

УДК 621.9.02.004.62:621.941.2-529

В. И. ТУРОМША, С. Н. МИЩЕНКО

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СТОЙКОСТИ ИНСТРУМЕНТА
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ РЕЗАНИИ
С УЧЕТОМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОГРАНИЧЕНИЙ**

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 04. 11. 2010)

Введение. Аналитическое определение периода стойкости T и величины износа h_p режущего инструмента является одной из важных задач технологии машиностроения, без решения которой невозможно осуществление оптимизации технологического процесса обработки деталей на металлорежущих станках. В условиях стационарного резания величины T и h_p определяются достаточно просто с помощью известных степенных зависимостей [1]:

$$T = C_T t^x S_o^y v^\mu; \quad (1)$$

$$h_p = V_h \tau = C_v t^q S_o^u v^m \tau, \quad (2)$$

где $C_T, C_v, x, y, \mu, q, u, m$ – эмпирические коэффициенты и показатели степени; V_h – скорость изнашивания инструмента; τ – время резания; t, S_o, v – соответственно глубина резания (мм), подача (мм/об), скорость резания (м/мин).

Процесс резания при обработке деталей на станках с ЧПУ в большинстве случаев является нестационарным [2]. Он характеризуется дискретным или непрерывным изменением параметров режима резания, рабочих углов инструмента и др. Большое распространение нестационарное резание имеет при точении деталей сложной формы методом следа. В этом случае непрерывно изменяется глубина резания t , которая определяется 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 в этом случае 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.

С целью повышения производительности труда при обработке деталей с переменной глубиной резания современные станки с ЧПУ обеспечивают управление подачей в соответствии с изменением t [3]. Определение T и h_p по формулам (1) и (2) для стационарного резания в этом случае дает большую погрешность. В [4] приведено решение для обработки деталей с переменными глубиной резания и подачей, но без учета технологических ограничений. Введение таких ограничений, например, по силе резания P_z или шероховатости обработанной поверхности R_{\max} , позволяет повысить производительность обработки и обеспечить заданное качество обработанной поверхности [3]. В связи с этим рассмотрим решение задачи определения T, h_p и τ с учетом технологических ограничений.

Ограничение по силе резания P_z . В данном случае производится обработка деталей с переменными глубиной резания и подачей при постоянной силе резания P_z . На рис. 1 представлена схема точения сложного контура, заданного в декартовых координатах уравнением $Y = f(X)$. Скорость резания v при использовании цилиндрической заготовки постоянна:

$$v = \pi D_3 n / 1000,$$

где D_3 – диаметр заготовки, мм; n – частота вращения, мин^{-1} .

Для установления зависимости подачи от глубины резания используем уравнение технологического ограничения, т. е. формулу для силы резания:

$$P_z = C_p t^{x_p} S_o^{y_p} v^{\mu_p} = \text{const}, \quad (3)$$

где C_p – постоянный коэффициент; x_p, y_p, μ_p – показатели степени.

Выделим в данном уравнении постоянную часть, т. е.

$$\frac{P_z}{C_p v^{\mu_p}} = \text{const} = A.$$

Обозначив $x_p / y_p = B$, из уравнения (3) получим зависимость

$$S_o = t^{-B} A. \quad (4)$$

Параметры A и B в данном уравнении связи (4) являются постоянными и зависят только от выбора материала инструмента и заготовки.

Глубина резания в любой момент времени определяется соотношением (рис. 1)

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

где d – диаметр обработки в любой момент времени τ ; α – угол наклона касательной к обработанной поверхности, проходящей через вершину резца.

В общем случае при обработке контура, заданного уравнением $Y = f(X)$, диаметр $d = 2Y = 2f(X)$, а угол $\alpha = \text{arctg}[f'(X)]$, где $f'(X)$ – первая производная от функции $f(X)$. Тогда

$$t = \frac{1}{2}[D_3 - 2f(X)] \cos \text{arctg}[f'(X)]. \quad (5)$$

Скорость движения подачи (мм/мин) в условиях нестационарного резания равна

$$v_s = \frac{dL}{d\tau},$$

откуда $d\tau = dL / v_s$, $\tau = \int_{l_n}^{l_k} dL / v_s$, где dL – изменение пути, пройденного вершиной резца за промежуток времени $d\tau$; τ – время резания, необходимое для обработки контура; l_n и l_k – длина перемещения резца в направлении подачи соответственно до начала и конца обрабатываемого контура.

