

---

---

DOI: 10.53078/20778481\_2021\_4\_96

УДК 621.9

*Д. Г. Шатуров*

## УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ

---

---

*D. G. Shaturov*

## ACCURACY CONTROL IN THE MACHINING OF SHAFTS ON CNC LATHES

### Аннотация

В работе показаны пути повышения точности при обработке валов на токарных станках с числовым программным управлением (ЧПУ), которые базируются на учёте упругой деформации элементов технологической системы резания (ТСР) и размерного износа лезвия резца при обработке на оптимальной скорости резания, обеспечивающей максимальный ресурс работы инструмента и повышение производительности.

### Ключевые слова:

резец, стойкость, точность обработки, скорость резания, ресурс работы.

### Для цитирования:

Шатуров, Д. Г. Управление точностью при обработке валов на токарных станках с ЧПУ / Д. Г. Шатуров // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2021. – № 4 (73). – С. 96–103.

### Abstract

The paper shows the ways to improve the accuracy in the machining of shafts on CNC lathes, which take into account the elastic deformation of elements of the technological cutting system (TCS) and the dimensional wear of a cutter blade when machining at the optimal cutting speed, which ensures the maximum tool life and the increase in productivity.

### Keywords:

cutter, durability, machining accuracy, cutting speed, service life.

### For citation:

Shaturov, D. G. Accuracy control in the machining of shafts on CNC lathes / D. G. Shaturov // The Belarusian-Russian university herald. – 2021. – № 4 (73). – P. 96–103.

---

Точность изделий машиностроения является важнейшей характеристикой их качества. В производственных условиях отклонения размеров деталей зависят от многих причин, приводящих к невозможности получения одинаковых по размерам и форме деталей в пределах партии, состоящей из нескольких штук. Так, обработка заготовок валов на токарных станках осуществляется в технологической системе резания (ТСР), состоящей из ряда эле-

ментов (шпинделя станка, заготовки, базовых опор), которая в процессе обработки представляет собой замкнутую упругодинамическую систему, деформирующуюся под действием силы резания, что и обуславливает возникновение погрешностей формирования [1, 2].

Пространственная линия упругих перемещений оси заготовки от действия силы резания имеет в общем случае три асимметрично расположенные экстремальные точки минимальных и макси-

мальных прогибов [2]. Наличие трёх экстремальных точек на линии упругих перемещений оси вала в процессе резания обеспечивает характерные погрешности обработки.

Кроме того, в процессе обработки заготовок размеры изготавливаемого вала непрерывно меняются вследствие радиального износа лезвия резца и увеличивающейся силы резания, которые оказывают значительное влияние на формирование систематической погрешности, особенно при обработке длиномерных валов. Из поверхностей призматического резца, образующих лезвие, преимущественно изнашивается его задняя поверхность, имеющая по сравнению с передней поверхностью большую в 2–3 раза скорость взаимного перемещения инструмента и заготовки [3].

Кривые износа призматического резца от времени резания могут иметь

выпуклую или вогнутую относительно оси абсцисс форму [2]. Это зависит от скорости резания, влияющей на температуру в зоне резания, характер изнашивания инструмента и на период его стойкости. При точении в широком диапазоне изменения скорости резания зависимость периода стойкости от скорости резания представляет собой плавную кривую с двумя экстремальными значениями периода стойкости [4]. Первый экстремум расположен в зоне скоростей наростообразования и обусловлен абразивно-адгезионным видом износа поверхностей лезвия резца. Второй имеет место в зоне повышенных скоростей резания при абразивно-окислительном виде износа поверхностей лезвия инструмента. Периоды стойкости с экстремальными значениями разделены между собой впадиной, имеющей минимальный период стойкости инструмента при скорости резания  $V_M$  (рис. 1).

