УДК 621.941-529.004

Мищенко С.Н., Туромша В.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗНОСА И СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ СЛОЖНЫХ КОНТУРОВ С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ РЕЗАНИЯ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Большинство работ, посвященных математическому моделированию процессов обработки материалов [1], выполнены для стационарных процессов резания. Последние характеризуются постоянством средних значений (математических ожиданий) и полей рассеяния (дисперсий) параметров процесса резания (глубины резания, подачи, скорости резания, геометрии режущего инструмента, свойств обрабатываемого материала и др.) за период стойкости инструмента. Однако, при обработке сложных контуров (конуса, сферы, эллипсоида, фасонной поверхности т.д.) на многоцелевых станках с ЧПУ характерны нестационарные процессы резания. Частным случаем нестационарного резания является переменное резание. Последнее отличается тем, что один или несколько параметров режима резания изменяются непрерывно в течение рабочего хода инструмента. В частности, при точении поверхностей, образующая которых не параллельна оси вращения детали, скорость резания v изменяется в соответствии с зависимостью

$$v = \frac{\pi d n}{1000},$$

где d- диаметр обработки; n - постоянная частота вращения шпинделя.

В работе [2] получены в общем виде зависимости для определения периода стойкости T и величины износа h_p инструмента при точении деталей с переменной скоростью и постоянными глубиной резания t и подачей S:

$$T = C_T t^x s^y \left(\frac{\pi n}{1000}\right)^{\mu} \frac{\tau_к - \tau_v}{\int\limits_{\tau_v}^{\tau_к} \frac{d\tau}{d^{\mu}}} = C_T t^x s^y V_{экв}^{\mu}; \qquad (1)$$

$$h_x = C_u t^q s^u \int\limits_{\tau_v}^{\tau_к} d^m d\tau = h_к - h_v = \int\limits_{\tau_v}^{\tau_к} V_h d\tau, \qquad (2)$$

где $C_t, C_u, x, y, \mu, q, u, m$ - эмпирические параметры в степенных зависимостях для определения периода стойкости T и скорости изнашивания V_h инструмента при стационарном резании, т.е. $T = C_T t^x s^y v^{\mu}$ и $V_h = C_u t^q s^u v^m$ [3]; $t_н$ и $t_к$ - соответственно время начала и конца обработки элементарной поверхности; $h_н$ и $h_к$ - соответственно величина износа резца в начале и в конце обработки элементарной поверхности; $V_{экв} = \pi d_{экв} n / 1000$ - эквивалентная скорость резания; $d_{экв}$ - эквивалентный диаметр обработки, т.е. такой постоянный диаметр, который соответствует эквивалентному периоду стойкости $T_{экв}$ при стационарном резании.

Из приведенных выражений видно, что переменным параметром является диаметр обработки, который, в свою очередь, определяется геометрией обрабатываемой детали.

В общем случае при обработке элементарной поверхности (рис. 1), образующая которой описана в декартовых координатах уравнением $Y = f(X)$, диаметр обработки в любой момент времени равен $d = 2Y = 2f(X)$.

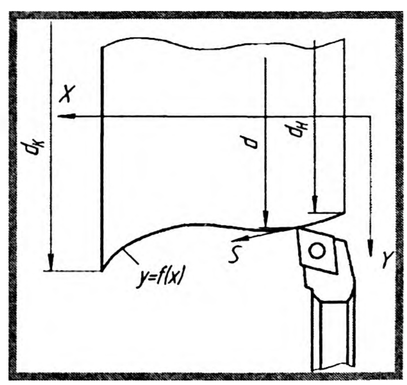


Рисунок 1 – Токарная обработка поверхности $Y = f(X)$ с переменной скоростью резания

Длина перемещения вершины резца вдоль образующей поверхности за время t определяется выражением

$$L = ns\tau = \int_0^x \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx,$$

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

Тогда

$$\tau = \frac{1}{ns}\int_0^x \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx.$$

Отсюда получим

$$\tau_v = \frac{1}{ns}\int_0^{x_v} \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx\ ; \qquad \tau_\kappa = \frac{1}{ns}\int_0^{x_\kappa} \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx\ ,$$

где $x_н$, $x_к$ - координаты вершины резца по оси OX, соответствующие началу и концу обработки элементарной поверхности $Y = f(X)$.

Значения $x_н$, $x_к$ равны

$$x_v = F(d_v)/2; \quad x_\kappa = F(d_\kappa)/2,$$

где F - обратная функция от $Y = f(X)$.

