

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-47-53>

УДК 621.822.7:621.7.083

Шлифование шариков из натурального камня планетарным движением инструмента

Канд. техн. наук, доц. В. П. Луговой¹⁾, магистрант Р. А. Попов¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

Реферат. В статье приведены схема модернизированного станка с планетарным движением инструмента для шлифования шариков из цветного камня и результаты испытания при обработке серпентинита. Существуют различные способы и устройства для обработки металлических шариков абразивными методами, применяемые в производстве подшипников. Эти устройства имитируют работу упорного подшипника. Один из инструментов содержит V-образный желоб, в котором получают преимущественно двухосное вращение обрабатываемые заготовки. Количественными критериями для оценки процесса обработки шариков являются производительность, точность геометрических размеров, сферической формы и шероховатость поверхности. В настоящее время находят также применение шарики из неметаллических материалов: керамики, стекла, ситаллов и камней, которые отличаются от стальных своими физико-механическими свойствами, в первую очередь такими, как хрупкость и меньшая прочность. Особенно это ощутимо при обработке минералов, применяемых в ювелирной промышленности, которые отличаются структурой, наличием слоистости, внутренних дефектов и пр. Все это вызывает необходимость выполнения обработки подобных материалов при режимах, отличающихся от режимов обработки стальных шариков (меньших усилий давления, скоростей). Однако вопросам, посвященным методам обработки шариков из хрупких материалов, в том числе ювелирных камней, уделено недостаточное внимание. Во многих случаях необходимые способы и условия обработки таких материалов определяются повсеместно на практике методом проб и ошибок. Возрастающий объем производства шариков для изготовления ювелирных украшений из натурального камня вызывает необходимость проведения комплексных исследований и обобщения результатов этих исследований для разработки рекомендаций для их практического применения. В настоящей работе предложен метод обработки шариков в устройстве, обеспечивающем планетарное движение шариков за счет того, что дискообразный инструмент получает периодический поворот от действия силы трения, возникающей при касании его боковой поверхности со столом, совершающим планетарное движение. В результате шарики, расположенные в конических гнездах диска, получают ускоренное движение и катятся по циклоидной траектории. Дополнительный путь, который проходят шарики за одинаковое время, а также изменение соотношения углов поворота шариков вокруг своих трех осей создают условия для повышения производительности и точности обработки. Эксперименты были проведены на опытной установке при обработке заготовок из серпентинита, который относится к группе мягких камней. Результаты работы показали, что время обработки партии на каждой операции шлифования деталей до достижения стабилизации размеров не превышает 30 мин. Величина съема припуска, степень достижения необходимой точности размеров шариков и шероховатость определяются размером абразивного зерна.

Ключевые слова: шарики из камня, шлифование, планетарное движение инструмента, конструкция станка, результаты экспериментов

Для цитирования: Луговой, В. П. Шлифование шариков из натурального камня планетарным движением инструмента / В. П. Луговой, Р. А. Попов // *Наука и техника*. 2025. Т. 24, № 1. С. 47–53. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-47-53>

Grinding of Natural Stone Balls with Planetary Movement of the Tool

V. P. Lugovoi¹⁾, R. A. Popov¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The article presents a diagram of a modernized machine with planetary movement of the tool for grinding balls of colored stone and test results when processing serpentinite. There are various methods and devices for processing metal balls

Адрес для переписки

Луговой Вячеслав Петрович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 22,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-91-01
Vlugovoj@bntu.by

Address for correspondence

Lugovoi Vjacheslav P.
Belarusian National Technical University
22, Ya. Kolas str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-91-01
Vlugovoj@bntu.by

