

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ

*А. Ю. ГОРЕЛОВА, аспирант, инженер-исследователь
М. Г. КРИСТАЛЬ, доктор техн. наук, профессор
(ВолГТУ, г. Волгоград)*

Поступила 16 июня 2015

Рецензирование 3 июля 2015

Принята к печати 7 августа 2015

Горелова А. Ю.—400005, г. Волгоград, пр. Ленина, 28,
Волгоградский государственный технический университет,
e-mail: forasyoo@gmail.com

Обработка глубоких отверстий сопровождается вибрациями системы СПИЗ различного рода. Среди них выделяют резонансные вибрации, возникающие при кратности частоты вынужденных колебаний, зависящей от режимов обработки, частоте собственных колебаний инструмента. Они приводят к появлению погрешностей формы и размера отверстия. Для уменьшения амплитуды резонансных вибраций предложен метод обработки глубоких отверстий, заключающийся в использовании инструмента, оснащенного гироскопическим стабилизатором. Предложен новый инструмент для обработки глубоких отверстий. Разработана и изготовлена экспериментальная установка для исследования процесса гашения колебаний инструмента по предложенному методу. Достигнуто уменьшение амплитуды резонансных колебаний в 9 раз при частотах вынужденных колебаний в диапазоне 152...1100 рад/с для частот собственных колебаний модели инструмента $\omega_{01} = 9,41$ рад/с, $\omega_{02} = 9,55$ рад/с, $\omega_{03} = 9,99$ рад/с, $\omega_{04} = 10,11$ рад/с. Установлено, что для достижения наименьшего значения амплитуды вибраций необходимо поддерживать систему СПИЗ в состоянии, близком к резонансному. Это позволит минимизировать увод оси отверстия и его последствия, снижающие точность обработки глубокого отверстия.

Ключевые слова: расточной инструмент, гироскопический стабилизатор для инструмента.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-75-81

Введение

Многие изделия содержат глубокие отверстия (ГО), т. е. такие, у которых отношение длины L к диаметру d превышает 10 ($L/d > 10$), и для их обработки требуется применение специальных технологических средств [1]. К таким изделиям относят: гильзы гидроцилиндров, ротора турбин, прокатные валы, гребные валы судов, стволы огнестрельного оружия, решетки ядерных реакторов [2].

Особенность обработки таких изделий состоит в том, что обрабатывающий инструмент (резцовая головка) закреплен на борштанге, длина которой превышает длину обрабатываемого отверстия. Различают три основные схемы обработки ГО: вращательное движение совершает инструмент, деталь либо инструмент при

этом совершает встречное движение подачи; вращательное движение совершает деталь, инструмент либо деталь имеет движение подачи; инструмент и деталь совершают вращательное движение в противоположных направлениях, инструмент либо деталь имеют движение подачи. Обработку длинномерных массивных заготовок чаще всего обрабатывают по схеме, где инструмент совершает поступательное движение подачи, продвигаясь в глубь вращающейся заготовки. Таким образом, длина борштанги, находящаяся вне опор, увеличивается, что приводит к изменению ее жесткости, а следовательно, и частоты собственных колебаний системы СПИЗ (станок-приспособление-инструмент-заготовка). Следствием этого является возникновение вибраций различного рода, что снижает точность изготовления глубокого отверстия.

При этом СПИЗ подвержена вынужденным колебаниям различной природы. Выделяют вибрации, возникающие в инструменте, в том числе самопроизвольно, и вибрации, передающиеся от станка, по причине недостаточной жесткости его элементов [3, 4, 5]. В работе [6] отмечено, что в процессе резания на борштангу действует крутящий момент, который совместно с неравномерным сходом стружки приводит к изменению усилия резания и вызывает крутильные колебания и вибрации. Вибрации достигают наибольшей амплитуды при резонансе, т. е. при кратности частоты вынужденных колебаний заготовки, определяемой режимом обработки, частоте собственных колебаний инструмента [7]. Так как длина борштанги изменяется по мере обработки, происходит смещение резонансных частот. Установлено, что частота продольных и крутильных колебаний не меняется в процессе обработки, а частота поперечных колебаний меняется [2]. Это снижает эффективность использования известных пассивных демпферов [8, 9, 10], так как их настройка возможна на уменьшение амплитуды колебаний для одной частоты вынужденных колебаний. Виброизоляторы не обеспечивают снижения амплитуды вибраций инструмента при резонансе, так как изолируют инструмент только от вибраций, передающихся от станка при контакте металл-металл.

