



УДК 621.941.01

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF THE DEFORMATIONS OF THE
ELEMENTS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM ON THE TREATMENT
ACCURACY UNDER THE TURNING OF NON-RIGID SHAFT
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ
СИСТЕМЫ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ ПРИ ТОЧЕНИИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА
НЕЖЕСТКИЙ ВАЛ**

Tchigirinsky Ju.L. / Чигиринский Ю.Л.*d.t.s., prof. / д.т.н., проф.***Nesterenko P.S. / Нестеренко П.С.***Postgraduate student / аспирант***Kozachuhnenko I.N. / Козачухненко И.Н.***Postgraduate student / аспирант***Smirnova E.N. / Смирнова Е.Н.***Postgraduate student / аспирант**Volgograd State Technical University, Volgograd, Lenin Avenue 28, 400005**Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, пр. Ленина 28,
400005*

Аннотация. В статье рассмотрен механизм формирования погрешности обработки, вызываемой деформациями элементов технологической системы при токарной обработке нежестких валов. Предложена уточненная математическая модель расчета данного вида погрешности, применение которой позволит повысить надёжность технологии на стадии проектирования технологического процесса.

Ключевые слова: токарная обработка, нежесткий вал, точность обработки, погрешность продольного профиля, деформации элементов технологической системы.

Вступление.

В процессе обработки под действием составляющих силы резания элементы технологической системы смещаются из исходного (ненагруженного) состояния, вызывая тем самым взаимное смещение инструмента и заготовки, приводящее к снижению точности выпускаемых изделий [1]. Особо следует выделить обработку деталей типа нежесткий вал, т. к. в силу малой жесткости обрабатываемых заготовок величина данного вида погрешности при их токарной обработке достигает 80 – 90% от общей погрешности обработки [2]. Принятые в технологии машиностроения формулы для расчета погрешности данного вида обладают относительно невысокой сходимостью с экспериментальными данными [3], так как носят упрощенный характер и не учитывают особенностей протекания процесса обработки. Данное обстоятельство обуславливает появление ошибки в технологии обработки ещё на стадии проектирования технологического процесса, в частности при назначении припусков на последующие финишные операции.

Основной текст

Рассмотрим процесс формирования данного вида погрешности обработки на примере обработки гладкого нежесткого вала с креплением в центрах. На рис. 1 показана схема базирования и распределение сил, действующих в



процессе обработки. В приведенной схеме не учитывается центробежная сила инерции, влияние которой на величину упругих деформаций при обработке гладкого вала незначительно [4].

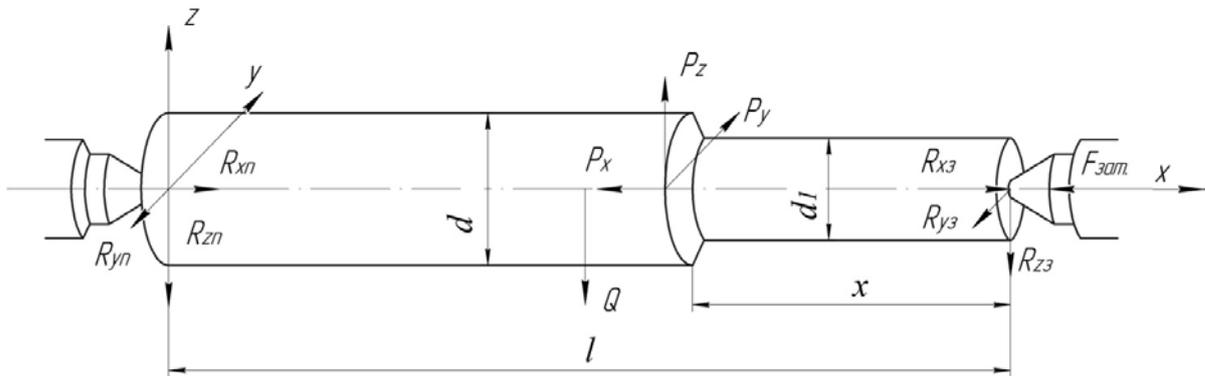


Рис. 1. Схема распределения сил, действующих в процессе обработки

Источник: [2]

Стоит отметить, что непосредственное влияние на точность обработки оказывают упругие деформации системы, обусловленные, прежде всего, действием радиальной составляющей силы резания P_Y , что же касается деформаций под действием тангенциальной составляющей P_Z и осевой составляющей P_X , то их влияние на точность обработки мало, и им можно пренебречь [2].

