

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ В ЦЕНТРАХ НА СТАНКАХ С ЧИСЛОВЫМ ПРОГРАММНЫМ УПРАВЛЕНИЕМ

В.Ф. Пегашкин, А.П. Старостин

Нижнетагильский технологический институт (филиал)

*Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
г. Нижний Тагил, Россия*

В статье описывается метод расчета траектории движения токарного инструмента на станке с числовым программным управлением для компенсации упругой деформации при обработке заготовки. В процессе точения тел вращения с малой жесткостью под действием режущей силы P_y происходят упругие деформации, что негативно влияет на точность обработанной поверхности. Вследствие этого появляется погрешность в виде бочкообразности, седлообразности или комбинации данных погрешностей в зависимости от жесткости станка и его отдельных частей. На основе расчета деформации при постоянной глубине резания предлагается определить погрешность, которую необходимо в дальнейшем компенсировать с помощью приведенного метода расчета. Он позволяет проводить компенсацию за счет предсказания траектории на этапе программирования управляющей программы. Тем самым в процессе точения будет получен требуемый диаметр с минимальными погрешностями, что в свою очередь положительно будет влиять на сокращение дополнительной обработки для удаления погрешностей формы и повышения качества обработки детали.

Ключевые слова: обработка вала, точение, станки с ЧПУ, погрешность формы, точность обработки, деформация вала, сила резания.

Введение

Повышение качества деталей является приоритетным направлением совершенствования современного машиностроительного производства. Широкий парк станков с числовым программным управлением создает требуемые условия для повышения точности обработки заготовок.

Маложесткие детали типа валов (с отношением длины к диаметру более 10) требуют особого подхода при их обработке, так как значительные упругие деформации детали, возникающие в процессе резания, приводят к погрешностям ее размеров и формы.

Для решения проблемы в работе [1] предложен алгоритм расчета погрешностей при обработке вала. Авторы предлагают предварительно рассчитывать погрешности и вносить требуемые изменения уже при обработке. Ж.А. Мрожек с соавторами делают вывод, что глубина резания имеет большее влияние на упругую деформацию по сравнению с подачей, и отмечают, что на основе предложенного алгоритма необходимо искать экстремальные точки упругой линии оси вала. Также производить расчет промежуточных погрешностей. Соответственно, авторы статьи предлагают повысить точность обработки на этапе проектирования с помощью трудоемких расчетов и не полного описания погрешностей в каждой точке обрабатываемой длины вала, что будет усложнять процесс производства конкретного вала в реальном производстве, а также не в полной мере описывать упругую деформацию вала.

В исследованиях [2–8] авторы предлагают другие способы решения данной задачи или проводят эксперименты для доказательства наличия ошибки. В частности, повысить точность обработки нежестких деталей типа «вал» путем ступенчатого изменения скорости подачи. Но для этой реализации требуется предварительный проход для определения термоЭДС, снятие показаний с датчика обратной связи для определения силы резания в зоне контакта инструмент – заготовка. Однако повышение точности таким методом будет негативно сказываться на качестве поверхности, т. е. в точке изменения подачи будет происходить выстой инструмента и образовываться канавка. Еще одним недостатком можно считать увеличение машинного времени в связи с уменьшением подачи к середине вала.

В статьях [8–15] авторы приводят результаты экспериментов по определению погрешности обработки вала и делают выводы о зависимости режимов резания и влияния жесткости станка, либо предлагают использовать дополнительные устройства (типа люнетов), что для станков с ЧПУ нежелательно. Также стоит отметить, что предлагаемый метод повышения точности в статье [15] трудозатратен для реального производства и требует большое количество времени.

