

УДК 621.97

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ В ЦЕНТРАХ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ

*Докт. техн. наук, проф. МРОЧЕК Ж. А., докт. техн. наук ШАТУРОВ Г. Ф.,
ЯСЮКОВИЧ Э. И., асп. ШАТУРОВ Д. Г.*

*Белорусский национальный технический университет,
Белорусский институт правоождения, Белорусско-Российский университет*

Технологическая система в процессе резания представляет собой динамическую упругую систему, элементы которой взаимно перемещаются и деформируются, что обуславливает возникновение погрешностей обработки [1].

Проблема повышения точности при формообразовании поверхностей на токарных станках решается оценкой степени влияния каждого элемента технологической системы (ТС) на вносимую им погрешность, выделением основных причин снижения точности, ее прогнозированием с учетом жесткости элементов ТС и снижением величин погрешностей за счет рационального управления деформациями упругой системы [2].

Смещение формообразующей точки лезвия – вершины резца относительно обрабатываемой поверхности в процессе обработки равно

$$\Delta l = \sqrt{\left(\sum_1^n Y_{ix}\right)^2 + \left(\sum_1^n Z_{ix}\right)^2}, \quad (1)$$

где

$$Y_{ix} = Y_{зб} + Y_{пб} + Y_з + Y_{ин} + Y_{пр} + Y_c + \delta_p. \quad (2)$$

Здесь Y_{ix} , Z_{ix} – смещение (упругое отжатие) соответственно элементов технологической системы: задней и передней бабок станка (опор вала), заготовки, инструмента, приспособления, суппорта в рассматриваемом сечении вала соответственно в радиальном и касательном к обрабатываемой поверхности направлениях;

δ_p – величина линейного радиального износа инструмента; смещение Z_{ix} имеет аналогичные составляющие, как и Y_{ix} (2).

Величина линейного радиального износа для резца с микрообновлением режущей кромки (МРК) равна нулю [3], а для призматического определяется по формуле [4]. Смещения инструмента и приспособления, как правило, малы и их можно не учитывать [1]. Смещение суппорта происходит в начале обработки, при незначительных колебаниях усилия резания, оно постоянно и не оказывает влияния на погрешность обработки.

Поскольку длинномерные валы в большинстве случаев обрабатываются в центрах, рассмотрим более подробно влияние отдельных элементов ТС на погрешность их обработки в центрах.

Диаметр обрабатываемой детали по сравнению с настроечным размером вершины резца относительно оси заготовки изменяется на двойную величину смещения. Тогда погрешность размера и формы обрабатываемой детали в сечении, отстоящем на расстоянии x от торца заготовки вала при обработке в центрах, равна

$$\Delta D = 2(R_x - R_i) \approx 2(Y_x - Y_i) + \frac{Z_x^2}{R_0 + Y_x} - \frac{Z_i^2}{R_0 + Y_i}, \quad (3)$$

где

$$R_i = \sqrt{(R_0 + Y_i)^2 + Z_i^2}; \quad R_x = \sqrt{(R_0 + Y_x)^2 + Z_x^2};$$

$$Y_x = P_y \omega_{36} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + P_y \omega_{п6} \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{P_y l^3}{3EJ} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 - \frac{1}{2} P_x \omega_{36} \frac{D}{l} + \frac{1}{2} P_x \omega_{п6} \frac{D}{l}; \quad (4)$$

$$Z_x = P_z \omega_{36} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + P_z \omega_{п6} \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{P_z l^3}{3EJ} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 - \frac{1}{2} G \omega_{36} \left(1 - \frac{x}{l}\right) - \frac{1}{2} G \omega_{п6} \left(\frac{x}{l}\right) - \frac{Gl^3}{24EJ} \left[\frac{x}{l} - 2 \left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right]; \quad (5)$$

Здесь $D = 2R_0$ – настроечный (номинальный) диаметр вала в начале обработки; Y_i, Z_i – упругое смещение оси вала в сечении, относительно которого определяется погрешность обработки; Y_x, Z_x – упругое смещение оси вала в сечении, в котором определяется погрешность обработки; P_y, P_z, P_x – соответственно радиальная, тангенциальная и осевая составляющие силы резания; l – длина вала; E – модуль упругости материала заготовки; J – момент инерции сечения заготовки, $J = 0,05D^4$; $\omega_{п6}, \omega_{36}$ – податливости соответственно передней и задней бабки станка (опор вала); G – вес обрабатываемого вала. В дальнейших расчетах принято $\delta_p = 0$.