1. Рассмотрим изгиб оси вала под действием радиальной составляющей силы резания P_Y , считая при этом узлы станка абсолютно жесткими. Тогда, согласно принятому в технологии машиностроения выражению, величина изгиб вала y_{li} может быть определена как:

$$y_{li} = P_Y \cdot \varepsilon_{li} = P_Y \frac{x^2 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot l}; \quad (1)$$

где ε_{li} - податливость заготовки в рассматриваемом сечении; E - модуль упругости второго рода; I - момент инерции вала в рассматриваемом сечении;

Выражение (1) достаточно точно отражают прогиб гладкого вала при его нагружении вне станка [3]. Механизм же возникновения прогиба в процессе обработки существенно отличается случая его статического нагружения. Так с момента начала обработки гладкий вал становится двухступенчатым с непрерывно изменяющимся соотношением длин ступеней. Тогда величина изгиб вала y_{li} может быть определена согласно энергетическом методу:

$$y_{li} = \int_0^x \frac{M_{P_{YI}} \cdot M_{1I}}{E \cdot I_1} dx + \int_x^l \frac{M_{P_{YII}} \cdot M_{1II}}{E \cdot I_2} dx; \quad (2)$$

где $M_{P_{YI}}$ - изгибающий момент от радиальной составляющей силы резания P_Y на обработанном участке; M_{1I} - изгибающий момент от единичной силы на обработанном участке; I_1 - момент инерции поперечного сечения обработанной ступени; $M_{P_{YII}}$ - изгибающий момент от радиальной составляющей силы резания P_Y на обрабатываемом участке; M_{1II} - изгибающий момент от единичной силы на обрабатываемом; I_2 - момент инерции поперечного сечения обрабатываемой ступени;



Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 1, и после преобразований, выражение (2) примет вид:

$$y_{li} = \frac{P_Y \cdot x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{P_Y}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right]; \quad (3)$$

Расчеты показали, что разница в определении величины прогиба по принятой в технологии машиностроения формуле (1) при глубине резания равной $0,25d_1$ достигает 50% по сравнению с расчетом по уточненной формуле (3). Такое соотношение на практике встречается при обработке заготовок с диаметром менее 40 мм.

2. Рассмотрим отжатия центров станка под действием радиальной составляющей силы резания P_Y . Рассматривая поведение вала, обрабатываемого на отжимающихся центрах, будем считать вал абсолютно жестким и суппорт неподатливым. По действием силы P_Y в процессе обработки центра станка упруго отжимаются, а по снятии нагрузки возвращаются в свое исходное положение (рис. 2). Так, в начальном положении резца передний центр, не испытывая нагрузки, будет находиться в покое ($y_{\Pi} = 0$), а задний центр под действием силы P_Y переместится на величину:

$$y_3 = P_Y \cdot \varepsilon_3; \quad (4)$$

где y_3 – смещение задней бабки в крайнем левом положении; ε_3 – податливость задней бабки.

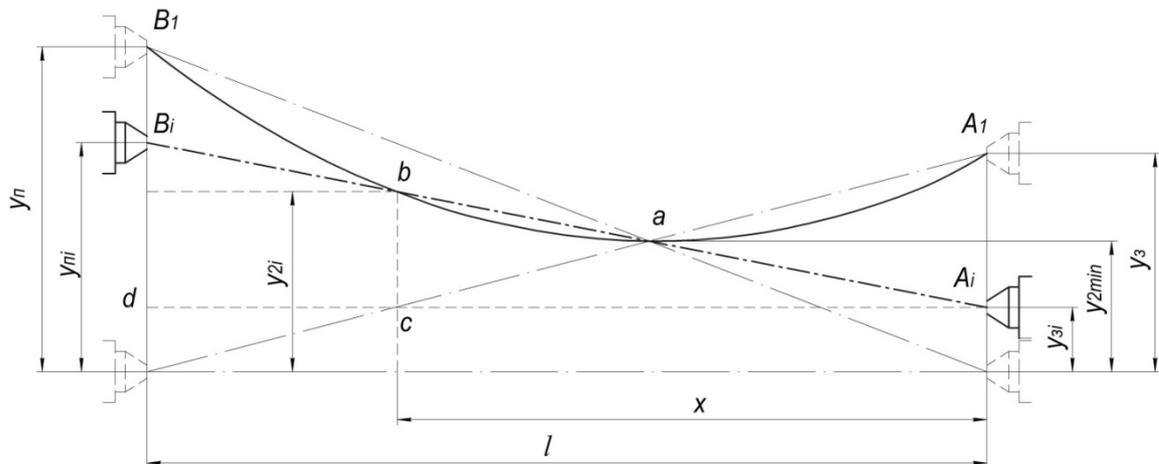


Рис. 2. Отжатие центров станка под действием силы P_Y

Источник: [2]