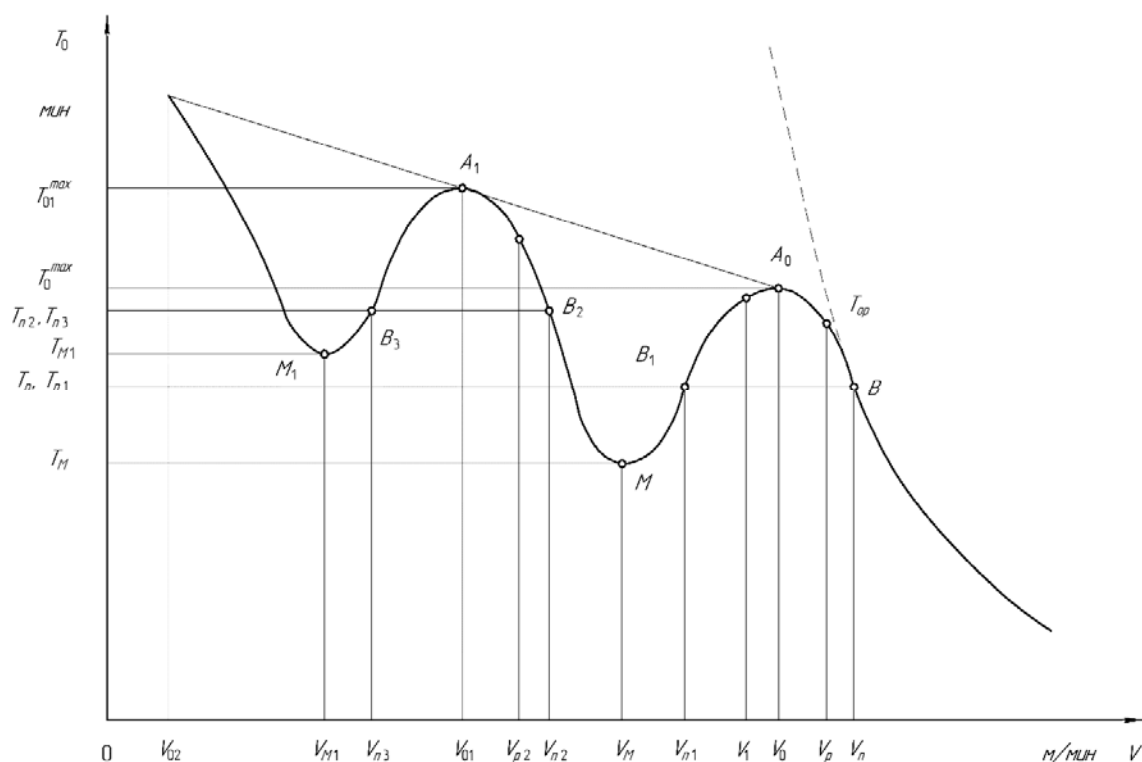


Рис. 1. Зависимость периода стойкости лезвийного инструмента от скорости резания

С точки зрения увеличения производительности рассмотрим диапазон скоростей резания второго экстремума при  $V > V_M$  и влияние на точность обработки отдельно и в совокупности всех причин: упругих перемещений элементов ТСР, характера и вида износа инструмента, скорости резания на период его работоспособности. Это и определило актуальность и цель исследований, которые заключаются в разработке методики выбора оптимальных режимов резания с учётом имеющихся условий обработки и радиального перемещения резца, обеспечивающих необходимую точность и производительность.

Период стойкости в зоне скоростей резания второго экстремума определяется из следующих зависимостей [5]:

$$T_0 = \frac{T_n \cdot \sqrt{e}}{e^{\frac{1}{2} \left( 5 \frac{V}{V_n} - 4 \right)}} \text{ при } M \leq V \leq V_n; \quad (1)$$

$$T_0 = T_n \cdot \left( \frac{V_n}{V} \right)^m = T_n \left( \frac{V_n}{V} \right)^5 \text{ при } V \geq V_n, \quad (2)$$

где

$$V_n = \left( \frac{C_v \cdot K_v}{t^x \cdot S^y} \right)^{1,25} \left( \frac{U_0}{1000 \cdot \delta_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_3} \right)^{0,25}; \quad (3)$$

$$T_n = \frac{1000 \cdot \delta_0}{V_n \cdot U_0} \operatorname{tg} \alpha_3, \quad (4)$$

