

УДК 621.97

*Д. Г. Шатуров, Г. Ф. Шатуров, А. А. Жолобов*

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕТОДА НАСТРОЙКИ РЕЗЦА

UDC 621.97

*D. G. Shaturov, G. F. Shaturov, A. A. Zholobov*

## THE INVESTIGATION OF ACCURACY OF SHAFT MACHINING DEPENDING ON THE METHOD OF CUTTER ADJUSTMENT

### Аннотация

Представлена методика расчета погрешностей для двух методов настройки призматического резца на размер при точении валов (для метода пробных проходов и промеров и метода автоматического получения размеров на настроенном станке), учитывающая размерный износ лезвия инструмента и деформацию элементов технологической системы. Приведены зависимости и режимы обработки, позволяющие осуществить управление процессом для обеспечения заданной точности обработки.

### Ключевые слова:

обработка, резец, точность, погрешность, деформация, технологическая система.

### Abstract

The paper gives the techniques of calculating errors for two methods of adjusting a prismatic cutter according to the size when turning shafts, the former being the method of test cuts and measurements and the latter being the method of receiving measurements automatically on an adjusted machine. The techniques take into account the dimensional wear of a cutting tool edge and the deformation of elements of the technological system. Dependences and machining conditions are presented, which control the process to secure a preset accuracy of machining.

### Key words:

treatment, cutter, accuracy, error, deformation, technological system.

При обработке поверхностей призматическим резцом систематическая погрешность формы обработанной заготовки складывается из двух величин: погрешности, обусловленной изменением жёсткости элементов технологической системы резания (ТСР) в процессе перемещения резца вдоль оси обрабатываемой заготовки, и переменной погрешности, обусловленной размерным износом лезвия резца [1]. Резец перемещается вдоль оси заготовки от задней опоры к передней, происходит сближение этой оси с резцом и уменьшается диаметр обрабатываемой поверхности вследствие изменения упру-

гой деформации элементов ТСР от максимального значения в начале обработки до минимального, соответствующего положению резца в лимитирующем сечении вала, расположенном от правого торца заготовки на расстоянии  $x_0$  [2]. Поверхность в результате этой погрешности имеет седлообразную форму с наибольшим диаметром в начале обработки. Одновременно при перемещении резца вдоль оси заготовки происходит увеличение расстояния от формообразующей поверхности точки лезвия – вершины резца до оси заготовки – вследствие радиального износа лезвия. Из-за образования второй погрешности

обработанная поверхность имеет форму прямого конуса с наибольшим диаметром в конце обработки.

Первую и вторую погрешность можно определить на основании результатов исследований, представленных в [1, 3].

Разработана методика нахождения погрешности при получистовой обработке с учетом интенсивности износа лезвия резца в период приработки и в период установившегося его износа, позволяющая определить оптимальные режимы резания, а также необходимость и количество поднастроек резца на размер в зависимости от жесткости элементов ТСР.

После получистовой обработки призматическим резцом диаметральный погрешность поверхности вдоль оси заготовки переменна и определяется по зависимости, левая часть которой (в квадратных скобках) представляет собой погрешность, связанную с жесткостью элементов ТСР, а правая часть – погрешность обработки, обусловленную износом лезвия:

$$\Delta D = 2 \left\{ P_{y1} \left[ \omega_{z\phi_1} - \left( 1 - \frac{x}{l} \right)^2 \omega_{z\phi_1} - \left( \frac{x}{l} \right)^2 \omega_{n\phi} \right] - \delta_0 \left( \frac{\tau}{T_0} \right)^{n_0} K_p \right\},$$

где  $\omega_{z\phi_1}, \omega_{n\phi_1}$  – податливость задней и передней опоры вала, используемого при получистовой обработке, соответственно, мкм/Н;  $\tau$  – время резания, мин;  $P_{y1}$  – радиальная составляющая силы резания при получистовой обработке, Н;  $K_p$  – коэффициент перевода линейного износа задней поверхности резца в радиальный,  $K_p \approx \operatorname{tg} \alpha_3$  [1];  $\alpha_3$  – задний угол заточки резца;  $\delta_0$  – оптимальный износ задней поверхности резца, мкм;  $T_0$  – период стойкости инструмента, мин;  $l$  – длина обрабаты-

ваемой поверхности вала, мм;  $x$  – расстояние от правого торца заготовки до расположения резца, мм;  $n_0$  – показатель степени.

Влияние составляющих  $P_z$  и  $P_x$  силы резания незначительно [3], и оно не учитывалось.

