

УДК 621.923.046, 621.9.04
DOI:10.30987/2223-4608-2021-2-14-19

О.П. Решетникова, к.т.н., **Б.М. Изнаиров**, к.т.н., **А.Н. Васин**, д.т.н.,
Н.В. Белоусова, аспирант, **А.В. Панфилова**, аспирант
(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77)
E-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru; bageev1@mail.ru; vasin@sstu.ru;
tusichka18061990@mail.ru; anastasiypanfilova@icloud.com

Определение величины суммарной погрешности наладочного размера при бесцентровом шлифовании шариков*

Определена суммарная погрешность базирования, возникающая в процессе бесцентрового шлифования шариков при применении различной формы винтовой канавки ведущего круга. На основании расчетов предложена конструкция ведущего круга с винтовой канавкой трапецеидальной формы. Предложена конструкция опорного ножа, которая позволяет эффективно выполнять автоматическую коррекцию положения измерительной базы операционного размера при шлифовании шариков.

Ключевые слова: бесцентровое шлифование; сфера; шарик; полый шарик; подшипник; шариковый подшипник; точность формы; опорный нож.

O.P. Reshetnikova, Can. Sc. Tech., **B.M. Iznairov**, Can. Sc. Tech., **A.N. Vasin**, Dr.Sc. Tech.,
N.V. Belousova, Post graduate student, **A.V. Panfilova**, Post graduate student
(Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054)

Definition of setting total error value at centerless ball grinding

There is defined a total basing error arising during centerless ball grinding using driving disk helical grooves with different forms. On the basis of computations there is offered a design of a driving disk with the trapezoidal helical groove. A design of a supporting knife which allows carrying out efficiently an automatic position correction of the measuring base of operation size during ball grinding is offered.

Keywords: centerless grinding; sphere; ball; hollow ball; bearing; ball bearing; form accuracy; supporting knife.

Введение

Существуют две основные схемы бесцентрового шлифования: методом продольной подачи и методом поперечной подачи [1, 2]. При этом врезную подачу в обоих случаях осуществляют ведущим абразивным кругом.

В последнее время в технической литературе публикуется достаточно много материалов теоретических и экспериментальных

исследований о возможности эффективного использования метода бесцентрового шлифования для предварительной и окончательной обработки сферических деталей, в частности, сферических тел качения (шариков) шарикоподшипников [3 – 8]. Поскольку, по мнению авторов публикаций, это технологическое направление является очень перспективным, необходимы всесторонние исследования как схемы, так и теоретических основ обеспечения точности операционного размера и формы обрабатываемых деталей.

В случае обработки шариков методом бесцентрового шлифования базирование происходит по сферической поверхности сначала

* Статья подготовлена при финансовой поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук № МК-2395.2020.8.

исходной заготовки. В процессе обработки технологическая база постоянно обновляется, т.к. базирование происходит по обрабатываемой поверхности шарика. Центр сферы является измерительной базой при формировании размера шарика. Технологическая и конструкторская (измерительная) базы при выполнении бесцентрового шлифования не совмещены по факту и не могут быть совмещены принципиально. В свою очередь центр сферы в процессе обработки непрерывно смещается. Все это вызывает погрешности по выполняемому операционному размеру – диаметру сферической поверхности.

На практике настройка станка на операционный размер осуществляется с использова-

нием эталонной детали, которая помещается в рабочую зону на опорный нож, а ведущий и шлифовальный круги приводят в контакт с поверхностью заготовки, что автоматически обеспечивает получение наладочного размера. Этот метод используется в связи с отсутствием теоретической методики определения необходимой величины наладочных размеров для обработки заготовок различных типоразмеров с учетом реальных параметров рабочей зоны.

Наименьшую величину погрешности ξ наладочного размера при бесцентровом шлифовании шариков можно определить следующим образом [3]:

$$\xi = 2 \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} - h_1^2} \cdot \frac{1}{(d+D_B)^2} - 2 \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} - h^2} \cdot \frac{D_3^2}{(D_3+D_B)^2} \quad (1)$$

где D_3 и d – диаметр заготовки и диаметр готового шара соответственно; D_B – диаметр ведущего круга; h – величина превышения центра обработанного шара над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов в начальный момент обработки; h_1 – величина превышения центра обработанного шара над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов после окончания обработки:

$$h_1 = h - \left(\frac{D_3-d}{2}\right) \cdot (1 - \sin(\alpha)) \quad (2)$$

где α – угол скоса опорного ножа.