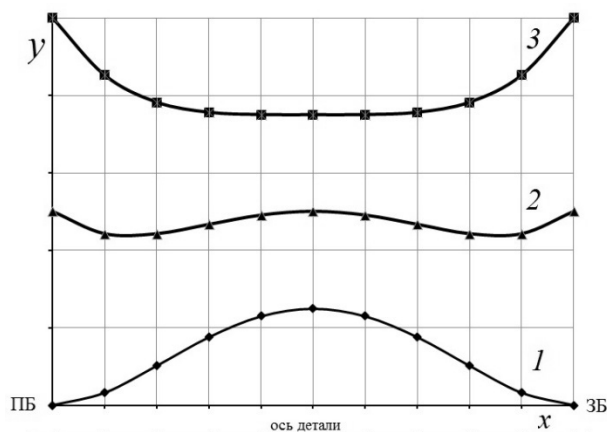


Рис. 1. Зависимость деформации технологической системы (y) от координаты инструмента (x) при различных соотношениях жесткостей (податливостей) элементов станка и детали: ПБ – передняя бабка; ЗБ – задняя бабка

сткой детали после обработки получим выпуклый профиль (рис. 1, кр. 1). Если деталь имеет жесткость, превышающую жесткость элементов станка, то после обработки получим вогнутый профиль (рис. 1, кр. 3) [6]. Естественно предположить, что существует какое-то промежуточное соотношение жесткостей детали и станка, при котором искажение профиля детали будет минимальным (рис. 1, кр. 2). Для определения условий наименьшей погрешности формы проанализируем возможные схемы базирования вала при обработке.

Расчетные зависимости упругой деформации

Деформация технологической системы при базировании детали постоянного по длине профиля определяется по известной зависимости

$$y = P_y \omega_{тс}, \quad (1)$$

где P_y – составляющая силы резания, $\omega_{тс}$ – податливость технологической системы.

В работе [7] подробно описываются различные варианты базирования нежестких деталей. Следовательно, для расчета деформации при базировании детали в центрах уравнение имеет вид

$$y = P_y \left[\mu \frac{x^2(1-x)^2}{3EJl} + \left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ПБ} + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \omega_{ЗБ} + \omega_C \right], \quad (2)$$

где x – координата силы по длине детали от передней бабки; l – длина детали; J – момент инерции детали (для круглого сплошного сечения вала диаметром d $J = 0,048d^4$); E – модуль упругости материала детали; $\omega_{ПБ}$, $\omega_{ЗБ}$, ω_C – податливости соответственно передней бабки, задней бабки и суппорта; μ – коэффициент динамичности.

Таким образом, прогиб y не должен превышать допустимого значения прогиба $[y]$. Соответственно, за допустимое значение прогиба как эквивалент возможно принять допуск формы

$$y \leq [y]. \quad (3)$$

Также при процессе обработки учитывается сила резания P_y , которая будет определяться по формуле [8]:

$$P_y = 10C_p v^u S^x t^z, \quad (4)$$

где C_p – постоянный коэффициент; v – скорость резания; S – подача; t – глубина резания; u , x , z – показатели степени.

Для анализа данных принимались следующие данные: сталь 45, $l = 2000$ мм, $d = 90$ мм, $j_{ст} = 20\,000$ Н/мм, $E = 210$ ГПа.

В связи с этим можно выделить несколько направлений решения данной проблемы:

- изменение режимов резания в процессе обработки с предварительным прогнозированием процесса обработки детали;
- создание дополнительных устройств для определения динамических характеристик в процессе резания и их последующего изменения;
- внесение изменений в траекторию движения инструмента.

При обработке деталей типа «вал» на станках токарной группы имеем нежесткую технологическую систему. В связи с этим появляется значительное отклонение формы обработанной поверхности. Рассматривая технологические системы с различной жесткостью, можно определить два крайних случая. При жестких элементах станка и нежесткой

Режимы резания: $C_p = 243$, $n = 500$ об/мин, $S = 0,5$ мм/об, $t = 0,5$ мм, $x = 0,6$, $u = 0,3$, $z = 0,9$. По данным параметрам был получен график податливости технологической системы (рис. 2).