using abrasive methods used in the production of bearings. These devices simulate the operation of a thrust bearing. One of the tools contains a V-shaped groove, in which the workpieces being processed receive predominantly biaxial rotation. Quantitative criteria for evaluating the ball processing process are productivity, dimensional accuracy, spherical shape and surface roughness. Currently, balls made of non-metallic materials are also used: ceramics, glass, glass ceramics and stones, which differ from steel ones in their physical and mechanical properties, primarily such as fragility and lower strength. This is especially noticeable when processing minerals used in the jewelry industry, which differ in structure, the presence of layering, internal defects, etc. All this makes it necessary to process such materials under conditions different from the conditions for processing steel balls (lower pressure forces, speeds). However, insufficient attention has been paid to issues devoted to methods of processing balls made of fragile materials, including jewelry stones. In many cases, the necessary methods and conditions for processing such materials are determined throughout practice by trial and error. The increasing volume of production of beads for making jewelry from natural stone necessitates comprehensive research and generalization of the results of these studies in order to develop recommendations for their practical use. In this work, we propose a method for processing balls in a device that ensures planetary motion of the balls due to the fact that the disk-shaped tool receives periodic rotation from the friction force that occurs when its side surface touches a table performing planetary motion. As a result, the balls located in the conical sockets of the disk receive accelerated motion and roll along a cycloid trajectory. The additional path that the balls travel in the same time, as well as the change in the ratio of the angles of rotation of the balls around their three axes, create conditions for increasing the productivity and accuracy of processing. The experiments were carried out on a pilot plant when processing workpieces made of serpentinite, which belongs to the group of soft stones. The results of the work showed that the batch processing time for each part grinding operation until dimensional stabilization is achieved does not exceed 30 minutes. The amount of allowance removal and the degree to which the required ball dimensional accuracy and roughness are achieved are determined by the size of the abrasive grain.

Keywords: stone balls, grinding, planetary movement of the tool, machine design, experimental results

For citation: Lugovoi V. P., Popov R. A. (2025) Grinding of Natural Stone Balls with Planetary Movement of the Tool. *Science and Technique*. 24 (1), 47–53. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2025-24-1-47-53> (in Russian)

Введение

Шарики из стали являются предметом массового производства для подшипников качения. Особенность технологии обработки шариков заключается в том, что заготовки должны непрерывно изменять свое положение в процессе абразивной обработки. При этом обрабатываемые поверхности являются одновременно базовыми. Количественными критериями процесса обработки шариков являются производительность, точность геометрических размеров, сферической формы и шероховатость поверхности [1].

Вместе с тем большое внимание в настоящее время уделяется также производству шариков из различных неметаллических материалов: керамики, стекла, ситаллов и камней, которые отличаются своими физико-механическими свойствами от стальных. Замена стальных шариков в подшипниках качения на прочные керамические материалы позволяет достичь более высоких эксплуатационных показателей гибридных шарикоподшипников, сочетающих керамические тела качения со стальными кольцами [2]. Шарики из стекла и камнесамоцветного сырья отличаются меньшей твердостью и повышенной хрупкостью. Стекланные шарики нашли применение в приборостроительной

отрасли в оптических приборах. Шарики из камнесамоцветного сырья широко применяются в ювелирной отрасли в производстве различных украшений массового спроса: четок, бус и прочих украшений. Перечень минералов, используемых для этих целей, весьма широк. Он охватывает сотни наименований природных камней, которые по стоимостному критерию делятся на драгоценные, ювелирные и поделочные [3]. Способ мелкосерийного изготовления шариков из камней приведен в [4].

Устройство для планетарного шлифования шариков

Существует многочисленное количество способов и устройств для обработки металлических шариков абразивными методами, которые могут быть использованы также и для обработки шариков из хрупких материалов. Эти устройства имитируют работу упорного подшипника. Один из инструментов содержит V-образный желоб, в котором получают преимущественно двухосное вращение обрабатываемые заготовки [5]. Но не всегда эти методы могут быть использованы для обработки хрупких материалов по двум причинам: возможности разрушения заготовок в условиях контакта с твердыми инструментами и ухудшения пока-

зателей точности формы в результате взаимного абразивного истирания шариков между собой при качении в кольцевых желобах.

В устройстве [6], предназначенном для шлифования шариков, сочетаются вращательные движения двух эксцентрично установленных дисков с одинаковыми угловыми скоростями, один из которых содержит на торцевой поверхности конические отверстия, а второй имеет плоское эластичное покрытие. Теоретические исследования кинематики шариков в процессе их шлифования в данном устройстве [7] позволили получить аналитические зависимости для расчета угловой скорости и скорости скольжения шарика в коническом отверстии.

