

УДК 621.787

Ж. А. Мрочек, д-р техн. наук, проф., Г. Ф. Шатуров, д-р техн. наук,
А. А. Жолобов, канд. техн. наук, проф., Д. Г. Шатуров

УПРАВЛЕНИЕ ТОЧНОСТЬЮ ПРИ СОВМЕЩЕННОЙ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ РЕЗАНИЕМ И ОБКАТЫВАНИЕМ РОЛИКОМ

В статье рассмотрены вопросы точности при совмещенной обработке валов резанием и обкатыванием роликом. Получены математические модели и выделены зависимости, позволяющие определить погрешности при обработке. Указаны пути управления точностью при формировании поверхностей валов.

Результаты исследований процесса обработки цилиндрических поверхностей резанием с одновременным обкатыванием роликом показывают, что точность размеров в продольном сечении валов повышается, а погрешность формы значительно (до 4 раз) уменьшается. Для получения меньшей погрешности обработки рекомендуется использование комбинированных инструментов с несколькими деформирующими роликами, равномерно расположенными по окружности [1].

Однако наличие одного деформирующего элемента в комбинированном инструменте позволяет значительно упростить конструкцию инструмента и его настройку, повысить точность управления упругими деформациями элементов технологической системы (ТС) по сравнению с многоэлементными обкатками, когда их суммарная жесткость в направлении действия радиальной составляющей P_y силы резания может значительно различаться ввиду неодинаковой жесткости каждого элемента (рис. 1).

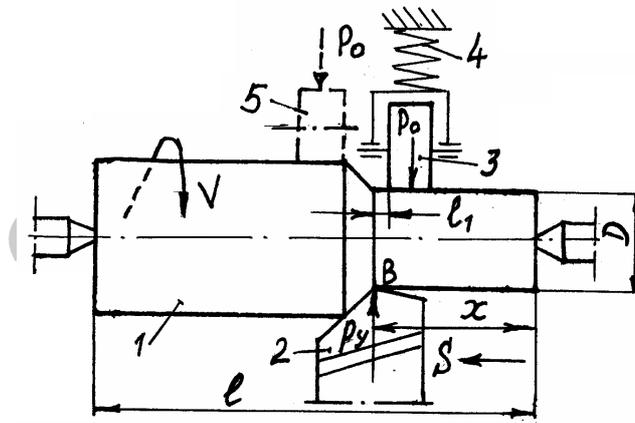


Рис. 1. Схема обработки: 1 – заготовка; 2 – резец; 3, 5 – ролик; 4 – упругий элемент (пружина); V, S – направления вращения заготовки и перемещения резца соответственно

Рассмотрим случай, когда комбинированный инструмент содержит один деформирующий элемент, установленный оппозитно резцу (режущий инструмент и деформирующий элемент (ролик, шарик) расположены относительно оси заготовки с противоположных сторон). Смещение деформирующего элемента относительно

вершины резца вдоль заготовки в направлении, обратном направлению подачи, не превышает ширины его рабочей части и больше половины величины подачи инструмента (при чистовой обработке $l_1 = 0,5...5$ мм).

Погрешность размеров в продольных сечениях вала, возникающая при со-

вмещенной обработке резанием и обкатыванием зависит от жесткости элементов технологической системы: опор крепления вала, жесткости заготовки и устройства, в котором расположен деформирующий элемент, усилия резания и деформирования [2].

Рассмотрим технологическую систему как две упругие подсистемы. К первой подсистеме отнесем переднюю и заднюю опоры вала и заготовку, а вторая подсистема будет состоять из упругого элемента, например пружины, входящей в конструкцию обкатника и действующей с усилием P_d на деформирующий элемент.