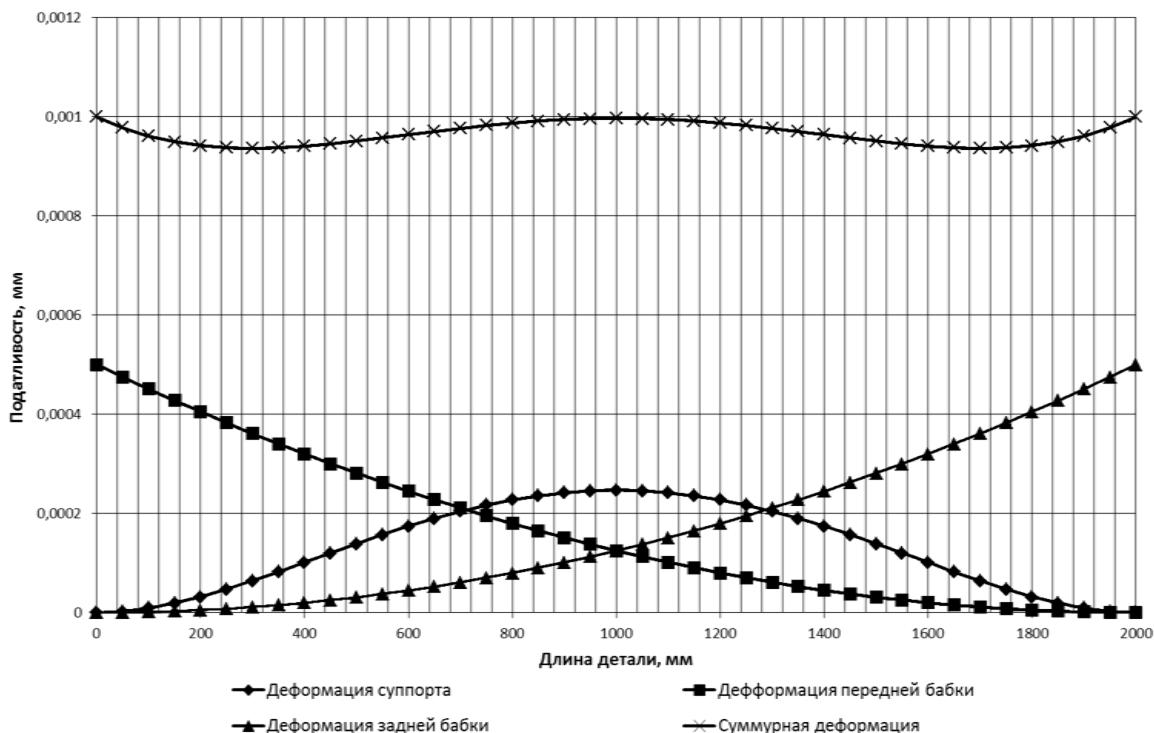


Рис. 2. График изменения податливости технологической системы

Одним из способов решения задачи повышения точности обработки нежестких валов является предсказание траектории инструмента. Таким образом, проводя предварительные математические расчеты на основе формулы (2), можем спрогнозировать первоначальный прогиб при номинальной подаче, глубине резания и частоты вращения шпинделя. Полученный профиль детали можно увидеть на рис. 3.

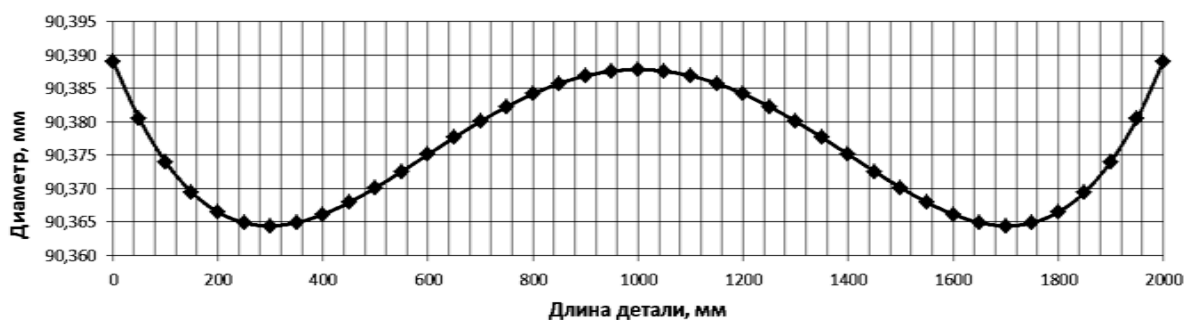


Рис. 3. Профиль вала после обработки

Учитывая математическую модель деформации технологической системы, требуется добиться выполнения следующей закономерности

