

УДК 621.97

Ж.А. Мрочек, д.т.н., проф.

Г.Ф. Шатуров, д.т.н., с.н.с.

Э.И. Ясюкович, инж.

Д.Г. Шатуров, аспирант

*Белорусский национальный технический университет*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗАГОТОВОК ВАЛОВ ПРИ ТОЧЕНИИ

*Предложена математическая модель для определения погрешностей диаметральных размеров вала при токарной обработке. Определены оптимальные варианты крепления заготовок и даны рекомендации по проектированию технологического процесса обработки вала с целью получения минимальных величин погрешностей.*

**Введение.** При обработке валов на токарных станках величина погрешностей размеров по мере перемещения резца вдоль обрабатываемой заготовки зависит от упругой податливости элементов технологической системы (ТС); передней и задней бабок станка; приспособления; суппорта; самой заготовки, а также от величины износа инструмента. Смещения инструмента (резца) и приспособления, как правило, малы [1] и их можно не учитывать. Смещение суппорта происходит в начале обработки и, при незначительных изменениях усилия резания, оно постоянно [2], а при динамической настройке на размер не оказывает влияния на погрешность обработки.

Существенную роль в упругих перемещениях ТС играет способ крепления вала при обработке, поэтому при проектировании технологического процесса следует выбрать оптимальный вариант крепления заготовки.

Цель исследования. Рассмотрим образование погрешности обработки при креплении вала в патроне с поджимом задним центром, именуемым в дальнейшем как крепление вала в патроне и центре.

Погрешность размера и формы обрабатываемой заготовки детали в сечении, расположенной на расстоянии  $x$  от торца заготовки (задней опоры вала), равна (рис. 1 [3]):

$$\Delta D = 2 \cdot (Y_x - Y_o),$$

где  $Y_x = Y_{зб} + Y_{пб} + Y_z + \delta_p$ ;  $Y_o = P_y \cdot \text{авб}$ .

Здесь  $Y_x$  – смещение (упругое отжатие) соответственно элементов технологической системы: задней и передней бабок станка (опор вала), заготовки в рассматриваемом сечении вала (в месте нахождения резца)

в радіальному напрямку до оброблюваної поверхності;  $\delta_p$  – величина износа інструмента;  $Y_o$  – упруге сміщення осі вала під дією радіальної сили в началі обробки при  $x = 0$ ;  $\omega_{зб}$  – податливість задньої бабки станка (опори вала);  $P_y$  – радіальна складова сили різання (рис. 1).

*Рис. 1. Величина упругих переміщень осі вала в радіальній площині при токарній обробці в залежності від положення різця:  $P_x, P_y, P_z$  – складова сили різання, діючі на вал*

При шаговому різанні і різанні з мікрооновленням режущої кромки [2] величина  $\delta_p = 0$ . При точенні призматическим різцем величина  $\delta_p$  визначається аналітичеськи [3]. В дальньшх расчетах прийнято  $\delta_p = 0$ .

Влияние тангенциальной  $P_z$  и осевой  $P_x$  составляющих силы резания (рис. 1) на точность обработки незначительно (меньше 0,5 %) [4], что позволяет при определении погрешности обработки их не учитывать.

Тогда можно записать (крепление заготовки вала в патроне и заднем центре [2]):

$$Y_x = P_y \cdot \omega_{зб} \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \cdot K_{рзб} + P_y \cdot \omega_{пб} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2 \cdot K_{рпб} + \frac{P_y \cdot l^3}{3 \cdot E \cdot J} \cdot \left(\frac{x}{l}\right)^2 \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \cdot K_d,$$

где

$$\left. \begin{aligned} K_{рзб} &= 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l}\right) \cdot \left(1 + \frac{x}{l}\right), \\ K_{рпб} &= 1,5 - \frac{1}{2} \left(\frac{x}{l}\right)^2, \end{aligned} \right\}$$

$\omega_{нб}$  – податливість передньої опори вала (передньої бабки станка);  $l$  – довжина вала;  $E$  – модуль пружності матеріала заготовки;  $J$  – момент інерції сечення заготовки,  $J = 0,05 \cdot D^4$ ;  $D$  – діаметр вала;  $x$  – відстань від торця заготовки до місця розташування вершини різця (рис. 1). При установці вала в центрах  $K_{рзб} = K_{рнб} = K_0 = 1$ .