Используя выражения (1) и (2), после замены переменной получим

$$T = C_T t^x s^y \left(\frac{2\pi n}{1000}\right)^{\mu} \frac{\int_{x_v}^{x_\kappa} \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx}{\int_{x_v}^{x_\kappa} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx}{[f(X)]^{\mu}}}\ ; \qquad d_{\acute{\upsilon}\kappa\beta} = \left[\frac{2^{\mu}\int_{x_v}^{x_r} \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx}{\int_{x_v}^{x_r} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx}{\int_{x_v}^{x_\kappa} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx}{[f(X)]^{\mu}}}}\right]^{\frac{1}{\mu}}\ ;$$

$$h_\pi = C_u t^q s^u \left(\frac{2\pi n}{1000}\right)^m \int_{x_v}^{x_v} [f(X)]^m \sqrt{1 + [f'(X)]^2}\, dx.$$

Полученные зависимости позволяют определить период стойкости (эквивалентный диаметр) и величину износа инструмента при токарной обработке с переменной скоростью резания деталей со сложным контуром. Используя значения $\tau_н$ и $\tau_к$ можно также определить время обработки элементарной поверхности

$$\tau_\pi = \tau_\kappa - \tau_v\ .$$

Рассмотрим решение данной задачи на примерах обработки некоторых элементарных поверхностей.

Исходные данные: $n = 300\ \mu\theta v^{-1}$; $s = 0{,}35 \mu\mu/\xi\alpha$; $t = 1 \mu\mu$. Заготовка - чугун СЧ21, НВ 190. Резец – ВК6, $\varphi = 60°$, $\varphi_1 = 20°$, $\alpha = 10°$, $\gamma = 7°$, $\lambda = 0°$. Параметры формул (1) и (2): $C_T = 215^5$; $x = -0{,}75$; $y = -1$; $\mu = -5$; $C_u = 0{,}2 \times 10^{-3}$; $q = 0{,}7$; $u = 0{,}8$; $m = 2{,}02$.

- Уравнение образующей поверхности в декартовых координатах задаются двумя способами:
- в виде теоретического уравнения;
- в виде аппроксимирующего полинома.

Сравнение полученных результатов позволит оценить точность предложенных моделей износа и стойкости.

Обработка сферической поверхности (рис. 2)

Примем $d_v = 75$ мм и $d_\kappa = 150$ мм.

Задание образующей сферической поверхности (окружности) теоретическим уравнением (рис. 2,а)

Уравнение окружности

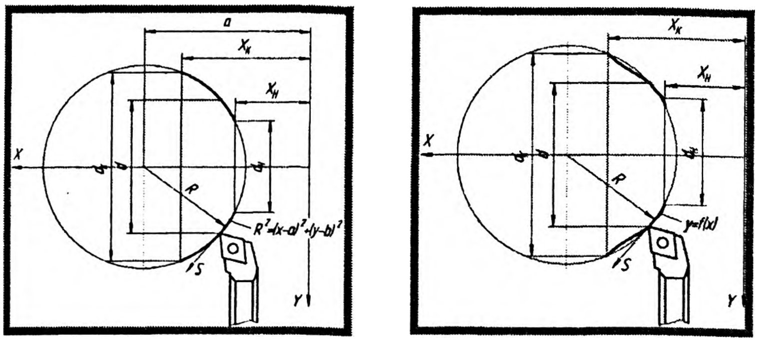
$$R^2 - (x - a)^2 + (y - b)^2,$$

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

Примем $R = 75$ мм. В данном примере окружность смещена относительно начала координат по оси X на величину 75 мм. Тогда зависимости $Y = f(X)$ и $f'(X)$ после преобразования примут вид

$$y = \sqrt{75^2 - (x - 75)^2},$$

$$y' = \frac{2x - 150}{2\left[5625 - (x - 75)^2\right]^{\frac{1}{2}}}.$$



а) б)

Рисунок 2 – Точение сферической поверхности с переменной скоростью резания

По приведенным выше зависимостям получим: $x_v = 10$ мм; $x_к = 75$ мм; $d_{бкβ} = 130{,}9$ мм; $V_{бкβ} = 123{,}4$ м/мин; $T = 45{,}9$ мин; $h_з = 1{,}08$ мкм; $\tau_v = 0{,}374$ мин; $\tau_к = 1{,}12$ мин; $\tau_з = 0{,}738$ мин.

Замена уравнения окружности полиномом (рис. 2,б)

Аппроксимируем окружность полиномом пятого порядка:

$$y = 4 \times 10^{-8} x^5 - 9 \times 10^{-6} x^4 + 0{,}00096\, x^3 - 0{,}063\, x^2 + 2{,}68\, x + 16{,}05\ .$$

Первая производная - $y' = -0{,}126x + 0{,}00288x^2 - \dfrac{9x^3}{250000} + \dfrac{x^4}{5000000} + 2{,}68$.