где  $T_0$ ,  $T_n$  – текущий период стойкости резца и период стойкости резца при скорости резания  $V_n$  соответственно, мин;  $V_n$  – скорость резания в точке перегиба кривой  $T_0 = f(V)$ , м/мин;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $C_v, K_v, x, y$  – коэффициенты и показатели степени, определяемые из [6] (при обработке стали  $C_v = 350$ ;  $x = 0,15$ ;  $y = 0,35$ ;  $K_v = 0,9$ ;  $m = 0,2$ );  $t$  – глубина резания, мм;  $S$  – подача, мм/об;  $\alpha_3$  – задний

угол заточки резца, град;  $\delta_0$  – оптимальная (допустимая) величина износа задней поверхности резца, мкм;  $U_0$  – относительный размерный износ лезвия резца,  $U_0 = 5 \dots 7$  мкм/км при обработке стали резцом из твёрдого сплава Т15К6 [6];  $m$  – показатель относительной стойкости.

Из всего диапазона скоростей резания второго экстремума необходимо выбрать ту скорость резания, которая обеспечит максимальный ресурс работы инструмента. Под максимальным ресурсом работы инструмента понимается максимальная длина пути резания за период его стойкости, подсчитываемая по зависимости [5]

$$L_p = V_p \cdot T_p, \quad (5)$$

где  $L_p$  – максимальный путь работы инструмента, м;  $V_p$ ,  $T_p$  – скорость резания, м/мин, и период стойкости, мин, при скорости резания  $V_p$ , обеспечивающие максимальный ресурс работы инструмента [5],

$$V_p = 0,847V_n; \quad (6)$$

$$T_p = 1,603T_n. \quad (7)$$

При скорости резания  $V_p$  имеем наибольший путь резания и наибольшую точность обработки, наименьший расход инструмента, наименьшее число переналадок резца, что увеличивает производительность.

После выбора оптимальной скорости резания обратимся к определению тех погрешностей, которые возникают при обработке валов в связи с упругими деформациями элементов ТСР и износом инструмента.

Пространственная линия упругих перемещений оси заготовки от действия силы резания имеет в общем случае (при  $l/d > 10$ ) три асимметрично расположенные экстремальные точки ми-

нимальных и максимальных прогибов [2]. Крепление вала может осуществляться в центрах, в патроне и центре и в двух патронах. Для исключения погрешности базирования и закрепления принято, что заготовка вала установлена в центрах как в наименее жёстком варианте крепления вала в ТСР.

Определение погрешностей обработки при точении заготовки вала, установленной в центрах, осуществлялось как деформация балки от радиальной силы  $P_y$ , лежащей на двух упругодеформируемых опорах. Тогда диаметрально погрешность обрабатываемой детали, обусловленная упругим перемещением оси вала и износом инструмента, определится как (рис. 2) [7]

$$\Delta D = 2(Y_0 - Y_x - \Delta\delta_{PN} - \Delta Y_x) = \min, \quad (8)$$

где

$$Y_0 = P_y \cdot \omega_{зб}; \quad (9)$$

$$Y_{01} = P_y \cdot \omega_{пб}; \quad (10)$$

$$Y_x = Y_C + Y_\delta; \quad (11)$$

$$Y_C = P_y \cdot \omega_C; \quad (12)$$

$$Y_\delta = P_y \cdot \omega_\delta; \quad (13)$$

$$\omega_C = \omega_{зб} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + \omega_{пб} \left(\frac{x}{l}\right)^2; \quad (14)$$

$$\omega_\delta = \frac{l^3 \cdot 10^4}{3EJ} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2; \quad (15)$$

$$\Delta Y_0 = Y_0 - Y_x; \quad (16)$$

$$\delta_{PN} = \delta_0 \left(\frac{\tau_0}{T_p}\right)^{n_0} \times$$

$$\times \left[ \left(\frac{x}{l} + N_{zi} - 1\right)^{n_0} - (N_{zi} - 1)^{n_0} \right] \text{tg}\alpha_3; \quad (17)$$

$$n_0 = \left[ \frac{V_p \cdot T_p \cdot U_0}{1000\delta_0 \cdot \text{tg}\alpha_3} \right]^{0,6}; \quad (18)$$