Известные системы управления положением инструмента и активные динамические гасители [11, 12, 13] обеспечивают уменьшение амплитуды вибраций инструмента за счет использования оперативной информации о процессе обработки и привода перемещения инструмента. Такие системы являются дорогостоящими и требуют особых условий эксплуатации, поэтому их использование не всегда целесообразно.

В работе [14] описана теоретическая возможность снижения амплитуды колебаний маятника, оснащенного гироскопическим успокоителем. Этот подход может быть использован для снижения амплитуды колебаний расточного инструмента.

Целью работы является повышение точности обработки глубокого отверстия за счет снижения амплитуды вибраций инструмента, в том числе при резонансе. Основная задача – разработка метода виброгашения инструмента в широком диапазоне частот его вынужденных колебаний

с использованием свойств двухстепенного гироскопа.

В рамках метода виброгашения предложен инструмент [15] для обработки глубоких отверстий, оснащенный стабилизатором, выполненным в виде корпуса, в котором на одной оси установлены два двухстепенных гироскопа в кардановом подвесе. Оси вращения роторов гироскопов расположены взаимно перпендикулярно, а рамы выведены из равновесия закрепленными на них дополнительными грузами. Каждый гироскоп реагирует на вибрации отклонением своей рамы, которая качается около положения равновесия в противофазе с вынужденными колебаниями, что приводит к уменьшению их амплитуды. Такая схема обуславливает снижение составляющих амплитуды колебаний каждым из гироскопов в соответствии с положением осей вращения их роторов, что позволяет обеспечить гашение вибрации инструмента, возникающей в произвольном направлении.

Методика

экспериментального исследования

Для исследования характеристик работы модели каждого из гироскопов разработан экспериментальный стенд (рис. 1). Цель эксперимента – определение эффективности снижения амплитуды резонансных колебаний по предложенному методу. Под термином «эффективность» следует понимать $\alpha = A_1/A_0$ отношения амплитуды A_1 колебаний модели в поперечном направлении с активным гироскопическим стабилизатором (скорость вращения ротора $\omega \neq 0$) к амплитуде A_0 модели с неактивным стабилизатором (скорость вращения ротора $\omega = 0$). Частота вынужденных колебаний варьировалась в диапазоне 152...1100 рад/с для четырех значений частот собственных колебаний, определяемых суммарной жесткостью подвесов гироскопа ($\omega_{01} = 9,41$ рад/с, $\omega_{02} = 9,55$ рад/с, $\omega_{03} = 9,99$ рад/с, $\omega_{04} = 10,11$ рад/с).

На плите-основании 1 (рис.1) установлены кронштейны 2 и 3, которые поддерживают с помощью упругих подвесов 4 корпус модели 5 с гироскопическим стабилизатором колебаний. Модель 5 содержит ротор 6, соединенный с поворотной рамой 7. Рама соединена с корпусом модели 5 посредством карданного подвеса.

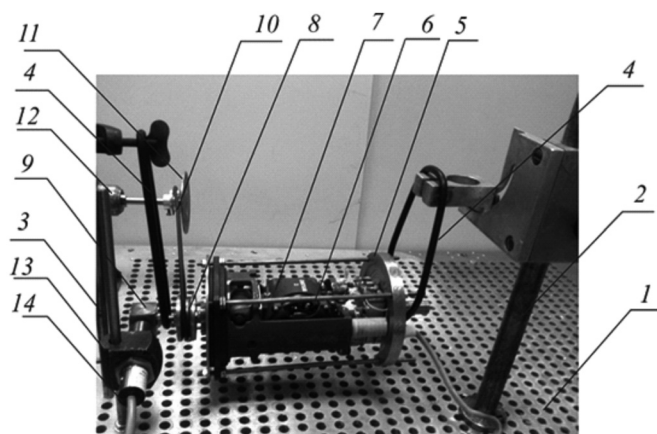


Рис. 1. Экспериментальная установка

Такое соединение обеспечивает две степени подвижности для гироскопа, третью степень подвижности обеспечивает корпус модели 5, подвешенный на упругих подвесах 4, которые выполняют функцию внешнего кольца карданного подвеса. Модель с гироскопическим стабилизатором содержит шкив 8 и экран 9 в виде металлического куба. Шкив 8 соединен ремнем со шкивом 10, установленным на валу 11 двигателя 12. На плите-основании 1 также установлен кронштейн 13, в котором закреплен индукционный датчик 14, регулируемый по высоте, вырабатывающий сигнал перемещения экрана 9.