В работе [3] определено, что наиболее предпочтительной схемой обработки шариков является метод обработки с врезной подачей ведущим кругом, т.к. при такой схеме обработки погрешность базирования ξ минимальна.

Для параметров рабочей зоны $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$ получили, что $\xi = 0,051493$ мм.

Определение суммарной погрешности наладочного размера, возникающего в процессе бесцентрового шлифования шариков

Зависимость (1) получена для случая, когда форма ведущего круга цилиндрическая с прямой образующей. При этих условиях происходит формирование цилиндрических деталей. Бесцентровое шлифование сферических деталей наиболее эффективно в том

случае, когда на поверхности ведущего круга выполнена винтовая транспортирующая канавка, позволяющая вести обработку на проход. Часто профиль такой канавки выполняют призматической формы (рис. 1) [4, 5]. При этом возникает дополнительная составляющая погрешности наладочного размера за счет дополнительного смещения измерительной базы – центра сферы – в глубину канавки в результате уменьшения диаметра заготовки в процессе съема припуска.

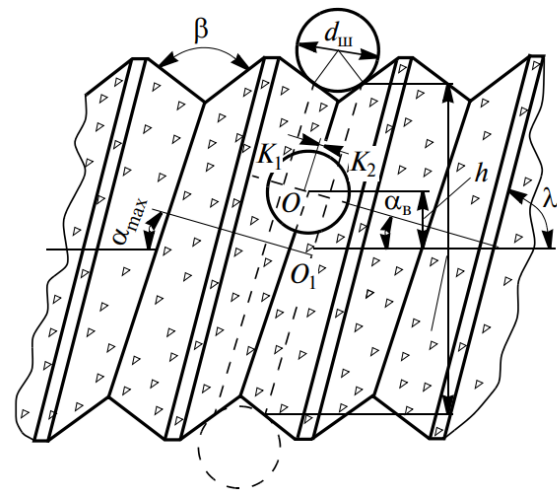


Рис. 1. Форма ведущего абразивного круга с винтовой канавкой призматического профиля [4, 5]

Величину этого смещения можно определить следующим образом (рис. 2)

$$\Delta = \frac{D_3-d}{2} \cdot \left(\frac{1}{\sin\left(\frac{\beta}{2}\right)}\right) \quad (3)$$

где β – угол профиля винтовой канавки.

Смещение Δ в выражении (3) происходит в направлении отрезка $K_1 - O_{B1}$ (рис. 3). Чтобы определить суммарную величину смещения,

необходимо спроецировать величину (3) на направление наладочного размера и просуммировать с (1).

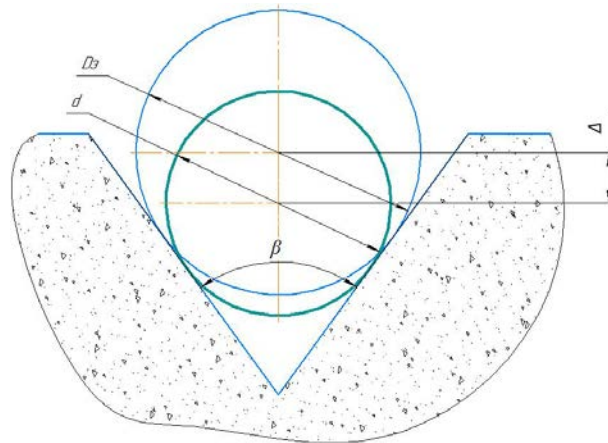


Рис. 2. Схема определения величины смещения центра сферы в канавке призматического профиля в результате съема припуска