$$n = \frac{1000V_p}{\pi d}; \quad (19)$$

$$\tau_0 = \frac{l}{Sn}; \quad (20)$$

$$P_y = C_p \cdot t_x \cdot S_y \cdot V^{-n_0}; \quad (21)$$

$$C_p = 2430; \quad x = 0,9;$$

$$y = 0,6; \quad n_0 = -0,3;$$

$$\Delta Y_x = \Delta Y_0 - \Delta\delta_{PN} =$$

$$= Y_0 - Y_x - \Delta\delta_{PN} \text{ при } \Delta D = 0; \quad (22)$$

$$N_3 = \frac{T_{0p}}{\tau_0}, \quad (23)$$

где  $\Delta D$  – систематическая погрешность обработки, обусловленная наличием упругой деформации элементов ТСР, износом инструмента и радиальным перемещением резца, мкм;  $\Delta Y_x$  – величина радиального перемещения резца, мкм;  $Y_0, Y_x, Y_{01}$  – радиальное упругое перемещение оси вала от действия радиальной силы  $P_y$  в процессе обработки при  $x = 0$ , по ходу процесса при  $0 < x < l$  и при окончании обработки при  $x = l$  соответственно, мкм;  $P_y$  – радиальная сила резания, Н [6];  $\omega_C$  – податливость ТСР, мкм/м;  $\omega_{зб}, \omega_{пб}$  – податливость задней и передней бабок станка (опор вала) соответственно, мкм/Н;  $l$  – длина вала, см;  $x/l$  – расположение резца от начала обработки (от правого торца вала), см;  $V$  – скорость резания, м/мин;  $\tau, \tau_0, T_0$  – текущее время, время обработки одной заготовки и период стойкости резца соответственно, мкм;  $E$  – модуль упругости, для углеродистой стали

$E = 2 \cdot 10^7 \text{ Н/см}^2$ ;  $J$  – момент инерции сечения вала,  $J = 0,05 \cdot d^4$ ,  $\text{см}^4$ ;  $d$  – диаметр вала,  $\text{см}$ ;  $n_0$  – показатель степени;  $n$  – частота вращения заготовки,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $N_{zi}$  – порядковый номер обрабатываемой заготовки от начала обработки пар-

тии из  $N_3$ ;  $\Delta\delta_{PN}$  – разница в величине размерного износа резца  $\delta_{PN}$  текущего его хода по сравнению с предыдущим,  $\text{мкм}$ ;  $N_3$  – расчётное количество заготовок в партии (целое число).