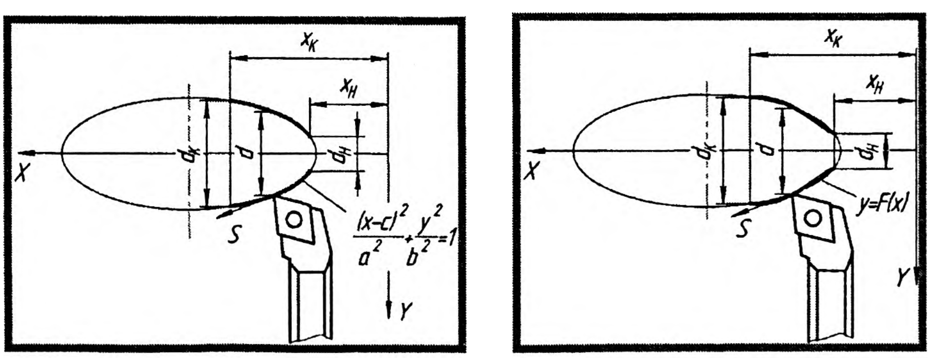
Аналогично предыдущему получим: $x_v = 10{,}5$ мм; $x_к = 75$ мм; $d_{бкβ} = 132{,}9$ мм; $V_{бкβ} = 125{,}3$ м/мин; $T = 47{,}7$ мин; $h_з = 1{,}07$ мкм; $\tau_з = 0{,}749$ мин.

Как следует из сравнения полученных результатов, замена теоретического уравнения образующей элементарной поверхности аппроксимирующим полиномом обеспечивает высокую точность результатов моделирования стойкости и износа инструмента.

Обработка эллипсоида (рис. 3)

Задание образующей (эллипса) теоретическим уравнением (рис. 3,а)

Основные параметры эллипса – размеры его полуосей a и b, которые соответственно равны $a = 200$мм; $b = 100$мм.



а) б)

Рисунок 3 - Точение эллипсоида с переменной скоростью резания

Уравнение эллипса

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

где c - смещение центра по оси X.

Примем $c = 200$ мм. Тогда уравнение эллипса $Y = f(X)$ в декартовых координатах будет иметь вид

$$y = \sqrt{b^2 - \frac{b^2}{a^2}(x - c)^2} = \sqrt{100^2 - \frac{1}{4}(x - 200)^2},$$

а первая производная

$$y' = \frac{1}{4\left[\left(-x^2\right)+400x\right]^{\frac{1}{2}}}\left[-2x+400\right].$$

Примем $d_к = 150$ мм; $d_v = 50$ мм. Тогда по приведенным выше зависимостям получим: $x_v = 6{,}35$ мм; $x_к = 67{,}71$ мм; $d_{экв} = 118{,}8$ мм; $V_{экв} = 112$ м/мин; $T = 74{,}6$ мин; $h_л = 0{,}913$ мкм; $\tau_v = 0{,}248$ мин; $\tau_к = 1{,}016$ мин; $\tau_л = 0{,}768$ мин.

Замена уравнения эллипса полиномом (рис. 3,б)

При аппроксимации эллипса полиномом получаем

$$y = -3\times10^{-6}x^4 + 5{,}6\times10^{-4}x^3 - 0{,}044x^2 + 2{,}244x + 12{,}55\ ;$$

$$y' = \frac{-3}{250000}x^3 + 0{,}168\times10^{-2}x^2 - 0{,}88\times10^{-1}x + 2{,}244.$$

Аналогично предыдущему получим: $x_v = 6{,}35$ мм; $x_к = 67{,}7$ мм; $d_{экв} = 118$ мм; $V_{экв} = 111{,}2$ м/мин; $T = 77{,}1$ мин; $h_л = 0{,}89$ мкм; $\tau_л = 0{,}761$ мин.

Обработка конической поверхности (рис. 4)

При обработке конической поверхности диаметр обработки в любой момент времени τ определяется выражением

$$\tau = 2ns\tau\sin\alpha,$$

где α - половина угла конуса.

Тогда

$$\tau_v = \frac{d_v}{2ns\sin\alpha}\ ;\ \tau_k = \frac{d_к}{2ns\sin\alpha},$$

где d_v , $d_к$ - соответственно минимальный и максимальный диаметры обработки.

