

УДК 621.923.046, 621.9.04
DOI:10.30987/2223-4608-2020-5-23-28

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
(ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический
университет имени Ю.А. Гагарина», 410054, г. Саратов, Политехническая, 77),
E-mail: olgareshetnikova1@yandex.ru, vasin@sstu.ru

Определение рациональных параметров рабочей зоны при бесцентровом шлифовании*

Рассмотрен способ бесцентрового шлифования сферических заготовок. Схема реализована за счет наличия на ведущем круге винтовой канавки трапецеидальной формы. Показано, что при бесцентровом шлифовании шаров возникает погрешность базирования по операционному размеру – диаметру сферической поверхности. Математически определен наладочный размер при выполнении технологической операции бесцентрового шлифования шаров, а также погрешность наладочного размера.

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

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
(FSBEI HE "Gagarin State Technical University of Saratov", 77, Polytekhnicheskaya Str., Saratov, 410054)

Efficient parameter definition for working area at centerless grinding

A method for a ball blank centerless grinding is considered. A circuit is realized at the expense of the presence helical trapezoidal groove on a drive disk. It is shown that at a ball centerless grinding appears an error of basing on an operation dimension – a diameter of a spherical surface. A setting dimension is defined mathematically during the fulfillment of a technological operation of a ball centerless grinding and also an error of a setting dimension is defined.

Keywords: centerless grinding; sphere; hollow ball; bearing; ball bearing; shape accuracy.

Введение

В промышленности широко используются детали сферической формы. Сложность в производстве представляют собой шарики для подшипников, т.к. их изготовление связано с применением сложных технологий [1 – 9] и дорогостоящего оборудования. Требования к точности деталей постоянно увеличиваются, поэтому в производстве требуется обеспечение высокой точности сферических поверхностей шариков, что требует особого подхода к финишным методам их обработки [2, 3, 5, 8, 9].

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

Основными методами окончательной обработки шариков являются: обработка чугунами дисками специального сечения с V-образными канавками [3] и методы бесцентрового шлифования шариков [7 – 9]. Меньшее распространение получили методы обработки магнитной жидкостью [6] и с применением ультразвука [5]. Однако цикл обработки при этом достаточно длительный и неблагоприятный для окружающей среды.

В условиях серийного производства наиболее приемлемыми методами обработки шариков являются методы бесцентрового шлифования [4, 7 – 9], так как при этом не требуется применение сложного специального технологического оборудования и имеется возможность его быстрой переналадки и автоматиза-

ции.

Исследования по созданию моделей получения сферической формы и теоретическому анализу проводились многими учеными [4, 5, 6, 8, 9]. Создание и анализ математической модели, прогнозирующей получение сферической поверхности заданной точности, – основная задача различных исследований финишной обработки шариков. Это основа и предпосылка для последующего изучения.

В работах [7, 9] исследован процесс исправления погрешностей формы сферических деталей, обрабатываемых бесцентровым шлифованием. Показано, что если величины погрешностей формы сферы имеют тот же порядок, что и зернистость абразивных кругов, то выступы (впадины) абразивных зерен, контактирующих с обрабатываемой поверхностью, начинают играть ту же роль, что и выступы (неровности) на поверхности заготовки. Взаимодействуя друг с другом случайным образом, они управляют поведением заготовки в зоне резания.

Способ бесцентрового шлифования – высокопроизводительный процесс, который легко поддается автоматизации, оборудование легко встраивается в автоматическую линию. Такой метод обработки позволяет получить высокую точность и низкую шероховатость обрабатываемых поверхностей.

На первый взгляд наладка бесцентрово-шлифовальных станков не представляет каких-либо трудностей. Однако до настоящего времени отсутствуют глубокие научные исследования, позволяющие теоретически обосновать целесообразную конфигурацию рабочей зоны и рациональные значения наладочных параметров.

Предлагаемый способ бесцентрового шлифования шариков

Задача предлагаемого технического решения вытекает из недостатков имеющихся способов обработки шариков и направлена на устранение этих недостатков, а именно – повышение точности и качества обрабатываемой сферической поверхности без снижения производительности и повышения трудоемкости ее обработки.

Поставленная задача решается следующим образом. На ведущем круге выполнены винтовые разрядные канавки трапецидального профиля вместо V-образных винтовых. При этом прямолинейную образующую дна канавки располагают параллельно оси ведущего

круга. На рис. 1 представлен главный вид – схема рабочей зоны устройства и разрез А–А главного вида устройства.