$$t = t_{\text{расч}} - u_{\text{расч}}, \tag{5}$$

где $t_{\text{расч}}$ – расчетная глубина резания в конкретной координате по оси OZ , $u_{\text{расч}}$ – расчетная деформации профиля детали при $t_{\text{расч}}$.

Учитывая тот факт, что при жестких элементах станка и нежесткой детали после обработки получаем выпуклый профиль, то при обработке нам необходимо будет компенсировать данную выпуклость, скорректировав глубину резания на величину упругой деформации в конкретной координате по оси OZ . Тогда сила резания с учетом изменившейся глубины резания будет равна

$$P'_y = 10C_p v^u S^x (t + y)^z. \tag{6}$$

Но в таком случае у нас изменится величина упругой деформации, что опять приведет к изменению силы резания. Проводя дальнейший анализ, можно прийти к выводу, что увеличение глубины резания t можно не проводить бесконечно, а ограничиться изменением на величину деформации при номинальной глубине резания, увеличенную на соотношение (i) измененной силы резания P'_y с учетом деформации y при заданной начальной t на силу резания при номинальной глубине резания

$$i = \frac{P'_y}{P_y}. \quad (7)$$

Объединяя формулы (3) и (4), получаем

$$i = \left(\frac{t+y}{t}\right)^2. \quad (8)$$

Далее, учитывая величину изменения деформации, можно рассчитать $t_{\text{расч}}$.

$$t_{\text{расч}} = t + yi. \quad (9)$$

Проводя математические расчеты при глубине резания $t_{\text{расч}}$, получаем упругую деформацию $U_{\text{факт}}$.

Из всего вышеизложенного и формулы (4) можно сделать вывод, что для осуществления проверки должно соблюдаться равенство

$$d_3 - 2(t_{\text{расч}} - y_{\text{расч}}) = d, \quad (10)$$

где d_3 – диаметр заготовки, d – диаметр детали после обработки.

Следовательно, при расчетах можно увидеть, что диаметр детали после обработки равен номинальному размеру на чертеже. Сравнение траектории движения, полученного диаметра с учетом измененной глубины резания по сравнению с полученным диаметром при номинальной глубине резания можно увидеть на рис. 4.