При точении заготовки вала изменяется глубина резания: по сравнению с номинальной (настроечной) она увеличивается вследствие уменьшения упругой деформации элементов ТСР при перемещении резца от менее жесткой задней к наиболее жесткой передней опоре вала и одновременно уменьшается вследствие размерного износа лезвия резца.

Максимальная погрешность рассчитывается исходя из разницы диаметральных размеров обработанной заготовки в начале обработки и в лимитирующем сечении или в конце обработки, где размерный износ лезвия резца максимален. Расположение лимитирующего сечения вала вдоль оси заготовки от начала обработки  $x_0$  определяется положением резца при наименьшем расстоянии оси заготовки от геометрической линии центров станка или наибольшем ее отстоянии от начального положения в начале обработки [2].

$$\left( \frac{x}{l} \right)_0 = \frac{\omega_{z\phi}}{\omega_{z\phi} + \omega_{n\phi}},$$

где  $\left( \frac{x}{l} \right)_0$  – расположение лимитирующего сечения вала от начала обработки (от правого торца вала).

Настройка резца на размер осуществляется в начале обработки.

Тогда для лимитирующего сечения вала при обработке первой заготовки можно записать (рис. 1)

$$\Delta D_{30\phi}^{пол.} = 2 \left( \Delta_{p1} - \delta_{p1} \right) = 2 \delta_{\phi_1} \leq \delta_1;$$

$$\Delta_{p1} = Y_0 - Y_3;$$

$$\begin{aligned}
 Y_0 &= P_{y1} \cdot \omega_{з\delta_1} = C_{p1} t_1^{0,9} \omega_{з\delta_1}; \\
 Y_3 &= C_{p1} t_1^{0,9} \cdot K_t \cdot \omega_{c1}; \\
 C_{p1} &= 2430 \cdot S_1^{0,6} \cdot V_1^{-0,3}; \\
 K_t &= \left( 1 + \frac{Y_0 - Y_3 - \delta_{p1}}{1000 t_1} \right)^{0,9}; \\
 \omega_{c1} &= \frac{\omega_{з\delta_1} \cdot \omega_{n\delta_1}}{\omega_{з\delta_1} + \omega_{n\delta_1}}; \\
 \Delta_{p1} &= C_{p1} t_1^{0,9} (\omega_{з\delta_1} - K_t \omega_{c1}), \quad (1)
 \end{aligned}$$

где  $\Delta D_{30\phi}^{пол.}$  – диаметральная погрешность при лучистой обработке, мкм;  $\delta_1$  – технологический допуск по-

верхности вала при лучистой обработке, мкм;  $\Delta_{p1}$  – погрешность обработки, обусловленная упругими перемещениями элементов ТСР в лимитирующем сечении вала, мкм;  $Y_0, Y_3$  – упругие перемещения оси заготовки в начальном и лимитирующем сечении вала, мкм;  $t_1$  – глубина резания, мм;  $K_t$  – коэффициент, учитывающий изменение глубины резания обусловленной износом резца и упругой деформацией опор вала;  $V_1$  – скорость резания, м/мин;  $\omega_{c1}$  – податливость технологической системы резания в лимитирующем сечении вала, мкм/Н.