Одним из способов шлифования шариков из хрупких материалов, нашедших применение в оптическом производстве, является способ обработки между двумя дисками, обеспечивающий планетарно-вращательное движение шариков [8]. Устройство для его осуществления содержит инструмент с эластичным покрытием из резины, совершающий планетарное движение (рис. 1).

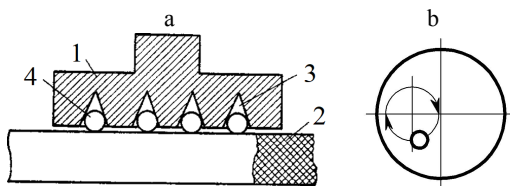


Рис. 1. а – схема устройства для обработки шариков;
б – траектория движения шарика
на поверхности планшайбы

Fig. 1. а – Scheme of the device for processing balls;
b – ball trajectory on the faceplate surface

Предварительно обработанные шарики устанавливают между двумя инструментами: нижней планшайбой 2 с резиновым покрытием и верхним металлическим диском 1 с коническими отверстиями для размещения шариков 4 (рис. 1а). Шарик погружается в коническое гнездо на $2/3$ диаметра и, соприкасаясь с его поверхностью, образует шаровой шарнир, который имеет три степени свободы. Планшайбу или диск приводят в кругообразное движение вокруг центра с постоянной скоростью без изменения ее направления, в результате чего шарик вращается вокруг трех осей и в условиях шлифующей абразивной среды, притираясь к кониче-

ской поверхности, принимает шарообразную форму. Все шарики, расположенные в ячейках конусных отверстий, описывают по планшайбе одинаковые и параллельные друг другу круговые движения (рис. 1б). Данный способ, обеспечивая необходимую точность обработки, однако не обладает высокой производительностью шлифования.

Подобные схемы обработки предложены в устройствах, приведенных в [9–11].

В способе обработки шариков изменение траектории их движения по замкнутой кривой второго порядка [12] достигается, либо изменив траекторию движения инструмента – планшайбы 2, придавая ей движение по эллиптической или любой другой замкнутой кривой, либо изменяя скорость ее вращения ω (рис. 2а). В первом случае переменное движение планшайбы 2 вокруг вертикальной оси по траектории 8 приводит к тому, что из-за изменения отношений радиусов R_1/R_2 и R_3/R_4 (рис. 2б) шарики 1 перемещаются по траектории 3, касаясь о стенки конусных отверстий с переменной скоростью. В результате сложения двух переменных скоростей, направленных в разные стороны, вращение шариков вокруг своих осей усиливается, способствуя повышению производительности и точности сферической формы. При этом скорость качения шариков вокруг горизонтальной оси изменяется. Она ускоряется или замедляется в зависимости от направления движения планшайбы: при движении слева направо шарики движутся с большей скоростью, а при движении справа налево – с меньшей скоростью.

Траектория движения шарика при этом соответствует траектории удлиненной циклоиды (рис. 3с), описываемой уравнениями: $x = rt - rsint$, $y = rt - rcost$, где r – радиус кривошипа 8 ($0 \leq t \leq 2\pi$). Длина дуги циклоиды выражается формулой $S(t) = 4r \left(1 - \cos \frac{t}{2} \right)$, где s – радиус

ее кривизны, равный $4r \cos \frac{t}{2}$. Граница периода циклоиды ограничена точками со значениями переменной $t = 2\pi k$, где k – произвольное целое число. Из приведенной формулы следует, что длина дополнительного пути, пройденного каждым шариком, зависит от радиуса r .

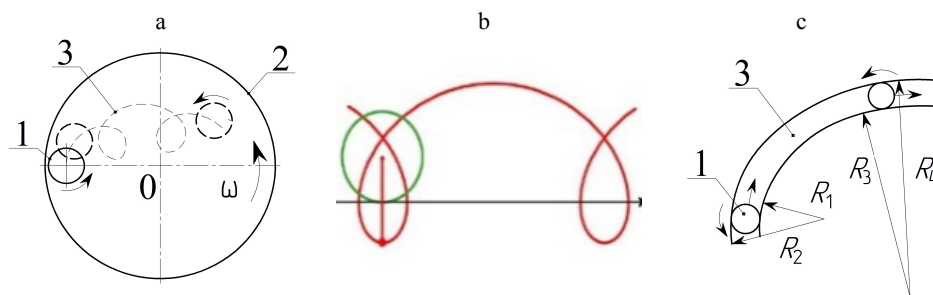


Рис. 2. Схема движения шариков при шлифовании [2]
 Fig. 2. Scheme of ball movement during grinding [2]

К недостаткам такого способа следует отнести необходимость применения дополнительного привода движения планшайбы по сложной траектории (эллиптической или иной).