Будемо вважати, що в початку обробки здійснюється динамічна налаштування на розмір по пробним проходів різця до отримання номінального розміру вала. В токарних станках, як правило, задня бабка менше жорстка, ніж передня, і тому просторовий ліній (0–1–2–3–4) пружних переміщень осі заготовки від дії сили різання має в загальному випадку три асиметрично розташовані відносно середини вала екстремальні точки максимальних і мінімальних прогинів:  $V_1$ ,  $V_2$  і  $V_3$ , розташованих відповідно на відстанях  $(x/l)_1$ ,  $(x/l)_2$  і  $(x/l)_3$  від початку обробки (рис. 1). Точки 0–1–3–4 залежності обумовлені пружним переміщенням опор вала під дією сили  $P_y$  з розташуванням лімітуючого сечення на відстані від початку обробки рівною

$$\left(\frac{x}{l}\right)_0 = 2 \cdot r \cdot \cos\left(60^\circ + \frac{\varphi}{3}\right),$$

де

$$r = \sqrt{|P|};$$

$$\varphi = \arccos\left(\frac{q}{r^3}\right); \quad q = \frac{7}{16} \cdot \frac{\omega_{зб}}{\omega_{зб} + \omega_{нб}} - \frac{1}{64} \left(\frac{\omega_{зб}}{\omega_{зб} + \omega_{нб}}\right)^3;$$

$$p = -\frac{1}{2} - \frac{1}{64} \left(\frac{\omega_{зб}}{\omega_{зб} + \omega_{нб}}\right)^2,$$

в якому маємо найменшу величину пружних переміщень осі заготовки (рис. 1).

Розташування точки 2 обумовлено величиною прогиба заготовки. Складення величин пружних деформацій опор вала і заготовки визначає

ет окончательно расположение точек 1, 2 и 3 представленной зависимости (рис. 1). При увеличении диаметра заготовки (ее жесткости) уменьшается величина упругих перемещений  $Y_2$  в экстремальной точке 2, расположенной на выпуклой части на расстоянии  $(x/l)_2$  от торца заготовки, что приводит к вырождению экстремума в этой точке, а зависимость упругих перемещений оси заготовки принимает вогнутую форму с одним экстремальным (наименьшим) значением прогиба, равным  $Y_3$  (табл.).

Таблиця

Влияние упругих перемещений и погрешностей при точении заготовок валов резцом  
 ( $P_y = 211 \text{ Н}$ ,  $\omega_{зб} = 0,3 \text{ мкм/Н}$ ,  $\omega_{пб} = 0,006 \text{ мкм/Н}$ )

