot 80,1^{-5} = 31,0 \text{ мин};$$

$$h_p = 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{0,7} \cdot 0,8^{0,8} \cdot 80,1^{2,02} \cdot 0,36 = 2,1 \text{ мкм},$$

т. е. расчетные значения  $T$  и  $h_p$  отличаются на 30 и 40 %, соответственно, от значений, полученных по моделям (12)–(13). Следовательно, зависимости для стационарного резания дают значительную погрешность расчета при обработке деталей с переменной глубиной резания. Применение моделей (12)–(13) позволяет существенно повысить точность расчета  $T$  и  $h_p$ .

### Обработка эллиптической поверхности

Уравнение эллипса, являющегося образующей эллипсоида (рис. 3, б):

$$\frac{(x-c)^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (15)$$

где  $c$  – смещение центра эллипса по оси  $X$ ;  $a$  и  $b$  – длина, соответственно, большой и малой полуосей эллипса.

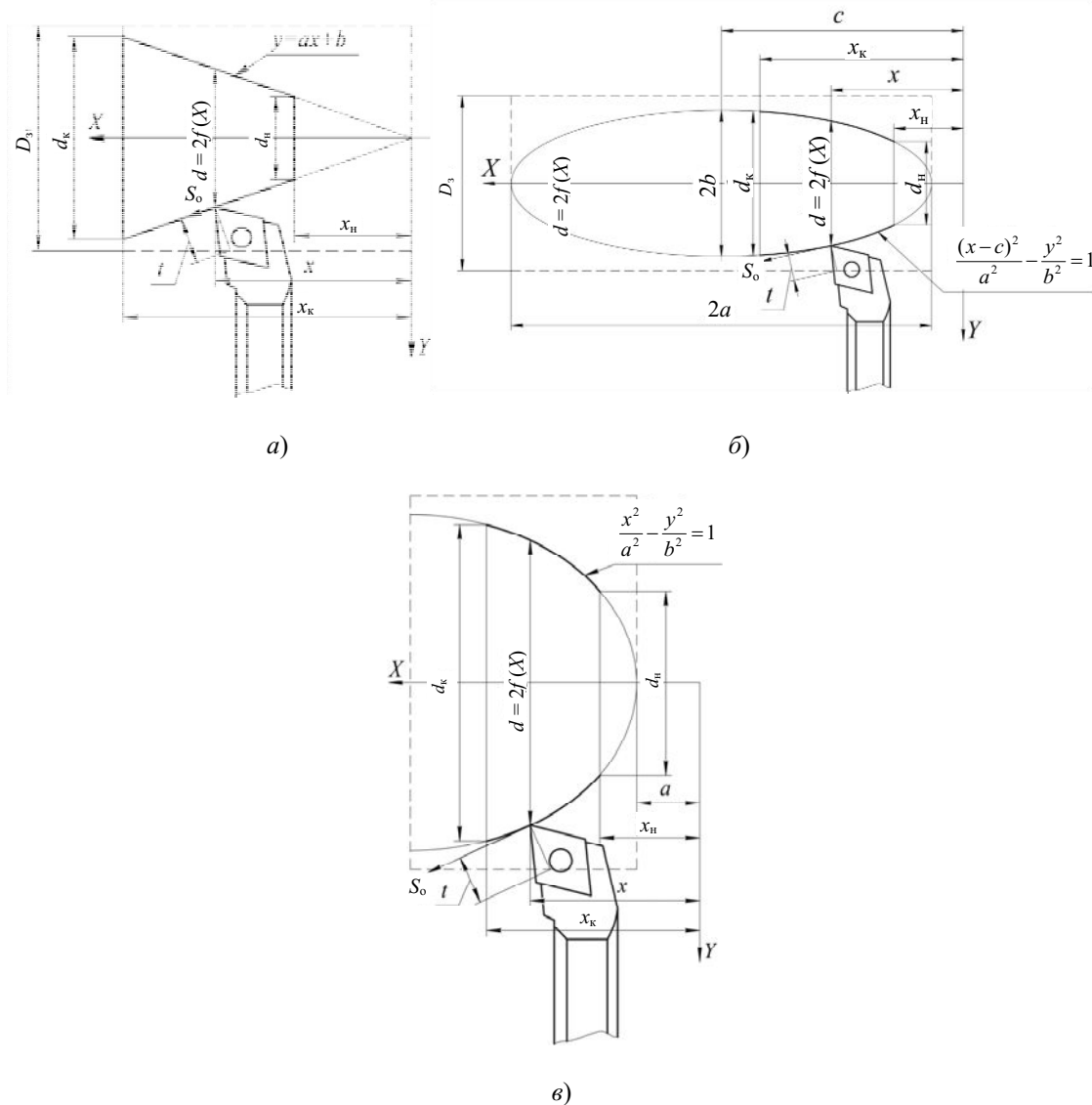


Рис. 3. Точение поверхностей с переменной глубиной резания:  
а – конуса; б – эллипсоида; в – гиперboloида

Зададим  $a = c = 200$  мм,  $b = 50$  мм,  $D_3 = 105$  мм,  $d_n = 90$  мм;  $d_k = 100$  мм. Тогда из уравнения (15) следует:

$$y(x) = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}(x-c)^2} = \sqrt{50^2 - \frac{50^2}{200^2}(x-200)^2}; \quad y'(x) = -\frac{\frac{x}{8} - 25}{2 \times \sqrt{2500 - \frac{(x-200)^2}{16}}}.$$

По формулам (6), (8) получим:  $x_n = 112,82$  мм;  $x_k = 200$  мм,  $n = 243$  мин<sup>-1</sup>. После подстановки этих значений в уравнения (9), (10), (12), (13) будем иметь:

$$T = 21,15 \text{ мин}; \quad h_p = 1,74 \text{ мкм}; \quad \tau_n = 0,53 \text{ мин}; \quad \tau_k = 0,89 \text{ мин}; \quad \tau = 0,36 \text{ мин}.$$

Аппроксимируя профиль эллипсоида полиномом вида