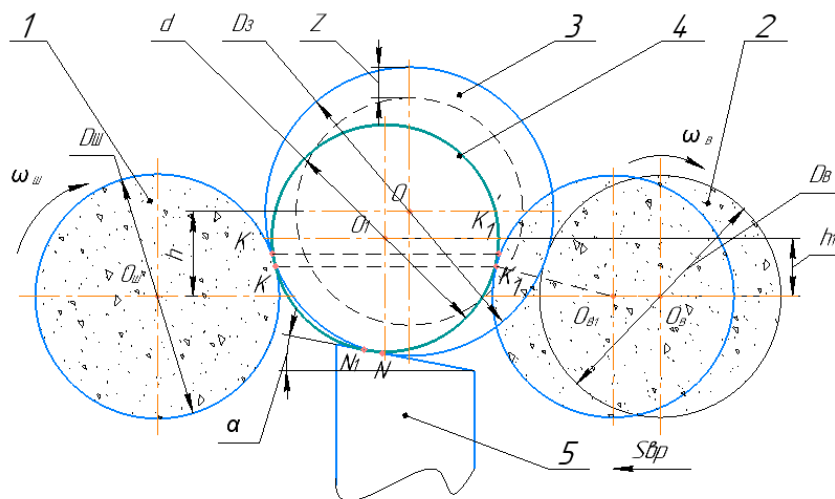


Рис. 3. Расчетная схема для определения суммарной величины погрешности наладочного размера при бесцентровом шлифовании:

1 – шлифовальный круг; 2 – ведущий круг; 3 – заготовка шарика; 4 – шарик после обработки; 5 – опорный нож

Величина проекции (3) на направление хорды $K - K_1$ (см. рис. 3):

$$\Delta_1 = \Delta \cdot \frac{d}{2\sqrt{\frac{d^2}{4} - h^2}} \quad (4)$$

Величина (4) представляет собой смещение центра сферы в глубину винтовой канавки. В величину суммарной погрешности входит его удвоенное значение (в диаметральной выражении).

Суммарная величина погрешности наладочного размера равна арифметической сумме

выражения (1) и удвоенному значению выражения (4):

$$\xi_{\Sigma} = \xi + 2 \cdot \Delta_1 \quad (5)$$

Для параметров $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$; $\beta = 90^\circ$ расчет по формулам (1) – (5) дает результат: $\xi = 0,051493$ мм; $\xi_{\Sigma} = 2,258$ мм.

Результаты расчета показывают, что при использовании ведущего абразивного круга с винтовой канавкой призматического профиля погрешность наладочного размера значитель-

но возрастает по сравнению с вариантом, при котором канавка отсутствует.

Однако отказаться от использования ведущих кругов с транспортирующей канавкой нежелательно, поскольку может резко снизиться производительность процесса бесцентрового шлифования сферических деталей. Поэтому рациональным решением является создание на поверхности ведущего круга канавки трапецеидального профиля, дно которой выполнено с прямолинейной образующей, параллельной оси круга (см. рис. 4). В этом случае величина погрешности наладочного размера будет определяться зависимостью (1).

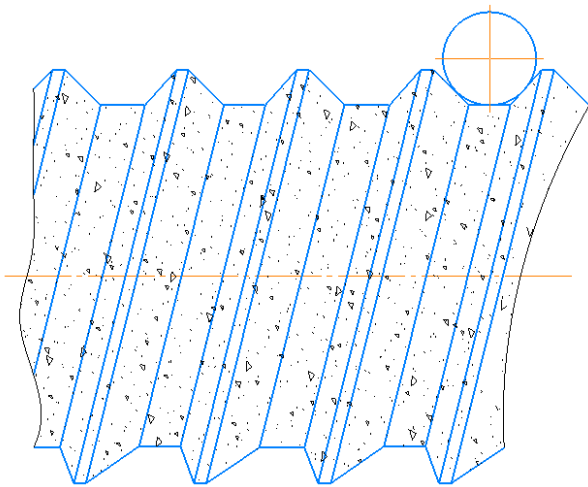


Рис. 4. Рациональная форма профиля транспортирующей канавки ведущего круга

Указанную погрешность ξ_{Σ} можно предотвратить путем использования опорного ножа с модернизированной формой опорной поверхности (рис. 5).