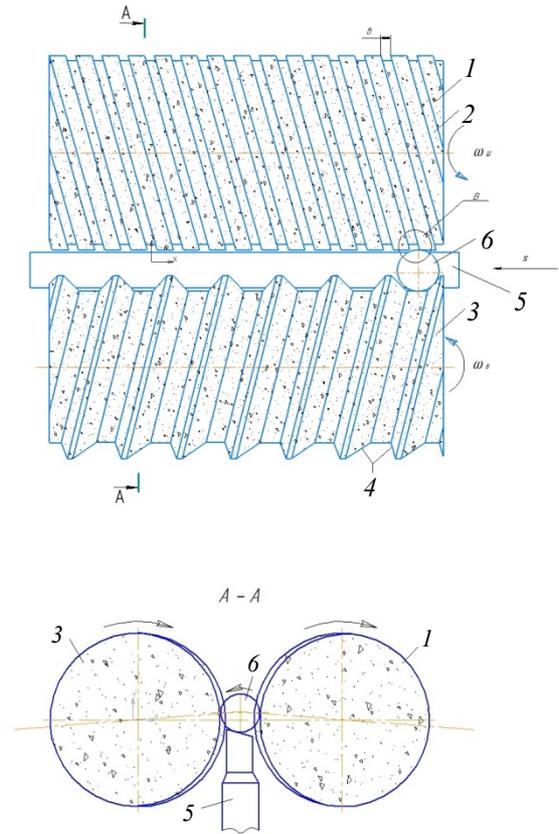


Рис. 1. Схема бесцентрового шлифования сферической заготовки с трапецидальным профилем канавки ведущего круга

Сущность способа заключается в следующем. Заготовку 6 располагают между шлифовальным 1 и ведущим 3 абразивными кругами, оси которых параллельны. Кругам сообщают однонаправленное вращение со скоростями $\omega_{ш}$ и $\omega_{в}$. В качестве опоры заготовки используют нож 5, представляющий собой односкосный клин с уклоном в сторону ведущего круга, что обеспечивает необходимый контакт с последним до начала обработки за счет составляющей силы тяжести. Это позволяет передавать вращение заготовке от ведущего круга.

Рабочая зона формируется совокупностью канавок, выполненных: одна в виде винтовой линии 2 с прямоугольным профилем на периферии шлифовального круга, вторая 4 – в виде трапеции на периферии ведущего круга.

Принципиальная схема этого способа в значительной степени соответствует традиционной схеме бесцентрового шлифования, что

позволяет использовать имеющееся на производстве станочное оборудование.

Существенное отличие предлагаемого устройства от аналогов заключается в изменении конструкции ведущего круга. Винтовая канавка трапецеидального профиля на ведущем круге позволяет выполнять правку несущей части ведущего круга непосредственно на бесцентрово-шлифовальном станке и устранить, тем самым, биение ведущего круга. Для реализации правки ведущего круга не требуется дополнительного резьбонарезного устройства, что значительно упрощает и удешевляет эту операцию.

При этом значительно уменьшается погрешность базирования сферической заготовки, поскольку последняя устанавливается не в призматической канавке ведущего круга, а на ее прямолинейном дне, что приводит к повышению точности, и уменьшению разноразмерности обработанных шариков.

Определение погрешности базирования при бесцентровом шлифовании шариков

Схема базирования заготовок при их обработке указанным способом абсолютно нетривиальна. При бесцентровом шлифовании заготовки базируются по обрабатываемой поверхности. Затем в процессе обработки технологическая база не просто сразу же срезается, но и постоянно обновляется.

Измерительной базой при формировании операционного размера – диаметра – является центр кругового сечения независимо от того, цилиндрическую или сферическую форму имеет заготовка. Совершенно очевидно, что технологическая и конструкторская (измерительная) базы при этом не только не совмещены по факту, но и не могли быть совмещены принципиально. Кроме того, указанный центр в процессе обработки непрерывно смещается. Эти обстоятельства с неизбежностью вызывают появление погрешности по операционному размеру – по диаметру.

