

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.9

А. В. Казаков, А. А. Жолобов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ

UDC 621.9

A. V. Kazakov, A. A. Zholobov

FORECASTING AND ENSURING THE ACCURACY OF STEPPED SHAFTS TURNING

Аннотация

Рассмотрены вопросы оценки и прогнозирования погрешностей обработки, возникающих вследствие деформации элементов ТСП, влияния внешних силовых факторов на упругую деформацию элементов ТСП при токарной обработке ступенчатых валов. Разработана математическая модель, которая позволила выявить и оценить влияние деформации заготовки, инструмента, задней и передней бабок станка на точность и форму обрабатываемых поверхностей ступенчатого вала.

Ключевые слова:

деформация, силы резания, технологическая система резания, токарная обработка, повышение точности, оптимизация, математическая модель, ступенчатые валы, прогнозирование, коррекция траектории движения режущего инструмента.

Abstract

The paper considers the problems of evaluating and forecasting processing errors caused by the deformation of elements of a technological cutting system (TCS) and the influence of external forces on elastic deformation of TCS elements when turning stepped shafts. The mathematical model has been developed, which reveals and assesses the impact of the deformation of a workpiece, of a cutting tool, and that of a headstock and a tailstock of the machine, on the accuracy and form of processed surfaces of a stepped shaft.

Key words:

deformation, cutting forces, technological cutting system (TCS), turning, increased accuracy, optimization, mathematical model, stepped shafts, forecasting, adjustment of the contour of the cutting tool movement.

При токарной обработке валов существенное влияние на точность формируемых поверхностей оказывает геометрическая точность технологической системы резания (ТСП) и податливость её элементов под воздействием сил резания [1–3]. Для обеспечения заданных конструктором параметров

изделия необходим строгий учёт возникающих и изменяющихся в процессе обработки погрешностей.

Многими учеными проведены теоретические и экспериментальные исследования этих погрешностей, в том числе и в Белорусско-Российском университете [3–6]. Однако в этих работах не

уделялось особого внимания специфике формирования погрешностей на поверхностях ступенчатых валов.

Для прогнозирования точности токарной обработки ступенчатых валов авторами сделана попытка создания математической модели, позволяющей выявить и оценить влияние деформации заготовки, инструмента, задней и передней бабок станка на точность размеров и форму обрабатываемых поверхностей ступенчатого вала.

В математической модели были учтены рекомендуемые в ранее выполненных работах [3, 4, 7–12] параметры: пространственные отклонения заготовки, погрешность установки заготовки, смещение центровых отверстий заготовки (при обработке в центрах); погрешность базирования заготовки в патроне; смещение оси задней бабки; податливость шпиндельного узла; податливость задней бабки; жесткость инструмента; упругая деформация заготовки.

Кроме того, при разработке модели было принято допущение, что материал поверхности заготовки имеет однородную структуру и равномерную твердость [3].

Рассматриваемая математическая модель имеет отличие от моделей, предлагаемых в [3, 4, 7–12]: применяется дифференциальное уравнение изогнутой оси балки для расчёта упругих деформаций, возникающих в технологической системе. Подход направлен на более полное раскрытие сущности моделирования процессов механической (токарной) обработки ступенчатых валов на станках с ЧПУ.

Основными причинами возникновения погрешностей цилиндрических поверхностей, связанных с податливостью ТСП, является влияние упругой деформации заготовки и инструмента и упругой деформации шпиндельного узла и задней бабки. Указанные факторы в разной степени сказываются на погрешностях обрабатываемой поверхности [3].

Для установления влияния различных внешних силовых факторов на упругие деформации элементов ТСП и, как следствие, на погрешности формируемых в процессе обработки цилиндрических поверхностей ниже рассмотрено общее решение дифференциального уравнения изогнутой оси балки.

Прогиб (величину упругой деформации) заготовки с учётом упругой деформации шпиндельного узла и задней бабки можно определить с помощью дифференциального уравнения изогнутой оси балки [13]

$$\Delta_{zy(z)}(x)'' = \frac{M_{z(y)}(x)}{EI(x)}, \quad (1)$$

где $\Delta_{zy(z)}(x)$ – уравнение упругих деформаций заготовки в плоскости YOX (ZOX), м; $M(x)$ – уравнение изгибающего момента, вызванного силой резания в рассматриваемой плоскости, Н·м; $EI(x)$ – уравнение изменения жёсткости при изгибе заготовки, Н·м².