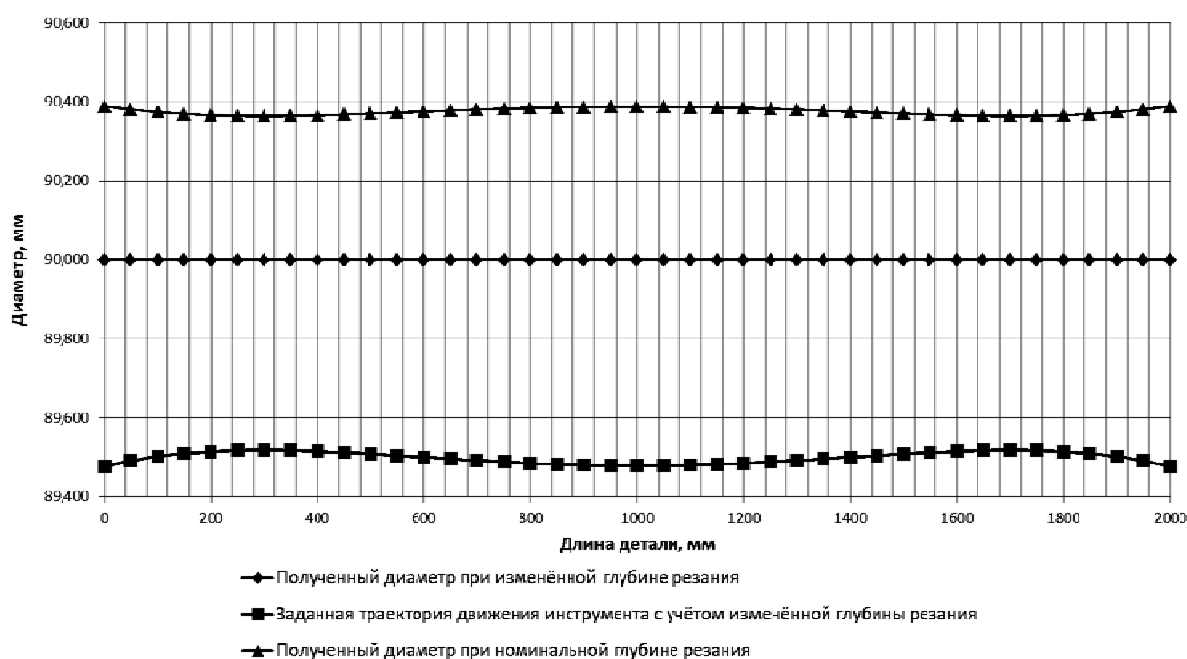


Рис. 4. Сравнение полученных диаметров и траектории движения инструмента

Вывод

В заключение стоит отметить, что для расчета заданной траектории движения требуется вычислить упругую деформацию при номинальной глубине резания, после чего определить коэффициент i по формуле (8) и рассчитать траекторию движения инструмента для каждой точки.

Предложенная выше методика позволяет определить упругую деформацию вала во время обработки в процессе написания управляющей программы и сократить дальнейшие затраты при получении высоких точностных характеристик нежестких деталей типа валов малого диаметра.

Литература

1. Исследование точности при обработке валов в центрах на токарных станках / Ж.А. Мрожек, Г.Ф. Шатуров, Э.И. Ясюкович, Д.Г. Шатуров // Вестник БНТУ. Серия Металлургия. Металлообработка. Машиностроение. – 2006. – № 3. – С. 30–34.
2. Плотников, А.Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ: моногр. / А.Л. Плотников, А.О. Таубе. – Волгоград: Волгоград. науч. изд-во, 2003. – 184 с.
3. Плотников, А.Л. Approach to ensure the required accuracy non-rigid shaft turning on numerical controlled machines / А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, А.А. Жданов // Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach : research articles. Vol. 4. Technical Sciences / ed. by A. Burkov. – Titusville (FL, USA), 2012. – P. 6–9.
4. Способы регулирования точности при обработке нежестких валов на токарных станках с ЧПУ / А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, А.А. Шмаров, Д.С. Ключиков // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 8: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ. – 2012. – № 13 (100). – С. 39–43.
5. Плотников, А.Л. Проблемы обеспечения расчетной точности токарной обработки в САПР ТП и методы их решения / А.Л. Плотников, Э.И. Мустафаев, А.А. Шмаров // Изв. ВолгГТУ. Серия «Прогрессивные технологии в машиностроении». Вып. 7: межвуз. сб. науч. ст. – Волгоград: ВолгГТУ. – 2011. – № 13. – С. 87–90.
6. Пегашкин, В.Ф. Влияние технологических параметров на погрешность формы деталей: учеб. пособие / В.Ф. Пегашкин, Е.В. Пегашкина. – Нижний Тагил: НТИ (ф) УГТУ-УПИ, 2007. – 104 с.
7. Подпоркин, В.Г. Обработка нежестких деталей / В.Г. Подпоркин – М.-Л.: МАШГИЗ, 1959. – 208 с.
8. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т. / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985. – Т. 2. – 656 с.
9. Karabulut, A. Experimental investigation of diametric errors during cylindrical turning / A. Karabulut // Journal of the faculty of engineering and architecture of gazi university. – 2010. – Vol. 25, no. 2. – P. 257–265.
10. Karabulut, A. Determination of diametral error using finite elements and experimental method / A. Karabulut // METALURGIJA. – 2010. – Vol. 49. – Iss. 1. – P. 57–60.
11. Pisarciuc, C. The use of statistical process control to improve the accuracy of turning / C. Pisarciuc // 20th innovative manufacturing engineering and energy conference (IMANEE 2016). Ser. Materials Science and Engineering. – IOP Publishing Ltd, 2016. – Vol. 161. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012011
12. Accuracy Control in the Machining of Low Rigidity Shafts. Industrial and service robotics / A. Swic, D. Wolos, J. Zubrzycki et al. // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 613. – P. 357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.613.357
13. Swic, A. Method of control of machining accuracy of low-rigidity elastic-deformable shafts / A. Swic, D. Wolos, G. Litak // Latin american journal of solids and structures. – 2003. – Vol. 23, iss. 3. – P. 221–232. DOI: 10.1016/S0307-904X(02)00122-1
14. Micro-geometry Surface Modelling in the Process of Low-Rigidity Elastic-Deformable Shafts Turning / A. Swic, A. Gola, D. Wolos, M. Opielak // Iranian journal of science and technology-transactions of mechanical engineering. – 2017. – Vol. 41, iss. 2. – P. 159–167. DOI: 10.1007/s40997-016-0050-4
15. Finite element and experimental studies of diametral errors in cantilever bar turning / A.V. Phan, L. Baron, J.R.R. Mayer, G. Cloutier // Applied mathematical modeling. – 2003. – Vol. 27, iss. 3. – pp. 221–232.