С учетом задания траектории движения вершины резца в виде уравнения $Y = f(X)$ длина обработанной поверхности (длина контура) в направлении подачи

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

где x_n и x_k – соответственно координаты начала и конца обрабатываемого контура, мм.

Отсюда

$$dL = \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx.$$

Поскольку $v_s = nS_o$, то зависимость для определения времени резания примет вид

$$\tau = \int_{l_n}^{l_k} \frac{dL}{v_s} = \int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{nS_o}. \quad (6)$$

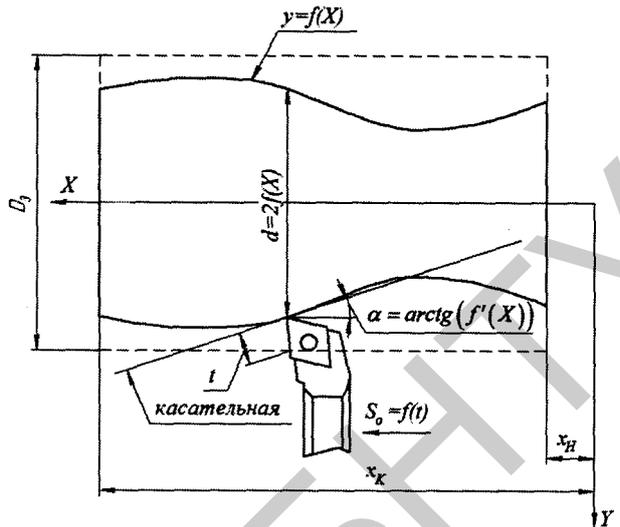


Рис. 1. Схема обработки сложного контура, заданного уравнением $Y = f(X)$, с переменной глубиной резания t и подачей S_o .

После подстановки уравнений (4) и (5) в (6) окончательно получим

$$\tau = \frac{1}{nA} \int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1+[f'(X)]^2}}{t^{-B}} dx = \frac{1}{2^B nA} \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1+[f'(X)]^2} \{ [D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)] \}^B dx. \quad (7)$$

В [4] для нестационарных процессов обработки деталей с переменной подачей и глубиной резания получена математическая модель, позволяющая определить период стойкости T и величину износа резца h_p в виде:

$$\begin{cases} T = C_T v^\mu \frac{\tau_k - \tau_n}{\int_{\tau_n}^{\tau_k} \frac{d\tau}{t^x S_0^y}}, \\ h_p = C_V v^m \int_{\tau_n}^{\tau_k} t^q S_0^u d\tau, \end{cases} \quad (8)$$

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

После подстановки формул (4) – (6) в (8) получим

$$T = C_T v^\mu A^y \frac{\int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1+[f'(X)]^2} dx}{2^{x-By} \int_{x_n}^{x_k} \frac{\sqrt{1+[f'(X)]^2} dx}{\{ [D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)] \}^{x-By}}}; \quad (9)$$

$$h_p = \frac{C_V A^u v^m}{2^{q-By} n} \int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1+[f'(X)]^2} \{ [D_3 - 2f(X)] \cos \arctg[f'(X)] \}^{q-By} dx. \quad (10)$$

Таким образом, зависимости (7), (9), (10) позволяют определить методами математического моделирования время резания τ , период стойкости T и величину износа инструмента h_p при точении с переменными глубиной резания и подачей, а также с постоянной силой резания для любого математически описываемого контура. Из полученных уравнений также следует, что τ , T и h_p зависят не только от геометрических параметров заготовки и обработанной детали, но и от параметров уравнения ограничения (3), т. е. от технологических условий обработки.