Уравнение (1) описывает закон изменения упругой деформации по всей длине обрабатываемой заготовки. Значение же упругой деформации, определяющее точность цилиндрической поверхности после механической обработки, будет находиться в точке приложения силы резания. То есть в любой момент времени в точке касания вершины резца и обрабатываемой поверхности отмечается такое значение упругой деформации заготовки, которое впоследствии оказывает влияние на точность обработанной поверхности. Для этого уравнение (1) приводится к виду, позволяющему определять значение упругой деформации в заданной точке.

Необходимо решить дифференциальное уравнение (1). Следует зафиксировать резец в произвольный момент обработки, а его действие на обрабатываемую заготовку заменить соответствующими составляющими силы резания. Таким образом, обрабатываемую заготовку можно представить с определёнными

допущениями как набор участков, жёсткость которых постоянна [14].

В процессе точения на заготовку действуют силовые факторы в виде сосредоточенных сил и изгибающих моментов, а также собственный вес заготовки как равномерно распределённая нагрузка по каждой из ступеней.

В качестве примера на рис. 1 представлен вал, содержащий N участков (ступеней) в зафиксированный момент обработки. Расстояние от правого торца заготовки до текущего положения резца обозначено через L_0 , а вылет заготовки – через L_3 . Пусть на заготовку действует силовой фактор ζ (изгибающий момент или поперечная сила), при-

ложенный в начале участка с номером n_p (см. рис. 1). Необходимо определить, какое влияние ζ оказывает на деформацию в конце участка с номером n .

Закон изгибающего момента $M_{Z(Y)}(x)$ в пределах участка с номером n от силового фактора ζ , приложенного в начале участка с номером n_p , выразим следующей зависимостью:

$$M_{Z(Y)}(x) \Big|_0^{l_n} = m_{Z(Y)}(\zeta, n_p, n), \quad (2)$$

где l_n – длина участка с номером n , м.

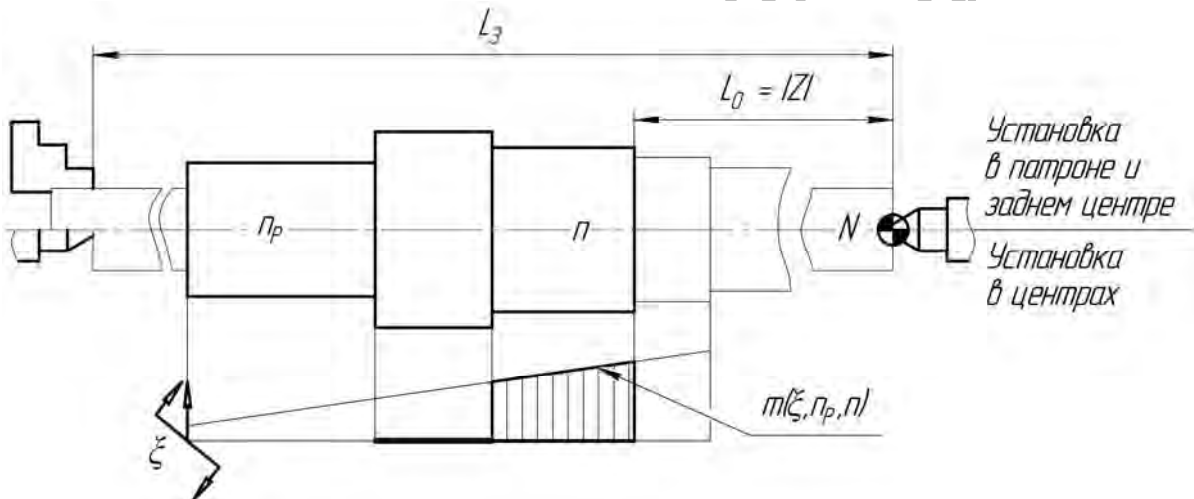


Рис. 1. Схема для определения изгибающего момента от силовых факторов

Интегрирование выражения (1) в пределах от 0 до l_n даёт значение угла поворота в конце участка с номером n [13]:

$$\theta_{Z(Y)}(n) = \Delta_{zZ(Y)}(n)' = \int_0^{l_n} \frac{M_{Y(Z)}(x)}{EI_n} + \theta_{Z(Y)0n}, \quad (3)$$

где $\theta_{Z(Y)}(n)$ – угол поворота в конце n -го участка, рад; $\theta_{Z(Y)0n}$ – угол поворота в начале n -го участка, рад.