$$y(x) = -0,0007x^2 + 0,2711x + 23,143,$$

получим:

$$y'(x) = -0,0014x + 0,2711,$$

а также:  $x_n = 114,44$  мм;  $x_k = 200$  мм;  $T = 19,7$  мин;  $h_p = 1,86$  мкм;  $\tau = 0,36$  мин.

Таким образом, замена теоретического уравнения образующей эллипсоида аппроксимирующим сплайном, как и в предыдущих случаях, обеспечивает удовлетворительное совпадение результатов расчета  $T$ ,  $h_p$  и  $\tau$ . Сравнивая их с результатами расчета при обработке сферической поверхности, можно сделать вывод, что величина погрешности при использовании сплайнов зависит от точности аппроксимации контура полиномом.

### Обработка гиперболической поверхности

Образующей поверхности является гипербола (рис. 3, в), уравнение которой в общем виде

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1, \tag{16}$$

где  $a$  и  $b$  – соответственно, действительная и мнимая полуоси гиперболы.

Зададим  $a = 50$  мм;  $b = 30$  мм;  $D_3 = 85$  мм. Тогда после преобразования уравнения (16) получим:

$$y = \sqrt{\frac{9}{25}x^2 - 900}; \quad y'(x) = \frac{9x}{25 \times \sqrt{\frac{9x^2}{25} - 900}}.$$

При  $d_n = 60$  мм и  $d_k = 75$  мм будем иметь:  $x_n = 70,71$  мм;  $x_k = 80,0$  мм,  $T = 41,7$  мин;  $h_p = 0,22$  мкм;  $\tau = 0,05$  мин.

При аппроксимации профиля гиперболоида полиномом вида

$$y(x) = 1 \times 10^{-4}x^3 - 0,02627x^2 + 3,086x - 91,96$$

получим:  $y'(x) = \frac{3x^2}{10000} - 0,05254x + 3,086$ ;  $x_n = 70,41$  мм;  $x_k = 79,39$  мм;  $T = 43,6$  мин;

$h_p = 0,22$  мкм;  $\tau = 0,05$  мин. Погрешность вычисления  $T$  после аппроксимации профиля гиперболоида сплайном составляет 4,5 %, а по остальным параметрам результаты практически совпадают.