Рассмотрим реализацию полученных моделей на примере обработки конуса, заданного уравнением $y = 0,08x + 25$ ($x_n = 0$; $x_k = 100$ мм) из цилиндрической заготовки диаметром $D_3 = 70$ мм. Материал заготовки – чугун СЧ21 (190 НВ). Эмпирические параметры в формулах (1) – (3) [1]: $C_T = 215^5$; $x = -0,75$; $y = -1$; $\mu = -5$; $C_V = 0,2 \times 10^{-3}$; $q = 0,7$; $u = 0,8$; $m = 2,02$; $C_P = 920$; $x_P = 1$; $y_P = 0,75$; $\mu_P = 0$. Частота вращения заготовки $n = 500$ мин⁻¹. Ограничение по силе резания $P_z = 4000$ Н.

Тогда по формулам (7), (9), (10) получим $\tau = 0,32$ мин; $T = 10,5$ мин; $h_p = 1,4$ мкм. Для сравнения рассчитаем τ , T и h_p при точении заданного контура с постоянной подачей. В этом случае время резания равно

$$\tau = \frac{L}{nS_0} = \frac{\int_{x_n}^{x_k} \sqrt{1+[f'(X)]^2} dx}{nS_0}. \quad (11)$$

Для определения величины подачи воспользуемся соотношением (4). Примем ограничение по силе резания также $P_z = 4000$ Н. Максимальная величина P_z достигается при точении заготовки с максимальной глубиной резания, т. е. в начале контура. По формуле (5) при $x = 0$ мм получим $t = t_{\max} = 10$ мм. Тогда по формуле (4) $S_0 = 0,33$ мм/об. В соответствии с формулой (11) получим $\tau = 0,61$ мин.

Период стойкости и величина износа резца при обработке конуса с постоянной подачей могут быть определены по формулам [4]

$$T = C_T S_0^y v^m \frac{\int_{x_n}^{x_s} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{2^x \int_{x_n}^{x_s} \frac{\sqrt{1 + [f'(X)]^2} dx}{\{[D_s - 2f(X)] \cos \arctg [f'(X)]\}^x}} = 22,9 \text{ мин}; \quad (12)$$

$$h_p = C_V S_0^y v^m \frac{1}{2^q n} \int_{x_n}^{x_s} \sqrt{1 + [f'(X)]^2} \{[D_s - 2f(X)] \cos \arctg [f'(X)]\}^q dx = 0,76 \text{ мкм}. \quad (13)$$

Анализ диаграмм, представленных на рис. 2, показывает, что значения периода стойкости и величины износа резца, полученные по математическим моделям (9), (10), учитывающим переменные глубину резания и подачу, а также ограничение по силе резания, отличаются от расчетных данных при постоянной величине подачи практически в два раза. Следовательно, разработанные математические модели значительно повышают точность расчета стойкости и величины износа режущего инструмента. Это позволяет более точно прогнозировать ресурс режущего инструмента и оказывает значительное влияние на производительность обработки деталей за счет назначения оптимальных параметров режима резания.

Управление подачей при точении деталей с переменной глубиной резания и с ограничением по силе резания в соответствии с разработанной математической моделью дает возможность сократить время резания почти в два раза, т. е. обеспечить повышение производительности обработки деталей.

Ограничение по шероховатости обработанной поверхности. В данном случае обработка деталей также производится с переменными глубиной резания и подачей, но технологическим ограничением является шероховатость обработанной поверхности, заданная, например, максимальной высотой микронеровностей R_{\max} . В соответствии с [5] для точения можно записать соотношение для определения максимально допустимой подачи:

$$S_0 = \frac{C_R R_{\max}^{y_R} r^{u_R}}{t^{x_R} \varphi^{z_R} \varphi_1^{z_R}}, \quad (14)$$

где C_R – постоянный коэффициент; x_R, y_R, z_R, u_R – эмпирические показатели степени; r – радиус закругления при вершине резца; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы резца в плане.