По мере перемещения резца к передней бабке отжатие заднего центра уменьшается до нуля, а отжатие переднего центра возрастает и достигает своего максимума при крайнем левом положении резца. Таким образом, упругие отжатия бабок вызывают непрерывные изменения положения оси вала, вследствие чего возникает погрешность обработки в виде корсетности. Кривая A_1aB_1 на рис. 2, выражает собой искаженный профиль вала. Прямая A_iB_i , соединяющая отложенные отжатия центров при расположении резца на расстоянии i от заднего центра, является осью смещенного вала в этом положении. Пересечение линии A_iB_i с осью резца дает точку b , ордината которой y_{2i} выражает собой увеличение радиуса вала в данном поперечном



сечении в следствии отжатия центров. Величина погрешности y_{2i} может быть найдена и аналитически, исходя из подобия треугольников $A_i c b$ и $A_i d B_i$:

$$\frac{x}{l} = \frac{y_{2i} - y_{3i}}{y_{3i} - y_{3i}}; \quad (5)$$

Откуда

$$y_{2i} = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot y_{3i} + \frac{x}{l} \cdot y_{3i}; \quad (6)$$

Так как деформация бабок прямо пропорциональна нагрузкам, то можно записать:

$$\begin{cases} y_{3i} = P_Y \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot \varepsilon_3; \\ y_{3i} = P_Y \cdot \frac{x}{l} \cdot \varepsilon_{II}. \end{cases} \quad (7)$$

Подставив выражения (7) в формулу (6), получим уравнение линии профиля вала:

$$y_{2i} = P_Y \cdot \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right]; \quad (8)$$

3. Деформация суппорта под действием радиальной составляющей силы P_Y . Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных станков показал, что податливость суппорта ε_C в случае его надлежащей сборки и исправного состояния остается практически постоянной на всей длине обработки, и при условии постоянства силы P_Y , его отжатие равно:

$$y_{3i} = P_Y \cdot \varepsilon_C; \quad (9)$$

Таким образом, деформации суппорта не вызывают появления погрешности формы обтачиваемого вала, однако вызывает увеличение его диаметра:

$$\Delta_3 = 2 \cdot y_{3i} = 2 \cdot P_Y \cdot \varepsilon_C; \quad (10)$$

При проведенном выше анализе было принято, что величина радиальной составляющей силы резания P_Y остается постоянной в процессе обработки, но в действительности, вследствие неравномерности податливости системы, изменяется глубина резания, величина которой, как известно из теории резания, оказывает непосредственное влияние на величину силы P_Y . Так, в начальный момент, когда произойдет полное врезание резца, система займет начальное деформированное положение. В дальнейшем, по ходу обработки величина деформации системы будет меняться, вследствие чего изменится и глубина резания. Изменение глубины резания в зависимости от упругих деформаций системы в общем виде можно выразить:

$$t_i = t - y_i; \quad (11)$$

где t_i – глубина резания при рассматриваемом положении резца; t – номинальная глубина резания; y_i — деформация системы при рассматриваемом положении резца.

Из теории резания металлов известно [5]:

$$P_Y = 10 \cdot C_p \cdot t^{xp} \cdot S^{yp} \cdot U^{np} \cdot K_p; \quad (12)$$



где S – подача; U – скорость резания; C_p , x_p , y_p , n_p – коэффициент и показатели степени соответственно; K_p – поправочный коэффициент.

Для выявления влияния непостоянства податливости системы на величину радиальной составляющей силы резания, примем, что физико-механические характеристики материалов заготовки и инструмента, припуск на обработку и все режимные параметры обработки, кроме глубины резания, остаются неизменными в процессе обработки. Тогда справедливо выражение:

$$P_{Yi} = C \cdot (t - y_i); \quad (13)$$

где $C = 10 \cdot C_p \cdot S^{x_p} U^{y_p} K_p = \text{const}$ – постоянная для данных условий обработки; P_{Yi} – величина радиальной составляющей резания с учетом влияния непостоянства податливости системы.