Модель гироскопического успокоителя подвешивалась в выбранном комплекте из двух упругих подвесов на кронштейнах 2 и 3. Эксперимент производили последовательно с четырьмя наборами подвесов, которые обеспечивают указанные выше частоты собственных колебаний модели. Датчик 14 выставляли по вертикали на высоте экрана 9, по горизонтали с зазором 1,5 мм, задавали вынужденные колебания $\omega = 152$ рад/с. Показания датчика перемещения 14 регистрировались по виртуальным приборам для случаев: с вращающимся (A_1) и с невращающимся (A_0) ротором гироскопического стабилизатора. По отношению $\alpha = A_1/A_0$ оценивалась эффективность работы гироскопи-

ческого успокоителя. Далее частоту вынужденных колебаний увеличивали с шагом 70 рад/с и производили следующее измерение.

Результаты и обсуждения

Для четырех частот собственных колебаний модели существуют области (рис. 2) как эффективного гашения колебаний (расположены ниже линии $\alpha = 1$), так и увеличения исходной амплитуды ($\alpha > 1$). Эффективность α гашения колебаний имеет пиковые значения, которые для частот $\omega > 950$ рад/с расположены в области эффективного гашения для исследуемой колебательной системы.

Время полного успокоения колебаний модели инструмента после единичного возмущающего воздействия для случая с вращающимся ротором гироскопического стабилизатора (с гироскопической стабилизацией) составило 2 с, а для невращающегося ротора (без гироскопической стабилизации) – 9 с. Эффективность гашения колебаний $\alpha = 0,625$ (рис. 3).

Эффективность α гашения колебаний модели для частоты вынужденных колебаний, близкой к частоте собственных колебаний каждой модели $\alpha = 0,01$ (рис. 4) При этом установлено, что момент включения вращения ротора не приводит к увеличению амплитуды колебаний системы, что позволяет отключать вращение ротора при работе системы в обычном режиме и включать при приближении к резонансу.

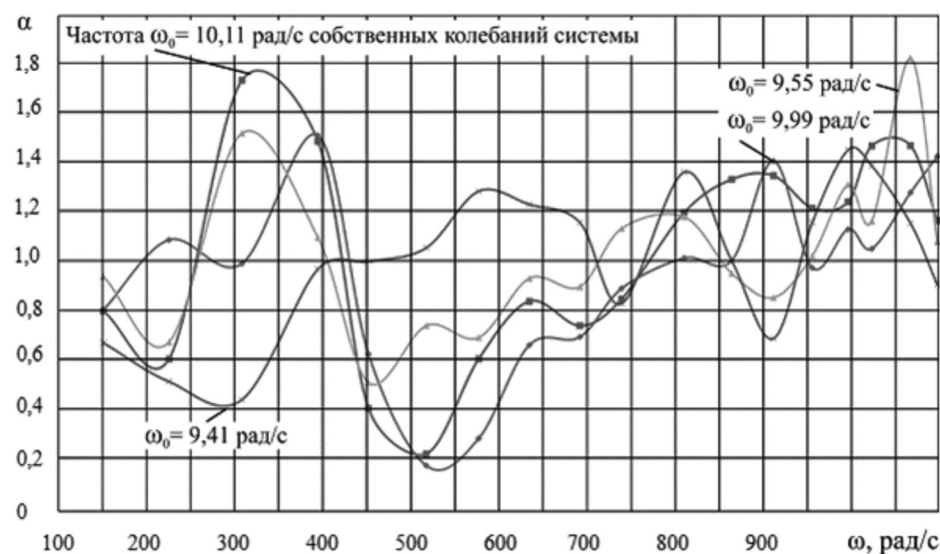


Рис. 2. Зависимость эффективности α гашения колебаний от частоты ω вынужденных колебаний системы