Эквивалентный диаметр, период стойкости и величина износа резца [2]

$$d_{экв} = \left[\frac{(1-\mu)(d_к-d_v)}{d_к^{1-\mu}-d_v^{1-\mu}}\right]^{\frac{1}{\mu}};\quad T = C_T t^x s^y\left(\frac{\pi n}{1000}\right)^{\mu}\frac{(1-\mu)(d_к-d_v)}{d_к^{1-\mu}-d_v^{1-\mu}};$$

$$h_л = C_U t^q s^u\left(\frac{\pi n}{1000}\right)^m \frac{d_к^{m+1}-d_v^{m+1}}{2ns\sin\alpha(m+1)}.$$

Примем $d_к = 120$ мм; $d_v = 50$ мм; $\alpha = 10°$.

Получим: $d_{экв} = 93{,}37$ мм; $V_{экв} = 78{,}9$ м/мин; $T = 249{,}6$ мин; $h_л = 1{,}23$ мкм; $\tau_л = 1{,}92$ мин.

Обработка торцевой поверхности (рис. 5)

Обработка торцевой поверхности является частным случаем обработки конуса с углом при вершине $\alpha = 90°$. Выполним расчет при n = 500 µθv $^{-1}$.

Примем $d_v = 60$ мм и $d_к = 120$ мм. Получим: $d_{экв} = 96$ мм; $V_{экв} = 90{,}5$ м/мин; $T = 216$ мин; $h_л = 0{,}2$ мкм; $\tau_л = 0{,}286$ мин.

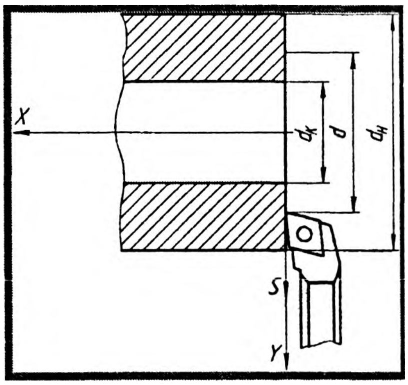


Рисунок 5 – Схема обработки торцевой поверхности

Токарная обработка контура с образующей в виде гиперболы (рис. 6)

Задание образующей (гиперболы) теоретическим уравнением (рис. 6,а)

Уравнение гиперболы в общем виде

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

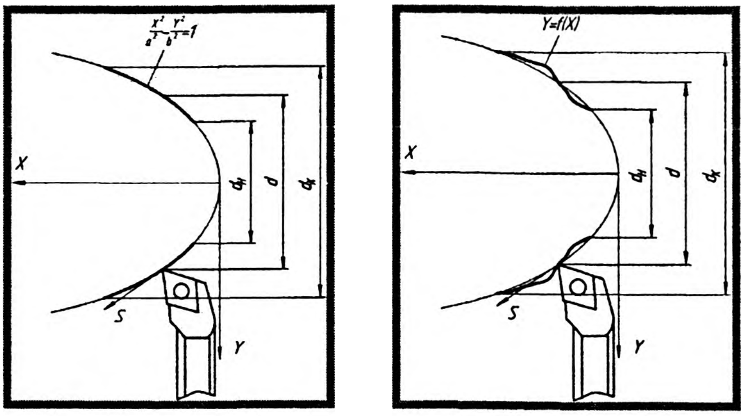
Примем $a = 50$мм; $b = 30$мм. Тогда уравнение гиперболы

$$\frac{x^2}{50^2} - \frac{y^2}{30^2} = 1 .$$

После преобразования

$$y = \sqrt{\frac{9}{25}x^2 - 900}; \qquad y' = \frac{3x}{\left(15x^2 - 22500\right)^{\frac{1}{2}}} .$$

Выполним расчет при n = 500 μθν $^{-1}$.



а) б)

Рисунок 6 – Схема обработки контура, описанного гиперболой

Примем $d_к$ = 75 мм; d_v = 60 мм.

Получим: x_v = 70,7 мм; $x_к$ = 80 мм; $d_{бкβ}$ = 68,1 мм; $V_{бкβ}$ = 107 м/мин; $T = 93{,}6$ мин; $h_к$ = 12,8 мкм; $\tau_к$ = 0,068 мин.

Замена уравнения гиперболы полиномом (рис. 6,б)

При аппроксимации гиперболы полиномом получаем

$$y = 1 \times 10^{-4} x^3 - 0{,}02627\, x^2 + 3{,}086\, x - 91{,}96\, ; \qquad y' = \frac{3x^2}{10000} - 0{,}052524x + 3{,}086 .$$

Аналогично предыдущему получим: x_v = 70,7 мм; $x_к$ = 80,04 мм; $d_{бкβ}$ = 69 мм; $V_{бкβ}$ = 108,3 м/мин; T = 88,2 мин; $h_к$ = 13,2 мкм; $\tau_к$ = 0,069 мин.