Пегашкин Владимир Федорович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил, v.f.pegashkin@urfu.ru.

Старостин Андрей Павлович, аспирант, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Нижний Тагил, ap-star@yandex.ru.

Поступила в редакцию 20 ноября 2017 г.

INCREASE OF ACCURACY OF PROCESSING OF NON-RIGID PARTS IN CENTRALS ON THE MACHINE WITH CNC

V.F. Pegashkin, v.f.pegashkin@urfu.ru,

A.P. Starostin, ap-star@ya.ru

Nizhny Tagil Institute of technology (branch) of the Ural Federal University of the first President of Russia Boris Yeltsin, Nizhny Tagil, Russian Federation

The article describes a method of calculating a trajectory of a lathe tool on a CNC machine to compensate elastic deformation during processing of a workpiece. In the process of turning bodies of rotation with a small rigidity under the action of the cutting force P_y the elastic deformation take place, which adversely affects the accuracy of the machined surface. As a result, you receive the error in the form of barrel-shaped, celebratory or a combination of these errors depending on the stiffness of the machine and its individual parts. Based on the calculation of deformation at a constant depth of cut is proposed to determine error, which should further offset using the given calculation method. It allows for compensation by pre-emphasis of the trajectory in the programming phase of the control program. Thus in the process of turning is obtained the desired diameter with a minimum error, which is lead a positively influence the reduction additional treatment for removal of errors of form and improvement of quality of processing parts.

Keywords: shaft processing, turning, machine with CNC, shape error, accuracy of machining, deformation of shaft, cutting force.

