

УДК 666.22.037

ШЛИФОВАНИЕ СТЕКЛЯННЫХ ШАРИКОВ МЕЖДУ ДВУМЯ СООСНЫМИ КОЛЬЦАМИ И ДИСКОМ

К. Г. ЩЕТНИКОВИЧ, М. Г. КИСЕЛЕВ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Введение

В оптическом производстве стеклянные шарики используются в основном при изготовлении линз микрообъективов и конденсоров толщиной, близкой к радиусу выпуклой поверхности или превышающей ее. Тонкое шлифование шариков выполняют на станках, содержащих верхний неподвижный шлифовальник с коническими отверстиями для размещения шариков и нижнюю планшайбу, с наклеенной на ее поверхность листовой резиной [1]. Планшайба совершает равномерное поступательное движение по окружности. Под действием сил сцепления с резиной шарики вращаются в отверстиях шлифовальника и притираются в присутствии абразивной суспензии к его коническим поверхностям.

Обработанные шарики имеют большую разноразмерность, вызванную различием диаметров исходных заготовок и разноглубинностью конических отверстий на шлифовальнике. Вследствие указанного недостатка шарики после каждого перехода сортируют по диаметру.

В способе обработки сферических поверхностей [2] шлифование шариков осуществляется путем планетарного вращения инструментальных втулок нижнего диска с установленными шариками и вращения верхнего диска, которому сообщается дополнительное возвратно-качательное перемещение. Однако зависимость скорости шарика от его положения на нижней планшайбе не позволяет уменьшить разноразмерность шариков обрабатываемой партии.

Значительное снижение разноразмерности обеспечивает, используемый в подшипниковой промышленности, метод обработки шариков между двумя соосными дисками в кольцевых канавках [3]. Скорость проскальзывания шариков относительно дисков в данном случае мала, поэтому обработка осуществляется при высокой скорости инструмента и большом давлении в рабочей зоне. Однако при шлифовании стеклянных шариков из-за хрупкости материала скорость вращения нижнего диска и усилие прижима верхнего диска приходится значительно уменьшать, что приводит к резкому снижению скорости съема припуска.

Обработка шариков в устройствах [4]–[6] осуществляется инструментом, состоящим из трех соосно расположенных деталей: двух концентрических приводных колец, фаски, на которых образуют V-образную кольцевую канавку и неподвижного или связанного с приводом вращения диска. Такая конструкция инструмента дает возможность увеличить интенсивность обработки за счет повышения угловой скорости и скорости проскальзывания шариков в рабочей зоне.

Однако при взаимодействии шарика с инструментом по трем площадкам контакта на каждой из них имеются точки, в которых проскальзывание отсутствует. Скорость проскальзывания увеличивается на краю площадки контакта, но давление здесь меньше, чем в центральной области площадки, следовательно, и в данном случае обработка осуществляется в условиях трения качения с дополнительным проскальзыванием шариков, вызванном различием угловых скоростей колец. При уве-

личении или уменьшении мгновенного натяга на одной из площадок контакта с инструментом происходят пропорциональные изменения натяга на других площадках контакта, поэтому значительных изменений положения мгновенной оси вращения шарика не наблюдается.

Постановка задачи

Повышение производительности процесса шлифования шариков соосным инструментом может быть достигнуто увеличением скорости проскальзывания шариков в рабочей зоне и более быстрым изменением положения мгновенной оси вращения шарика. Одним из возможных путей повышения точности обработки шариков в устройствах с концентрическими кольцами и одновременно упрощения конструкции инструмента является установка одного из колец не на отдельном шпинделе, а непосредственно на обрабатываемые заготовки по двум базовым поверхностям. В этом случае достигается четырехточечный контакт шариков с инструментом, и их перемещение по кольцевой дорожке сопровождается скольжением. Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию процесса тонкого шлифования стеклянных шариков между нижним приводным диском и двумя соосными кольцами, одно из которых базируется на обрабатываемых заготовках.

Конструкция инструмента

Инструмент для тонкого шлифования шариков (рис. 1) разработан и изготовлен на базе устройства для обработки шариков [7] между нижним диском и, расположенными над ним, двумя концентрическими кольцами, рабочие поверхности которых образуют кольцевую дорожку трапецеидальной формы. Шарик *13* обрабатывается между соосно установленными нижним приводным диском *14* и двумя кольцами *1* и *3*. Внутреннее приводное кольцо *3* имеет коническую фаску *7* и установлено на оправке *4* верхнего шпинделя. Наружное неподвижное кольцо *1* имеет кольцевую проточку *2* прямоугольного профиля и базируется на обрабатываемых шариках.