После преобразования выражение (13) примет вид:

$$P_{Yi} = \frac{P_Y}{1 + C \cdot \varepsilon_i}; \quad (14)$$

где ε_i — податливость системы в рассматриваемом положении реза.

Уравнение (14) позволяет определить величину P_Y в любой точке по длине вала в зависимости от податливости системы.

Величина податливости системы в рассматриваемом положении реза может быть определена исходя из выражений (3), (8), (10):

$$\varepsilon_i = \frac{x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{1}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right] + \left[\left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right] + \varepsilon_C; \quad (15)$$

Окончательно формула для расчета погрешности обработки Δ_Σ , вызванной упругими деформациями элементов технологической системы при токарной обработке деталей типа нежесткий вала в центрах примет вид:

$$\Delta_\Sigma = \frac{P_Y}{1 + C \cdot \varepsilon_i} \cdot \left\{ \frac{x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{1}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right] + \left[\left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right] + \varepsilon_C \right\}; \quad (16)$$

В таблице 1 и на рис. 3 представлены экспериментальные данные исследования погрешности обработки Δ_Σ , возникающей при точении вала диаметром 24,8 мм и длиной 325 мм из стали 45 на токарном станке с ЧПУ модели 16A20 Ф3 режущей пластиной T15K6 при следующих режимах резания: подача - 0,25 мм/об, глубина резания - 0,6 мм, скорость резания - 46,3 м/мин, приведенные в работе [6]. Также в табл. 1 и на рис. 3 представлены данные полученные путем расчета погрешности обработки по уточненной формуле (16) и по традиционной формуле, приведённой в источнике [7].



Таблица 1

Экспериментальные данные и результаты расчета погрешности обработки по теоретическим зависимостям.

Рассматриваемое сечение x , мм	Экспериментальные данные		Расчетные данные (по традиционной формуле [7])		Расчетные данные (по уточненной формуле (16))	
	D , мм	Δ_{Σ} , мм	Δ_{Σ} , мм	Отклонение, %	Δ_{Σ} , мм	Отклонение, %
1	2	3	4	5	6	7
325	23,71	0,11	0,090	18,08	0,090	18,08
300	23,72	0,12	0,089	25,58	0,089	25,41
275	23,73	0,13	0,107	17,80	0,108	16,74
250	23,75	0,15	0,133	11,57	0,136	9,01
225	23,77	0,17	0,159	6,71	0,166	2,37
200	23,79	0,19	0,179	5,99	0,190	0,01
175	23,80	0,20	0,189	10,15	0,204	2,98
150	23,82	0,22	0,187	15,11	0,204	7,12
125	23,81	0,21	0,172	17,69	0,191	9,02
1	2	3	4	5	6	7
100	23,79	0,19	0,149	21,60	0,166	12,86
75	23,77	0,17	0,119	29,90	0,132	22,37
50	23,74	0,14	0,089	36,05	0,097	30,64
25	23,70	0,10	0,068	31,88	0,071	29,42
0	23,67	0,07	0,065	7,03	0,065	7,03

Авторская разработка

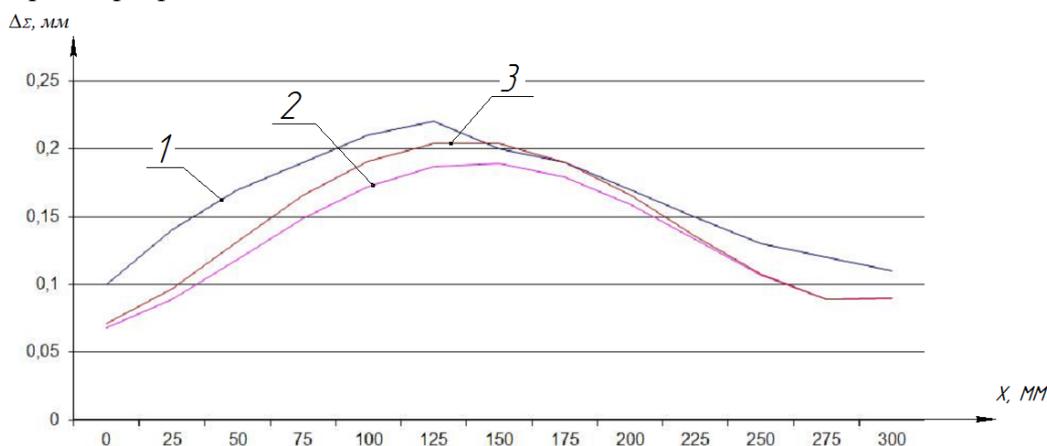


Рис. 6. Отклонение размеров обработанных валов от заданных значений: 1 – экспериментальные данные; 2 – данные по расчету по традиционной методике; 3 – данные по расчету по уточненной формуле