Ввиду незначительности расстояния l_1 (см. рис. 1) между деформирующим элементом и резцом, примем, что радиальная составляющая P_y силы резания и горизонтальная составляющая P_o силы обкатывания P_d расположены в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения заготовки и проходящей через вершину резца – точку В. Упругое перемещение оси заготовки и ролика относительно вершины резца одинаковы для двух подсистем. При этом сила P_y уравновешивается силами упругости двух подсистем и горизонтальной составляющей P_o силы обкатывания.

Следовательно, при динамической настройке резца на наибольший размер вала при обработке в центрах можно представить:

$$P_y = P_1 + P_2 + P_o, \quad (1)$$

где

$$P_y = C_{p1}(t_o - Y_{xc})^x,$$

$$C_{p1} = 10C_p S^y V^n \cdot K_p;$$

$$P_1 = Y_{xc} / \omega_{ox};$$

$$P_2 = Y_{xc} \cdot \cos \beta / \omega_p;$$

$$P_o = P_d \cos \beta = \frac{i}{\omega_p} \cos \beta;$$

$$t_o = t + Y_{oc};$$

$$\omega_{ox} = \omega_{3б} \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 + \omega_{нб} \left(\frac{x}{l}\right)^2 + \frac{l^3}{3EJ} \left(\frac{x}{l}\right)^2 \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2,$$

где P_1, P_2 – усилия, воспринимаемые первой и второй подсистемами от действия силы P_y соответственно, Н; P_o – горизонтальная составляющая усилия деформирования P_d , Н; P_d – усилие, приложенное к деформирующему элементу, Н; ω_{ox}, ω_p – податливость первой и второй подсистем соответственно, мкм/Н; Y_{xc} – радиальное упругое перемещение оси вала в сечении, в котором определяется погрешность обработки, мм; Y_{oc} – радиальное упругое перемещение оси вала под действием действующих сил в начале обработки при $x = 0$, мм²; $\omega_{нб}, \omega_{3б}$ – податливость передней и задней бабок станка (опор вала) соответственно, мкм/Н; l – длина вала мм; E – модуль упругости материала заготовки; J – момент инерции сечения заготовки, $J = 0,05D^4$; D – диаметр вала, мм; x – расстояние от начала обработки (торца заготовки) до расположения резца, мм; i – величина натяга (заглубления) деформирующего элемента относительно обрабатываемой поверхности или величина предварительного сжатия упругого элемента (пружины) обкатника для обеспечения силы P_d и P_o , мм; β – радиальный, относительно центра вала, угол расположения деформирующего элемента относительно горизонтальной опорной плоскости резца, град; C_p, x, y, n – коэффициенты [2]; K_p – коэффициент, учитывающий геометрию резца и условия обработки: $K_p = 1$ ($\varphi = 45^\circ, \varphi_1 = \alpha_3 = \gamma_3 = 10^\circ, \lambda = 0$); S – подача, мм/об; t – глубина резания, мм; V – скорость резания, м/мин.

В расчетах при обработке призматическим твердосплавным резцом заготовок из конструкционной стали 40Х для определения радиальной составляющей P_y зависимость (1) может быть представлена в следующем виде:

$$C_{p1}(t_o - Y_{xc})^x = Y_{xc} \left(\frac{1}{\omega_{ox}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p} \right) + \frac{i}{\omega_p} \cos \beta, \quad (2)$$

где

$$t_o = t + Y_{oc}.$$

Если $x = 1$, то

$$Y_{xc} = \frac{C_{pl} t_o - \frac{1000 \cdot i}{\omega_p} \cos \beta}{C_{pl} + 1000 \left(\frac{1}{\omega_{ox}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p} \right)}$$

Если $x < 1$, то после преобразования зависимости (2) получим возможность определить перемещение оси вала при обработке:

$$Y_{xc} = \sqrt{A^2 + B} - A, \quad (3)$$

где

$$A = \frac{t_o}{1-x} + \frac{1000 \cdot t_o^{2-x}}{C_{pl} \cdot x \cdot (1-x)} \left(\frac{1}{\omega_{ox}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p} \right);$$

$$B = \frac{2t_o^2}{x(1-x)} - \frac{2000 t_o^{2-x} i}{C_{pl} x(1-x) \omega_p} \cos \beta.$$