Характерно, что наладочным размером при этой схеме обработки является не диаметр, а величина хорды $K - K_1$ (рис. 2 – 4), соединяющей точки контакта обрабатываемой поверхности с поверхностями ведущего и шлифовального кругов. По окончании обработки эта хорда занимает положение $K' - K'_1$. Поэтому фактически выполняемым размером будет не диаметр сферы, а именно величина этой хорды.

Пусть образующие ведущего и шлифовального кругов имеют прямолинейную форму и параллельны друг другу. В начальный момент обработки центр кругового сечения заготовки расположен выше оси центров шлифовального и ведущего кругов на величину h . При съеме полной величины припуска на сторону Z измерительная база наладочного размера (точка контакта K_1 обрабатываемой детали с ведущим кругом) опускается вместе с ней на величину OO_1 до контакта с опорным ножом.

При этом ввиду наличия скошенной опорной плоскости ножа, возможны три варианта развития процесса. А именно, заготовка, в зависимости от способа подачи материала в зону шлифования, могла бы:

- при врезной подаче шлифовальным кругом дополнительно сместиться в направлении ведущего круга в точку O_1 (рис. 2);
- при врезной подаче ведущим кругом дополнительно сместиться в направлении шлифовального круга в точку O_1 (рис. 3);
- при съеме материала за счет симметричного профилирования абразивных кругов конической формы без смещения в направлении абразивных кругов (рис. 4), просто опустившись в точку O_1 .

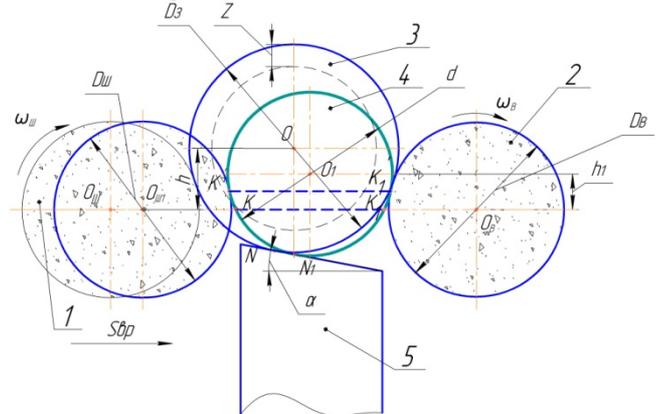


Рис. 2. Схема врезного бесцентрового шлифования с подачей шлифовальным кругом

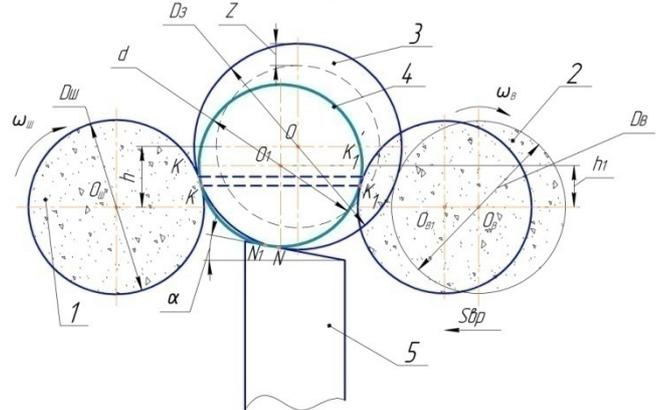


Рис. 3. Схема врезного бесцентрового шлифования с подачей ведущим кругом

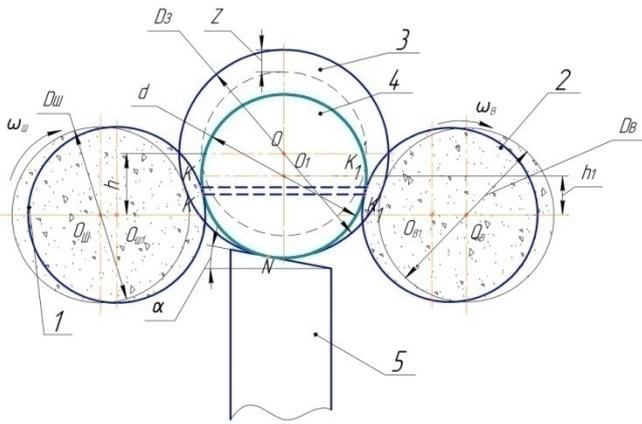


Рис. 4. Схема бесцентрового шлифования со съемом за счет симметричного профилирования ведущего и шлифовального кругов

При этом неизбежно формируется погрешность операционного размера, представляющая собой величину проекции смещения измерительной базы (центра кругового сечения) на направление наладочного размера $K' - K'_1$.