Угол поворота в начале n -го участка определяется из условия целостно-

сти ступенчатого вала [13]:

$$\theta_{Z(Y)0n} = \theta_{Z(Y)}(n-1). \quad (4)$$

Исходя из вышеизложенного, угол поворота $\theta_{Z(Y)}(\zeta, n_p, n)$ в конце участка с номером n от силового фактора ζ , приложенного в начале участка с номером n_p :

$$\theta_{Z(Y)}(\zeta, n_p, n) = \int_0^{l_n} \frac{m_{Y(Z)}(\zeta, n_p, n)}{EI_n} + \theta_{Z(Y)}(\zeta, n_p, n-1). \quad (5)$$

После суммирования выражения начального угла поворота $\theta_{Z(Y)}(\xi, n_p, n-1)$ от n_p до $n-1$

$$\begin{aligned} \theta_{Z(Y)}(\xi, n_p, n-1) = \\ = \sum_{i=n_p}^{n-1} \int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01}. \end{aligned} \quad (6)$$

С учётом (5) выражение (6) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \theta_{Z(Y)}(\xi, n_p, n) = \\ = \sum_{i=n_p}^n \int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\theta_{Z(Y)01}$ – угол поворота в начале первого участка, рад.

Значение упругой деформации в конце участка с номером n можно получить интегрированием выражения (3) [13]:

$$\begin{aligned} \Delta_{3Z(Y)}(n) = \\ = \int_0^{l_n} \frac{M_{Y(Z)}(x)}{EI_n} + l_n \cdot \theta_{Z(Y)0n} + \Delta_{Z(Y)0n}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta_{3Z(Y)}(n)$ – значение упругой деформации в конце n -го участка, м; $\Delta_{Z(Y)0n}$ – значение упругой деформации в начале n -го участка, м.

Значение упругой деформации в начале n -го участка определяется из условия целостности ступенчатого вала [13]:

$$\Delta_{3Z(Y)0n} = \Delta_{3Z(Y)}(n-1). \quad (9)$$

Исходя из (2), (8), (9) значение упругой деформации $\Delta_{Z(Y)}(\xi, n_p, n)$ в конце участка с номером n от силового фактора ξ , приложенного в начале участка с номером n_p , определяется зависимостью

$$\begin{aligned} \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n) = \\ = \int_0^{l_n} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, n)}{EI_n} + \\ + l_n \cdot \theta_{Z(Y)}(\xi, n_p, n-1) + \\ + \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n-1). \end{aligned} \quad (10)$$

После суммирования выражения упругой деформации $\Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n-1)$ от n_p до $n-1$

$$\begin{aligned} \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n-1) = \\ = \sum_{k=n_p}^{n-1} \int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i} + \\ + l_k \cdot \theta(\xi, n_p, k-1) + \Delta_{3Z(Y)01}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $\Delta_{3Z(Y)01}$ – упругая деформация в начале первого участка (при $n_p = 1$), м.

С учётом (7) выражение (11) принимает следующий вид:

$$\begin{aligned} \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n-1) = \\ = \sum_{k=n_p}^{n-1} \left[\int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, k)}{EI_k} + l_k \times \right. \\ \left. \times \left(\sum_{i=n_p}^{k-1} \int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01} \right) \right] + \Delta_{3Z(Y)01}. \end{aligned} \quad (12)$$

С учётом (10) окончательно

$$\begin{aligned} \Delta_{3Z(Y)}(\xi, n_p, n) = \\ = \sum_{k=n_p}^n \left[\int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, k)}{EI_k} + l_k \times \right. \\ \left. \times \left(\sum_{i=n_p}^{k-1} \int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i} + \theta_{Z(Y)01} \right) \right] + \Delta_{3Z(Y)01}. \end{aligned} \quad (13)$$

Таким образом, совместное влияние различных силовых факторов на деформацию заготовки сводится к определению функции, описывающей уравнение изгибающего момента в пределах рассматриваемого участка (14) и двух интегралов (15) и (16):

$$m_{Y(Z)}(\xi, n_p, n); \quad (14)$$

$$\int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, k)}{EI_k}; \quad (15)$$

$$\int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(\xi, n_p, i)}{EI_i}. \quad (16)$$

Внешние силовые факторы, действующие на обрабатываемую заготовку, можно разделить на три группы. Первая – сосредоточенный изгибающий момент. В качестве примера может служить изгибающий момент, вызванный силой P_x .