При обработке поверхностей стальных заготовок, когда $C_p = 243$; $x = 0,9$; $y = 0,6$; $n = -0,3$, имеем:

$$A = 10t_o + \frac{1000 \cdot t_o^{1,1}}{0,09 \cdot C_{pl}} \left(\frac{1}{\omega_{ox}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p} \right);$$

$$B = \frac{t_o^2}{0,045} - \frac{1000 t_o^{1,1} i}{0,045 C_{pl} \omega_p} \cos \beta.$$

Упругое радиальное перемещение оси вала в начале обработки, т. е. в сечении, по которому проходит настройка резца на размер, для случая, когда $Y_{xc} = Y_{oc}$ и фактическая глубина резания равна номинальной t , имеем:

$$Y_{oc} = (P_y - P_o) \omega_o, \quad (4)$$

где

$$\omega_o = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{зб}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p}};$$

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^{0,9} \cdot S^{0,6} \cdot V^{-0,3} \cdot K_p. \quad (5)$$

При статической настройке резца на

размер для определения величины упругого перемещения Y_{xc} оси вала можно воспользоваться зависимостями (2) или (3), где величина t_o соизмерима с глубиной резания t .

Величина упругих перемещений оси вала, вследствие изменения жесткости ТС, меняется по мере перемещения резца вдоль оси заготовки и имеет, например, для жестких валов ($l/D \leq 17$) максимум в начале обработки ($x = 0$), т. е. в месте крепления заготовки в менее жесткой, по сравнению с передней, задней бабке станка. Минимальная величина упругих перемещений оси вала имеет место в лимитирующем сечении, расположенном от середины вала в направлении расположения передней бабки станка на расстоянии $x/1$ от начала обработки (торца заготовки) (рис. 2).

Погрешность диаметральных размеров зависит от упругих перемещений оси заготовки относительно вершины резца и равна удвоенной разнице между перемещением Y_{xc} в рассматриваемом сечении, расположенном на расстоянии X от торца вала, и перемещением оси Y_{oc} в начале обработки, в котором проводится настройка резца на размер.

$$\Delta D_\phi = 2(Y_{xc} - Y_{oc}), \quad (6)$$

где ΔD_ϕ – погрешность обработки при динамической настройке резца на размер.

Знак при ΔD_ϕ указывает на форму обработанной поверхности вдоль оси вала. При положительном значении ΔD_ϕ имеем бочкообразную форму, а при отрицательном – корсетную (рис. 3).

Для определения максимальной погрешности обработки ΔD_ϕ^{\max} необходимо в зависимость (6) подставлять разницу величин упругих перемещений оси вала между максимальным Y_{oc} и минимальным Y_{xc} [3, 4]. При изменении отношения $\omega_p/\omega_{нб}$ минимальная величина упругого перемещения Y_{oc} меняется незначительно (см. рис. 2).