Как и в предыдущем случае, выделим в уравнении (14) постоянную часть

$$\frac{C_R R_{\max}^{y_R} r^{u_R}}{\varphi^{z_R} \varphi_1^{z_R}} = \text{const} = A$$

и обозначим $x_R = B$. Получим

$$S_0 = At^{-B}. \quad (15)$$

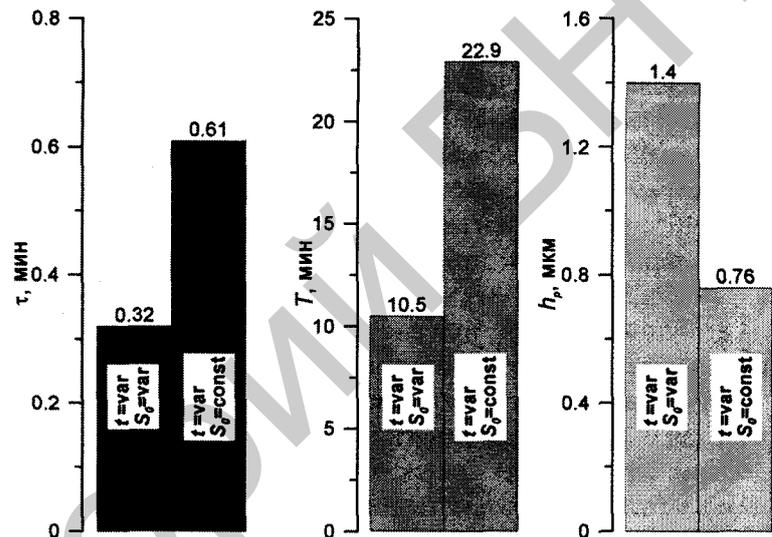


Рис. 2. Расчетные значения τ , T и h_p при точении конуса с переменной глубиной резания и с ограничением по силе резания P_z

Данное уравнение связывает между собой подачу и глубину резания и имеет такой же вид, как и формула (4) для ограничения по силе резания. Поэтому для определения τ , T и h_p можно воспользоваться уже полученными выше зависимостями (7), (9), (10) с учетом уравнения (15), включающего в себя параметры ограничения по шероховатости обработанной поверхности.

Рассмотрим реализацию полученных моделей с ограничением по шероховатости ($R_{\max} = 12,5$ мкм) на примере точения конуса, заданного уравнением $y = 0,03x + 35$ ($x_H = 0$; $x_K = 100$ мм), резцом с ромбической пластиной твердого сплава ($\varphi = 90^\circ$, $\varphi_1 = 10^\circ$, $r = 10$ мм). Заготовка – пруток ($D_3 = 78$ мм), материал – чугун СЧ21 (190 НВ). Эмпирические параметры в формулах (1), (2), (14) [1,5]: $C_T = 215^5$; $x = -0,75$; $y = -1$; $\mu = -5$; $C_V = 0,2 \times 10^{-3}$; $q = 0,7$; $u = 0,8$; $m = 2,02$; $C_R = 0,045$; $x_R = 0,25$; $y_R = 1,25$; $z_R = 0,5$, $u_R = 0,75$. Частота вращения заготовки $n = 1000$ мин⁻¹.

Используя модели (7), (9) и (10), получаем $\tau = 3,07$ мин; $T = 8,3$ мин; $h_p = 0,16$ мкм. Для сравнения рассчитаем τ , T и h_p при точении контура с постоянной подачей. По формуле (5) максимальная глубина резания $t_{\max} = 4$ мм, соответствующая ей подача (по формуле (14)) $S_0 = 0,029$ мм/об. В соответствии с формулами (11) – (13) получим $\tau = 3,45$ мин; $T = 9,13$ мин; $h_p = 0,15$ мкм.

Отсюда следует, что определение τ , T и h_p по моделям с постоянной подачей, как и в примере с ограничением по силе резания, также дает существенную погрешность, особенно при расчете времени обработки (более 12%). Погрешность расчета T составляет около 10%. Учитывая то, что для современных высокопроизводительных режущих инструментов период стойкости не превышает 15 мин, такая погрешность также может оказать значительное влияние на производительность обработки при назначении параметров режима резания.

Анализ полученных результатов также показывает, что ограничение по силе резания влияет на величины τ , T и h_p при расчете по моделям с постоянной и с переменной подачей в большей степени, чем ограничение по шероховатости.