References

1. Mrozhek Zh.A., Shaturov G.F., Yasyukovich E.I., Shaturov D.G. *Issledovanie tochnosti pri obrabotke valov v tseentrakh na tokarnykh stankakh* [Accuracy Study when Machining Shaft Centres on Lathe]. *Bulletin of BNTU. Series Metallurgy. Metalworking. Mechanical Engineering*, 2006, no. 3, pp. 30–34.
2. Plotnikov A.L., Traube A.O. *Upravlenie rezhimami rezaniya na tokarnykh stankakh s ChPU* [Control of Cutting Conditions on CNC Lathes]. Volgograd, Volgograd. Sci. Publishing House, 2003. 184 p.
3. Plotnikov A.L., Chigirinskiy Yu.L., Zhdanov A.A.; Burkov A. (Ed.) Approach to Ensure the Required Accuracy Non-Rigid Shaft Turning on Numerical Controlled Machines. *Scientific Enquiry in the Contemporary World: Theoretical Basics and Innovative Approach: research articles. Technical Sciences*. Titusville, FL, USA, 2012, vol. 4, pp. 6–9.
4. Plotnikov A.L., Chigirinskiy Yu.L., Shmarov A.A., Klyuykov D.S. [Principles of Accuracy Regulation in the Processing of Heavy Shafts on CNC Turning Machines]. *Izv. VolgGTU. Ser. Progressive Technologies in Mechanical Engineering. Interuniversity. Sat. Sci. Art.*, Volgograd, 2012, no. 13 (100), iss. 8, pp. 39–43.
5. Plotnikov A.L., Mustafayev E.I., Shmarov A.A. *Problemy obespecheniya raschetnoy tochnosti tokarnoy obrabotki v SAPR TP i metody ikh resheniya* [Problems of Ensuring the Calculated Accuracy of Turning in CAD and the Methods of Their Solution]. *Izv. VolgGTU. Ser. Progressive Technologies in Mechanical Engineering. Interuniversity. Sat. Sci. Art.*, Volgograd, 2011, no. 13, iss. 7, pp. 87–90.
6. Pegashkin V.F., Pegashkina E.V. *Vliyanie tekhnologicheskikh parametrov na pogreshnost' formy detaley* [The Influence of Technological Parameters on the Error in the Shape of Parts. Tutorial]. Nizhny Tagil, 2007. 104 p.
7. Podporkin V.G. *Obrabotka nezhestkikh detaley* [Processing of Non-Rigid Parts]. Moscow-Leningrad, 1959. 208 p.
8. Kosilova A., Meshcheryakov R. (Eds.) *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitel'ya* [The Reference Book of the Technologist-Machine Builder. In 2 Vol.]. M., Mechanical Engineering, 1985, Vol. 2. 656 p.
9. Karabulut A. Experimental Investigation of Diametric Errors During Cylindrical Turning. *Journal of the faculty of engineering and architecture of gazi university*, 2010, vol. 25, no. 2, pp. 257–265.

10. Karabulut A. Determination of Diametral Error Using Finite Elements and Experimental Method. *Metalurgiya*, 2010, vol. 49, iss. 1, pp. 57–60.
11. Pisarciuc C. The Use of Statistical Process Control to Improve the Accuracy of Turning. *20th Innovative Manufacturing Engineering and Energy Conference (IMANEE 2016)*, 2016, vol. 161. DOI: 10.1088/1757-899X/161/1/012011
12. Swic A., Wolos D., Zubrzycki J., Opielak M., Gola A., Taranenko V. Accuracy Control in the Machining of Low Rigidity Shafts. *Industrial and Service Robotics. Applied Mechanics and Materials*, 2014, vol. 613, pp. 357. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.613.357
13. Swic A., Wolos D., Litak G. Method of Control of Machining Accuracy of Low-Rigidity Elastic-Deformable Shafts. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 2003, vol. 23, iss. 3, pp. 221–232. DOI: 10.1016/S0307-904X(02)00122-1
14. Swic A., Gola A., Wolos D., Opielak M. Micro-Geometry Surface Modelling in the Process of Low-Rigidity Elastic-Deformable Shafts Turning. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, 2017, vol. 41, iss. 2, pp. 159–167. DOI: 10.1007/s40997-016-0050-4
15. Phan A.V., Baron L., Mayer J.R.R., Cloutier G. Finite Element and Experimental Studies of Diametral Errors in Cantilever Bar Turning. *Applied Mathematical Modelling*, 2003, vol. 27, iss. 3, pp. 221–232.

Received 20 November 2017

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Пегашкин, В.Ф. Повышение точности обработки нежестких деталей в центрах на станках с числовым программным управлением / В.Ф. Пегашкин, А.П. Старостин // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 51–57. DOI: 10.14529/engin180106

FOR CITATION

Pegashkin V.F., Starostin A.P. Increase of Accuracy of Processing of Non-Rigid Parts in Centrals on the Machine with CNC. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 51–57. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin180106