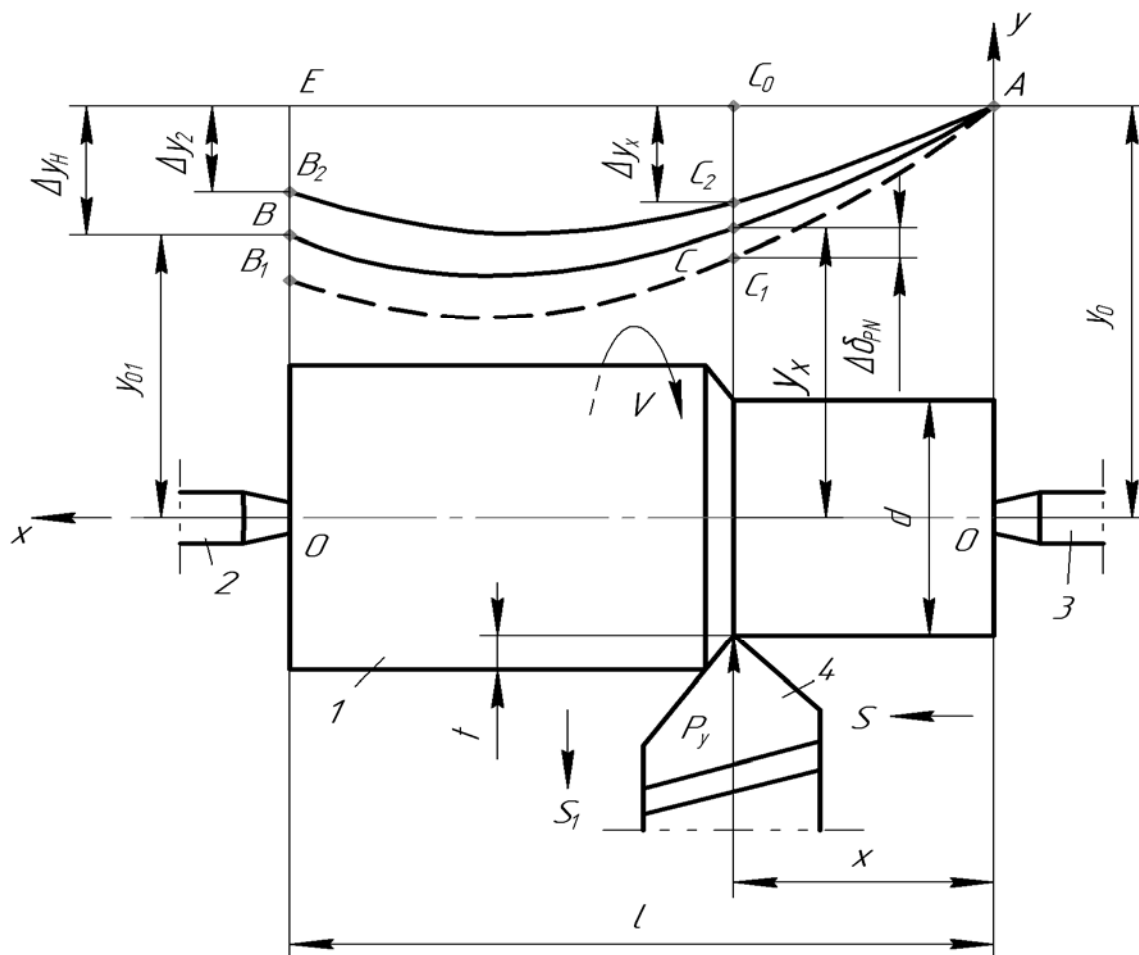


Рис. 2. Схема обработки вала в центрах: 1 – заготовка; 2 – передний центр; 3 – задний центр; 4 – резец

Обработку заготовки вала на токарном станке с ЧПУ осуществляют следующим образом (см. рис. 2) [7]. В начале обработки первой заготовки 1, установленной в переднем 2, наиболее жёстком, и заднем 3, менее жёстком, центрах токарного станка настройку резца на размер диаметра  $d$  получаемого вала при вращающейся заготовке производят методом пробных ходов и промеров на небольшом участке обрабаты-

ваемой поверхности путём снятия стружки [1]. В результате настройки резца на определённый размер диаметра  $d$  получаемого вала ось заготовки имеет упругое перемещение от геометрической линии центров токарного станка в начале обрабатываемой поверхности, равное  $Y_0$  (см. формулу (9)). После настройки резца 4 на необходимый размер  $d$  вала производят обработку с продольной подачей  $S$  при враща-

ющейся заготовке со скоростью  $V_p$ , определенной по формуле (6), от заднего центра 3 к переднему 2 (см. рис. 2). Поскольку передняя опора 2 более жёсткая, чем задняя 3, то при обработке в результате перемещения резца к передней опоре имеем меньшее суммарное упругое перемещение оси заготовки относительно линии 0-0 центров станка. Ось заготовки перемещается в направлении к резцу. Траектория этого перемещения представлена линией  $ACB$  (см. рис. 2), которая удалена от линии центров станка в начале обработки на величину  $Y_0$  (см. формулу (9)), в конце обработки поверхности на величину  $Y_{01}$ , определенную по формуле (10), меньше  $Y_0$ , а в любом другом месте расположения резца – на величину  $Y_x$ . В то же время при обработке имеет место радиальный (размерный) износ лезвия резца  $\delta_p$ , который увеличивает расстояние между формообразующей поверхностью точкой  $A_0$  – вершиной резца до линии центров станка. Величина текущего радиального износа лезвия резца представлена расстоянием между линиями  $ACB$  и линией  $AC_1B_1$ . При обработке первой заготовки величина текущего радиального износа  $\delta_{p1}$  увеличивает погрешность обработки и определяется следующим образом:

$$\delta_{p1} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \left( \frac{x}{nS} \right)^{n_0} \operatorname{tg} \alpha_3 =$$

$$\delta_0 \left( \frac{\tau_0}{T_0} \right)^{n_0} \left( \frac{x}{l} \right)^{n_0} \operatorname{tg} \alpha_3. \quad (24)$$

При обработке второй и последующих заготовок вала величина приращения текущего радиального износа  $\Delta \delta_{PN}$  определяется по формуле (17).