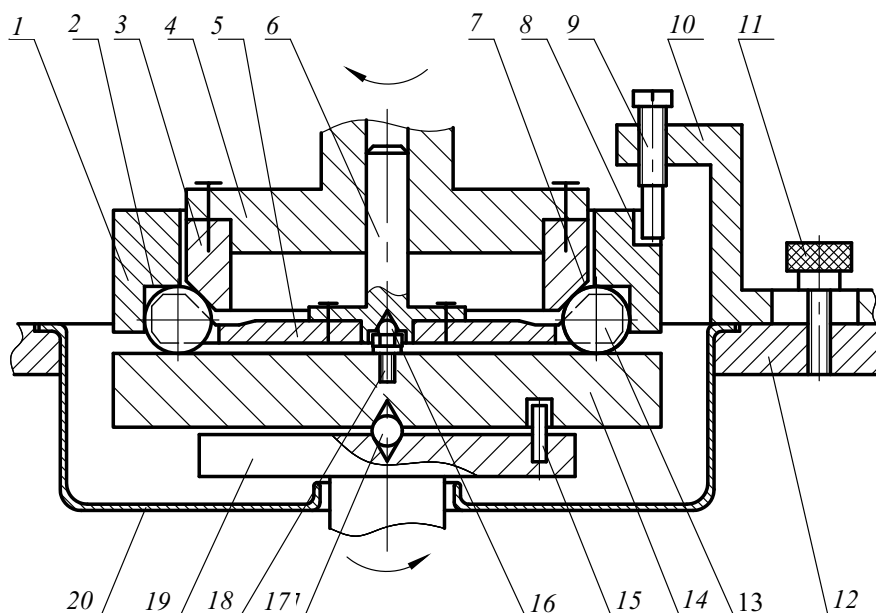


Рис. 1. Конструкция инструмента для шлифования шариков

Для фиксации наружного кольца от вращения на нем выполнена выемка *8*, в которую входит стопорный винт *9* кронштейна *10*. Кронштейн с помощью зажимного винта *11* закреплен на столе *12*. Нижний диск установлен на оправке *19* на опорном

шарике 17 и получает вращение от поводка 15. На нижнем диске установлен сепаратор 5, жестко соединенный с осью 6, входящей с малым зазором в центрирующее отверстие оправки 4. Нижний конец оси через шарик 16 опирается на регулировочный болт 18, закрепленный на нижнем диске. Излишки абразивной суспензии стекают в таз 20.

Наружное кольцо имеет две базовые поверхности, по которым оно устанавливается на обрабатываемые заготовки: цилиндрическую и торцевую поверхности кольцевой проточки. Шарикки прижимаются к цилиндрической поверхности проточки конической фаской внутреннего кольца и перемещают наружное кольцо в горизонтальной плоскости в положение, соосное внутреннему кольцу. С помощью торцевой поверхности наружное кольцо занимает положение, параллельное горизонтальной поверхности нижнего диска. Установка нижнего диска на опорном шарике позволяет компенсировать биение конической фаски верхнего приводного кольца. Самоустановка в процессе обработки в требуемом положении наружного кольца и нижнего диска значительно снижают точностные требования к верхнему и нижнему шпинделям установки.

Рабочее давление на заготовки создается осевой нагрузкой, прикладываемой к внутреннему кольцу, и усилием прижатия наружного кольца к шарикам. Возможность раздельной регулировки осевой нагрузки и усилия прижатия неподвижного кольца к шарикам расширяет технологические возможности управления процессом шлифования. Контакт шарика с инструментом осуществляется по четырем несимметрично расположенным точкам, поэтому при перемещении шарика по кольцевой дорожке относительно одной из ее поверхностей будет наблюдаться скольжение.