В настоящей работе предложен метод обработки шариков в устройстве, которое позволяет изменить скорость и направление вращения шариков вокруг своих осей без дополнительных источников движения. Эта цель достигается тем, что верхний диск 2 получает периодическое движение от действия силы трения, возникающей при касании его боковой поверхности с губчатой резиной, приклеенной к планке 6, которая жестко присоединена к столу 4 с помощью стоек 7 (рис. 3а).

Для увеличения коэффициента трения шариков 1 стол 4 покрыт листовой резиной. Шлифование шариков осуществляется в присутствии абразивной суспензии, а необходимое давление инструмента на них создается грузом P , установленным на оси 5.

Планетарное движение со скоростью 60 об/мин стола 4 осуществляется от электродвигателя через ременную и червячную передачу и связанные с центральным зубчатым колесом две одинаковые шестерни, на торцевой поверхности которых закреплены на радиусе r эксцентрично расположенные пальцы 8. При вращении пальцев 8 стол совершал планетарное движение в горизонтальной плоскости. Совершая периодические круговые движения с переменной скоростью, диск 2 заставляет перемещаться шарики по траектории переменной кривизны (рис. 3с). В правом положении стола диск 2, соприкасаясь с планкой 8 (фиг. 3б), проворачивается вокруг своей вертикальной оси на некоторый угол α , ускоряя движение шарика. Таким образом, изменение кинематики движения шарика за один круговой оборот стола позволяет пройти ему больший путь, способствуя повышению производительности и точности обработки шариков.

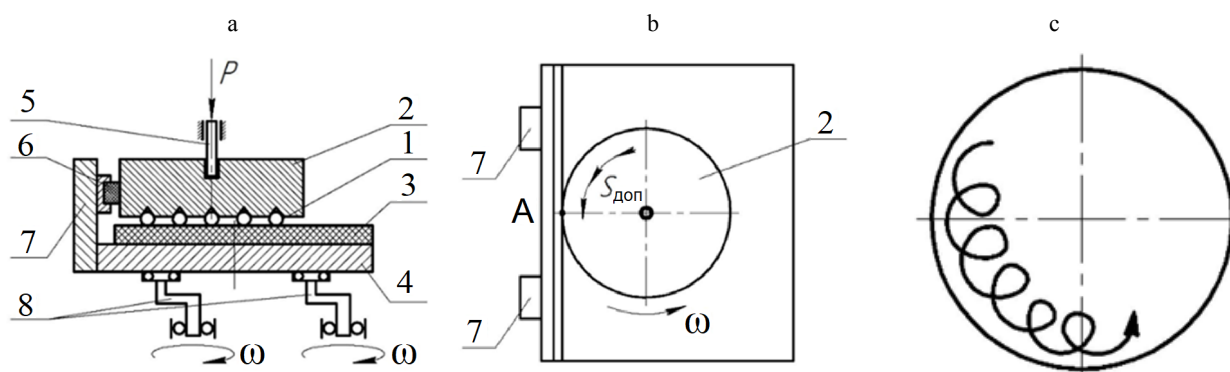


Рис. 3. а – схема устройства для шлифования шариков; б – положения верхнего диска в момент контакта с подвижным столом; в – траектории движения шарика по циклоиде

Fig. 3. а – diagram of the device for grinding balls; б – position of the upper disk at the moment of contact with movable table; в – trajectory of the ball along the cycloid

Результаты испытаний

Экспериментальные исследования предложенного способа были проведены в устройстве, приведенном на рис. 4а. Верхний диск с конусными отверстиями диаметром 14 и 180 мм был изготовлен для черновой обработки из стали (рис. 4б) и чугуна, а для чистового шлифования – из текстолита. К столу прямоугольной формы была наклеена плотная листовая резина толщиной 8 мм.