Авторская разработка

Значительное расхождение расчетных данных, полученных при расчете по уточненной формуле (40), с экспериментальными данными в начале процесса обработки может свидетельствовать о том, что обработка велась без достаточного предварительного поджатия заднего центра (сползание центра). Расхождение данных в конце обработки объясняется значительном износе металлорежущего инструмента по ходу обработки.

Заклучение и выводы.

Анализ приведенных данных показал, что предложенная уточненная математическая модель расчета погрешности обработки, обусловленной



деформациями элементов технологической системы, обладает более высокой сходимостью результатов с экспериментальными данными по сравнению с традиционными математическими моделями, принятыми в технологии машиностроения. Использование данной математической модели позволит повысить надёжность технологии обработки на стадии проектирования технологического процесса, в частности при назначении припусков на последующие финишные операции.

Литература:

1. Перельгина Т. А., Фролова А. В. Влияние сил, действующих в технологической системе на точность обработки нежестких валов // Молодой ученый. — 2015. — №14.2. — С. 75-78.
2. Подпоркин, В. Г. Обработка нежестких деталей. — М.; Л.: Машгиз, 1959. — 208 с.
3. Балакшин, Б. С. Адаптивное управление станками / Б. С. Балакшин. — М.: Машиностроение, 1973. — 688 с.
4. Чигиринский, Ю.Л. К вопросу управления точностью продольного профиля деталей типа нежесткий вал / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 5 (200). - С. 43-45.
5. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2/ Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 2003, - 943 с.
6. Набнпкин А.Ю. Автоматизированная система управления формой нежестких валов при токарной обработке / А.Ю. Набилкип, С.А. Кравченко, В.П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2012. №3 (34). Часть 1. С. 321-330.
7. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 496 с., ил

Abstract. The article considers the mechanism of forming the processing error caused by deformations of the elements of the technological system during turning processing of nonrigid shafts. A refined mathematical model for calculating this type of error is proposed, the application of which will increase the reliability of the technology at the design stage of the technological process.

Key words: turning, non-rigid shaft, treatment accuracy, error of longitudinal profile, deformation of the elements of technological system.

References:

1. Perelygina T. A., Frolova A. V. Vliyanie sil, dejstvuyushchih v tekhnologicheskoy sisteme na tochnost' obrabotki nezhestkih valov // Molodoj uchenyj. — 2015. — №14.2. — S. 75-78.
2. Podporkin, V. G. Obrabotka nezhyostkikh detalej. — M.; L.: Mashgiz, 1959. — 208 s.
3. Balakshin, B. S. Adaptivnoe upravlenie stankami / B. S. Balakshin. — M.: Mashinostroenie, 1973. — 688 s.
4. Tchigirinsky, J.L. K voprosu upravleniya tochnost'yu prodol'nogo profilya detalej tipa



nezhyostkij val / J.L. Tchigirinskij, P.S. Nesterenko // Izvestiya VolgGTU. Ser. Progressivnye tekhnologii v mashinostroenii. - Volgograd, 2017. - № 5 (200). - С. 43-45.

5. Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya. V 2-h t. T. 2/ Pod red. A.G. Kosilovoj i R.K. Meshcheryakova. – 4-e izd., pererab. i dop. – M.: Mashinostroenie, 2003, - 943 s. \

6. Nabnppkin A.YU. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya formoj nezhyostkih valov pri tokarnoj obrabotke / A.YU. Nabilkip, S.A. Kravchenko, V.P. Biryukov // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aehrokosmicheskogo universiteta. 2012. №3 (34). Chast' 1. S. 321-330.

7. Matalin, A. A. Tekhnologiya mashinostroeniya : uchebnik dlya mashinostroitel'nyh vuzov po special'nosti «Tekhnologiya mashinostroeniya, metallorezhushchie stanki i instrumenty». – L. : Mashinostroenie, Leningr. otd- nie, 1985. – 496 s., il

Статья отправлена: 07.05.2018 г.

© Чигиринский Ю.Л., Нестеренко П.С., Козачухненко И.Н., Смирнова Е.Н.