Кинематика шариков

Теоретический анализ кинематики шариков в зоне обработки (рис. 2) основывается на допущениях точечного контакта шарика с инструментом и отсутствия проскальзывания в наиболее нагруженных точках контакта A , B и K [8]. Мгновенная ось вращения проходит через неподвижную точку на кольце K и точку P , являющуюся полюсом скоростей V_A и V_B точек A и B контакта шарика с дисками. Значения угловых скоростей шарика (абсолютной ω , относительной ω_r и переносной ω_e) вычисляются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \omega &= \frac{\omega_n R + \omega_b (R - r \cos \alpha)}{r [\sin(\alpha + \beta) + \cos \beta]}; \\ \omega_r &= \frac{\omega \cos \beta}{\cos \gamma}; \quad \omega_e = \frac{\omega r \sin \beta}{R}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где ω_n и ω_b – угловые скорости нижнего диска и внутреннего приводного кольца соответственно; R – расстояние от центра шарика до оси вращения инструмента; r – радиус шарика; α – угол конической фаски на внутреннем кольце; β и γ – углы наклона мгновенных осей соответственно абсолютного и относительного вращения шарика к горизонтали.

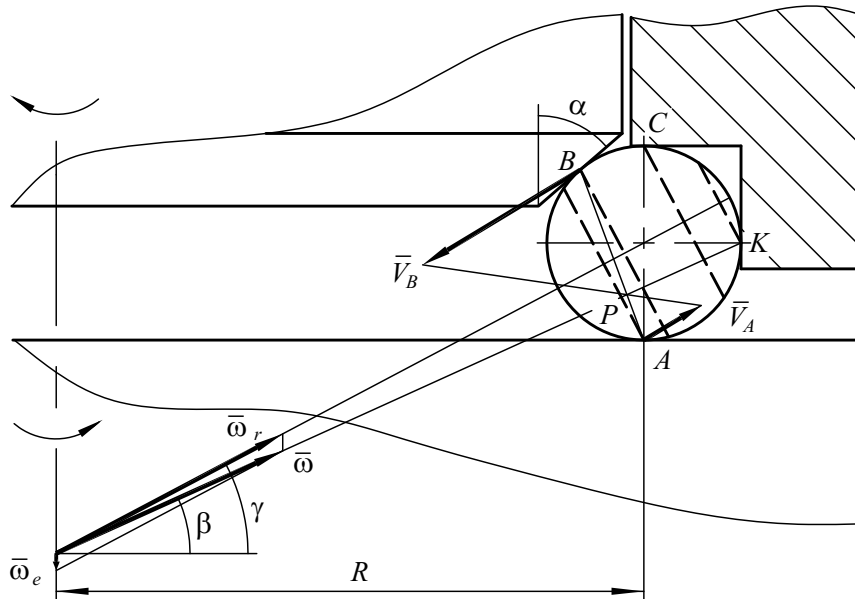


Рис. 2. Кинематика шарика в зоне обработки

Углы β и γ определяются выражениями:

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\omega_b(R - r \cos \alpha) - \omega_n R \sin \alpha}{\omega_b(R - r \cos \alpha) + \omega_n R(1 + \cos \alpha)}; \quad \operatorname{tg}\gamma = \frac{R + r}{R} \operatorname{tg}\beta. \quad (2)$$

Скорость проскальзывания шарика относительно горизонтальной поверхности кольцевой проточки на неподвижном кольце (в точке C) равна

$$V_C = \sqrt{2} \omega r \sin\left(\frac{\pi}{4} + \beta\right). \quad (3)$$

Анализ формул (1)–(3) показывает, что противоположное вращение внутреннего кольца и диска обеспечивает более высокие значения угловой скорости шариков и скорости скольжения относительно неподвижного кольца по сравнению с вращением в одну сторону. При противоположном вращении снижается величина переносной угловой скорости ω_e , определяющей линейную скорость шариков в рабочей зоне, и уменьшаются, действующие на шарики, динамические нагрузки. Сравнение численных значений скорости проскальзывания шариков при традиционном способе доводки (V-образный профиль канавки с углом 90° при длине дуги контакта 0,3 диаметра шарика) и при шлифовании предлагаемым методом показывает, что в последнем случае она возрастает более чем в 5 раз. Увеличение частоты вращения внутреннего кольца по сравнению с нижним диском обеспечивает большую скорость проскальзывания шариков относительно кольцевой проточки на неподвижном кольце, поэтому данный режим является более производительным. Меньшая величина угловой скорости нижнего диска благоприятствует также лучшему удержанию абразивной суспензии на его поверхности.