Вторая – сосредоточенная поперечная сила (силы резания P_y, P_z). Третья – собственный вес детали, который необходимо учитывать при обработке длинных и нежёстких валов (в виде равномерно распределённой по каждой ступени, нагрузки).

Далее выражения (14)...(16) преобразовываются для каждой группы силовых факторов.

Для постоянного момента $\xi = M$ (рис. 2) выражение (14) принимает вид:

$$m_{Y(Z)}^M(M_{Y(Z)}, n_p, n) = M_{Y(Z)}. \quad (17)$$

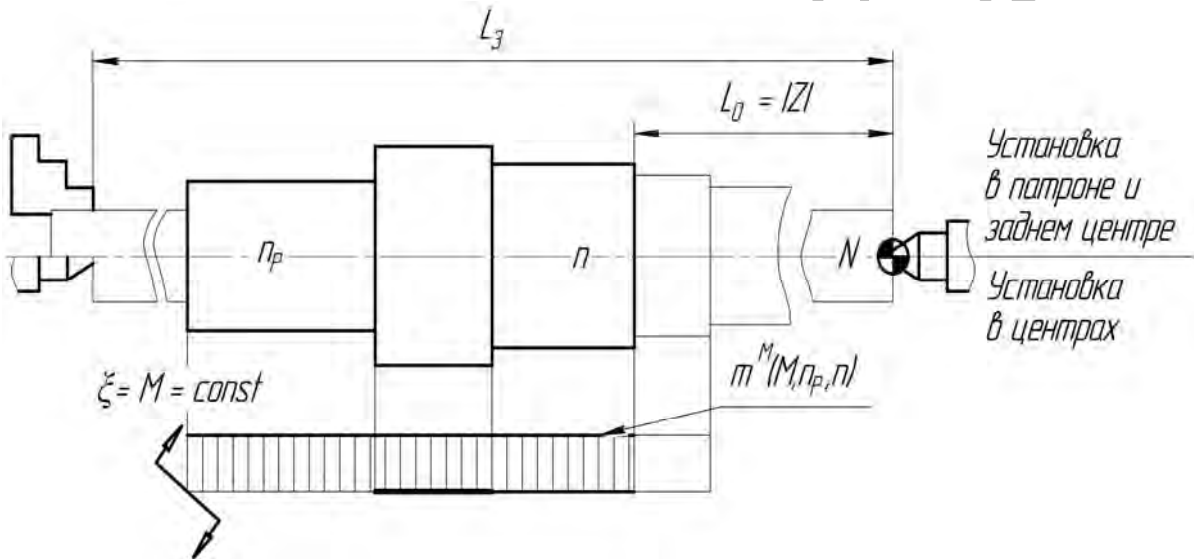


Рис. 2. Закон изменения изгибающего момента при $M = const$

В (15) и (16) подставлено (17), получены следующие выражения:

$$\int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}^M(M_{Y(Z)}, n_p, i)}{EI_i} = \frac{M_{Y(Z)} l_i}{EI_i}; \quad (18)$$

$$\int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}^M(M_{Y(Z)}, n_p, k)}{EI_k} = \frac{M_{Y(Z)} l_k^2}{2 \cdot EI_k}; \quad (19)$$

В (13) подставлены (18) и (19), получена зависимость, выражающая влияние постоянного изгибающего момента на деформацию заготовки:

$$\Delta_{3Z(Y)}^M(M_{Y(Z)}, n_p, n) = \frac{M_{Y(Z)}}{E} \sum_{k=n_p}^n l_k \cdot \left[\frac{l_k}{2I_k} + \sum_{i=n_p}^{k-1} \frac{l_i}{I_i} \right]. \quad (20)$$

Для поперечной силы ($\xi = P$) (рис. 3) зависимость (14) принимает вид:

$$m_{Y(Z)}^P(P_{Z(Y)}, n_p, n) = P_{Z(Y)} \cdot \left(\sum_{j=n_p}^{n-1} l_j + x \right). \quad (21)$$