### Обработка сложных контуров (совокупности элементарных поверхностей) с переменной глубиной резания

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, сферической и эллиптической поверхностей (рис. 4).

Математические модели, позволяющие определить  $T$ ,  $h_p$  и  $\tau$ , в этом случае имеют вид [4]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_i}{\sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{T_i}}; \quad (17)$$

$$h_p = \sum_{i=1}^N h_{pi}; \quad (18)$$

$$\tau = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (19)$$

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

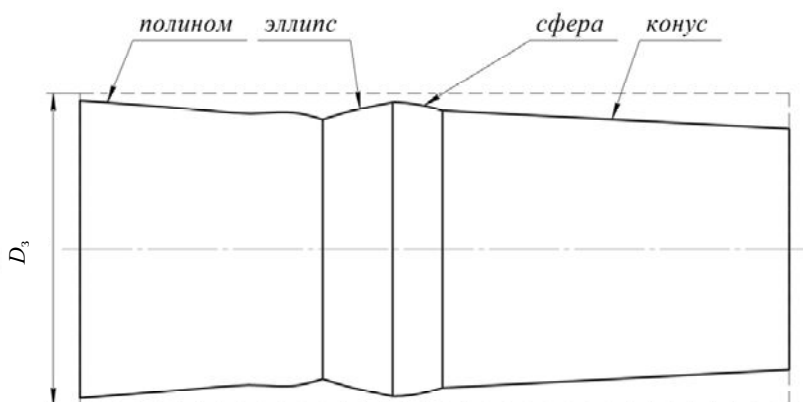


Рис. 4. Сложный контур, состоящий из образующих нескольких элементарных поверхностей

Результаты расчета приведены в табл. 1.

В соответствии с моделями (17)–(19) время резания при обработке контура составит

$$\tau = 0,42 + 0,06 + 0,09 + 0,29 = 0,86 \text{ мин},$$

период стойкости инструмента

$$T = \frac{0,42 + 0,06 + 0,09 + 0,29}{\frac{0,42}{28,99} + \frac{0,06}{54,14} + \frac{0,09}{42,02} + \frac{0,29}{26,33}} = 29,89 \text{ мин}$$

и величина износа инструмента за время обработки детали

$$h_p = 2,24 + 0,18 + 0,33 + 1,72 = 4,47 \text{ мкм.}$$

Таблица 1

**Результаты моделирования износа и стойкости инструмента при обработке сложного контура**

Элементарная поверхность	Уравнение образующей	Параметры	$\tau_{i, \text{мин}}$	$T_{i, \text{мин}}$	$h_{pi, \text{мкм}}$
Конус	$y(x) = 0,05x + 30$	$x_H = 0,0 \text{ мм};$ $x_K = 100,0 \text{ мм};$ $d_H = 70,0 \text{ мм};$ $d_K = 80,0 \text{ мм}$	0,42	28,99	2,24
Сфера	$y(x) = \sqrt{R^2 - (x - a)^2}$	$x_H = 28,14 \text{ мм};$ $x_K = 42,5 \text{ мм};$ $d_H = 80,0 \text{ мм};$ $d_K = 85,0 \text{ мм};$ $R = 42,5 \text{ мм};$ $a = 42,5 \text{ мм}$	0,06	54,14	0,18
Эллипс	$y(x) = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}(x - c)^2}$	$x_H = 119,58 \text{ мм};$ $x_K = 139,75 \text{ мм};$ $d_H = 85,0 \text{ мм};$ $d_K = 75,0 \text{ мм};$ $a = 90,0 \text{ мм};$ $b = 45,0 \text{ мм};$ $c = 90,0 \text{ мм}$	0,09	42,02	0,33
Контур, заданный сплайном	$y(x) = -4 \times 10^{-5}x^3 + 0,004x^2 - 0,117x + 37,5$	$x_H = 0,0 \text{ мм};$ $x_K = 70,0 \text{ мм};$ $d_H = 75,0 \text{ мм};$ $d_K = 70,38 \text{ мм}$	0,29	26,33	1,72
Суммарная величина			0,86	29,89	4,47