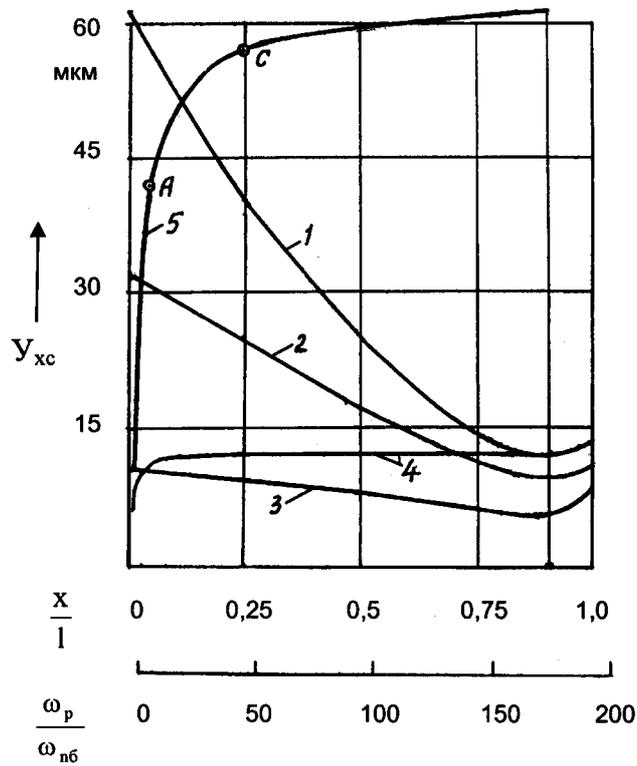


Рис. 2. Величина упругих перемещений Y_{xc} (1, 2, 3) оси вала в радиальной плоскости в зависимости от местоположения реза и величина минимального Y_{3c} (4) и максимального Y_{oc} (5) упругих перемещений оси вала в зависимости от отношения ω_p/ω_{nb} : 1 – $\omega_p = \infty$ ($P_0 = P_2 = 0$); 2 – $\omega_p = \omega_{3c}$; 3 – $\omega_p = \omega_{nb}$; $D = 100$ мм; $l = 1000$ мм; $\omega_{nb} = 0,06$ мкм/Н; $\omega_{3c} = 0,3$ мкм/Н; $t = 0,5$ мм; $S = 0,5$ мм/об; $V = 200$ м/мин; $P_y = 210$ Н; А – $\omega_p/\omega_{3c} = 8,3$; С – $\omega_p/\omega_{3c} = 50$

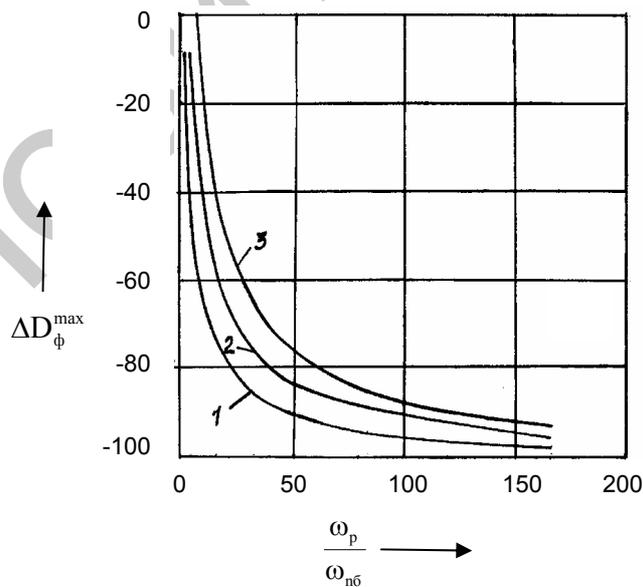


Рис. 3. Зависимость изменения максимальной погрешности ΔD_{ϕ}^{\max} от отношения ω_p/ω_{nb} : 1 – $i = 0$ ($\omega_p = \infty$); 2 – $i = 0,05$ мм ($\omega_p = 0,3$), мкм/Н; 3 – $i = 0,1$ мм ($\omega_p = 1,0$), мкм/Н

Максимальная величина упругого перемещения, напротив, имеет три характерные области изменения. Так, до $\omega_p/\omega_{нб} \leq 8,3$ зависимость упругих перемещений имеет крутое восхождение. С увеличением $\omega_p/\omega_{нб} \geq 50$ максимальное упругое перемещение оси вала меняется незначительно (менее чем на 10 %) и практически не оказывает влияние на погрешность обработки. Между этими крайними областями лежит переходная область, характеризующаяся уменьшением темпа роста максимальных упругих перемещений при увеличении отношения $\omega_p/\omega_{зб}$.