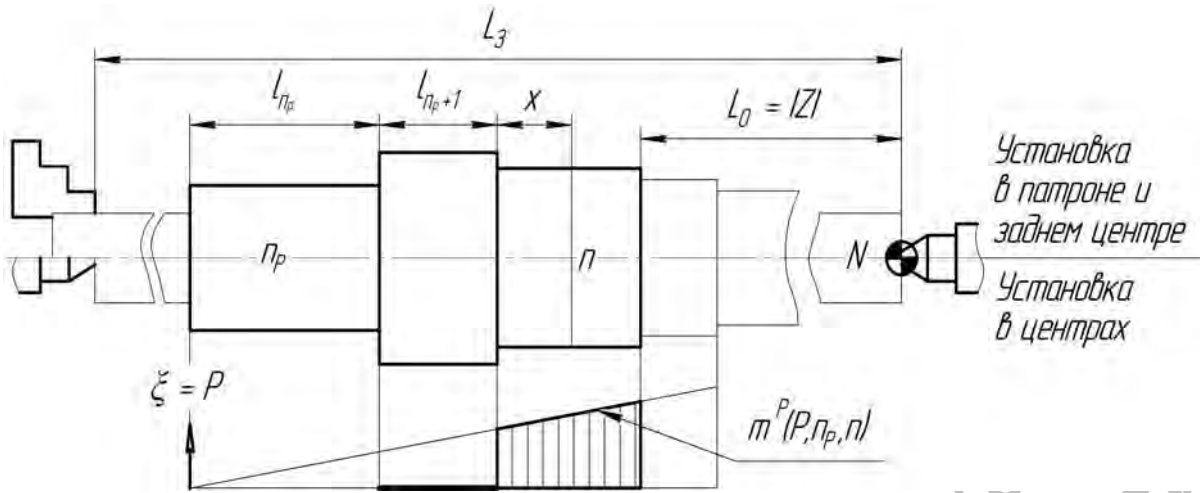


Рис. 3. Закон изменения изгибающего момента от поперечной силы P

Далее последовательно подставлены (21) в (15) и (16), (22) и (23) в (13), получена зависимость (24), выражающая влияние поперечной силы на деформацию заготовки:

$$\int_0^{l_i} \frac{m_{Y(Z)}(P_{Z(Y)}, n_p, i)}{EI_i} = \frac{P_{Z(Y)} l_i}{EI_i} \left(\sum_{j=n_p}^{i-1} l_j + \frac{l_i}{2} \right); \quad (22)$$

$$\int_0^{l_k} \int_0^{l_k} \frac{m_{Y(Z)}(P_{Z(Y)}, n_p, k)}{EI_k} = \frac{P_{Z(Y)} l_k^2}{2 \cdot EI_k} \left(\sum_{j=n_p}^{k-1} l_j + \frac{l_k}{3} \right); \quad (23)$$

$$\Delta_{ZY(Z)}^P(P_{Y(Z)}, n_p, n) = \frac{P_{Y(Z)}}{E} \sum_{k=n_p}^n l_k \times \left[\frac{l_k}{2I_k} \cdot \left(\sum_{j=n_p}^{k-1} l_j + \frac{l_k}{3} \right) + \sum_{i=n_p}^{k-1} \frac{l_i}{I_i} \cdot \left(\sum_{j=n_p}^{i-1} l_j + \frac{l_i}{2} \right) \right]. \quad (24)$$

Собственный вес заготовки можно рассматривать как равномерно распределённую нагрузку по каждой ступени [13], приложенную от первого до последнего участка (рис. 4).