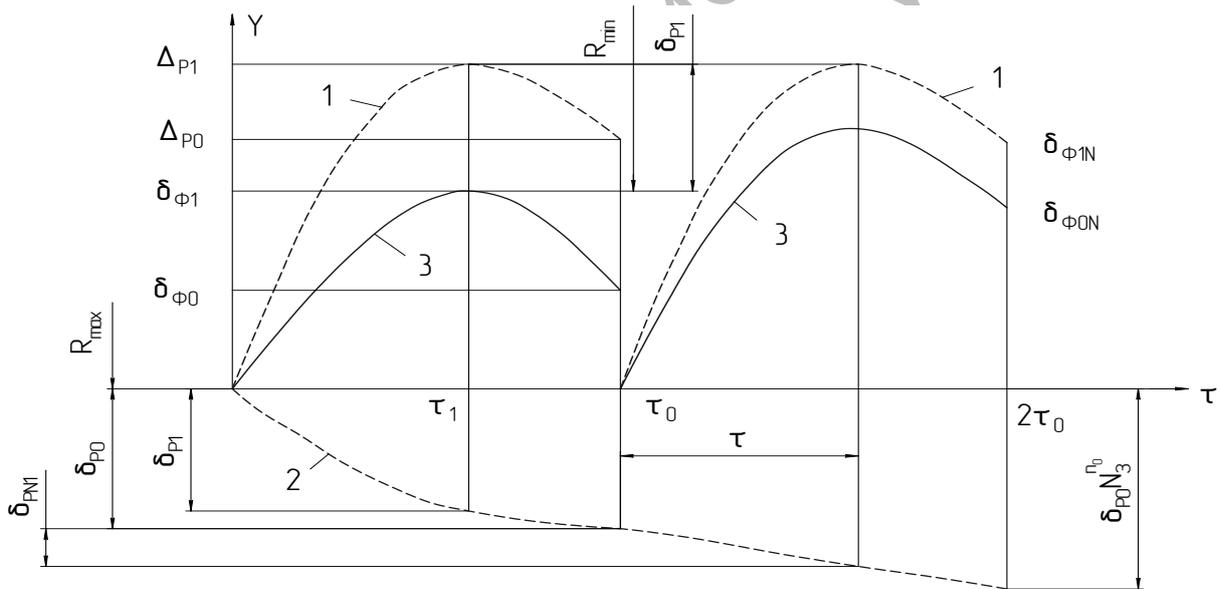


Рис. 1. Схема образования погрешностей обработки при достижении точности методом индивидуальной настройки резца на размер: 1 – упругая деформация заготовки; 2 – кривая размерного износа лезвия резца; 3 – результирующая кривая положения вершины резца относительно оси заготовки;  $R_{min}, R_{max}$  – минимальный и максимальный радиусы обработанной поверхности вала

В первом приближении расчета погрешности можно принять  $K_t = 1,0$ .

Тогда

$$\Delta_{p1} = P_{y1} \Delta\omega = C_{p1} t_1^{0,9} \Delta\omega_1; \quad (2)$$

$$\Delta\omega_1 = \omega_{з\delta_1} - \omega_{c1} = \frac{\omega_{з\delta_1}^2}{\omega_{з\delta_1} + \omega_{n\delta_1}};$$

$$\delta_{p1} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau_1^{n_0} \operatorname{tg} \alpha_3 = \delta_{p0} \left( \frac{\omega_{з\delta_1}}{\omega_{з\delta_1} + \omega_{n\delta_1}} \right)^{n_0}; \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \delta_{p_0} &= \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau_0^{n_0} \operatorname{tg} \alpha_3; \\ \tau_0 &= \frac{l}{S_1 n}; \\ \tau_1 &= \tau_0 \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}}; \\ \delta_{\phi_1} &= \Delta_{p_1} - \delta_{p_1} = \\ &= P_{y_1} \Delta \omega_1 - \delta_{p_0} \left( \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}} \right)^{n_0}, \quad (4) \end{aligned}$$

где  $\delta_{p_0}, \delta_{p_1}$  – размерный износ лезвия призматического резца за время обработки  $\tau = \tau_0$  и  $\tau = \tau_1$  соответственно, мкм;  $\tau_0, T_0$  – время обработки одной заготовки и период стойкости призматического резца, мин;  $S_1$  – подача, мм/об;  $\tau_1$  – время обработки заготовки от начала работы инструмента до расположения лимитирующего сечения, мин;  $n$  – частота вращения заготовки, мин<sup>-1</sup>;  $\delta_{\phi_1}$  – отклонение профиля продольного сечения (формы) при обработке первой заготовки, мкм.

Заданной точности обработки заготовки можно достигнуть двумя методами настройки: методом пробных ходов и промеров, т. е. при индивидуальной настройке резца на размер, и методом автоматического получения размеров на настроенном станке.

При индивидуальной настройке резца на размер диаметральный погрешность формы или отклонение профиля продольного сечения вала в лимитирующем сечении и в конце обработки  $N$ -й заготовки

$$\left. \begin{aligned} \Delta D_{30\phi}^{nol} &= 2\delta_{\phi_1 N}; \\ \Delta D_0^{nol} &= 2\delta_{\phi_0 N}; \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\delta_{\phi_1 N} = P_{y_1} \Delta \omega_1 - \delta_{p_1 N} \leq \delta_1 / 2; \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \delta_{p_1 N} &= \delta_{p_0} [(N_3 - 1 + \\ &+ \frac{\omega_{3\delta_1}}{\omega_{3\delta_1} + \omega_{n\delta_1}})^{n_0} - (N_3 - 1)^{n_0}]; \quad (7) \end{aligned}$$

где  $\Delta D_0^{nol}$  – погрешность обработки  $N$ -й заготовки при  $x = l$ .