Отметим, что расчет погрешности обработки и упругих перемещений зависит от условия настройки резца на размер. При настройке резца на размер по наибольшему предельному размеру (для валов) и по наименьшему предельному размеру (для отверстий) упругие перемещения определяются по зависимостям (3), (4). При настройке резца на размер по наименьшему предельному размеру (для валов) и по наибольшему предельному размеру (для отверстий) предпочтительнее определять упругие перемещения по следующим зависимостям:

$$Y_{зс} = \frac{P_{y1} - P_o}{\frac{1}{\omega_{зс}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p}}, \quad (7)$$

где

$$P_{y1} = 10C_p S^y V^n (t + \delta/2)^x; \quad (8)$$

$$\omega_{зс} = \omega_{ох} = \frac{\omega_{зб} \cdot \omega_{нб}}{\omega_{зб} + \omega_{нб}}; \quad (9)$$

$Y_{зс}$, $\omega_{зс}$ – упругое перемещение и податливость соответственно оси вала в лимитирующем сечении; δ – допуск размера при формообразовании поверхности.

Величина $Y_{ос}$ определяется из зависимости (3), где

$$t_o = t + \delta/2 + Y_{зс}. \quad (10)$$

Для жестких валов с погрешностью менее 5 % максимальная погрешность обработки равна

$$\Delta D_{\phi}^{\max} = 2(P_y - P_o)\Delta\omega,$$

где

$$\Delta\omega = \frac{1}{\frac{1}{\omega_{зб}} + \frac{1}{\omega_{нб}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p}} - \frac{1}{\frac{1}{\omega_{зб}} + \frac{\cos \beta}{\omega_p}}; \quad (11)$$

$\Delta\omega$ – разность между податливостью технологической системы в лимитирующем сечении вала и в начале обработки при $x = 0$.

Если максимальную погрешность ограничить допуском δ на изготовление цилиндрической поверхности вала, то получим зависимость, используя которую можно проектировать технологический процесс совмещенной обработки резанием резцом с одновременным обкатыванием роликом, обеспечивая заданную точность.

$$\delta \geq 2(P_y - P_o) |\Delta\omega|. \quad (12)$$

Исходя из зависимости (12), управление точностью обработки можно осуществить:

- за счет изменения жесткости элементов ТС, например, податливости ω_p упругого элемента комбинированного инструмента при $P_o = 0$ (см. рис. 3);

- за счет установленной величины усилия P_o , изменяя величину натяга i или угла β (рис. 4);

- за счет изменения величины радиальной силы P_y путем оптимизации параметров режима обработки, устанавливая относительную глубину резания, обеспечивающую необходимую точность обработки (см. рис. 4).

Для определения параметров совмещенной обработки валов (точение с обкаткой) на станках разработан алгоритм расчета погрешности (рис. 5), с помощью которого можно обеспечить заданную точность. Расчеты производились с использованием пакета MS Excel.

Используя методику, можно решить и обратную задачу, например, назначить силу P_o , или податливость ω_p , или режимы обработки, обеспечивающие заданную точность.