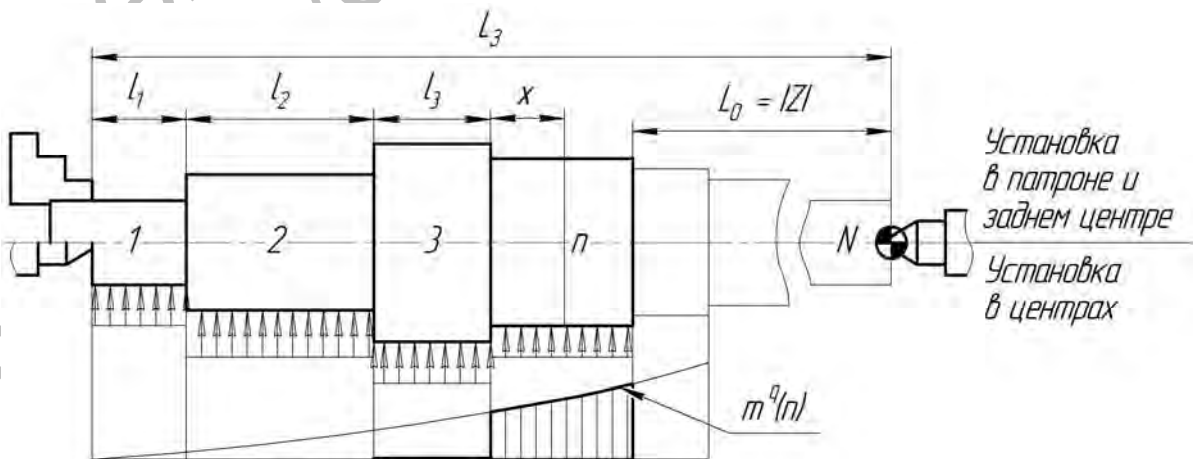


Рис. 4. Закон изменения изгибающего момента от собственного веса

Поэтому зависимость (14) принимает вид:

$$m_{Z(Y)}^q(n) = \sum_{j=1}^{n-1} q_j l_j \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{n-1} l_w + x \right) + \frac{q_n x^2}{2}. \quad (25)$$

Далее последовательно подставлены (25) в (15) и (16), (26) и (27) в (13), получена зависимость (28), выражающая влияние собственного веса заготовки на её деформацию:

$$\int_0^{l_i} \frac{m_{Z(Y)}^q(i)}{EI_i} = \frac{l_i}{EI_i} \left(\sum_{j=1}^{i-1} q_j l_j \times \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{i-1} l_w + \frac{l_i}{2} \right) + \frac{q_i l_i^2}{6} \right); \quad (26)$$

$$\int_0^{l_k} \int_0^{l_k} \frac{m_{Z(Y)}^q(k)}{EI_k} = \frac{l_k^2}{2EI_k} \times \left(\sum_{j=1}^{k-1} q_j l_j \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{k-1} l_w + \frac{l_k}{3} \right) + \frac{q_k l_k^2}{12} \right); \quad (27)$$

$$\Delta_3^q(n) = \sum_{k=1}^n l_k \left[\frac{l_k}{2EI_k} \times \left(\sum_{j=1}^{k-1} q_j l_j \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{k-1} l_w + \frac{l_k}{3} \right) + \frac{q_k l_k^2}{12} \right) + \sum_{i=1}^{k-1} \frac{l_i}{EI_i} \left(\sum_{j=1}^{i-1} q_j l_j \left(\frac{l_j}{2} + \sum_{w=j+1}^{i-1} l_w + \frac{l_i}{2} \right) + \frac{q_i l_i^2}{6} \right) \right]. \quad (28)$$

Таким образом, с учётом вышеизложенных зависимостей и преобразований уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\Delta(n)_{3Y(Z)} = \Delta_{3Y(Z)01} + \theta_{01Y(Z)} \sum_{i=1}^n l_i + \sum \Delta_{3Y(Z)}^M(M_{iZ(Y)}, n_{Pi}, n) + \sum \Delta_{3Y(Z)}^P(P_{iY(Z)}, n_{Pi}, n) + \Delta_3^q(n). \quad (29)$$

Это уравнение описывает значение упругой деформации в конце участка с номером n .

Влияние податливости шпиндельного узла $\Delta_{ШY(Z)}$, задней бабки $\Delta_{БY(Z)}$, инструмента $\Delta_{ИY(Z)}$, а также смещения оси задней бабки $\Delta_{СБY(Z)}$ и геометрических неточностей ТСР на деформацию заготовки подробно рассмотрено в [14]. Эти факторы могут быть учтены посредством задания соответствующих начальных параметров в выражении (29).

На основе уравнения (29), методик структурно-параметрической оптимизации [15] и коррекции траектории движения режущего инструмента [16] разработана интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ ЧПУ, позволяющая управлять точностью токарной обработки на этапе технологической подготовки производства.