Выводы

Анализ полученных результатов показывает следующее:

- разработанные математические модели позволяют определить период стойкости и величину износа инструмента при обработке с переменной скоростью резания любой аналитически описываемой поверхности;
- замена теоретического уравнения аппроксимирующим полиномом обеспечивает высокую точность моделирования периода стойкости и износа инструмента;
- использование уравнения в виде полинома позволяет использовать разработанные модели при программировании обработки сложных контуров средствами современных систем ЧПУ.

Реальные детали, обрабатываемые на станках с ЧПУ, представляют собой совокупность нескольких элементарных поверхностей. Математические зависимости, позволяющие определить T, h_p и τ_p, в этом случае имеют вид [4]:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^{N} \tau_{\pi i}}{\sum_{i=1}^{N} \frac{\tau_{\pi i}}{T_i}}\,; \quad (3) \qquad h_\pi = \sum_{i=1}^{N} h_{\pi i}\,; \quad (4) \qquad \tau_\pi = \sum_{i=1}^{N} \tau_{\pi i}\,, \quad (5)$$

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

Обработка сложного профиля

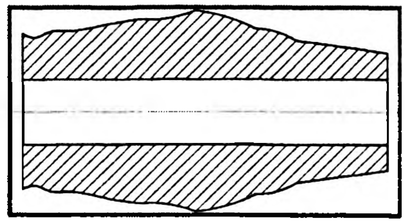


Рисунок 7 – Обработка сложного контура с переменной скоростью резания

Рассмотрим обработку сложного контура, состоящего из торцевой, конической, сферической и эллиптической поверхностей, а также поверхности, образующая которой описана полиномом (рис. 7).

Выполним расчет при $n = 300\ \mu\theta v^{-1}$.

Результаты моделирования износа и стойкости инструмента приведены в табл. 1.

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

Элементарная поверхность	Параметры образующей	$d_н$	$d_к$	$d_{экв}$	$V_{экв}$	T_i	h_{pi}	τ_{pi}
Торец	-	60	100	83	78,4	444	0,6	1,097
Конус	$\alpha = 10^\circ$	110	100	105	99	137	0,51	0,546
Сфера	$R = 80_{мм}$	110	160	147	138,5	25,8	1,08	0,619
Эллипсоид	$a = 200$, $b = 100$	160	180	171	161	12	0,92	0,327
Контур, описанный полиномом	$y = -9\times10^{-9}x^5 + 2\times10^{-6}x^4 - 9\times10^{-5}x^3 + 0{,}247x + 90$	180	126	190,5	179,5	4,26	3,61	0,955

Время на обработку контура составит:

$$\tau_{\Sigma} = 1{,}097 + 0{,}546 + 0{,}619 + 0{,}327 + 0{,}955 = 3{,}544 \text{ мин.}$$

Период стойкости инструмента:

$$T = \frac{4}{\dfrac{1{,}097}{444} + \dfrac{0{,}546}{137} + \dfrac{0{,}619}{25{,}8} + \dfrac{0{,}327}{12} + \dfrac{0{,}955}{4{,}26}} = 12{,}57 \text{ мин.}$$

Износ инструмента за время обработки детали:

$$h_{\Sigma} = 0{,}6 + 0{,}507 + 1{,}083 + 0{,}92 + 1{,}418 = 6{,}72 \text{ мкм.}$$

Таким образом, разработанные математические модели (3 – 5) позволяют определить период стойкости, величину износа инструмента и время резания при обработке с переменной скоростью резания сложных контуров, включающих несколько элементарных поверхностей. Такие модели могут быть использованы как при назначении параметров режима резания на токарных многоцелевых станках, так и для оптимизации режима резания методами математического моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соломенцев Ю.М., Басин А.М. Оптимизация технологических процессов механической обработки и сборки в условиях серийного производства. М. НИИМаш, 1977. – 72с. 2. В.И.Туромша, Чан Ким Тоан. Токарная обработка деталей сложной формы с переменной скоростью резания. // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1995. №2. С. 48-53. 3.Справочник технолога-машиностоителя / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. В 2 т. М., 1985. Т. 2. 584 с. 4. П.И.Ящерицын, В.И.Туромша, Чан Ким Тоан. Период стойкости и износ резцов при нестационарном резании на токарных станках с ЧПУ. // Весці Акадэміі навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. №4. С. 40-47.