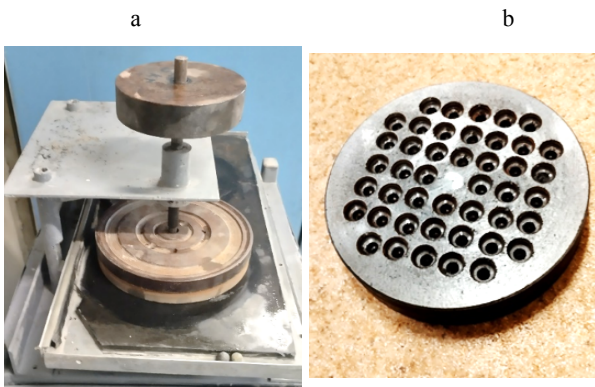


Рис. 4. а – устройство для шлифования шариков; б – шлифовальный диск с коническими отверстиями
 Fig. 4. а – device for grinding balls; б – grinding disc with conical holes

В качестве материала исходной заготовки был принят серпентинит (змеевик) зеленого цвета, который относится к группе минералов, силикатов магния. Состоит преимущественно из минералов серпентина с примесью карбонатов, граната, оливина, пироксена, амфиболов и талька. Отличается большой прочностью и волокнистой структурой. По степени твердости он относится к камням мягким (по шкале Мооса 2,5–4). Плотность 2,5–2,6 г/см³, устойчив к истиранию. В зависимости от включений может быть разным по цвету, твердости и структуре. Его используют как поделочный самоцвет для изготовления ваз, шкатулок, подсвечников; камень высокого сорта идет на изготовление ювелирных украшений и бижутерии (бус, кольцо и пр.). Сложное вращение шариков вокруг своих осей при непрерывной смене направления их усилий на стенки конусных отверстий в верхнем диске позволяет повысить точность шлифования по форме сферы.

Исходными заготовками для изготовления шариков служили кубики размером 14 мм (рис. 5а),

которые были получены распиливанием минерала на отрезном станке. В структуре минерала часто просматриваются включения в виде черных полос или вкраплений. Для получения сферических полуфабрикатов кубики предварительно скруглялись на гранескругляющем шлифовальном станке до диаметра 12 мм (рис. 5б), после чего подвергались последовательному шлифованию в предложенной конструкции станка (рис. 5с). После полного цикла последовательного шлифования и полирования были получены шарики со средним размером в диаметре 10,5 мм. Шлифование производилось в три перехода абразивным материалом из электрокорунда белого (оксида алюминия) марки 25А ГОСТ 3647–80. На первом этапе производилось предварительное шлифование шлифпорошком 6 (размер зерна 60–80 мкм) для придания полуфабрикатам формы сферы и снижения шероховатости. На втором этапе выполнялось последовательное получистовое шлифование микропорошком М28 ГОСТ 28818–90 (28–20 мкм), а затем чистовое шлифование микропорошком М14 (14–10 мкм) с целью дальнейшего повышения точности формы и размеров и снижения шероховатости поверхности для последующего полирования шариков алмазной пастой зернистостью 7/5.

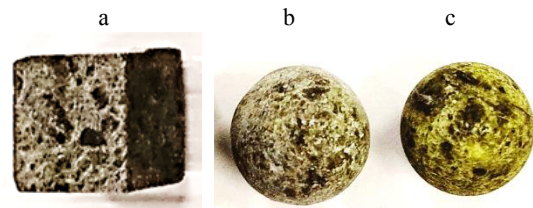


Рис. 5. а – исходная заготовка; б – заготовка после гранескругления; с – шарик после шлифования
 Fig. 5. а – initial workpiece; б – workpiece after facet rounding; с – ball after grinding

Результаты исследований показали, что изменение формы и размеров шариков на каждом из этапов шлифования происходит наиболее интенсивно на начальном этапе обработки. Продолжительность обработки на первой операции предварительного шлифования составила 30–40 мин (рис. 6). На последующих двух операциях она сокращается соответственно до 30 и 20 мин, что объясняется снижением степени абразивности воздействия на материал заготовки зернами меньшего размера и дости-

жением предельного значения шероховатости для данной фракции зерна.