*Примечание.* Диаметр заготовки  $D_3 = 85 \text{ мм}$ . Материал заготовки – чугун СЧ21 (190 НВ). Материал резца – твердый сплав ВК6. Подача –  $S_0 = 0,8 \text{ мм/об}$ . Частота вращения заготовки –  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ .

**Оценка адекватности математических моделей износа и стойкости инструмента при обработке деталей с переменной глубиной резания**

Для проверки адекватности математических моделей выполнялись экспериментальные исследования на примере токарной обработки с переменной глубиной резания деталей с наружной конической 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 производилось в среде *Pro/Engineer*.

В соответствии с рекомендациями [5] в качестве критерия стойкости резца был принят размерный износ  $h_r$ . Его определение осуществлялось с помощью измерительной системы линейных перемещений станка и устройства ЧПУ. Для этого производилась привязка резца к системе отсчета станка и вычисление вылета резца.

После обработки определенного числа контуров (или в заданные моменты времени резания) операция привязки резца повторялась и снова определялась величина вылета резца. Разность вылетов равна величине радиального износа резца  $h_r$ . При достижении резцом величины предельного размерного износа  $H_r$  разность вылетов нового и изношенного резца равна величине  $h_r$  за время резания, равное периоду стойкости  $T$ .

Сравнение расчетных и экспериментальных данных осуществлялась по двум критериям – по величине предельного размерного износа  $H_r$  и по периоду стойкости  $T$ . Связь между величинами  $H_r$  и  $T$  в период нормального изнашивания определяется зависимостью [4]:

$$H_r = V_h T + h_0, \quad (20)$$

где  $V_h$  – скорость изнашивания резца, мкм/мин;  $T$  – заданный период стойкости, мин;  $h_0$  – величина начального износа, определяемая величиной отрезка, отсекаемого на оси ординат прямой  $h_r = f(\tau)$ , соответствующей периоду нормального изнашивания резца, мкм.

Скорость размерного изнашивания определяется как

$$V_h = \frac{h_r}{\tau}, \quad (21)$$

где  $h_r$  – величина размерного износа за время резания  $\tau$ .

При расчете  $H_r$  в формуле (21) используются значения  $h_r$ , определяемые по теоретической зависимости  $h_r = f(\tau)$ .

При использовании в качестве критерия износа резца периода стойкости в качестве аргумента использовался предельный размерный износ, определяемый экспериментально, т. е.  $H_{r\tau}$ . Соответствующий ему период стойкости определяется по зависимости, получаемой из уравнения (20):

$$T = \frac{H_{r\tau} - h_0}{V_h},$$

где для определения скорости размерного изнашивания используется экспериментальная зависимость  $h_r = f(\tau)$ .

Для оценки адекватности разработанных моделей расчетные величины предельного размерного износа  $H_r$  и периода стойкости  $T$  сравнивались с величинами, полученными экспериментально, т. е. с их математическими ожиданиями  $M(H_r)$  и  $M(T)$ .

Исследования выполнены на примере токарной обработки деталей из стали 45 с твердостью 215 НВ и  $\sigma_b = 750$  МПа без применения СОЖ. Материал резца – твердый сплав Т15К6. Геометрические параметры резца:  $\varphi = 60^\circ$ ;  $\varphi_1 = 30^\circ$ ;  $\gamma = 7^\circ$ ;  $\alpha = 10^\circ$ ;  $\lambda = 0^\circ$ . Параметры режима резания:  $n = 500$  мин<sup>-1</sup>;  $S_0 = 0,2$  мм/об. Параметры модели (12)–(13) [1]:  $C_T = 310^5$ ;  $C_v = 0,515 \times 10^{-3}$ ;  $x = -0,75$ ;  $y = -1$ ;  $\mu = -5$ ;  $q = 0,022$ ;  $u = 0,49$ ;  $m = 1,55$ .