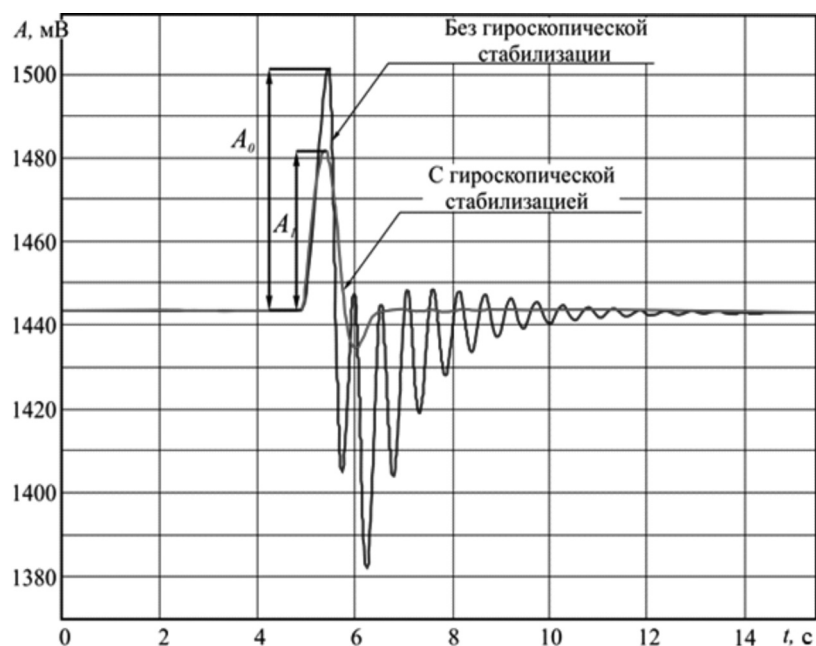


Рис. 3. Реакция модели на единичное воздействие

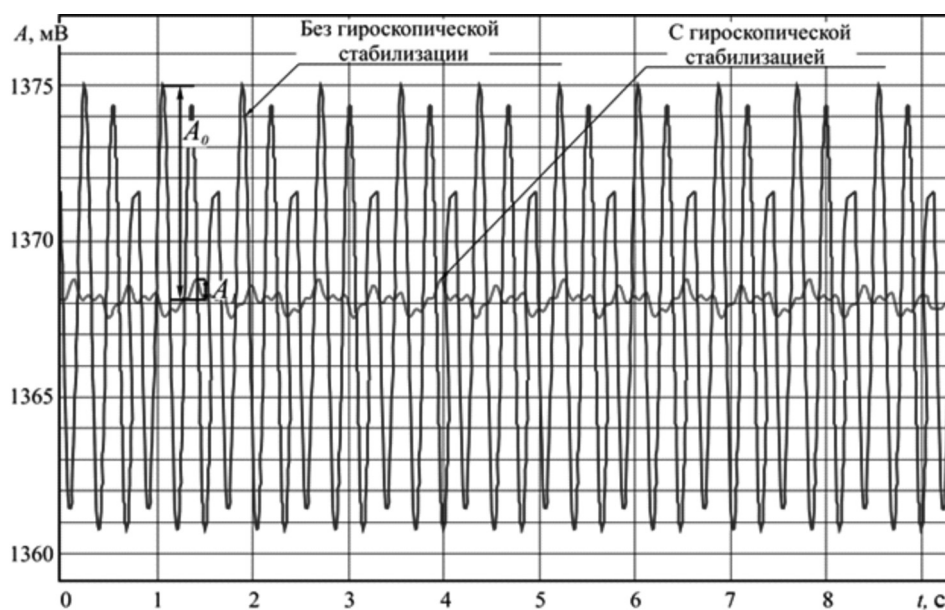


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний A модели от времени t

Выводы

Предложенный метод повышения точности обработки глубоких отверстий, включающий инструмент, оснащенный стабилизатором, выполненным в виде корпуса, в котором на одной оси установлены два двухстепенных гироскопа в кардановом подвесе, позволяет снизить амплитуду вынужденных колебаний инструмента в 9 раз при частотах вынужденных колебаний в диапазоне 152...1100 рад/с для частот

собственных колебаний модели инструмента $\omega_{01} = 9,41$ рад/с, $\omega_{02} = 9,55$ рад/с, $\omega_{03} = 9,99$ рад/с, $\omega_{04} = 10,11$ рад/с.

Установлено, что для достижения наименьшего значения амплитуды вибраций необходимо поддерживать систему СПИЗ в состоянии, близком к резонансному. Это позволит минимизировать уход оси отверстия и его последствия, снижающие точность обработки глубокого отверстия.