Оценим влияние тангенциальной составляющей силы резания P_z на упругие перемещения и точность при обработке на токарном станке модели 1К62, имеющем податливость $\omega_{п6} = 0,353/P_y^{0,32}$ и $\omega_{36} = 5,02/P_y^{0,52}$.

Так, при обработке стального вала: $D = 100$ мм; $l = 1000$ мм на режимах $s = 0,5$ мм/об; $t = 2,0$ мм; $V = 200$ м/мин имеем $P_y = 600$ Н; $P_z = 1611$ Н; $Y_i = Y_0 = 109,6$ мкм; $Z_i = Z_0 = 173,82$ мкм; $(x/l)_3 = 0,903$; $Y_x = 25,14$ мкм; $Z_x = 49,41$ мкм; $\Delta D = -167,84$ мкм (без учета силы P_z) и $\Delta D_1 = 168,39$ мкм (с учетом силы P_z).

Ошибка в определении погрешности обработки без учета силы P_z составляет 0,33 %, что позволяет в дальнейшем, определяя погрешность при обработке валов среднего машиностроения, не учитывать влияние силы P_z и веса вала G . По той же причине не учитывалось влияние силы P_x . Тогда можно записать

$$\Delta D = Y_x - Y_0, \quad (6)$$

где

$$Y_0 = P_y \omega_{36}; \quad (7)$$

$$Y_x = P_y \omega_{36} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + P_y \omega_{п6} \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{P_y l^3}{3EJ} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2. \quad (8)$$

Здесь Y_0 – радиальное упругое смещение оси вала под действием радиальной силы в начале обработки при $x = 0$.

Диаметр вала в начале обработки зависит от схемы настройки на размер, которая может быть статической или динамической. Статическая настройка осуществляется по контрольному валу (эталоны), диаметр которого равен предельному размеру обрабатываемого вала. Динамическая настройка осуществляется по пробным проходам в начале обработки до получения номинального (наибольшего) размера вала. В первом случае диаметр детали будет увеличен и равен

$$D_x = D + 2Y_x,$$

где D_x – текущий диаметр детали, измеряемый на расстоянии x от начала обработки (торца заготовки), а глубина резания или толщина снимаемого припуска будет уменьшена на величину упругого отжатия

$$t_\phi = t - Y_x, \quad (9)$$

t_ϕ, t – соответственно фактическая и расчетная глубина резания.

При динамической настройке или адекватной ей статической настройке резец в начале обработки заглабливают в обрабатываемую поверхность на величину, большую глубины резания, равную упругой деформации ТС в начале обработки. Тогда глубина резания равна

$$t_\phi = t + Y_0 - Y_x. \quad (10)$$

Динамическая настройка в большей степени обеспечивает суммарное упругое перемещение элементов ТС в пределах допуска на изготовление вала.

В токарных станках, как правило, жесткости передней и задней бабок не равны, при этом задняя бабка менее жестка. Поэтому пространственная линия упругих перемещений оси заго-

товки от действия силы резания (0-1-2-3-4) имеет в общем случае три асимметрично расположенных относительно середины вала экстремальные точки минимальных и максимальных прогибов (1, 2, 3) (рис. 1).

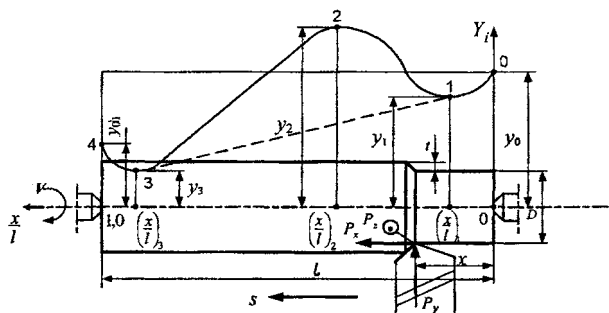


Рис. 1. Вид кривой и величина упругих перемещений оси вала в радиальной плоскости при обработке в зависимости от местоположения реза: P_x, P_y, P_z – составляющие силы резания, действующие на вал

Кривая 0-1-3-4 обусловлена упругим перемещением опор вала с расположением лимитирующего сечения от начала обработки на расстоянии, равном (а. с. 1826314)

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = \frac{1}{1 + \frac{\omega_{пб}}{\omega_{сб}}} \quad (11)$$

Часть выпуклой кривой на участке 1-2-3 (рис. 1) обусловлена прогибом заготовки в процессе обработки с расположением экстремальных точек 1 и 2 соответственно на расстояниях $(x/l)_1$ и $(x/l)_2$.