Зависимость величины снимаемого припуска от размера абразивного зерна приведена на рис. 7.

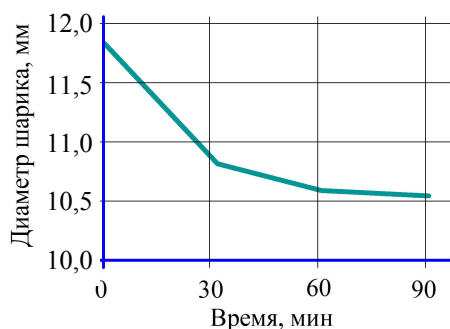


Рис. 6. Влияние времени на изменение размера шариков при различной зернистости абразива

Fig. 6. Influence of time on the change in ball size at different abrasive grain sizes

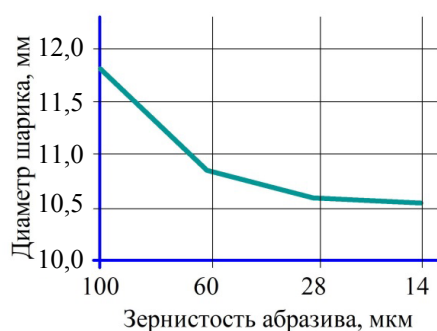


Рис. 7. Влияние зернистости абразива на сьем материала при шлифовании шариков

Fig. 7. Influence of abrasive grain size on material removal when grinding balls

Количественная оценка съема материала производилась по величине среднего диаметра шариков после каждой из операций. Видно, что обработка шариков может быть окончательно завершена при шлифовании абразивным микропорошком размером 14–10 мкм, после чего целесообразна предварительная и окончательная полировка камня алмазными пастами зернистостью 7/5 и 3/2 на вращающихся полировальниках из текстильных материалов при скорости вращения 15–20 м/с.

ВЫВОДЫ

1. Технология шлифования шариков из хрупких материалов (минералов, стекла, кера-

мики), идентичная технологии изготовления металлических шариков подшипников, имеет ряд особенностей, вызванных физико-механическими свойствами этих материалов, которые различаются по степени твердости, хрупкости и структуре. Механизм обработки шариков основан на получении сложной кинематики их движения между шлифовальными инструментами.

2. До настоящего времени отсутствуют научно обоснованные сведения по назначению оптимальных режимов обработки шариков из камней, что требует проведения исследований с целью установления необходимых режимов обработки и рекомендаций применительно к минералам различных групп.

3. Обработка шариков из камней осуществляется, как правило, на станках оптического производства для шлифования шариков из стекол, обладающих изотропными свойствами и одинаковой структурой внутри материала. Однако в ряде случаев они не могут быть применимы для шлифования шариков из натуральных минералов, отличающихся от стекла рядом своих свойств, что требует разработки специальных способов и устройств.

4. Предложено модернизированное устройство для шлифования шариков, в котором достигается изменение кинематики движения последних за счет принудительного периодического поворота инструмента.

5. Установлены оптимальное время шлифования шариков из мягкого камня (серпентинита) и влияние зернистости абразива на скорость съема материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Олендер, Л. А. Технология и оборудование шарикового производства / Л. А. Олендер. Минск: Вышэйш. шк., 1974. 336 с.
2. Алмазная доводка керамических шаров из карбида бора / С. В. Сохань [и др.] // Оборудование и инструмент. 2018. № 3. С. 54–57. URL: https://www.informdom.com/uploads/metal/18_3/54_Almaznaya_dovodka_2018_3.pdf/.
3. Собчак, Н. Энциклопедия минералов и драгоценных камней / Н. Собчак, Т. Собчак. СПб.: Нева; М.: ОЛМА-ПРЕСС, 2002. 479 с.
4. Синкенес, Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней / Дж. Синкенес. М.: Мир, 1998. 423 с.