Список литературы

1. *Троицкий Н.Д.* Глубокое сверление. – Л.: Машиностроение, 1971. – 176 с.
2. *Ушаков А.И.* Динамические процессы при обработке глубоких отверстий: дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05. – М., 1974. – 177 с.
3. Обработка глубоких отверстий / Н.Ф. Уткин, Ю.Н. Кижняев, С.К. Плужников, А.А. Шаманин, Ф.М. Дроздов, Б.А. Немцев, Н.А. Бычков, В.Ф. Борзов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 269 с.
4. *Минков М.А.* Технология изготовления глубоких точных отверстий. – М.; Л.: Машиностроение, 1965. – 176 с.
5. *Костюкович С.С., Дечко Э.М., Долгов В.И.* Точность обработки глубоких отверстий. – Минск: Вышэйшая школа, 1978. – 144 с.
6. *Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Олыштынский Н.В.* Прогрессивные методы обработки глубоких отверстий: монография. – Волгоград: ВолгГТУ, 2003. – 136 с.
7. *Горелова, А.Ю., Плешаков А.А., Кристаль М.Г.* Методы повышения точности обработки глубоких отверстий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 7–2. – С. 363–370.
8. Патент 2365471 Российская Федерация, МПК В 23 В 29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / П. Михик. – № 2006131554/02; заявл. 02.02.2005; опубл. 27.08.2009, Бюл. № 24. – 9 с.
9. Патент 2298456 Российская Федерация, МПК В 23 В 29/02. Расточной инструмент / Н.А. Корюкина. – № 2005135279/02; заявл. 14.11.2005; опубл. 10.05.2007, Бюл. № 13. – 5 с.
10. Патент 2421302 Российская Федерация, МПК В 23 В 35/00. Способ сверления глубокого отверстия

в детали / С.Г. Комаишко, А.Г. Комаишко, Г.Н. Кулик, М.В. Моисей, С.К. Плужников, К.В. Суздаль, А.Ю. Тонконог; патентообладатель Открытое акционерное общество «Дефорт». – № 2010105941/02; заявл. 15.02.2010; опубл. 20.06.2011, Бюл. № 17. – 9 с.

11. Patent DE 102004024170 A1, Int. Cl. B 23 C 5/00, B 23 C 9/00, B 23 B 29/12. Rotary mechanical tool system for e.g. drilling process, has gyroscopic unit controlled depending on dynamic characteristic changes during chipping process, where axis of rotation of unit is identical to axis of rotation of tool / B. Aschenbach. – N DE200410024170; application 14.05.2004; date of publication 01.12.2005. – 4 p.

12. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression / M. Deqing, K. Tianrong, J.S. Albert, C. Zichen // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – Vol. 209, iss. 4. – P. 1861–1870. – doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.037.

13. *Matsubara A., Maeda M., Yamaji I.* Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit // CIRP Annals–Manufacturing Technology. – 2014. – Vol. 63, iss. 1. – P. 373–376. – doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.132.

14. *Николаи Е.Л.* Теоретическая механика. Ч. 3. – 2-е изд. – Л.; М.: ГОНТИ НКТП СССР, 1939. – 311 с.

15. Полезная модель к патенту 152126 Российская Федерация, МПК⁷ В 23 В 29/00. Резцедержатель, демпфирующий вибрации / А.Ю. Горелова, А.А. Плешаков, М.Г. Кристаль; патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Волгоградский государственный технический университет» (ВолгГТУ). – № 2014147420/02; заявл. 25.11.2014; опубл. 10.05.2015, Бюл. № 13. – 2 с.

OBRAOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(68), July – September 2015, Pages 75–81

The deep hole boring tool

Gorelova A. Yu., Ph.D. student, Research Engineer, e-mail: forasyoo@gmail.com

Kristal M. G., D.Sc. (Engineering), Professor, e-mail: crysmar@mail.ru

Volgograd State Technical University, 28 Lenin avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation

Abstract

A great number of parts which are used in machine building industry contain deep holes. Its production requires a special tool with a large length-to-diameter ratio boring bar. The boring bar significantly changes its length during lengthy blanks processing. Therefore, natural frequency of the tool changes too. Deep hole boring is inevitably

accompanied by the appearance of the resonance, when the forced oscillation frequency, dependent on the operating mode, multiplies the natural oscillation frequency of the tool. There is another phenomenon accompanying the deep holes' machining, called chatter. This kind of self-excited vibration can also lead to resonance.

It causes various working errors to appear, the one hardest to reduce being the wall thickness variation, which is presented due to the tool axis deviation in relation to the axis of the hole. Authors suggested a boring bar equipped with gyroscopic stabilizer. It contains a frame mounted on the body of stabilizer by the means of cardan suspension, which provides two degrees of freedom for the gyroscope. The third degree of freedom is offered by the boring bars' body. Gyroscopic stabilizer mounted inside the boring bar and behind the tool. Thus, when the boring bar starts to bend the frame simultaneously starts to swing and it achieves the lateral vibration suppression.