Для получения нулевой погрешности обработки необходимо осуществить непрерывное или пошаговое радиальное перемещение резца от линии центров

станка на величину  $\Delta Y_x = C_0 C_2$  (см. формулу (22)), равную разнице между начальным  $Y_0$ , определенным по формуле (9), и текущим  $Y_x$ , рассчитанным по формуле (11), упругим перемещением оси вала ( $Y_0 - Y_x = C_0 C$  (см. рис. 2)) и величиной текущего радиального износа резца  $\Delta \delta_{PN} = C C_1 = C C_2$ , т. е.

$$\Delta Y_x = C_0 C_2 = Y_0 - Y_x - \Delta \delta_{PN}.$$

В этом случае траектория перемещения вершины резца будет совпадать с линией  $ACB$ , что обеспечит одинаковое расстояние между вершиной резца, точкой  $A_0$  и осью вала, которое будет равно половине диаметра получаемого вала  $0,5d$  обрабатываемой поверхности, что обеспечит нулевую погрешность обработки. При обработке второй и последующих заготовок резец из точки  $B$  перемещают в продольном направлении к заднему центру токарного станка и устанавливают в исходное относительно правого торца вала положение, точка  $H$  (см. рис. 2). Перед обработкой поверхности следующей заготовки резец перемещают в радиальном направлении к геометрической линии центров станка на величину, равную разнице упругих перемещений опор вала,  $\Delta Y_H = HA = Y_0 - Y_{01} = P_y (\omega_{зб} - \omega_{нб})$ , в точку  $A$ .

На основании полученных зависимостей можно осуществить управление точностью при обработке валов на токарных станках с ЧПУ за счёт управления радиальным перемещением резца [7].

Методика расчётов состоит в следующем. Вначале рассчитывается необходимый припуск, т. е. глубина резания  $t$ . Исходя из получения заданной величины шероховатости назначается подача  $S$ . Далее производится расчёт скорости резания  $V_p$  наибольшего ресурса работы инструмента и непрерывного или пошагового радиального перемещения резца по алгоритму

$$\begin{aligned}
 &t \rightarrow S \rightarrow V_n(3) \rightarrow T_n(4) \rightarrow V_p(6) \rightarrow \\
 &\rightarrow T_p(7) \rightarrow P_y(21) \rightarrow Y_0(9) \rightarrow Y_x(11) \rightarrow \\
 &\rightarrow Y_{01}(10) \rightarrow n_0(18) \rightarrow n(19) \rightarrow \tau_0(20) \rightarrow \\
 &\rightarrow N_s(23) \rightarrow \Delta\delta_{PN}(17) \rightarrow \\
 &\rightarrow \Delta Y_x(22) \rightarrow \Delta D(8). \quad (25)
 \end{aligned}$$

Пример обработки. Производится обработка вала (сталь 45) диаметром  $d = 100$  мм, длиной  $L = 1000$  мм призматическим резцом Т15К6; задний угол заточки резца  $\alpha_z = 10$ .

Режимы обработки: глубина резания  $t = 1,0$  мм; подача  $S = 0,25$  мм/об; величина оптимального (допустимого) износа задней поверхности резца  $\delta_0 = 500$  мкм; величина относительного размерного износа  $U_0 = 5$  мкм/км [6]; податливость опор  $\omega_{зб} = 0,3$  мкм/Н;

$$\omega_{пб} = 0,6 \text{ мкм/Н.}$$

Расчёт режимов резания и величину радиального перемещения резца производим по алгоритму (25). Определяем скорость резания  $V_n$  ( $C_v = 350$ ;  $K_v = 0,9$ ;  $x = 0,15$ ;  $y = 0,35$ );  $V_n = 211$  м/мин; период стойкости  $T_n = 83$  мин. Остальные параметры обработки:  $V_p = 178$  м/мин;  $T_p = 133$  мин;  $P_y = 224$  Н;  $n = 566 \text{ мин}^{-1}$ ;  $n_0 = 1,64 \text{ мин}^{-1}$ ;  $\tau_0 = 7,1$  мин.