| $D$ , мм              | 40       | 45       | 47,5    | 50      | 60     | 75    | 80      | 100   | 200   | патрон-центр |
|-----------------------|----------|----------|---------|---------|--------|-------|---------|-------|-------|--------------|
| $Y_0$ , мкм           | 63,3     | 63,3     | 63,3    | 63,3    | 63,3   | 63,3  | 63,3    | 63,3  | 63,3  |              |
| $Y_1$ , мкм           | 60,1     | 57,95    | 56,44   | 54,45   | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $Y_2$ , мкм           | 100,48   | 71,0     | 61,88   | 55,39   | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $Y_3$ , мкм           | 12,28    | 12,17    | 12,11   | 12,04   | 11,74  | 11,23 | 11,07   | 10,57 | 10,06 |              |
| $Y_{01}$ , мкм        | 12,66    | 12,66    | 12,66   | 12,66   | 12,66  | 12,66 | 12,66   | 12,66 | 12,66 |              |
| $(x/l)_1$             | 0,045    | 0,075    | 0,1     | 0,145   | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $(x/l)_2$             | 0,375    | 0,345    | 0,315   | 0,275   | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $(x/l)_3$             | 0,955    | 0,945    | 0,935   | 0,930   | 0,895  | 0,840 | 0,820   | 0,775 | 0,735 |              |
| $\Delta D_{32}$ , мкм | -176,389 | -117,648 | -99,548 | -86,685 | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $\Delta D_{30}$ , мкм | -102,02  | -102,245 | -       | -102,5  | -      | -     | -       | -     | -     |              |
| $(x/l)_2$             | 0,48     | 0,465    | 0,460   | 0,445   | 0,355  | -     | -       | -     | -     | центр-центр  |
| $(x/l)_3$             | 0,995    | 0,995    | 0,990   | 0,990   | 0,980  | 0,955 | 0,940   | 0,900 | 0,840 |              |
| $\Delta D_{32}$ , мкм | -357,18  | -228,85  | -187,67 | -156,24 | -87,98 | -     | -       | -     | -     |              |
| $\Delta D_{30}$ , мкм | -101,39  | -101,44  | -101,50 | -101,55 | -      | -     | -102,67 | -     | -     |              |
| $l/D$                 | 25       | 22,2     | 21,05   | 20      | 16,6   | 13,3  | 12,5    | 10    | 5     |              |

Погрешность обработки по диаметру вала равна удвоенной разности упругих перемещений оси заготовки между перемещениями в рассматриваемой точке и начальной при  $x = 0$ .

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

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

Погрешность обработки на участках равна:

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_{21} &= \Delta D_{20} - \Delta D_{10} = 2 \cdot (Y_2 - Y_1), \\ \Delta D_{32} &= \Delta D_{30} - \Delta D_{20} = 2 \cdot (Y_3 - Y_2), \\ \Delta D_{43} &= \Delta D_{01} - \Delta D_{30} = 2 \cdot (Y_{01} - Y_3). \end{aligned} \right\}$$

В таблиці представлені величини погрешностей, що виникають при обробці заготовок різних діаметрів, закріплених в патроні і в центрі, в порівнянні з обробкою їх при установках в центрах.

В загальному випадку при збільшенні діаметра заготовки вала  $D \leq D_1$ ,

где 
$$D \leq \left[ \frac{7 \cdot l^3}{2400 \cdot (27 \cdot \omega_{зб} - 11 \cdot \omega_{нб})} \right]^{0,25},$$

заготовку необхідно кріпити в патроні з піджимом заднім центром, що забезпечує меншу в 2–3 рази погрешність обробки, ніж при установці вала в центрах.

При збільшенні діаметра заготовки вала  $D \geq D_2$ ,

где 
$$D \geq \left[ \frac{l^3}{1200 \cdot (3 \cdot \omega_{зб} - \omega_{нб})} \right]^{0,25},$$

заготовку рекомендується кріпити в центрах, і в залежності від жорсткості опор можемо отримати зменшення до 30 % і більше погрешності обробки (рис. 2). В першу чергу це стосується до ступінчатим валам з розташуванням оброблюваної поверхні не на всій довжині заготовки.