$$\delta_{\phi_0 N} = \Delta_{p_0} - \delta_{p_0 N} \leq \delta_1 / 2;$$

$$\Delta_{p_0} = P_{y_1} (\omega_{3\delta} - \omega_{n\delta_1});$$

$$\delta_{p_0 N} = \delta_{p_0} [N_3^{n_0} - (N_3 - 1)^{n_0}],$$

где  $\delta_{\phi_1 N}, \delta_{\phi_0 N}$  – отклонение профиля продольного сечения (формы) в лимитирующем сечении вала и в конце обработки  $N$ -й заготовки, мкм (см. рис. 1);  $N_3$  – количество обработанных заготовок, шт.;  $\delta_{p_1 N}$  – прирост размерного износа лезвия резца за время обработки  $N$ -й заготовки при  $\tau = \tau_1$ , мкм;  $\Delta_{p_0}$  – погрешность обработки, обусловленная упругим отжатием заготовки в конце обработки, мкм;  $\delta_{p_0 N}$  – прирост размерного износа лезвия резца за время обработки  $N$ -й заготовки, мкм.

Используя зависимость (6), можно установить режимы резания, обеспечивающие условие  $\delta_{\phi_1 N} \leq \delta_1 / 2$ .

$$\frac{S_1^{0,6} \cdot t_1^{0,9}}{V_1^{0,3}} \leq \frac{1}{2430 \cdot \Delta \omega_1} \left( \frac{\delta_1}{2} + \delta_{p_1 N} \right)$$

или

$$V_1 \geq \left[ \frac{2430 \cdot S_1^{0,6} \cdot t_1^{0,9} \cdot \Delta \omega_1}{\delta_1 / 2 + \delta_{p_1 N}} \right]^{0,3}.$$

Таким образом, при индивидуальной настройке резца на размер при разной жесткости опор технологической системы (ТС) размерный износ лезвия резца уменьшает погрешность обработки, притом в большей степени при об-

работке первой заготовки ( $\delta_{\phi_1} < \Delta_{p_1}$ ) (см. рис. 1).

Рассмотрим способ обработки, когда заданная точность достигается методом автоматического получения размеров на настроенном станке, например, на токарном станке с ЧПУ.

Поскольку положение резца после первой его настройки на размер относительно технологической базы не меняется, то глубина резания при обработке очередной заготовки уменьшается на величину предшествующего размерного износа лезвия резца (рис. 2).