Для проверки адекватности и значимости математической модели (29) проводилась обработка партии валов на токарном станке модели 16К20Ф3, оснащённом системой ЧПУ NC-201 с последующим изменением на координатно-измерительной машине DuraMax. Исходные данные эксперимента: диаметры обрабатываемых ступеней $D_1 = 20, D_2 = 25, D_3 = 30$ мм; длины обрабатываемых ступеней $L_1 = L_2 = L_3 = 40$ мм; диаметр заготовки $D_{заг} = 38$ мм; длина заготовки $L_3 = 240$ мм; предел прочности материала заготовки $\sigma_B = 610$ МПа; модуль упругости материала заготовки $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па.

Параметры инструмента: материал режущей пластины – Т15К6; передний угол $\gamma = 0^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$; радиус при вершине $r = 2$ мм.

Результаты измерений приведены на рис. 5. В табл. 1 представлены сравнительные данные измерения погрешности профиля продольного сечения ступеней вала.

Применение интегрированной системы автоматизированного проектирования ступенчатых валов и программ

токарной обработки, основанных на управлении траекторией формообразующих элементов, позволило повысить точность обработки деталей в условиях эксперимента на 20...40 %. Данная сис-

тема может быть использована на промышленных предприятиях для прогнозирования и обеспечения точности изготовления ступенчатых валов.

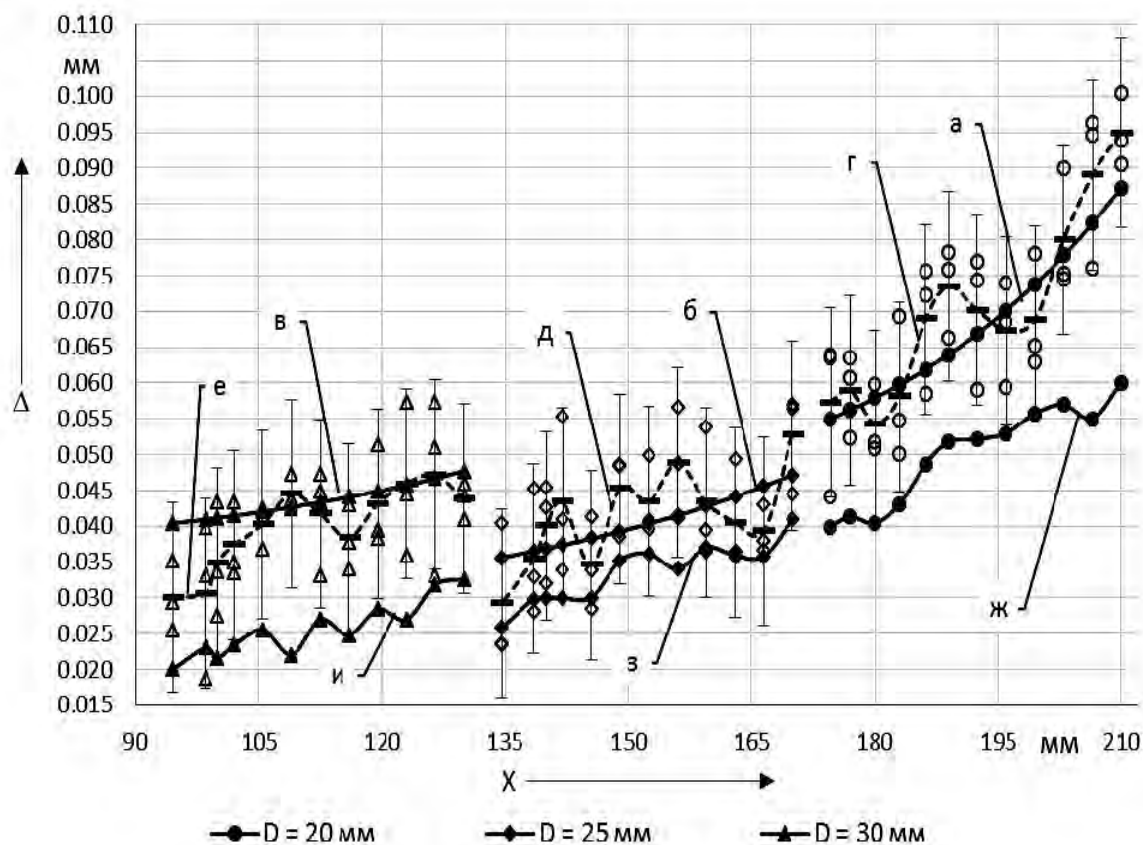


Рис. 5. Погрешности профиля продольного сечения ступеней вала: а-в – построенные на основе формулы (29); г-е – построенные на основе измерений после обработки без коррекции траектории движения режущего инструмента; ж-и – построенные на основе измерений после обработки с коррекцией траектории движения режущего инструмента