Время резания, расчетный период стойкости и радиальный износ резца при точении одной конической поверхности составляют [4]:

$$\tau_p = \frac{d_k - d_n}{2nS_0 \sin \alpha} = \frac{89 - 84}{2 \cdot 500 \cdot 0,2 \cdot \sin 1,433} = 1,0 \text{ мин};$$

$$T = C_T S_o^y v^u \frac{(\cos \alpha)^x (1-x)(d_k - d_H)}{2^x [(D_3 - d_H)^{1-x} - (D_3 - d_k)^{1-x}]} =$$

$$= 310^5 \cdot 0,2^{-1} \left( \frac{3,14 \cdot 90 \cdot 500}{1000} \right)^{-5} \cdot \frac{(\cos 1,433^\circ)^{-75} \cdot (1+0,75)(89-84)}{2^{-0,75} \cdot [(90-84)^{1+0,75} - (90-89)^{1+0,75}]} = 168 \text{ мин};$$

$$h_r = C_V S_o^u v^m \frac{1}{n S_o} \cdot \frac{(\cos \alpha)^{q+1}}{2^q (q+1) \sin 2\alpha} [(D_3 - d_H)^{q+1} - (D_3 - d_k)^{q+1}] =$$

$$= 0,515 \cdot 10^{-3} \cdot 0,2^{0,49} \left( \frac{3,14 \cdot 90 \cdot 500}{1000} \right)^{1,55} \cdot \frac{1}{500 \cdot 0,2} \cdot \frac{(\cos 1,433^\circ)^{0,022+1}}{2^{0,022} \cdot (0,022+1) \sin 2,866^\circ} \times$$

$$\times [(90-84)^{0,022+1} - (90-89)^{0,022+1}] = 0,509 \cdot 10^{-3} \text{ мм}.$$

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных представлены в табл. 2. Погрешность расчета радиального износа  $\delta_{Hr}$  и периода стойкости  $\delta_T$  при обработке конических поверхностей с переменной глубиной резания составляет, соответственно, 7,3 и 8,3 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

Таблица 2

Оценка погрешности математических моделей

Обрабатываемая поверхность	Параметры	T, мин	M(T), мин	$\delta_T$ , %	H <sub>r</sub> , мкм	M(H <sub>r</sub> ), мкм	$\delta_{Hr}$ , %
Конус	D <sub>3</sub> = 90 мм; d <sub>H</sub> = 84 мм; d <sub>k</sub> = 89 мм; α = 1,433°	168	156,5	7,3	90,0	98,1	8,3

### Заключение

1. Разработанные математические модели позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и время резания при обработке деталей с переменной глубиной резания 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 деталей с переменной глубиной резания составляет, соответственно, 7,3 и 8,3 %, что свидетельствует об адекватности разработанных математических моделей.

3. Расчетные значения периода стойкости и величины износа инструмента, полученные по моделям для нестационарного резания с переменной глубиной, отличаются на 30 и 40 % соответственно от значений, полученных по моделям для стационарного резания.

4. Задание контура обрабатываемой детали сплайном обеспечивает высокую точность вычислений радиального износа и периода стойкости инструмента. Величина погрешности расчета зависит от точности аппроксимирующего полинома.

5. Применение сплайн функций позволяет использовать разработанные модели стойкости и величины износа инструмента при программировании обработки сложных контуров средствами современных систем ЧПУ.

**Литература**

1. Справочник технолога-машиностроителя : в 2 т. / редкол.: под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
2. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием: учеб. пособие / А. А. Рыжкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. – Ростов н/Д : Феникс, 2008. – 411 с.
3. Каштальян, И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания : моногр. / И. А. Каштальян. – Минск : БНТУ, 2008. – 311 с.
4. 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 // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1993. – № 4. – С. 40–47.
5. Макаров, А. Д. Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с.

*Получено 13.01.2011 г.*