Для достижения высоких точностных показателей шариков необходимо учитывать расположение следов обработки на сферической поверхности. Следы от контакта шарика с инструментом (рис. 2) представляют собой окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных вектору $\bar{\omega}_r$ и, следовательно, будут зависеть от уг-

ла γ наклона оси относительного вращения. Как видно из формулы (2) угол γ зависит от соотношения угловых скоростей внутреннего кольца и диска.

Учитывая высокую скорость проскальзывания шарика относительно кольца в точке C , необходимо стремиться к увеличению диаметра окружности контакта проходящей через нее. Однако при обработке необходимо избегать близкого к горизонтальному положения вектора $\vec{\omega}$, которое наблюдается, когда угловая скорость нижнего диска несколько превышает скорость приводного кольца. В этом случае скорость поступательного перемещения шарика мала, что ухудшает условия приработки заготовок неподвижному кольцу. Следы обработки, проходящие через диаметрально противоположные точки A и C , накладываются друг на друга, а след от точки K вырождается в точку. Исходя из вышесказанного, скорость приводного кольца должна превышать скорость нижнего диска. Значительное увеличение ω_v по сравнению с ω_n сопровождается смещением следов обработки от точек A и C к краям сферы и уменьшением их протяженности, что также нежелательно.

Рассмотренная кинематика шарика является преобладающей в зоне обработки. Это подтверждают результаты измерений частоты вращения сепаратора при нагрузках на внутреннее кольцо, значительно превышающих давление на наружное, и визуальные исследования следов обработки на поверхности шарика, полученные при очень медленном вращении инструмента.

Контакт шарика с инструментом по четырем площадкам значительно ускоряет его переориентацию в пространстве. Тормозящий момент от силы трения скольжения шарика о горизонтальную поверхность неподвижного кольца значительно увеличивает силы сцепления по остальным площадкам контакта с инструментом. Радиальное и торцевое биения инструмента, погрешности контактирующих поверхностей, неизбежные вибрации в технологической системе приводят к непрерывному изменению сил трения, действующих на шарики по площадкам контакта. Наиболее быстрые изменения кинематики шарика происходят в моменты, когда по тем или иным причинам контактная нагрузка по площадке C приближается к нагрузке по площадке B . Это вызывает уменьшение скорости скольжения шарика относительно горизонтальной поверхности кольцевой проточки и появления скольжения шарика относительно конической поверхности фаски на приводном кольце. Вектор $\vec{\omega}$ в этот момент поворачивается вокруг точки K по часовой стрелке на значительный угол. В следующее мгновение вектор $\vec{\omega}$ займет положение под углом β к горизонтальной линии, но следы обработки пройдут уже по другому участку сферы. Периодические изменения мгновенного натяга по площадкам контакта B и C сопровождаются быстрым нанесением сетки следов на сферическую поверхность шарика.

Экспериментальные исследования

Исследования процесса тонкого шлифования проводились на шариках диаметром 5–6 мм, изготовленных из стекла марки К8 после шлифования электрокорундом белым зернистостью М28. Нижний диск и кольца изготавливались из чугуна марки СЧ 15-32. Материал сепаратора – бронза БрАмц9-2. При шлифовании шариков использовалась водная суспензия электрокорунда белого зернистостью М10. Разнообразие шариков в партии V_{DwL} и непостоянство единичного диаметра V_{DwS} измерялись оптикатором с ценой деления 0,1 мкм. В процессе проведения экспериментальных исследований определялся рациональный диапазон осевого давления p_o , оказываемого на шары приводным кольцом, и частоты его вращения n_v при давлении на наружного кольца $p_k = 0,25$ Н/шар и частоте вращения нижнего диска $n_n = 1,0$ с⁻¹.

Точность шариков (рис. 3) быстро улучшается в первые 20–25 мин шлифования, когда интенсивной обработке подвергаются заготовки, имеющие самые большие размеры в партии. После выравнивания размеров точность шариков возрастает постепенно, достигая максимальной величины во время выхаживания. Скорость съема припуска при достаточном количестве абразивного материала составляет 1,0–1,4 мкм/мин.