Табл. 1. Результаты измерения

Диаметр, мм	Погрешность профиля продольного сечения		
	Наименование	без коррекции, мкм	с коррекцией, мкм
20	Конусность	100,4	61,2
25		57,1	41
30		41	32,5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Жолобов, А. А.** К вопросу технологического обеспечения качества поверхностей деталей при их формировании / А. А. Жолобов, С. В. Гонорова, В. А. Широченко // Отделочно-упрочняющая технология в машиностроении : сб. тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 1994. – Ч. 1. – С. 67–69.
2. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и контроль возможностей технологической системы СПИД / А. А. Жолобов // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения : сб. науч. тр. – Полоцк : Технопринт ; Полоцкий гос. ун-т, 2001. – С. 78–79.
3. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование и обеспечение качества технологических систем на этапах их проектирования и изготовления : монография / А. А. Жолобов. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2005. – 304 с. : ил.
4. **Будкевич, А. М.** Автоматизация прогнозирования деформации технологической системы при точении / А. М. Будкевич, К. А. Шальжин ; науч. рук. А. А. Жолобов, канд. техн. наук, доц. // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Респ. науч.-техн. конф., Могилев, 29 янв. 2004 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2004. – С. 22.
5. **Пашкевич, В. М.** Повышение точности механической обработки и сборки изделий машиностроительного производства на основе построения и использования компьютерных обучающихся систем : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / В. М. Пашкевич ; Белорус. нац. техн. ун-т. – Минск, 2007. – 45 с.
6. **Пашкевич, В. М.** Самообучающиеся системы искусственного интеллекта в машиностроении / В. М. Пашкевич, Ж. А. Мрочек. – Могилев : МГТУ, 2003. – 434 с.
7. **Жолобов, А. А.** К вопросу прогнозирования и контроля геометрической точности технологических систем / А. А. Жолобов // Перспективные технологии, материалы и системы : сб. науч. тр. – Могилев : МГТУ, 2001. – С. 23.
8. **Жолобов, А. А.** Математическая модель для прогнозирования деформации заготовки при точении / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Машиностроение : сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2003. – № 19. – С. 310–314.
9. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование точности деталей при обработке на токарных станках / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 1. – С. 43–46.
10. **Жолобов, А. А.** Автоматизация процесса прогнозирования качества поверхностей деталей / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Вестн. МГТУ. – 2002. – № 2. – С. 11–14.
11. **Жолобов, А. А.** Методика контроля геометрической точности технологического оборудования и деталей / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Могилев, 2004. – С. 160–161.
12. **Жолобов, А. А.** Прогнозирование шероховатости поверхности при точении / А. А. Жолобов, А. М. Будкевич // Машиностроение : Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск : Технопринт, 2002. – № 18. – С. 23–25.
13. **Писаренко, Г. С.** Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев ; отв. ред. Г. С. Писаренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев : Наук, думка, 1988. – 736 с.
14. **Жолобов, А. А.** Особенности расчёта упругих деформаций технологической системы при токарной обработке ступенчатого вала / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3. – С. 87–95.
15. **Казаков, А. В.** Оптимизация режимов резания технологических переходов наружной токарной обработки ступенчатых валов на станке с ЧПУ / А. В. Казаков, А. А. Жолобов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 4. – С. 23–31.
16. **Жолобов, А. А.** Коррекция траектории движения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Полоцкого гос. ун-та. – 2009. – № 9 (серия С). – С. 124–133.

Статья сдана в редакцию 17 января 2014 года

Александр Алексеевич Жолобов, канд. техн. наук, проф., Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

Алексей Владимирович Казаков, ассистент, Белорусско-Российский университет. Тел.: 8-0222-23-04-51.

Aleksandr Alekseyevich Zholobov, PhD (Engineering), Prof., Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.

Aleksei Vladimirovich Kazakov, assistant lecturer, Belarusian-Russian University. Phone: 8-0222-23-04-51.