При обработке по схеме, изображенной на рис. 2, а именно, при врезной подаче шлифовальным кругом, величина этой погрешности может быть определена следующим образом:

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

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;

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

где α – угол скоса опорного ножа; h_1 – величина превышения центра обработанного шара над плоскостью, в которой расположены оси ведущего и шлифовального кругов после окончания обработки.

Пример 1. Пусть $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$. Тогда расчет по формулам (1) – (2) дает результат: $KK_1 = 25,34255$ мм; $K'K'_1 = 25,39995$ мм. Погрешность наладочного размера 0,0515 мм.

При обработке по схеме, изображенной на рис. 3, а именно, при врезной подаче ведущим кругом, величина этой погрешности может

быть определена также по зависимости (1), но величина h_1 в этом случае будет иметь значение:

$$h_1 = h - \left(\frac{D_3 - d}{2} \right) \cdot (1 - \sin(\alpha)) \quad (3)$$

Пример 2. Пусть $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$. Тогда расчет по формулам (1) – (2) дает результат: $KK_1 = 25,34255$ мм; $K'K'_1 = 25,39993$ мм. Погрешность наладочного размера 0,051493 мм.

При обработке по схеме, изображенной на рис. 4, а именно, при подаче материала в зону шлифования за счет симметричного профилирования абразивных кругов конической формы, величина этой погрешности может быть также определена с использованием зависимости (1), но величина h_1 в этом случае будет иметь значение:

$$h_1 = \left(h - \frac{D_3 - d}{2} \right). \quad (4)$$

Пример 3. Пусть $D_B = 300$ мм; $D_3 = 26,4$ мм; $d = 25,4$ мм; $h = 10$ мм; $\alpha = 30^\circ$. Тогда расчет по формулам (1), (4) дает результат: $KK_1 = 25,34255$ мм; $K'K'_1 = 25,3999437$ мм. Погрешность наладочного размера 0,051496 мм.

Таким образом, величина погрешности наладочного размера в случае выполнения врезной подачи при помощи ведущего круга является наименьшей.

Показательно, что конструкция большинства моделей современных бесцентровошлифовальных станков имеет именно такой вариант выполнения врезной подачи. Такое конструктивное решение является результатом многочисленных экспериментов и большого производственного опыта. Приведенные выше исследования не только строго теоретически доказывают его правильность, но и позволяют управлять процессом формирования точности операционного размера, оперируя факторами, содержащимися в выражениях (1) и (3).

Например, при увеличении диаметра ведущего круга в пределах диапазона значений, предусмотренных конструкцией станка, погрешность операционного размера снижается.

При уменьшении величины угла скоса опорного ножа в пределах его целесообразных значений погрешность операционного размера также снижается.

Уменьшение величины припуска, т.е. использование заготовки, близкой по диаметру к

размеру готовой детали, также позволяет уменьшить погрешность операционного размера.

Приведем обобщенный график, показы-

вающий изменение погрешности базирования в зависимости от диаметра заготовки шарика при различных схемах обработки, приведенных выше (рис. 5).