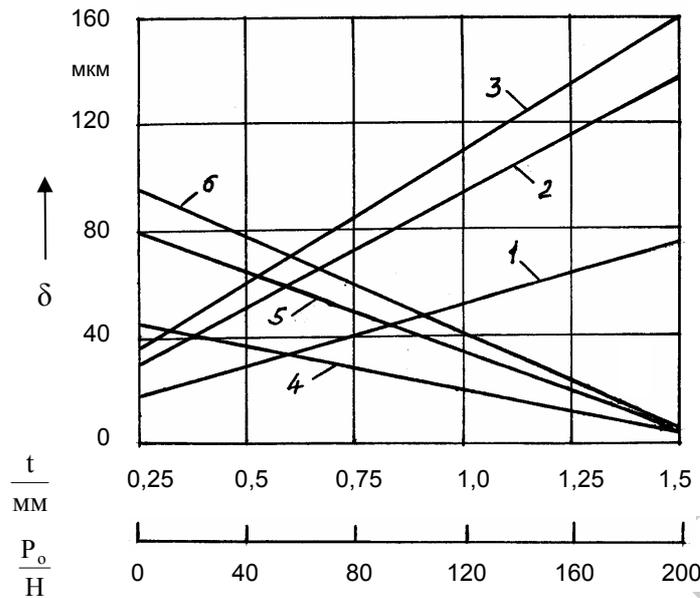


Рис. 4. Влияние глубины резания t (1, 2, 3) и усилия обкатывания ролика P_o (4, 5, 6) на величину допуска δ изготовления вала: $\omega_p/\omega_{н6} = 5$ (1; 4); 20 (2; 5); 50 (3; 6); $\omega_{н6} = 0,06$; $\omega_{с6} = 0,3$

Алгоритм расчета в этом случае может быть следующий:

$\delta \rightarrow \omega_p$ (принимаем конструктивно) \rightarrow
 $\rightarrow \Delta\omega$ (11) $\rightarrow P_o = f(P_y) \rightarrow P_y$ (12) \rightarrow
 $\rightarrow t$ (5, 8) $\rightarrow P_o$ (12) или $\delta_o \rightarrow t \rightarrow S \rightarrow$
 $\rightarrow P_y$ (5, 8) $\rightarrow \omega_p \rightarrow \Delta\omega$ (11) $\rightarrow P_o$ (12).

Однако следует уточнить, что предложенная методика и приведенные зависимости пригодны для точностных расчетов и выбора необходимых параметров при совмещенной обработке набивных бумажных валов суперкаландра чашечным резцом с поддерживающим профильным роликом, устанавливаемых при точении наружной поверхности на токарном станке в собственных башмаках на подшипниках качения.

В этом случае динамическую настройку резца на размер необходимо вести относительно сечения детали, в котором расположен резец, и в тот момент, когда ролик полностью вступит в работу. При вступлении в работу деформирующего элемента произойдет пере-

мещение заготовки на резец и в месте расположения резца, на расстоянии l_1 от торца заготовки, диаметр детали уменьшается. Для уменьшения или исключения перепадов диаметров детали, образованных в начале обработки резцом и в момент вступления ролика в работу, можно предложить ряд технологических решений ведения технологического процесса. Так, например, обработку необходимо вести с малыми относительными расстояниями расположения друг от друга резца и ролика ($l_1 < 1,0$ мм), а образующийся перепад диаметров на длине l_1 устраняют последующим точением торцевой фаски (см. рис. 1). При больших усилиях деформирования P_d увеличивают радиальный угол β расположения ролика и тем самым уменьшают до приемлемых значений силы P_2 и P_o . Деформирующий ролик устанавливают впереди резца или в одной плоскости с резцом и он производит работу с опережающим пластическим деформированием необработанной поверхности или поверхности резания. В этом случае пер-

вым в работу вступает ролик, а затем ре-
зец – и перепад диаметров исключен.

Таким образом, представленные
математические зависимости и методи-
ка расчета погрешности позволяют

осуществлять управление точностью,
используя для этого оптимизацию ре-
жимов резания и параметров совмещен-
ной обработки комбинированным инст-
рументом.