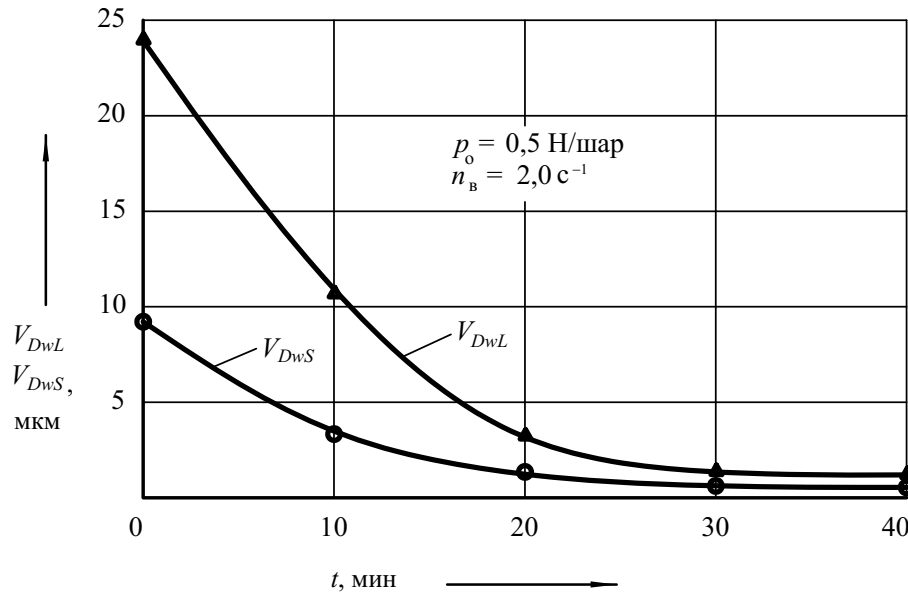


Рис. 3. Влияние продолжительности обработки t на точность тонкого шлифования шариков

Рост нагрузки на приводное кольцо (рис. 4, а) вызывает постепенное увеличение отклонений от сферической формы шарика из-за роста съема припуска и при давлении более 0,9 Н/шар заметно возрастает разноразмерность шариков.

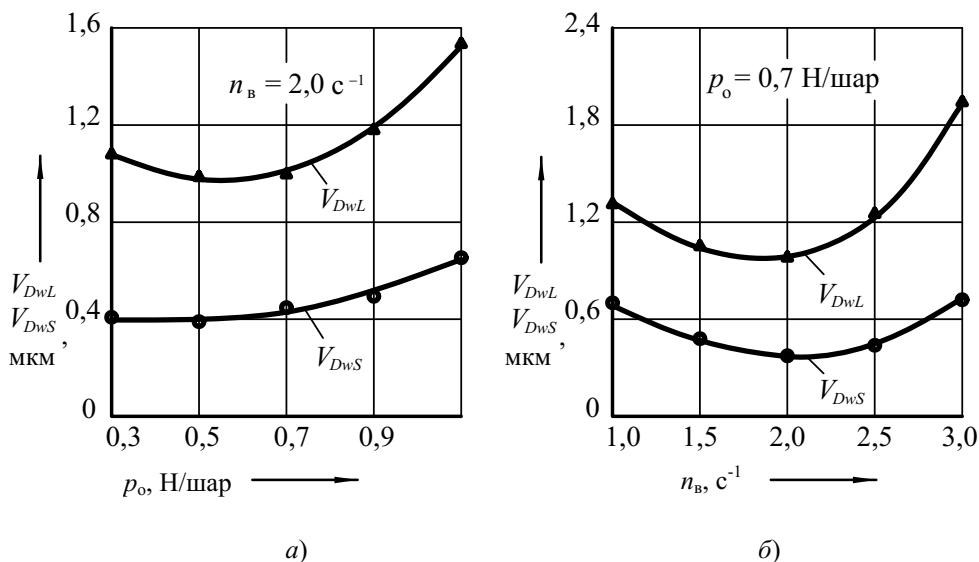


Рис. 4. Влияние осевой нагрузки (а) и частоты вращения приводного кольца (б) на точность шариков

При малых давлениях (менее 0,5 Н/шар) несколько увеличивается разноразмерность шариков в обрабатываемой партии вследствие значительного снижения скоро-

сти поступательного перемещения шариков при осевых нагрузках, близких к нагрузкам на неподвижное кольцо. Сильное влияние на точность обработки оказывает изменение частоты вращения приводного кольца (рис. 4, б), влияющее на скорость съема припуска и на расположение следов обработки на поверхности шарика. Наилучшие точностные параметры были достигнуты при частоте вращения $1,5\text{--}2,5\text{ с}^{-1}$, что соответствует диапазону отношений частот вращений приводного кольца и нижнего диска $1,5\text{--}2,5$.