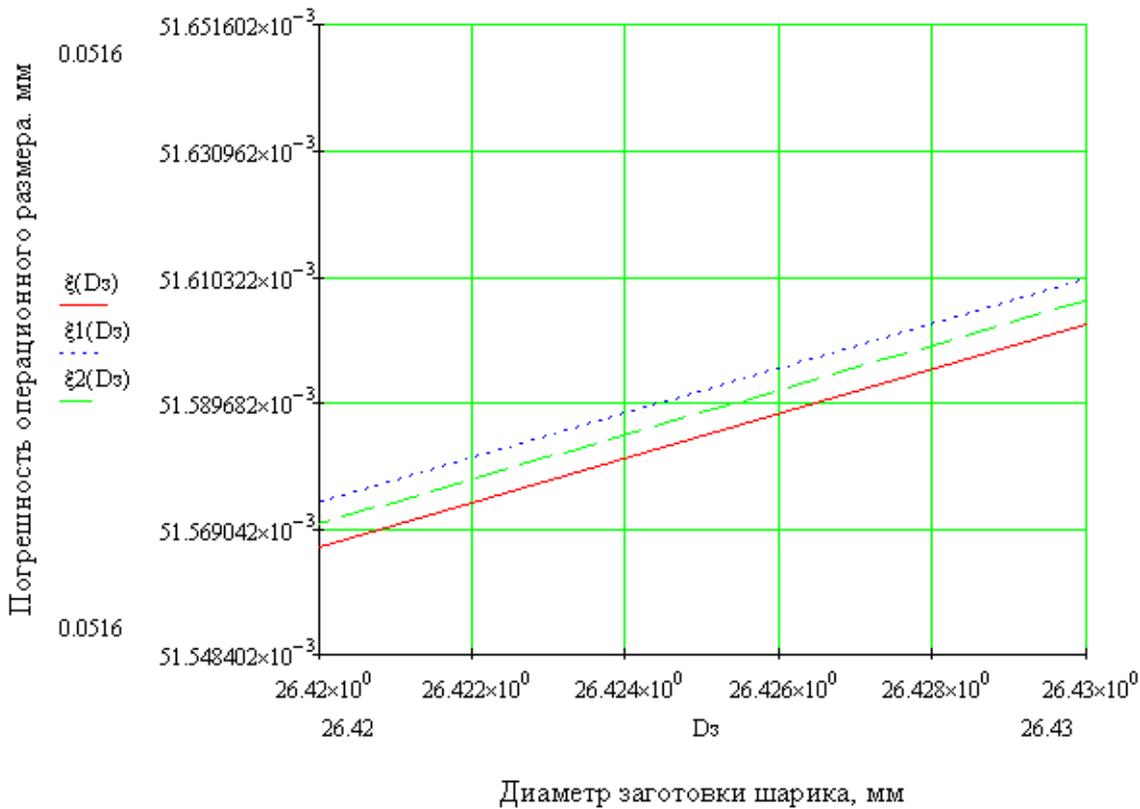


Рис. 5. Зависимость погрешности операционного размера при изменении диаметра заготовки шарика при схеме наладки:

$\xi(D_3)$ – обработка методом врезной подачи ведущим кругом; $\xi_1(D_3)$ – обработка с подачей шлифовальным кругом; $\xi_2(D_3)$ – обработка с симметричным профилированием ведущего и шлифовального кругов

Как видно из графика, при увеличении диаметра заготовки погрешность базирования увеличивается. При этом наиболее предпочтительная схема – обработка шариков методом врезной подачи ведущим кругом, т.к. погрешность операционного размера наименьшая. Результаты расчетов сведены в табл. 1.

1. Результаты расчета погрешности операционного размера при различных схемах обработки

Диаметр заготовки D_3 , мм	Погрешность операционного размера при обработке методом врезной подачи $\xi(D_3)$, мм	Погрешность операционного размера при обработке с подачей шлифовальным кругом $\xi_1(D_3)$, мм	Погрешность операционного размера при обработке с симметричным профилированием ведущего и шлифовального кругов $\xi_2(D_3)$, мм
26,4	$5,1493 \cdot 10^{-2}$	$5,1500 \cdot 10^{-2}$	$5,1496 \cdot 10^{-2}$
27,4	$5,5142 \cdot 10^{-2}$	$5,515 \cdot 10^{-2}$	$5,5149 \cdot 10^{-2}$
28,4	$5,8892 \cdot 10^{-2}$	$5,8911 \cdot 10^{-2}$	$5,8902 \cdot 10^{-2}$

Как видно из графика (см. рис. 5), при увеличении диаметра заготовки погрешность базирования увеличивается. При этом наиболее предпочтительна схема обработки шариков методом врезной подачи ведущим кругом, т.к. погрешность операционного размера при этом наименьшая.

Заключение

1. Предложен способ бесцентрового шлифования шариков, отличающийся наличием на ведущем круге винтовых разрядных канавок трапециoidalного профиля.

2. Показано, что применение на ведущем круге канавки трапециoidalной формы позволяет повысить точность обрабатываемой сферической поверхности без снижения производительности и повышения трудоемкости ее обработки.

3. Выполнение винтовой канавки трапециoidalного профиля на ведущем круге позволяет выполнять правку несущей части ведущего круга непосредственно на бесцентрово-шлифовальном станке и устранить, тем самым, биение ведущего круга.