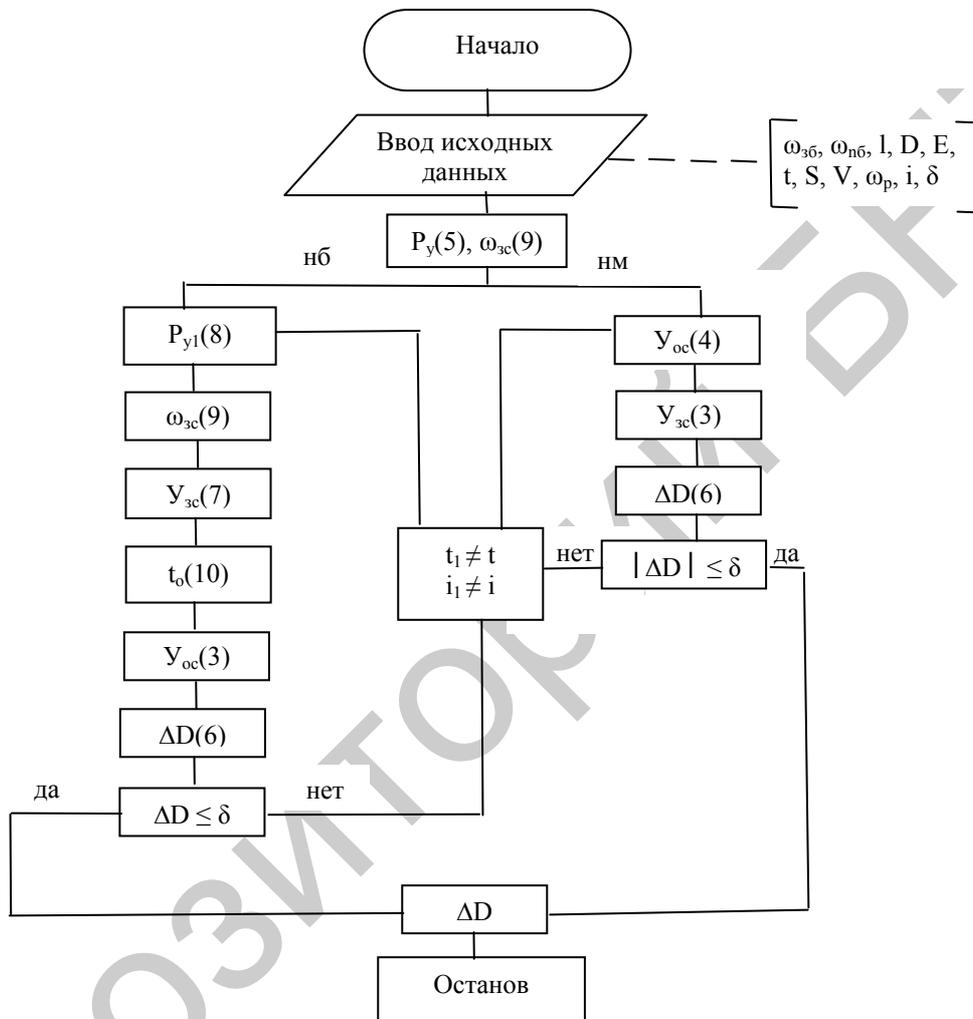


Рис. 5. Алгоритм управления точностью при совмещённой обработке валов (точением с обкаткой):
нм, нб – настройка резца по наименьшему и наибольшему размеру вала соответственно

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Чистосердов, П. С.** Комбинированные инструменты для отделочно-упрочняющей обработки / П. С. Чистосердов. – Минск : Беларусь, 1977. – 128 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя / Под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 655 с.
3. Исследование точности при обработке валов в центрах на токарных станках / Ж. А. Мрочек [и др.] // Вестн. БНТУ. – 2006. – № 3. – С. 30–34.
4. **Шатуров, Г. Ф.** Прогрессивные процессы механической обработки / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : Технопринт, 2001. – 460 с.

Белорусский национальный технический университет
Белорусский институт правоведения
Белорусско-Российский университет
Материал поступил 22.12.2006

**Zh. A. Mrochek, G. F. Shaturov,
A. A. Zholobov, D. G. Shaturov**
**Accuracy management at combined
lathing by means of cutting and rolling
with a combination tool**
Belarusian National Technical University
Belarusian Institute of Law
Belarusian-Russian University

In the article there considered the questions of accuracy at combined lathing of axles (shafts) by means of cutting and rolling. Mathematical models have been developed and dependences have been derived permitting to determine lathing errors. The ways of accuracy management under the process of machining the axles surface have been pointed out.