Предлагаемая конструкция опорного ножа

Модернизированная конструкция опорного ножа (см. рис. 5) должна предусматривать возможность обеспечения оптимального положения центра поперечного сечения заготовки по мере съема припуска на уровне, обеспечивающем сохранение достигнутого значения наладочного размера. Для этого его опорная поверхность должна быть не прямолинейной, а комбинированной, т.е. состоять из нескольких участков.

Первый участок предназначен для размещения заготовки перед началом обработки. Его поверхность параллельна осям ведущего и шлифовального кругов.

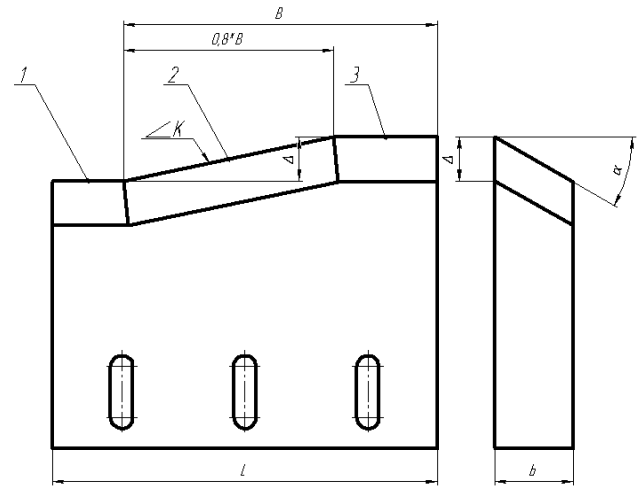


Рис. 5. Модернизированный опорный нож

Второй участок выполнен с некоторым уклоном. Величина уклона позволяет при перемещении заготовки по поверхности ножа в процессе снятия припуска постоянно достигать положение центра сферы, обеспечивающее неизменное положение хорды, размер которой и является наладочным.

Третий участок предназначен для окончательного формирования размера сферы в процессе выхаживания. Этот участок имеет поверхность, параллельную осям ведущего и шлифовального кругов.

Покажем расчетом методику определения рационального значения величины уклона ножа на участке 2, обеспечивающего отсутствие погрешности наладочного размера (рис. 6).

На рис. 6 изображено: 1 – шлифовальный абразивный круг, ось которого лежит в одной плоскости с осью ведущего абразивного круга 2 под некоторым углом к ней; 3 – поперечное сечение исходной заготовки (цилиндрической или сферической); 4 – поперечное сечение окончательно обработанной заготовки (цилиндрической или сферической); 5 – опорный нож с комбинированной опорной поверхностью, имеющей участок с уклоном, обеспечивающим рациональное положение центра поперечного сечения детали в процессе снятия припуска; h – начальная (наладочная) величина превышения центра поперечного сечения заготовки над плоскостью, в которой лежат оси абразивных кругов.

Из треугольника $OO_{B1}M$ имеем:

$$OO_{B1}M = \sqrt{(OO_{B1})^2 - h^2}$$

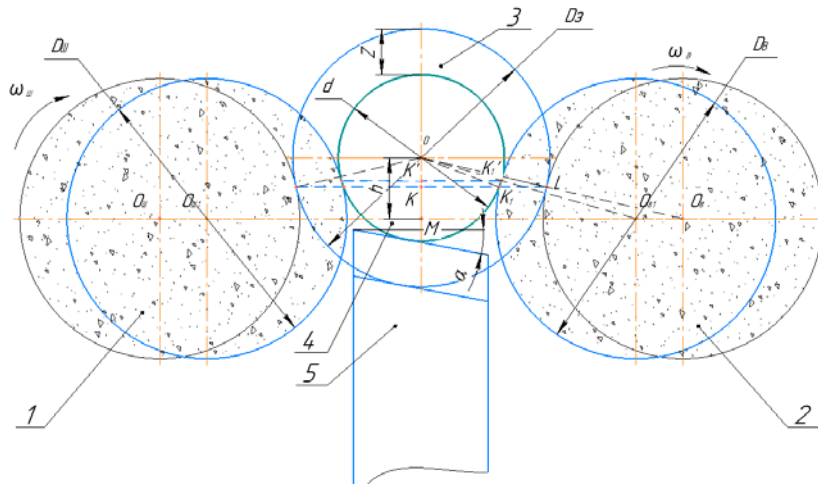


Рис. 6. Схема бесцентрового шлифования с опорой заготовки на нож, имеющий участок с уклоном, обеспечивающим неизменное положение хорды, имеющей наладочный размер:

1 – шлифовальный круг; 2 – ведущий круг; 3 – заготовка; 4 – готовый шарик; 5 – опорный нож

Треугольники $\Delta OO_{B1}M$ и $\Delta OK'K_1$ подобны, поэтому

$$\frac{K'K_1}{OO_{B1}M} = \frac{OK'}{OO_{B1}}$$

$$\frac{K'K_1}{\sqrt{(OO_{B1})^2 - h^2}} = \frac{(d/2)}{(d/2 + D_B/2)}$$

$$K'K_1 = \frac{(d/2) \cdot \sqrt{(d/2 + D_B/2)^2 - h^2}}{(d/2 + D_B/2)} \quad (6)$$

Из треугольника $OO_B M$ имеем:

$$OO_B M = \sqrt{(OO_B)^2 - h^2}$$

Треугольники $\Delta OO_B M$ и ΔOKL подобны, поэтому

$$\frac{OK}{OM} = \frac{OL}{OO_B}$$

$$\frac{OK}{h} = \frac{(D_3/2)}{(D_3/2 + D_B/2)} \quad OK = \frac{h \cdot D_3}{D_3 + D_B}$$

Из треугольника ΔOKK_1 :

$$KK_1 = \sqrt{(OK_1)^2 - (OK)^2}$$

$$KK_1 = \sqrt{\left(\frac{d^2}{4}\right) - \left(\frac{h \cdot D_3}{D_3 + D_B}\right)^2} \quad (7)$$

Погрешность наладочного размера определим по формуле:

$$\xi = 2 \cdot (K'K_1 - KK_1) = 2 \cdot \left(\left(\frac{(d/2) \cdot \sqrt{(d/2 + D_B/2)^2 - h^2}}{(d/2 + D_B/2)} \right) - \left(\sqrt{\left(\frac{d^2}{4}\right) - \left(\frac{h \cdot D_3}{D_3 + D_B}\right)^2} \right) \right) \quad (8)$$

Пусть $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$. Тогда расчет по формулам (7), (8) дает результат: $KK_1 = 12,674218$ мм; $K'K_1 = 12,675989$ мм. Погрешность наладочного размера $\xi = 0,00354$ мм.

Для того чтобы выполнить условие $\xi = 0$, необходимо добиться соотношения: $K'K_1 = KK_1$ или $OK = OK'$.

$$\frac{OK'}{h} = \frac{(d/2)}{(D_B/2 + d/2)} = \frac{d}{(D_B + d)}$$

$$OK' = \frac{h \cdot d}{(D_B + d)}$$

$$h_1 = h - (OK - OK') = h \cdot \left(1 - \left(\left(\frac{D_3}{D_3 + D_B} \right) - \left(\frac{d}{(D_B + d)} \right) \right) \right) \quad (9)$$

Расчет по формуле (9) дает результат: $h_1 = 9,971754$ мм.

То есть для сохранения правильного значения наладочного размера нужно не поддержи-

вать постоянной величину h , а уменьшать величину превышения s до h_1 в соответствии с (9).

Величину необходимого уклона на втором участке опорной поверхности ножа (рис. 5) можно определить следующим образом:

$$\Delta = \frac{Z - (h - h_1)}{0,8 \cdot B}$$

где Z – припуск на сторону обрабатываемой заготовки; B – длина рабочей поверхности шлифовального круга.

При использовании опорного ножа описанной конструкции погрешность наладочного размера при бесцентровом шлифовании сферы значительно уменьшается, практически на порядок, и имеет место только вследствие наличия допуска на размер заготовки. Ее величина в этом случае может быть определена с использованием (4), но величина h при этом изменится и примет значение

$$h' = \left(h - \frac{T}{2} \right) \quad (10)$$

где T – допуск на диаметр сферической заготовки.

Для условий, приведенных в предыдущих примерах и $T = 0,1$ мм расчет по формулам (1) и (2) дает результат: $\xi = 0,051493$ мм; расчет по формулам (8) и (10) дает результат: $\xi = 0,0035$ мм.