4. Для реализации правки ведущего круга не требуется дополнительного резьбонарезного устройства, что значительно упрощает и удешевляет эту операцию.

5. Определена погрешность базирования, возникающая в процессе бесцентрового шлифования шариков для трех вариантов обработки.

6. Традиционная наладка станка при бесцентровом шлифовании шариков дает большую погрешность размеров шариков.

7. Предлагается схема наладки станка, приводящая к повышению точности и уменьшению разноразмерности обработанных шариков.

8. Показано, что наиболее предпочтительной схемой обработки является обработка с врезной подачей ведущим кругом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Олендер, Л.А. Технология и оборудование шарикового производства. – Минск: Выш. шк., 1974. – 334 с.
2. Ящерицын П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько; Акад. наук Белорус. ССР (Минск). – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
3. Щетникович, К.Г. Влияние профиля кольцевой канавки на формообразование сферической поверхности шариков при доводке // Вестник машиностроения. – 2010. – №2. – С. 25-29

4. Захаров, О.В., Склярова, А.И. Геометрические и силовые аспекты суперфиниширования шаров авиационных подшипников // Вестник пермского национального исследовательского университета. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – №4. – С. 90-101.

5. Xu W, Cui D and Wu Y (2016) Sphere forming mechanisms in vibration-assisted ball centreless grinding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 108. 83-94.

6. Childs, T. H. C., & Yoon, H. J. (1992). Magnetic fluid grinding cell design. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 41(1), 343-346. doi:10.1016/S0007-8506(07)61219-0.

7. Бочкарев, А. П. Повышение эффективности и качества формообразования полых тонкостенных шаров бесцентровым шлифованием [Текст]: дис... канд. техн. наук: 05.02.08 / Антон Петрович Бочкарев ; науч. рук. А.Н. Васин. – Саратов, 2013. – 123 с.

8. Васин А.Н., Изнаиров, Б.М., Бочкарев, П.Ю. Научная формообразующая технология бесцентрового шлифования шариков // Научные технологии в машиностроении. – 2012. – № 3(9). – С. 3-10.

9. Васин, А.Н., Изнаиров, Б.М., Бочкарев, А.П. Повышение эффективности исправления погрешностей формы при бесцентровом шлифовании шариков // СТН. – 2013. – № 3. – С. 17-19

REFERENCES

1. Olender, L.A. *Technology and Equipment of Ball Production*. Minsk: Higher School, 1974 – pp. 334.
2. Yashcheritsyn, P.I. Machinery and device thin finishing processes/ P.I. Yashcheritsyn, A.G. Zaitsev, A.I. Barbotko, Academy of Sciences of Belarusian SSR (Minsk). – Minsk: *Science and Engineering*, 1976. – pp. 328.
3. Shchetnikovich, K.G. Circular groove profile impact upon ball surface spherical shaping at smooth finishing // *Bulletin of Mechanical Engineering*. – 2010 – No.2. – pp. 25-29.
4. Zakharov, O.V., Sklyarova, A.I. Geometrical and power aspects of ball super-finishing for aircraft bearings // *Bulletin of Perm National Research University. Mechanical Engineering, Material Science*. – 2015 – No.4. – pp. 90-101.
5. Xu W, Cui D and Wu Y (2016) Sphere forming mechanisms in vibration-assisted ball centreless grinding // International Journal of Machine Tools and Manufacture. 108 83-94.
6. Childs, T. H. C., & Yoon, H. J. (1992). Magnetic fluid grinding cell design. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 41(1), 343-346. doi:10.1016/S0007-8506(07)61219-0.
7. Bochkaryov, A.P. *Effectiveness and Quality Increase of Hollow Thin-Wall Ball Shaping by Centerless Grinding* [Text]: thesis for Can. Sc. Tech. Degree: 05.02.08 / A.P. Bochkaryov; scientific adviser: A.N. Vasin. – Saratov, 2013 – pp. 123.
8. Vasin A.N., Iznairov, B.M., Bochkaryov, P.Yu. High shaping technology for ball centerless grinding // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. – 2012. – No.3(9). – pp. 3-10.
9. Vasin, A.I., Iznairov, B.M., Bochkaryov, A.P. *Effectiveness Increase in Shape Error Correction at Ball Centerless Grinding* // STN. – 2013 – No.3. – pp. 17-19.

Рецензент д.т.н. Н.В. Бекренёв