В результате погрешность обработки по диаметральным размерам вала равна разности упругих перемещений на рассматриваемых участках (рис. 1):

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_{10} &= 2(Y_1 - Y_0); \\ \Delta D_{21} &= 2(Y_2 - Y_1); \\ \Delta D_{20} &= 2(Y_2 - Y_0); \\ \Delta D_{32} &= 2(Y_3 - Y_2); \\ \Delta D_{30} &= 2(Y_3 - Y_0); \\ \Delta D_4 &= 2(Y_{01} - Y_3); \\ \Delta D_0 &= 2(Y_{01} - Y_0), \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где Y_i – упругое перемещение элементов ТС в рассматриваемом сечении вала.

Исследуя зависимость (8), получим расположение экстремумов упругой линии оси вала [5]:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{x}{l}\right)_1 &= 2r \left(60^\circ + \frac{\varphi}{3}\right); \\ \left(\frac{x}{l}\right)_2 &= 2r \left(60^\circ - \frac{\varphi}{3}\right); \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{x}{l}\right)_3 &= -2r \cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) \text{ для валов } \frac{l}{d} > 13; \\ \left(\frac{x}{l}\right)_3 &= 0,5 + \sqrt[3]{-q + \sqrt{q^2 + p^3}} + \sqrt[3]{-q - \sqrt{q^2 + p^3}} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

для валов $\frac{l}{d} \leq 13$,

где

$$q = -\frac{3 EJ}{8 l^3} (\omega_{сб} - \omega_{пб});$$

$$p = \frac{1 EJ}{2 l^3} (\omega_{сб} + \omega_{пб}) - \frac{1}{12}; \quad (15)$$

$$r = -\sqrt{|p|}; \quad \varphi = \arccos(q/r^3).$$

Существенную погрешность при обработке вносит неодинаковая податливость опор крепления вала: шпинделя и задней бабки станка. Для жестких валов ($l/d \leq 13$) это приводит к корсетности (линия 0-1-3-4, рис.1), которая значительно увеличивается при $\omega_{пб}/\omega_{сб} < 0,6$ и достигает максимума при $(x/l) = (x/l)_3$ (рис. 2). Прогиб вала в этом случае уменьшает погрешность обработки от 1,3 до 3 раз.

Таким образом, наибольшая погрешность обработки для жестких валов имеет место не в середине вала [1], а в лимитирующем сечении, расположенном на некотором расстоянии от его центра в направлении к наиболее жесткой опоре, что позволяет повысить точность ее определения на 20-35 % по сравнению с известной методикой, рекомендующей определять погрешность обработки по середине вала [1]. С уменьшением диаметра вала или увеличением отношения $l/d \geq 13$ на кривой линии 0-1-3-4 (рис. 1) упругого перемещения оси вала на расстоянии от торца заготовки, равном $(x/l) \approx 0,25$, возникают два экстремума функции, которые затем расходятся: один – в направлении к более податливой опоре (точка 1 кривой), другой

(точка 2 кривой) – в направлении к середине вала, и расположенных соответственно на расстояниях $(x/l)_1$ и $(x/l)_2$ от начала обработки (рис. 1).

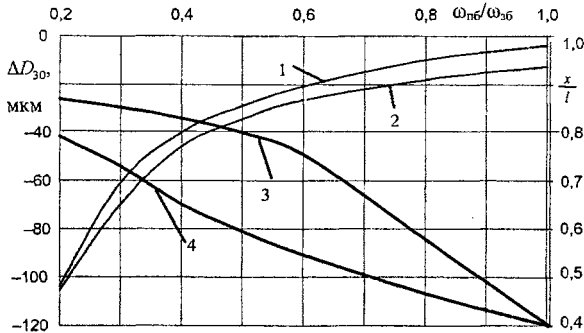


Рис. 2. Зависимость изменения максимальной погрешности ΔD_{30} (1), (2) и расположения экстремальных точек $\left(\frac{x}{l}\right)_3$ (3) и $\left(\frac{x}{l}\right)_0$ (4) на кривой упругих перемещений оси вала при обработке резцом с МРК в зависимости от отношения $\omega_{нв}/\omega_{36}$: $D = 100$ мм; $l = 1000$ мм; $\omega_{нв} = 0,06$ мкм/Н; $t = 0,5$ мм; $s = 0,5$ мм/об; $v = 200$ м/мин; $v_p = 1,1 \cdot 10^{-5}$ м/с; $P_y = 211$ Н; $1 - f \neq 0$; $2 - f = 0$; f_0 – максимальный прогиб вала

Наличие трех экстремальных точек на линии упругих перемещений оси вала в процессе резания и порождает характерные погрешности обработки (12), которые представлены в табл. 1 для $l/d \leq 25$.