Аналогично могут быть получены математические модели, позволяющие определить τ , T и h_p при использовании других технологических ограничений (по точности обработки, величине деформации системы станок – приспособление – инструмент – деталь и др.). Для этого необходимо установить математическую зависимость ограничения от параметров режима резания и получить уравнения связи для параметров, входящих в выражения для расчета периода стойкости, величины износа инструмента и машинного времени при стационарном резании.

Влияние технологических ограничений на стойкость инструмента и производительность обработки. Из формул (7), (9), (10) следует, что время резания τ , период стойкости T и величина износа инструмента h_p при точении с переменными глубиной резания и подачей зависят от условий обработки, выражаемых параметрами уравнения технологического ограничения. На рис 3, а–в показана зависимость τ , T , h_p от величины P_z и на рис 3, г–е – зависимость τ , T , h_p от R_{\max} при различных n . При увеличении P_z и R_{\max} время резания τ снижается. Степень снижения τ постепенно уменьшается, приближаясь к некоторому пределу. Это объясняется соотношением параметров в уравнениях связи (4), (15). При увеличении n время резания снижается, поскольку возрастает скорость движения подачи (минутная подача).

Период стойкости T при увеличении P_z и R_{\max} уменьшается, а величина износа инструмента h_p возрастает, что связано с увеличением подачи S_0 . Поскольку взаимосвязь между P_z (R_{\max}) и S_0 не прямо пропорциональная, а выражается через уравнения (4) и (15), то степень снижения T убывает по мере увеличения P_z и R_{\max} . При увеличении n период стойкости инструмента снижается, а величина износа увеличивается, поскольку возрастают скорость резания и минутная подача.

Полученные результаты показывают, что технологические ограничения значительно влияют на процесс резания с переменными глубиной резания и подачей и их необходимо учитывать при расчете параметров износа и стойкости режущего инструмента, а также при определении производительности обработки деталей и назначении режима резания.

Оценка адекватности математических моделей износа и стойкости инструмента. Проверка адекватности разработанных математических моделей осуществлялась путем сравнения результатов расчета по формулам (9), (10) с данными экспериментальных исследований.

Исследования выполнялись на примере токарной обработки с переменными глубиной резания и подачей наружной конической поверхности деталей. Применялся двухосевой токарный