The paper covers the proposed method of deep holes manufacturing. A structure of gyroscopic stabilizer for boring bars with a large length-to-diameter ratio is presented. The experimental stand for the study of the process of damping by the proposed method is described.

Ninefold reduction of the amplitude of the resonant vibrations is achieved in the forced oscillations frequency range of 152...1100 rad/s for following values of the natural oscillations frequency of the tool model: $\omega_{01} = 9,41$ rad/s, $\omega_{02} = 9,55$ rad/s, $\omega_{03} = 9,99$ rad/s, $\omega_{04} = 10,11$ rad/s.

It is established, that achieving lower values of the vibrations amplitude requires the tool to be maintained in a resonant or near-resonant state. It allows minimizing tool axis deviation and its consequences, which reduce the accuracy of the deep hole machining.

Keywords:

deep hole boring tool, gyroscopic stabilizer of the tool.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-3-75-81

References

1. Troitskii N.D. *Glubokoe sverlenie* [The Deep hole drilling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1971. 176 p.
2. Ushakov A.I. *Dinamicheskie protsessy pri obrabotke glubokikh otverstii. Diss. kand. tekhn. nauk* [Dynamic processes in the deep holes processing. PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 1974. 177 p.
3. Utkin N.F., Kizhnyayev Yu.N., Pluzhnikov S.K., Shamanin A.A., Drozdov F.M., Nemtsev B.A., Bychkov N.A., Borzov V.F. *Obrabotka glubokikh otverstii* [The Deep holes machining]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1988. 269 p.
4. Minkov M.A. *Tekhnologiya izgotovleniya glubokikh tochnykh otverstii* [Technology of precise holes manufacturing]. Moscow, Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1965. 176 p.
5. Kostyukovich S.S., Dechko E.M., Dolgov V.I. *Tochnost' obrabotki glubokikh otverstii* [Accuracy of deep holes manufacturing]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1978. 144 p.
6. Otenii Ya.N., Smol'nikov N.Ya., Ol'shtynskii N.V. *Progressivnye metody obrabotki glubokikh otverstii* [Progressive methods of deep holes manufacturing]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2003. 136 p. ISBN 5-230-04102-2
7. Gorelova A.Y., Pleshakov A.A., Kristal M.G. *Metody povysheniya tochnosti obrabotki glubokikh otverstii* [Ways to increase the accuracy of deep holes' manufacturing]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki – News of the Tula State University. Technical sciences*, 2013, no. 7–2, pp. 363–370.
8. Mikhik P. *Reztsezhatel', dempfiruyushchii vibratsii* [Tool holder that damps vibrations]. Patent RF, no. 2365471, 2009.
9. Korjukina N.A. *Rastochnoi instrument* [Boring tool]. Patent RF, no. 2298456, 2007.
10. Komaishko S.G., Komaishko A.G., Kulik G.N., Moisej M.V., Pluzhnikov S.K., Suzdal' K.V., Tonkonog A.Yu. *Sposob sverleniya glubokogo otverstiya v detail* [Method of drilling deep holes]. Patent RF, no. 2421302, 2011.
11. Aschenbach B. Rotary mechatronical tool system for e.g. drilling process, has gyroscopic unit controlled depending on dynamic characteristic changes during chipping process, where axis of rotation of unit is identical to axis of rotation of tool. Patent DE, no. 102004024170 A1, 2005.
12. Deqing M., Tianrong K., Albert J.S., Zichen C. Magnetorheological fluid-controlled boring bar for chatter suppression. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, vol. 209, iss. 4, pp. 1861–1870. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2008.04.037
13. Matsubara A., Maeda M., Yamaji I. Vibration suppression of boring bar by piezoelectric actuators and LR circuit. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2014, vol. 63, iss. 1, pp. 373–376. doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.132

14. Nikolai E.L. *Teoreticheskaya mekhanika*. Ch. 3 [Theoretical Mechanics. Pt. 3]. 2nd ed. Leningrad, Moscow, GONTI NKTP USSR Publ., 1939. 311 p.

15. Gorelova A.Yu., Pleshakov A.A., Kristal M.G. *Reztsederzhatel', dempfiruyushchii vibratsii* [Vibration damping toolholder]. Patent RF (Useful Model), no. 152126, 2015.

Article history:

Received 16 June 2015

Revised 3 July 2015

Accepted 7 August 2015