Использование бронзового сепаратора исключает контакт шариков между собой в процессе обработки и положительно сказывается на качестве сферической поверхности. Визуальное обследование шариков показало отсутствие на их поверхности сколов и трещин. Поверхность имеет однородную структуру и подготовлена для выполнения следующей операции технологического процесса – полирования.

Заключение

Взаимодействие шариков с инструментом по четырем несимметрично расположенным площадкам контакта сопровождается их скольжением в рабочей зоне и интенсивным изменением положения мгновенной оси вращения шарика. Самоустановка в процессе обработки в требуемом положении нижнего диска и неподвижного кольца позволяет компенсировать биение жестко установленного приводного кольца и достигать высокой точности шлифования. Рассмотренная конструкция инструмента может быть применена для шлифования, доводки и полирования шариков, изготовленных из различных хрупких материалов: металлокерамики, магнитотвердых спеченных материалов, ювелирных и поделочных камней.

Анализ кинематики шариков при высоких нагрузках на приводное кольцо и результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. Соотношение частот вращения приводного кольца и нижнего диска оказывает сильное влияние на расположение следов на поверхности шарика и величину скорости скольжения шариков в рабочей зоне. Скорость скольжения возрастает при противоположном вращении нижнего диска и приводного кольца, при этом увеличение частоты вращения приводного кольца в большей степени влияет на скорость скольжения.

2. Наилучшие точностные параметры шариков диаметром 5–6 мм были достигнуты при осевом давлении 0,4–0,7 Н/шар, давлении неподвижного кольца 0,25 Н/шар и частоте вращения приводного кольца в 1,5–2,5 раза превышающей частоту вращения нижнего диска.

Литература

1. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.] ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Санкт-Петербург : Политехника, 2004. – 679 с.
2. Способ обработки сферических поверхностей : пат. 2069 Респ. Беларусь, МПК6 В 24 В 11/02 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. И. Чембрович, В. И. Шамкалович, Т. А. Реут ; заявитель Белорус. гос. политех. акад. – № 88 ; заявл. 15.01.93 ; опубл. 30.03.98 // Официальный бюл. / Белгоспатент. – 1998. – № 1. – С. 103.
3. Олендер, Л. А. Совершенствование формообразования сферических поверхностей / Л. А. Олендер, Ю. А. Добрынин. – Минск : БелНИИТИ, 1980. – 44 с.
4. Способ чистовой обработки шаров : а. с. 1060428 СССР, МКИЗ В 24 В 11/02 / А. Н. Резников, Б. Г. Яновский ; Тольят. политех. ин-т. – № 3476319 ; заявл. 11.06.82 ; опубл. 15.12.83 // Открытия. Изобрет. – 1983. – № 46. – С. 57.

5. Устройство для доводки шариков : пат. 3984945 США, МКИ2 В 24 В 11/06 / Klaus Messerschmidt ; заявитель Sebastian Messerschmidt. – № 2202098 ; заявл. 18.01.72 ; опубл. 12.10.76 // Изобрет. стран мира. – 1977. – № 4. – С. 29.
6. Устройство для обработки шариков : пат. 3178771 Япония, МКИ5 В 24 В 37/02 / Onoda Makota ; заявитель NTN Corp. – № 19900204846 ; заявл. 30.07.90 ; опубл. 02.08.91 // Изобрет. стран мира. – 1991. – № 2. – С. 15.
7. Устройство для обработки шариков : пат. 1969 Респ. Беларусь, МПК6 В 24 В 11/02 / К. Г. Щетникович ; заявитель К. Г. Щетникович. – № 1836 ; заявл. 29.03.94 ; опубл. 30.12.97 // Официальный бюл. / Белгоспатент. – 1997. – № 4, ч. 1. – С. 120.
8. Щетникович, К. Г. Кинематика шариков при обработке между соосными дисками и кольцом / К. Г. Щетникович, О. В. Балашова, И. Ф. Петренко // Наука – образованию, производству, экономике : материалы междунар. науч.-техн. конф. / Белорус. нац. техн. ун-т ; под общ. ред. Б. М. Хрусталева, В. Л. Соломахо. – Минск, 2003. – Т. 1. – С. 78–82.

Получено 27.08.2007 г.