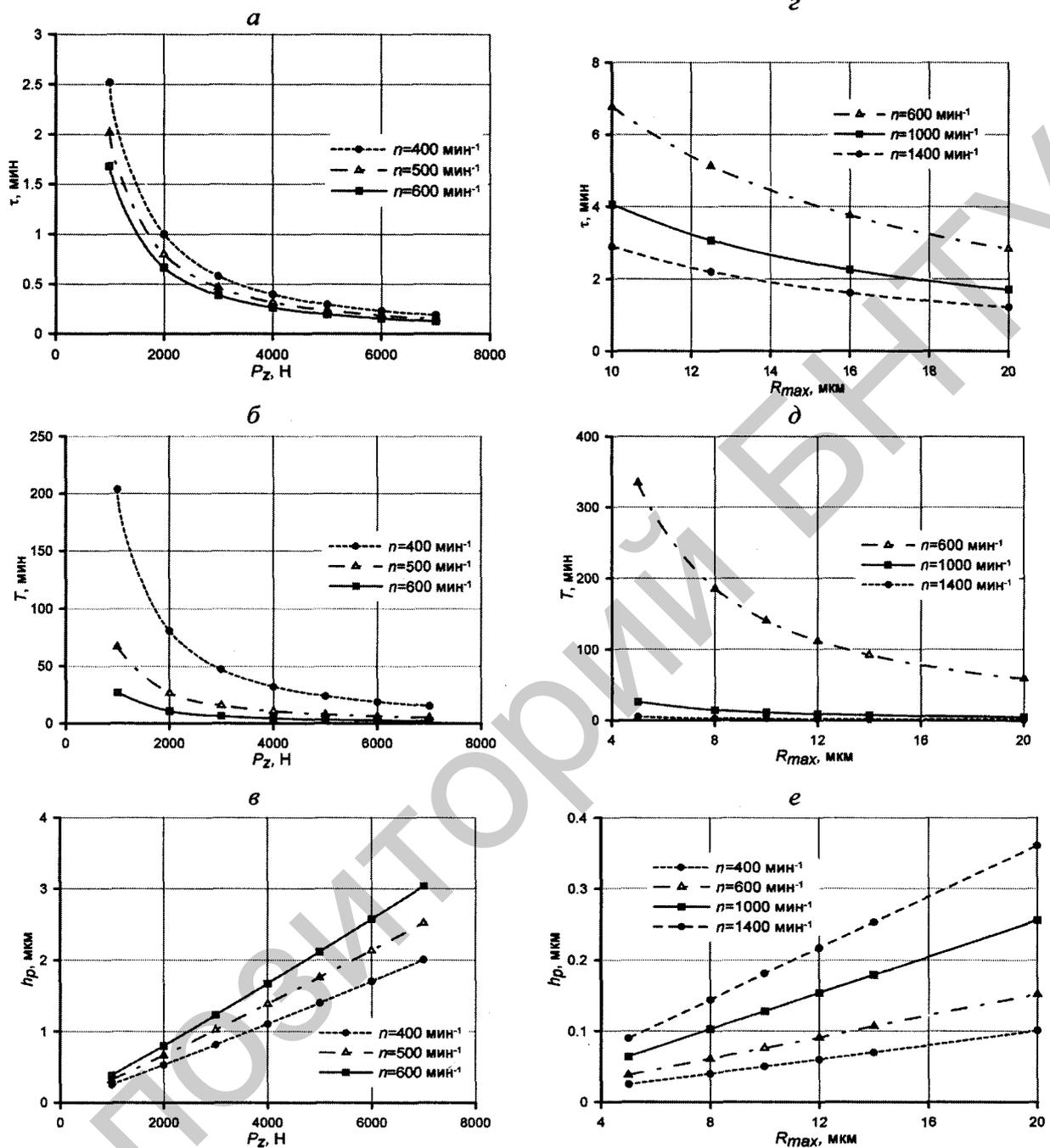


Рис. 3. Влияние технологических ограничений на время резания, период стойкости и величину износа инструмента при точении с переменными глубиной резания и подачей: а - $\tau = f(P_z)$; б - $T = f(P_z)$; в - $h_p = f(P_z)$; г - $\tau = f(R_{max})$; д - $T = f(R_{max})$; е - $h_p = f(R_{max})$

станок с ЧПУ мод. Nawk 200 фирмы Cincinnati с системой ЧПУ GE-Fanuc 21i-TA. Моделирование обработки и создание управляющей программы для станка производились в среде Pro/Engineer.

В соответствии с рекомендациями [6] в качестве критерия стойкости резца был принят размерный износ h_p . Определение величины h_p осуществлялось с помощью измерительной системы линейных перемещений станка и устройства ЧПУ. Для этого производилась привязка резца к системе отсчета станка и вычислялся вылет резца.

В начале эксперимента в память УЧПУ вводилась величина вылета резца, равная нулю. Затем производились обтачивание цилиндрического участка на заготовке, отвод суппорта по координате Z станка и измерение диаметра d_1 обточенной части заготовки с помощью рычажной ин-

дикаторной скобы СРП 213-802 с погрешностью 0,001 мм. Диаметр d_1 вводился под адресом X , а на экране дисплея высвечивались номер резца и вычисленное значение вылета резца X_1 по координате X относительно начала координат.

После обработки определенного числа контуров (или в заданные моменты времени резания) вновь производились обтачивание цилиндрического участка и измерение его диаметра d_2 . Затем операция привязки резца повторялась и определялась величина вылета резца X_2 . Разность $|X_1 - X_2|$ равна величине радиального износа резца h_r . Разность вылетов после достижения резцом величины предельного размерного износа H_r , равна величине h_r за время резания, равное периоду стойкости T .

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

$$H_r = V_h T + h_0 = h_r \frac{T}{\tau} + h_0, \quad (16)$$

где V_h – скорость размерного 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

$$V_h = \frac{h_r}{\tau}, \quad (17)$$

где h_r – величина размерного износа за время резания τ .

При расчете H_r в формуле (17) используются значения h_r , определяемые по модели (10) за время резания τ , т. е. применяется теоретическая зависимость $h_r = f(\tau)$. Затем расчетная величина предельного размерного износа сравнивалась с величиной, полученной экспериментально.