Упругие перемещения элементов ТС прямо пропорциональны радиальной составляющей силы резания, которая, например при резании призматическим резцом и прямом сечении сре-

заемого слоя, в большей степени зависит от глубины резания и в меньшей – от подачи [4]

$$P_y = 2430t^{0,9}S^{0,6}V^{-0,3}(1+\Delta t/t)^{0,9}k_p, \quad (16)$$

где k_p – коэффициент, учитывающий геометрию резца и условия обработки, $k_{p=1}$ ($\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = \alpha_3 = \gamma_3 = 10^\circ$; $\lambda = 0$); Δt – величина колебаний припуска при обработке.

Поэтому изменение глубины резания при прямом сечении срезаемого слоя в большей степени влияет на погрешность обработки, чем подача, а при обратном сечении срезаемого слоя – наоборот (рис. 3). Проведенные исследования показали, что экспериментальные данные не отличаются от расчетных более чем на 5 %.

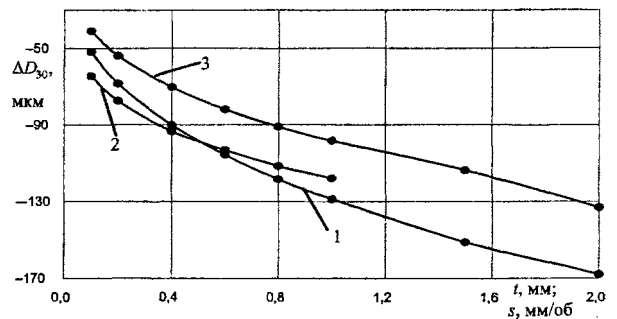


Рис. 3. Зависимость изменения максимальной погрешности ΔD_{30} от глубины резания t (1), (3) и подачи s (2) при обработке призматическим резцом: 3 – при $\frac{x}{l} = 0,5$; $t = 0,5$ мм; $s = 0,5$ мм/об; $v = 200$ м/мин; $\omega_{нв} = 0,353 P_y^{0,32}$; $\omega_{36} = 5,02 / P_y^{0,52}$

Таблица 1

Величина упругих перемещений и погрешностей при обработке валов чашечным резцом с микрообновлением режущей кромки ($t = 0,5$ мм; $s = 0,5$ мм/об; $v = 200$ м/мин; $v_p = 1,1 \cdot 10^{-5}$ м/с)

D , мм	40	50	55	56,1	57	60	62	75	100	200	∞
Y_0 , мкм	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3	63,3
Y_1 , мкм	62,03	59,55	57,62	57,08	56,63	54,78	53,13	–	–	–	–
Y_2 , мкм	190,93	90,65	69,15	65,66	63,19	56,38	53,15	–	–	–	–
Y_3 , мкм	12,6	12,52	12,47	12,45	12,44	12,39	12,36	12,1	11,46	10,6	10,55
Y_{01} , мкм	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66	12,66
$(x/l)_1$	0,0148	0,064	0,1	0,112	0,122	0,169	0,2376	–	–	–	–
$(x/l)_2$	0,4955	0,4473	0,415	0,405	0,396	0,3526	0,2868	–	–	–	–
$(x/l)_3$	0,995	0,989	0,984	0,983	0,982	0,978	0,976	0,953	0,9	0,84	0,833
f_0 , мкм	171,7	70,33	48,04	44,38	41,64	33,92	29,75	13,89	4,4	0,275	0
ΔD_{10} , мкм	-2,55	-7,5	-11,35	-12,43	-13,3	-17,0	-20,3	–	–	–	–
ΔD_{21} , мкм	257,8	62,2	23,0	17,15	13,13	3,2	~0	–	–	–	–
ΔD_{20} , мкм	255,3	54,7	11,69	4,72	-0,21	-13,84	-20,3	–	–	–	–
ΔD_{32} , мкм	-356,6	-156,3	-113,3	-106,4	-101,5	-87,98	-81,58	–	–	–	–
ΔD_{30} , мкм	-101,4	-101,5	-101,6	-101,7	-101,73	-101,8	-101,88	-102,4	-103,7	-105,4	-105,5
ΔD_4 , мкм	0,116	0,28	0,39	0,42	0,446	0,54	0,606	1,12	2,4	4,12	4,22
ΔD_0 , мкм	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28	-101,28
l/D	25	20	18,2	17,8	17,5	16,7	16,1	13,3	10	5	–

Погрешность обработки в поперечном сечении зависит от колебания снимаемого припуска Δt , физико-механических свойств и определяется на основе приведенных выше зависимостей (8), (12), (16).