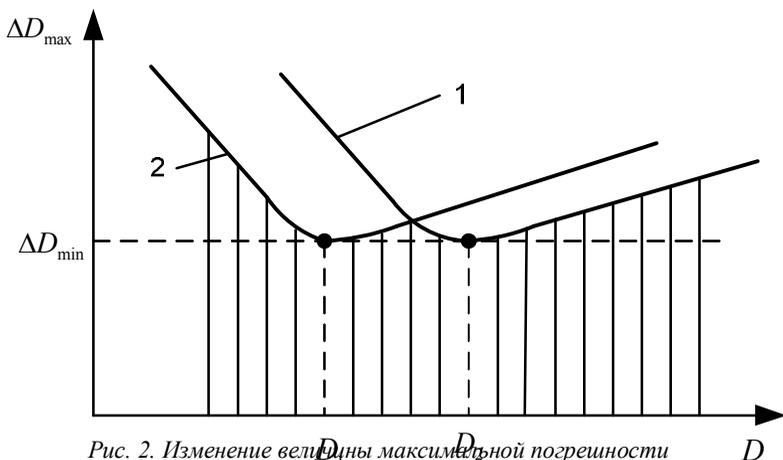


Рис. 2. *Изменение величины максимальной погрешности обработки  $\Delta D_{max}$  в зависимости от диаметра обрабатываемой заготовки вала  $D$  при ее креплении*

в центрах (1) и в патроне и центре (2) (заштрихованная часть графика – область получения наименьшей погрешности обработки)

Для диаметров заготовок валов, величины которых находятся между предельными значениями  $D_1$  и  $D_2$  ( $D_1 \leq D \leq D_2$ ), для получения меньшей величины погрешности обработки, вариант крепления заготовки выбирают в зависимости от расположения ее диаметра относительно экстремальных значений  $D_1$  или  $D_2$ . Так, при  $l = 1000$  мм,  $\omega_{\text{зб}} = 0,3$  мкм/Н,  $\omega_{\text{пб}} = 0,06$  мкм/Н имеем:  $D_1 = 44,5$  мм и  $D_2 = 56,1$  мм. Для остальных значений  $\omega_{\text{зб}}$  величины  $D_1$  и  $D_2$  представлены на рис. 3.

Уменьшение величины погрешности для диаметра вала  $D < D_1$  при его креплении в патроне и центре, по сравнению с установкой в центрах, объясняется тем, что в этом случае имеем уменьшение на 37,5 % сил, действующих на наиболее податливую заднюю опору вала, и увеличение на 37,5 % сил, действующих на наиболее жесткую переднюю его опору, что уменьшает общий прогиб опор и уменьшение на 43 % величины прогиба заготовки. При обработке диаметра вала  $D > D_2$  в центрах имеем больший его прогиб, чем при обработке в патроне и центре, что уменьшает разность прогиба  $V_3$  в лимитирующем сечении и начальным  $V_0$ , а также и максимальную погрешность  $\Delta D_{30}$ .