При оценке износа резца по величине периода стойкости в качестве аргумента использовался предельный размерный износ, определяемый экспериментально, т. е. H_{r3} . Соответствующий ему период стойкости определяется по зависимости, получаемой из уравнения (16)

$$T = \frac{H_{r3} - h_0}{V_h},$$

где для определения скорости размерного изнашивания используются экспериментальные значения h_r за время τ , т. е. применяется экспериментальная зависимость $h_r = f(\tau)$.

Статистическая оценка результатов экспериментов производилась по общеизвестным методам. Погрешности определения радиального износа δ_{H_r} и периода стойкости δ_T составляют:

$$\delta_{H_r} = \frac{|H_r - M(H_r)|}{M(H_r)} 100\%; \quad \delta_T = \frac{|T - M(T)|}{M(T)} 100\%,$$

где H_r и T – расчетные значения предельного радиального износа и периода стойкости, а $M(H_r)$ и $M(T)$ – математические ожидания этих величин по результатам экспериментальных исследований.

Результаты сравнительного анализа расчетных и экспериментальных данных при обработке конической поверхности представлены ниже: $T = 168$ мин; $M(T) = 155,5$ мин; $\delta_T = 8,0\%$; $H_r = 90$ мкм; $M(H_r) = 97,1$ мкм; $\delta_{H_r} = 7,3\%$.

Полученные данные свидетельствуют об адекватности разработанных математических моделей.

Выводы

1. Полученные математические модели позволяют определить период стойкости T , величину износа инструмента h_p и время резания τ при точении деталей с переменными глубиной резания и подачей, а также с учетом технологических ограничений для любого математически описываемого контура.

Для получения математических моделей используются зависимости ограничения от параметров режима резания и уравнения связи для параметров, входящих в выражения для расчета периода стойкости, величины износа инструмента и машинного времени при стационарном резании.

2. Расчетные значения τ , T и h_p зависят не только от геометрических параметров заготовки и обработанной детали, но и от параметров уравнения ограничения, т. е. от технологических условий обработки.

3. Управление подачей при точении деталей с переменной глубиной резания в соответствии с разработанными математическими моделями дает возможность сократить время резания почти в два раза при ограничении по силе резания и на 12% при ограничении по шероховатости обработанной поверхности.

4. Значения периода стойкости и величины износа резца, рассчитанные по математическим моделям, учитывающим переменную глубину резания и подачу, а также технологическое ограничение, отличаются от расчетных данных при постоянной величине подачи практически в два раза при ограничении по силе резания и на 10% при ограничении по шероховатости обработанной поверхности.

Литература

1. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. М., 1985.
2. Каштальян И. А. Повышение эффективности использования станков с ЧПУ в условиях нестационарного резания. Мн., 2008.
3. Рохин О. В. // Металлообработка. М., 2007. № 3. С. 2–5.
4. Ящерицын П. И., Туромша В. И., Чан Ким Тоан // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 1993. № 4. С. 40–47.
5. Горанский Г. К., Владимиров Е. В., Ламбин Л. Н. Автоматизация технического нормирования работ на металлорежущих станках с помощью ЭВМ. М., 1970.
6. Макаров А. Д. Оптимизация процессов резания. М., 1976.

V. I. TUROMSHA, S. N. MISHCHENKO

TOOL DURABILITY MODELLING UNDER NON-STATIONARY CUTTING IN VIEW OF TECHNOLOGICAL CONSTRAINTS

Summary

Mathematical dependences that allow to evaluate the durability period T , the amount of tool degradation h_p , and chip-cutting time τ in turning workpieces with variable depth of cut and feed and in view of technological constraints for any mathematically described contours were obtained. The models with cutting force and surface finish constraints are considered in detail.

It was found that the design value of the durability period and the amount of tool degradation determined using the mathematical models suggested are distinguished from the calculated data under constant amount of feed by practically 2 times under cutting force constraint and by 10% under surface finish constraint.

Feed control in accordance with the mathematical models developed enables the machining time to be reduced by 2 times under cutting force constraint and by 12% under surface finish constraint.