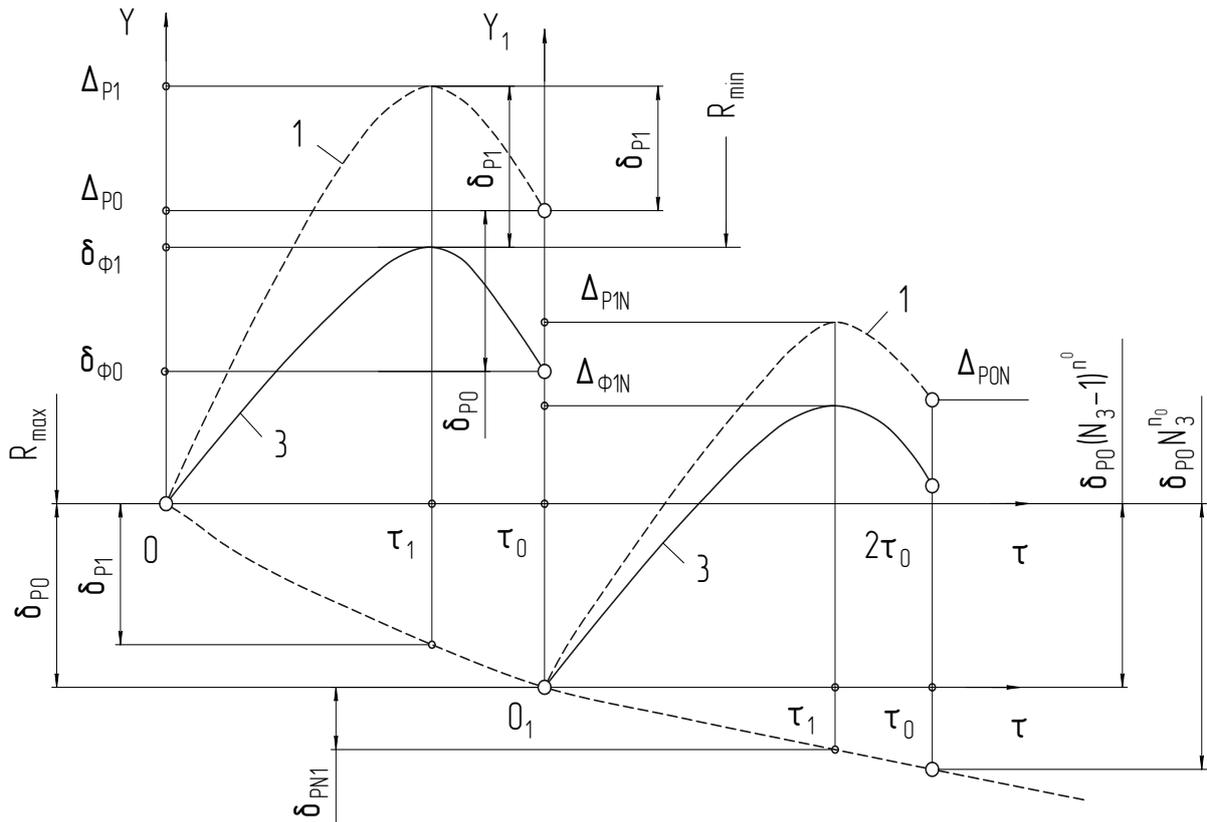


Рис. 2. Схема образования погрешностей обработки при достижении точности методом автоматического получения размеров на настроенном станке: 1 – упругая деформация заготовки; 2 – кривая размерного износа лезвия резца; 3 – результирующая кривая положения вершины резца относительно оси заготовки;  $R_{\min}, R_{\max}$  – минимальный и максимальный радиусы обработанной поверхности вала

$$t = t_1 - \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} \tau_0^{n_0} \cdot K_p \cdot (N_3 - 1)^{n_0}$$

или

$$t = t_1 - \delta_{p0} (N_3 - 1)^{n_0},$$

где  $t_1$  – начальная глубина резания.

Тогда

$$\Delta_{p1N} = P_{y1} \cdot K_{t1} \cdot \Delta \omega_1, \quad (8)$$

$$K_{t1} = \left[ 1 - \frac{\delta_{p0} (N_3 - 1)}{1000 t_1} \right]^{0,9},$$

где  $K_{t1}$  – коэффициент, учитывающий изменение глубины резания при методе автоматического получения размеров на настроенном станке.

Применительно к продольному точению принята следующая зависимость

для определения радиальной составляющей  $P_{y1}$  силы резания [4]:

$$P_{y1} = \frac{2430 \cdot S_1^{0,6} \cdot t_1^{0,9}}{V_1^{0,3}}.$$

Тогда отклонение профиля продольного сечения или погрешность формы находят из зависимости, аналогичной (4):

$$\Delta D_{30\phi}^{нол} = 2\delta_{\phi 1N} \leq \delta_1; \\ \delta_{\phi 1N} = P_{y1} K_{t1} \Delta \omega_1 - \delta_{p1N}. \quad (9)$$

При обработке заготовок методом автоматического получения размера на настроенном станке, кроме погрешности формы продольного сечения, учитывают и погрешность размера.

Погрешность размера включает в себя погрешность формы при обработке первой заготовки и общий размерный износ лезвия резца (см. рис. 2).

$$\Delta D_{30p}^{нол} = 2\delta_{n1} \leq \delta_1. \quad (10)$$

$$\delta_{n1} = \Delta_{p1} - \delta_{p0} \left( \frac{\omega_{з\phi 1}}{\omega_{з\phi 1} + \omega_{н\phi 1}} \right)^{n_0} + \\ + \delta_{p0} (N_3 - 1)^{n_0} \leq \delta_1 / 2, \quad (11)$$

где  $\Delta D_{30p}^{нол}$  – погрешность размера, мкм;  $\delta_{n1}$  – погрешность размера, отнесенная к радиусу заготовки.

Исходя из зависимости (11) определяется время или количество заготовок, которые можно обработать до первой подстройки резца на размер, т. е.

$$N_{3н} = \left[ \frac{\delta_1 / 2 - \Delta_{p1}}{\delta_{p0}} + \left( \frac{\omega_{з\phi 1}}{\omega_{з\phi 1} + \omega_{н\phi 1}} \right)^{n_0} \right]^{1/n_0} + 1;$$

$$\tau_{нс} = N_{3н} \cdot \tau_0,$$

где  $N_{3н}$  – количество заготовок, обработанных до первой подстройки резца на размер;  $\tau_{нс}$  – время очередной настройки резца, мин.