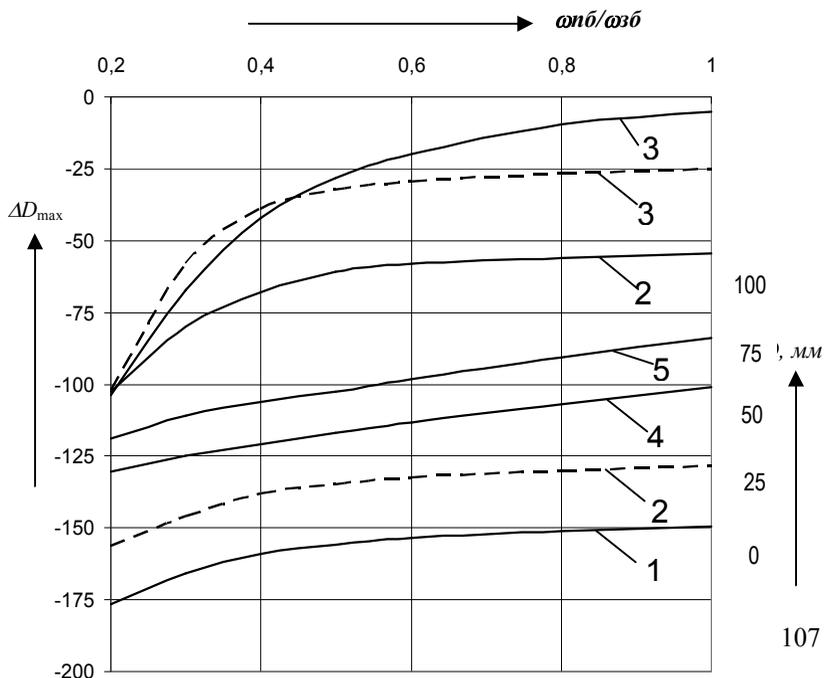


Рис. 3. Изменения максимальной погрешности  $\Delta D_{\max}$  (1, 2, 3) и величины диаметров  $D_1$  (4) и  $D_2$  (5) в зависимости от отношения  $\omega\tau_b/\omega\tau_c$  для диаметров валов  $1 - D = 40$  мм;  $2 - D = 50$  мм;  $3 - D = 70$  мм; крепление заготовки:   
 — в центрах; — — — в патроне;   
 $P_y = 211$  Н,  $\omega\tau_b = 0,06$  мкм/Н

Неодинаковая жесткость передней и задней опор вала приводит к существенному изменению формы обработанной поверхности по длине от выпуклой (бочкообразной) до корсетной и к увеличению максимальной величины погрешности обработки (рис. 3).

Для нежестких заготовок валов ( $l/D > 15$ ) крепление в патроне и центре обеспечивает уменьшение в 2...3 раза погрешности, чем при обработке в центрах. При этом темп роста максимальной величины погрешности обработки заметно снижается при  $\omega\tau_b/\omega\tau_c > 0,5$  (рис. 3).

Величины упругих перемещения элементов ТС прямо пропорциональны радиальной составляющей  $P_y$  силы резания [3], когда

$$P_y = 2430 \cdot t^{0,9} \cdot S_{0,6} \cdot V^{-0,3} \cdot (1 + \Delta t)^{0,9} \cdot K_p [H],$$

где  $\Delta t = \pm \varepsilon_y \cdot \left(\frac{x}{l}\right)$ ,  $\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_\delta^2 + \varepsilon_s^2}$ ;

$K_p$  – коэффициент, учитывающий геометрию призматического резца и условия обработки;  $K_p = 1$  ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = \alpha_3 = \gamma_3 = 10^\circ$ ;  $\lambda = 0$ );  $\Delta t$  – величина припуска при обработке;  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_\delta$ ,  $\varepsilon_s$  – погрешность соответственно установки, базирования и закрепления;  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $V$  – скорость резания, м/мин.

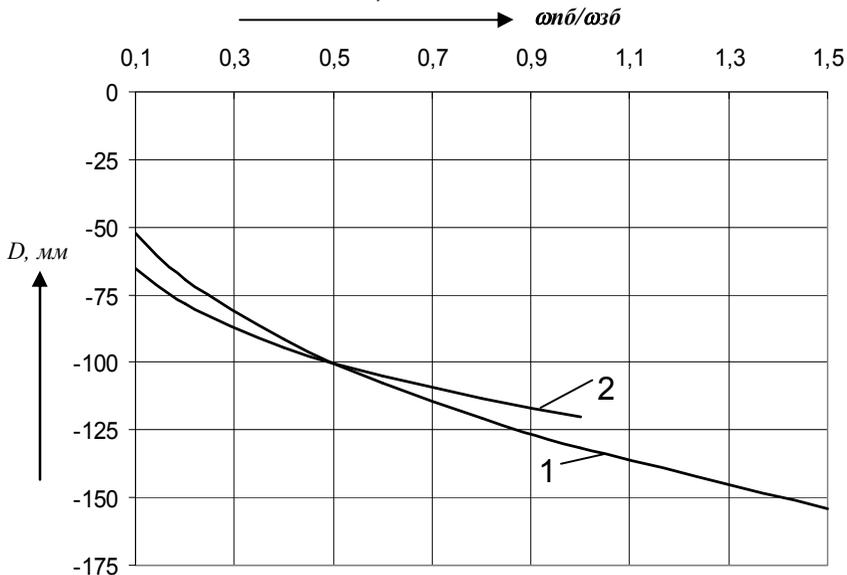
Глубина резания в большей степени влияет на силу  $P_y$  и погрешность обработки, чем подача, при  $S \leq t^{1,5}$ . При  $S > t^{1,5}$  влияние глубины резания и подачи на силу резания и погрешность обработки меняются местами (рис. 4).