Заключение

1. Определена суммарная погрешность базирования, возникающая в процессе бесцентрового шлифования шариков при применении различной формы винтовой канавки ведущего круга.

2. Доказано, что рациональным решением является создание на поверхности ведущего круга транспортирующей канавки трапецеидального профиля, дно которой выполнено с прямолинейной образующей, параллельной оси круга.

3. Установлено, что традиционная наладка станка при бесцентровом шлифовании шариков дает неприемлемо большую погрешность размеров шариков.

4. Предложена конструкция опорного ножа, которая позволяет эффективно выполнять автоматическую коррекцию положения измерительной базы операционного размера – диаметра сферы – в процессе обработки сферической поверхности, что обеспечивает минимальное значение погрешности операционного размера в пределах пятого качества точности.

5. Предложенные зависимости универсальны и позволяют рассчитывать параметры опорной поверхности ножа для обработки

сферических деталей различных типоразмеров.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Абразивная** и алмазная обработка материалов: справочник // под ред. А.Н. Резникова. М.: Машиностроение, 1977. – 391 с.
2. **Бесцентровое** шлифование // под ред. З.И. Кремня. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1986. – 92 с.
3. **Решетникова, О.П.** Определение рациональных параметров рабочей зоны при бесцентровом шлифовании. // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2020. – № 5 (107). – С. 23 – 28.
4. **Бочкарев, А.П.** Совершенствование метода обработки полых тел сферической формы. // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2011. – № 58. – С. 17 – 20.
5. **Васин, А. Н., Изнаиров, Б.М., Бочкарев, А.П.** Математическая модель процесса формообразования при бесцентровом шлифовании пустотелых шаров. // СТН. – 2013. – № 1. – С. 28 – 32.
6. **Захаров, О.В.** Минимизация погрешностей формообразования при бесцентровой абразивной обработке: монография. // Саратов: СГТУ, 2006. – 152 с.
7. **Xu, W., Wu, Y., Fujimoto, M., & Tachibana, T.** (2012). A new ball machining method by centreless grinding using a surface grinder. *International Journal of Abrasive Technology*, 5(2), 107-118. doi:10.1504/IJAT.2012.048535
8. **Захаров, О.В., Погораздов, В.В., Горшков, В.В.** Анализ периодических погрешностей при бесцентровом шлифовании на жестких опорах // Динамика технологических систем: Сб. тр. межд. науч.-техн. конф. Саратов: СГТУ, 2004.–С. 149 – 152.

REFERENCES

1. *Material Abrasion and Diamond Processing*: reference book // under the editorship of A.N. Reznikov. M.: Mechanical Engineering, 1977. – pp. 391.
2. *Centerless Grinding* // under the editorship of Z.I. Kremen. – 3-d Edition, revised and supplemented. – L.: Mechanical Engineering, 1986. – pp. 92.
3. Reshetnikova, O.P. Efficient parameter definition of working area at centerless grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2020. – No.5 (107). – pp. 23-28.
4. Bochkaryov, A.P. Improvement of spherical hollow solid processing. // *Bulletin of Saratov State Technical University*. – 2011. – No.58. – pp. 17-20.
5. Vasin, A.N., Iznairov, B.M., Bochkaryov, A.P. Mathematical model of shaping at hollow ball centerless grinding. // *STIN*. – 2013. – No.1. – pp. 28-38.
6. Zakharov, O.V. Shaping error minimization at centerless abrasion: monograph. // *Saratov: SSTU*, 2006. – pp. 152.
7. Xu, W., Wu, Y., Fujimoto, M., & Tachibana, T. (2012). A new ball machining method by centreless grinding using a surface grinder. *International Journal of Abrasive Technology*, 5(2), 107-118. doi:10.1504/IJAT.2012.048535
8. Zakharov, O.V., Pogorazdov, V.V., Gorshkov, V.V. Periodic error analysis at centerless grinding upon rigid bearings // *Dynamics of Technological Systems: Proceedings of the Inter. Scientific-Tech. Conf.* Saratov: SSTU, 2004. – pp. 149-152.

Рецензент д.т.н.
Николай Валерьевич Бекренев