5. Ящерицын, П. И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П. И. Ящерицын, А. Г. Зайцев, А. И. Барботько. Минск: Наука и техника, 1976. 328 с.
6. Патент ВУ 1444, МПК6 В 24 В 11/02. Способ обработки шариков: № 525: заявлено 19.07.1993: опубл. 16.12.1996 / К. Г. Щетникович; заявитель: К. Г. Щетникович. 2 с.
7. Щетникович, К. Г. Кинематика шариков при тонком шлифовании между несоосными дисками в конических отверстиях / К. Г. Щетникович, М. Г. Киселев // Вестник Белорусского национального технического университета. 2009. № 3. С. 39–45.
8. Михнев, Р. Л. Оборудование оптических цехов: учеб. для техникумов / Р. Л. Михнев, С. К. Штандель. М.: Машиностроение, 1991. 367 с.
9. Патент RU 1510250, МКИ В24 В 11/02 (2006.01). Способ шлифования шариков: № 4242987/08: заявлено 13.05.1987: опубл. 10.12.1995 / Л. Н. Васин, И. А. Коробченко. 7 с.
10. Авторское свидетельство SU 1572794, МПК В24В 11/02(2006.01). Способ обработки шариков из оптических материалов: № 4436255: заявлено 30.03.1988: опубл. 23.06.1990 / Н. Н. Николаев, С. П. Оробинский, Т. М. Акрамовская. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1572794A1_19900623.
11. Авторское свидетельство SU 1787747, МПК В24В 11/02 (2006.01). Способ обработки шариков: № 4839688: заявлено 1990.06.14.06.1990: опубл. 15.01.93 / К. Г. Щетникович, Б. Б. Стальмошонок. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1787747A1_19930115.
12. Авторское свидетельство SU 1713819 МПК В29С 37/02(2006.01). Устройство для обработки шариков: №4842378: заявлено 12.04.1990: опубл. 23.02.92 / А. С. Лобанкин. URL: https://yandex.ru/patents/doc/SU1713819A1_19920223.

Поступила 24.09.2024

Подписана в печать 28.11.2024

Опубликована онлайн 31.01.2025

REFERENCES

1. Olender L. A. (1974) *Technology and Equipment for Ball Production*. Minsk, Vysheyschaya Shkola Publ. 336 (in Russian).
2. Sokhan'S. V., Maistrenko A. L., Borimskii A. I., Sorochenko V. G., Voznyi V. V., Gamanyuk M. P., Zubanev E. N. (2018) Diamond Finishing of Ceramic Balls Made of Boron Carbide. *Oborudovanie i Instrument* [Equipment and Tools], (3), 54–57. Available at: https://www.informdom.com/uploads/metal/18_3/54_Almaznaya_dovodka_2018_3.pdf (in Russian).
3. Sobchak N., Sobchak T. (2002) *Encyclopedia of Minerals and Gems*. St. Petersburg, Neva Publ. Moscow, OLMAPRESS Publ. 479 (in Russian).
4. Sinkankas J. (1984) *Gem Cutting. A Lapidary's Manual*. Van Nostrand Reinhold Company.
5. Yashcheritsyn P. I., Zaitsev A. G., Barbotko A. I. (1976) *Fine Finishing Processes for Processing Machine Parts and Devices*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 328 (in Russian).
6. Shchetnikovich K. G. (1996) *Method of Processing Balls*. Patent No 1444 Republic of Belarus (in Russian).
7. Shchetnikovich K. G., Kiselev M. G. (2009) Ball Kinematics in Fine Polishing between Misaligned Disks in Conical Openings. *Vestnik Belorusskogo Natsional'nogo Tekhnicheskogo Universiteta* [Bulletin of the Belarusian National Technical University], (3), 39–45 (in Russian).
8. Mikhnev R. L., Shtandel S. K. (1991) *Equipment for Optical Workshops*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 367 (in Russian).
9. Vasin, L. N., Korobchenko I. A. (1995) *Method of Grinding Balls*. Patent of Russian Federation No 1510250 (in Russian).
10. Nikolaev N. N., Orobinsky S. P., Akramovskaya T. M. (1990) *Method for Processing Balls Made of Optical Materials*. USSR Author's Certificate No 31572794 (in Russian).
11. Shchetnikovich K. G., Stalmoshonok B. B (1993) *Method of Processing Balls*. USSR Author's Certificate No 1787747 (in Russian).
12. Lobankin A. S. (1992) *Device for Processing Balls*. USSR Author's Certificate No 1713819 (in Russian).

Received: 24.09.2024

Accepted: 28.11.2024

Published online: 31.01.2025