Остальные расчёты сведены в табл. 1. Отметим, что максимальная погрешность обработки имеет место при расположении резца при обработке жёстких валов  $l/d < 10$  на расстоянии от начала обработки, равном  $x/l = (x/l)_0$  [2].

$$(x/l)_0 = \frac{\omega_{зб}}{\omega_{зб} + \omega_{пб}}.$$

Табл. 1. Величина упругих перемещений элементов ТСР, износа лезвия и радиального перемещения резца для получения минимальной погрешности обработки

Исследованные параметры процесса, мкм	Место положения резца от начала обработки $X$ , см, и отношение $(x/l)_0$					Число $N_{zi}$ проходов
	0	25	50	83	100	
$Y_c$	67,2	38,64	20,16	11,2	13,44	1,0
$Y_0$	0	2,625	4,67	1,486	0	
$Y_x$	67,2	41,265	24,83	12,69	13,44	
$\Delta Y_0$	0	25,93	42,37	54,51	53,76	
$\delta_{PN}$	0	0,074	0,237	0,531	0,7216	1
	0	0,733	1,49	2,54	3,1	5
	0	1,22	2,46	4,125	5,0	10
	0	1,61	3,24	5,418	6,55	15
	0	1,9	3,8	6,34	7,66	19
$\Delta Y_x$	0	25,86	42,13	53,98	53,04	1
	0	25,197	40,88	51,97	50,66	5
	0	24,71	39,91	50,39	48,76	10
	0	24,32	39,13	49,09	47,21	15
	0	24,03	38,57	48,17	46,1	19

В приведенном примере  $(x/l)_0 = 0,83$ .

Как видно из табл. 1, для уменьшения погрешности обработки величину радиального перемещения резца можно назначить не после обработки очередной заготовки, а после обработки промежуточной партии, меньшей общей партии заготовок. В приведенном примере размер промежуточной партии составляет четыре-пять заготовок. Тогда, например, погрешность в определении величины радиального перемещения резца и точности обработки составляет 7,5 %...3,8 %.

$$\Delta D = 2 \left( 1 - \frac{51,97}{53,98} \right) \cdot 100 = 7,44;$$

$$\Delta D = 2 \left( 1 - \frac{48,17}{49,09} \right) \cdot 100 = 3,75.$$

### Заключение

Приведена методика по управлению точностью обработки за счёт непрерывного или пошагового радиального перемещения резца, включающая назначение оптимальной скорости резания, обеспечивающей максимальный ресурс работы инструмента, учёт упругих деформаций элементов ТСР и размерного износа резца, обеспечивающих в совокупности минимальную погрешность обработки и повышенную производительность.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Маталин, А. А. Технология машиностроения / А. А. Маталин. – Москва: Машиностроение, 1985. – 496 с.
2. Шатуров, Д. Г. Технологические особенности чистовой токарной обработки валов: монография / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т. – 2015. – 192 с.
3. Бобров, В. Ф. Основы теории резания металлов / В. Ф. Бобров. – Москва: Машиностроение, 1979. – 344 с.
4. Шелег, В. К. Анализ и выбор рациональных режимов резания твердосплавным инструментом при точении валов / В. К. Шелег, Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 14–20.
5. Шатуров, Д. Г. Ресурс работы лезвийного инструмента при обработке / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 4. – С. 90–98.
6. Справочник технолога машиностроителя: в 2 т. / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – Москва: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.
7. Способ обработки  $N_z$  заготовки валов на токарном станке с числовым программным управлением: пат. ВУ 22237 / Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов, М. В. Панков. – Опубл. 26.07.2018.

Статья сдана в редакцию 25 октября 2021 года

Денис Геннадьевич Шатуров, канд. техн. наук, доц., Белорусско-Российский университет.

Denis Gennadyevich Shaturov, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian-Russian University.