Фактическое количество обработанных заготовок  $N_3$ , соответствующее получению максимального (допустимого) размерного износа лезвия, определяется из следующей зависимости:

$$\delta_p^{\max} = \frac{\delta_0}{T_0^{n_0}} (\tau_0 N_{3\max})^{n_0} \cdot k_p = \delta_{p0} \cdot N_{3\max}^{n_0};$$

$$N_{3\max} = \left( \frac{\delta_p^{\max}}{\delta_{p0}} \right)^{\frac{1}{n_0}} \leq N_3;$$

$$\delta_p^{\max} = \delta_0 \cdot K_p,$$

где  $N_{3\max}, N_3$  – расчетное и фактическое количество обработанных заготовок за период стойкости резца;  $\delta_p^{\max}$  – максимально допустимый размерный износ лезвия резца.

Общее количество настроек резца на размер

$$Z_p = \frac{2\delta_p^{\max}}{\delta_1 - \Delta}.$$

Тогда

$$Z \geq Z_p + 1;$$

$$Z \geq Z_p + 1.$$

где  $Z_p, Z$  – расчетное и фактическое число поднастроек резца на размер;  $\Delta$  – величина допуска на настройку резца на размер.

Так, например, при обработке первой заготовки вне зависимости от метода настройки резца на размер  $d = 100,8^{-0,14}$  мм длиной  $l = 1000$  мм на станке 16К20 с  $\omega_{з\phi} = 0,3$  мкм/Н;  $\omega_{н\phi} = 0,06$  мкм/Н призматическим резцом на режимах: подача  $S_1 = 0,5$  мм/об, глубина резания  $t = 0,8$  мм, скорость резания

$V_1 = 250$  м/мин; частота вращения заготовки  $n = 800$  мин<sup>-1</sup>, – были получены следующие значения:  $T_0 = 22$  мин;  $P_{y1} = 250$  Н;  $n_0 = 0,25$ ;  $\Delta_{p1} = 62,5$  мкм;  $\delta_{p0} = 51$  мкм;  $\tau_0 = 2,5$  мин;  $\delta_{p1} = 48,8$  мкм;  $\delta_{\phi_1} = 62,5 - 48,8 = 13,7$  мкм;  $\Delta D_3^{пол} = 27,4$  мкм.

При обработке второй заготовки без изменения настройки резца на размер при  $K_{r1} = 0,942$  были получены следующие погрешности:  $\Delta_{p1} = 58,87$  мкм;  $\delta_{p1} = 8,34$  мкм;  $\delta_{\phi_1} = 50,5$  мкм;  $\delta_{n1} = 13,7 + 51 = 64,7$  мкм;  $\Delta D_{30}^{пол} = 129,4$  мкм.

Количество заготовок, обработанных до первой поднастройки резца на размер  $N_{zn} = 2,477$  шт. (принято

$N_{zn} = 2$ ), время до первой поднастройки резца на размер  $\tau_{nc} = 5$  мин, общее количество деталей, обработанных за период стойкости резца,  $N_3^{max} = 8$  деталей, общее число поднастроек  $Z = 2$ , допуск на настройку резца  $\Delta = 10$  мкм.

Повышенный износ лезвия в период приработки приводит к уменьшению на 22 %  $(1 - 48,8 / 62,5) \cdot 100$  % погрешности формы и к увеличению в 3...5 раз  $(129,6 / 27,4) = 4,73$  погрешности размера при следующей операции.

Таким образом, разработанная методика позволяет на стадии проектирования технологической операции определить с учетом характеристики ТСР и режимов обработки количество поднастроек резца на размер для обеспечения заданной точности.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шатуров, Г. Ф. Исследование процесса изнашивания токарного инструмента / Г. Ф. Шатуров, В. А. Лукашенко, Д. Г. Шатуров // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2006. – № 3. – С. 113–118.
2. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.
3. Исследование закономерностей формообразования поверхностей заготовок валов при точении / Ж. А. Мрочек [и др.] // Вестн. БНТУ. – 2006. – № 3. – С. 30–34.
4. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 496 с.

Статья сдана в редакцию 15 января 2014 года

**Денис Геннадьевич Шатуров**, инженер, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-67-98.  
**Геннадий Филиппович Шатуров**, д-р техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-25-67-98.  
**Александр Алексеевич Жолобов**, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

**Denis Gennadyevich Shaturov**, engineer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-25-67-98.  
**Gennady Filippovich Shaturov**, DSc (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-25-67-98.  
**Aleksandr Alekseyevich Zholobov**, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.