Отметим, что погрешность обработки при статической настройке всегда больше, чем при динамической, так как она включает в себя погрешность формы ΔD_ϕ и погрешность размера ее расположения Y_3 (рис. 1)

$$\Delta D_c = \Delta D_\phi + 2Y_3, \quad (17)$$

где ΔD_c , ΔD_ϕ – погрешности соответственно при статической и динамической настройках.

Динамическая погрешность содержит только погрешность формы $\Delta D_\phi = \Delta D_{32}$ (рис. 1).

При статической настройке на размер необходимо после получения первичных результатов по упругому перемещению элементов ТС определить фактическую глубину резания t_ϕ по зависимости (9). После чего вторично определить радиальную силу резания, величину упругих перемещений оси вала и погрешность обработки. Если этого не сделать, то относительная ошибка η в нахождении погрешности может составить от 4 до 16 % (рис. 4), т. е.

$$\eta = \frac{\Delta D_1 - \Delta D}{\Delta D} \cdot 100 \%. \quad (18)$$

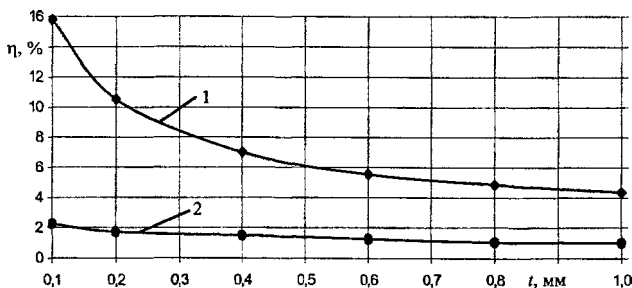


Рис. 4. Относительная погрешность обработки вала в процентах от глубины резания l при статической (1) и динамической (2) настройках на размер

При динамической настройке это делать обязательно, так как относительная погрешность в этом случае будет меньше 2 % (рис. 4).

На рис. 5 представлен алгоритм расчета погрешности при обработке валов в центрах на токарном станке. Расчеты производились с использованием пакета MS Excel.

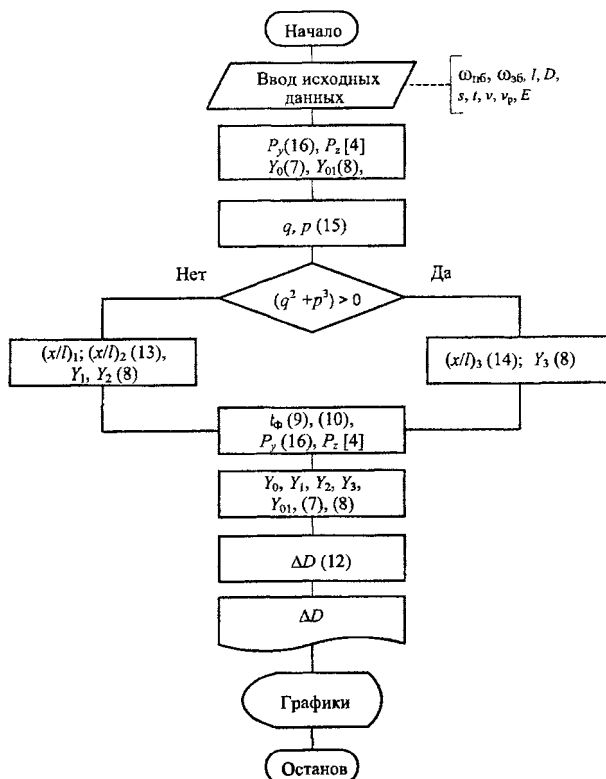


Рис. 5. Алгоритм расчета погрешностей при обработке валов

ВЫВОД

Таким образом, представленные результаты исследований позволяют, имея упруго-динамическую характеристику оборудования, элементов ТС и режимы обработки, определить на стадии проектирования технологического процесса всю картину погрешностей, которые могут иметь место при обработке вала и принять меры по их уменьшению до предельно допустимых чертежом значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Шатуров, Г. Ф. Влияние жесткости технологической системы на точность и производительность обработки / Г. Ф. Шатуров // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – Минск, 1998. – 26 с. – Деп. в ВНИТИ 09.12.98, № 3601-B98 // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 1999. – № 2. – С. 142.
3. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск: УП «Технопринт», 2001. – С. 460.
4. Справочник технолога-машиностроителя. – Т. 1 / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 655 с.
5. Корн, Г. Справочник по математике: для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

Поступила 10.10.2005