При назначении режимов обработки это необходимо учитывать, чтобы получить оптимальную величину силы  $P_y$ .

При креплении заготовки в патроне и центре возникает погрешность установки  $\varepsilon_y$ , которая увеличивает общую погрешность из-за изменения силы резания.

Так, при точении на режимах:  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,5$  мм;  $V = 200$  м/мин;  $\varepsilon_y = 0,12$  мм, когда  $\omega\tau_b = 0,353/P_y^{0,32}$  мкм/Н;  $\omega\tau_c = 5,02/P_y^{0,52}$  мкм/Н;  $D = 100$  мм для лимитирующего сечения  $(x/l)_3 = 0,77$

имеем  $P_y^{\max} = 212,7$  Н;  $P_y^{\min} = 137$  Н;  $\Delta D_{30}^{\max} = 101,41$  мкм;  $\Delta D_{30}^{\min} = 95,042$  мкм;  $\Delta D_{30} = 98,076$  мкм ( $\Delta t = 0$ ). Таким образом, увеличение припуска на 24 % приводит к увеличению погрешности на 3,4 %, что может не превышать допуска на изготовление детали. Увеличение радиальной составляющей силы резания может привести к упругим перемещениям суппорта, и погрешность значительно возрастает. Поэтому перед началом работы необходимо шлифовать или расточить кулачки патрона в размер, равный диаметру базирующей поверхности заготовки вала, что уменьшит величину  $\varepsilon_y$ .



от глубины резания  $t$  (1) и подачи  $S$  (2) при обработке заготовки вала призматическим резцом:  $t = 0,5$  мм;  $S = 0,5$  мм/об;  $V = 200$  м/мин;  $\omega_b = 0,353/P_y^{0,32}$ ;  $\omega_{zb} = 5,02/P_y^{0,52}$ ;  $D = 100$  мм;  $l = 1000$  мм

Следовательно, можно утверждать, что предложенная методика позволяет, в первом приближении, имея упруго-динамическую характеристику элементов ТС, на стадии проектирования технологического процесса выбрать вариант крепления заготовки и оптимальные режимы обработки, обеспечивающие минимальные величины погрешности формообразования.

**Выводы.** По результатам исследования разработана компьютерная программа, которая позволяет разработчику выбрать оптимальный вариант технологического процесса обработки заготовок валов.

**ЛИТЕРАТУРА:**

1. *Маталин А.А.* Технология машиностроения. – Л.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. *Шатуров Г.Ф., Мрочек Ж.А.* Прогрессивные процессы механической обработки. – Мн.: УП "Технопринт", 2001. – 460 с.
3. Справочник технолога-машиностроителя. Т.1 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение, 1985. – 655 с.
4. *Мрочек Ж.А., Шатуров Г.Ф., Ясюкович Э.И., Шатуров Д.Г.* Исследование точности при обработке валов в центрах на токарных станках // Известия БНТУ, 2006. – № 3. – С. 6.

**МРОЧЕК Ж.А.** – доктор технических наук, профессор Белорусского национального технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- процессы механической обработки в машиностроении.

**ШАТУРОВ Г.Ф.** – доктор технических наук, старший научный сотрудник Белорусского национального технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- процессы механической обработки в машиностроении.

**ЯСЮКЕВИЧ Э.И.** – инженер Белорусского национального технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- процессы механической обработки в машиностроении.

**ШАТУРОВ Д.Г.** – аспирант Белорусского национального технического университета.

Научные интересы:

- технология машиностроения;
- процессы механической обработки в машиностроении.

Подано 17.02.2006