

УДК 666.22.037

К. Г. Щетникович, канд. техн. наук, доц., М. Г. Киселев, д-р техн. наук, проф.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПОЛИРОВАНИЯ СТЕКЛЯННЫХ ШАРИКОВ

Описана конструкция установки для полирования шариков между соосно установленными нижним приводным диском и двумя кольцами: неподвижным и вращающимся. Рассмотрена кинематика шариков в зоне обработки при четырехточечном контакте с инструментом, приведены результаты экспериментальных исследований процесса полирования шариков.

Введение

В оптической промышленности полирование шариков осуществляется на специальных станках, работающих по принципу упорного подшипника. Шарик обрабатывается между двумя соосными дисками, на торцевой поверхности которых выполнены кольцевые канавки радиусного профиля глубиной 0,25 диаметра шарика [1]. Нижний диск неподвижен, а верхний прижимной диск приводится во вращение. При силовом замыкании инструмента под действием сил сцепления с верхним приводным диском шарики катятся по кольцевой канавке. Полируемые поверхности шариков предохраняют от контакта друг с другом с помощью промежуточных шариков из полистирола

диаметром, на 0,1–0,5 мм меньше диаметра стеклянных шариков. Обработка шариков происходит в условиях трения качения при малой скорости проскальзывании относительно кольцевой поверхности канавки в присутствии полирующей суспензии.

Движение шарика между дисками (рис. 1) в каждый момент времени можно рассматривать как вращение с угловой скоростью $\bar{\omega}$ вокруг мгновенной оси абсолютного вращения [2]. Ось абсолютного вращения O_0O_n проходит через точки контакта шарика с неподвижным диском, в которых отсутствует проскальзывание, и пересекает ось дисков в точке O_0 под углом θ .

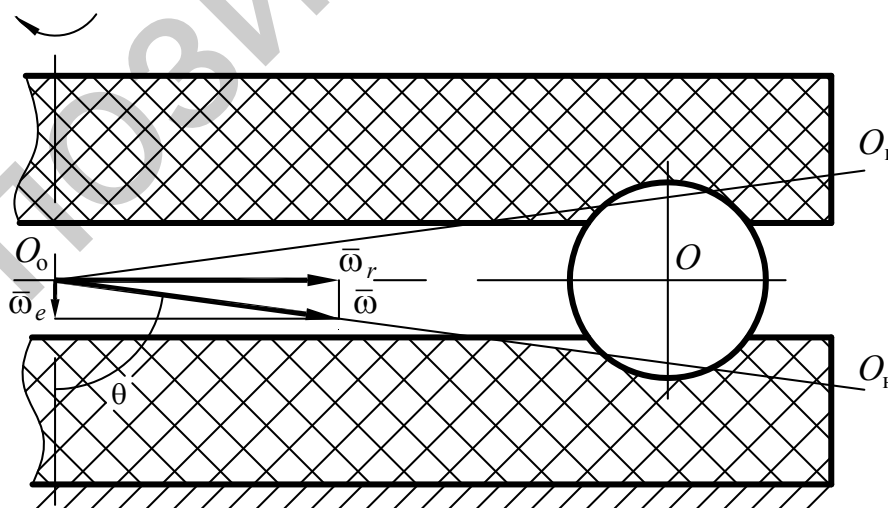


Рис. 1. Схема полирования шариков между двумя соосными дисками

Абсолютное движение шарика есть результат сложения относительного вращения вокруг оси, проходящей через его центр O , с угловой скоростью $\bar{\omega}_r$ и переносного вращения вокруг оси дисков с угловой скоростью $\bar{\omega}_e$. Относительно верхнего приводного диска движение шарика можно представить как вращение вокруг оси O_0O_v , также проходящей через точки контакта, в которых скорость проскальзывания равна нулю. Для формообразования точной сферической поверхности необходимо, чтобы при движении по кольцевой канавке постоянно изменялось положение мгновенной оси вращения шарика относительно оси инструмента. Медленное изменение угла θ происходит вследствие погрешностей формы шариков и рабочих поверхностей инструмента, радиального биения шпинделя, вибраций и других факторов.

Рассмотренный метод полирования дает возможность получать шарики требуемого качества, так как простая кинематика инструмента обеспечивает необходимую точность его вращения и при качении шариков по кольцевой канавке происходит постепенная взаимная приработка рабочих поверхностей дисков и шариков. Однако малая скорость проскальзывания шариков в рабочей зоне и медленное изменение положения мгновенной оси вращения шарика относительно оси инструмента не позволяют достигнуть высокой производительности процесса.

В устройствах [3–5] обработка шариков осуществляется между диском и двумя соосно расположенными вращающимися кольцами, боковые поверхности которых образуют кольцевую канавку. Кольца установлены на соосных шпинделях и имеют разные угловые скорости, поэтому при перемещении по канавке шарики получают дополнительное вращение вокруг вертикальной оси. Взаимодействие шарика с инструментом по трем площадкам контакта, имеющим разные линейные скорости, способствует некоторому увеличению скорости проскаль-

зывания и более быстрому изменению положения мгновенной оси вращения в пространстве.

Однако существенного изменения кинематики шарика не происходит, так как на каждой из площадок контакта имеются точки, в которых проскальзывание отсутствует. Обработка шариков и в данном случае осуществляется в условиях трения качения, с дифференциальным проскальзыванием шариков относительно рабочих поверхностей инструмента, при этом области контакта с максимальной скоростью проскальзывания часто не совпадают с зонами максимального давления соприкасающихся поверхностей. Скорость проскальзывания шариков значительно ниже линейной скорости инструмента, поэтому для обеспечения необходимой скорости съема припуска обработку ведут при повышенных частотах вращения инструмента, что вызывает дополнительные динамические нагрузки на шарики. В рассматриваемых устройствах предъявляются также высокие точностные требования к шпиндельным узлам крепления кольцевого инструмента, так как радиальное и торцевое биение рабочих поверхностей жестко установленных на оправках колец отрицательно влияет на качество шариков.

Постановка задачи

Повышение производительности процесса полирования шариков при обработке соосным инструментом может быть достигнуто, если перемещение шариков в рабочей зоне будет сопровождаться скольжением по всей поверхности хотя бы одной из площадок контакта с инструментом. Для этого при движении шарика по кольцевой канавке необходимо обеспечить его взаимодействие с инструментом по четырем площадкам контакта и эти площадки должны быть расположены несимметрично относительно центра шарика. Конструкция инструмента должна предпола-

гать его самоустановку в требуемом положении в процессе полирования. Обработку необходимо вести при сравнительно невысокой скорости линейного перемещения шариков по кольцевой канавке, что позволит снизить действующие на них динамические нагрузки. Настоящая работа посвящена описанию устройства установки для полирования стеклянных шариков и исследованию процесса их полирования кольцевым соосным инструментом, обеспечивающим четырехточечный контакт шариков в рабочей зоне.

Конструкция установки

В основу конструкции установки положена реализация устройства для обработки шариков [6] между соосно расположенными нижним приводным диском и двумя кольцами, одно из которых связано с

приводом вращения, а второе неподвижно и базируется на обрабатываемых шариках. Установка для полирования шариков создана на базе полировально-доводочного станка мод. 4ПД-200. Нижний шпиндель станка оставлен без изменений, а вместо механизма верхнего звена на столе станка на направляющих качения установлен верхний шпиндельный узел (рис. 2). Шарiki 15 обрабатываются между соосно установленными нижним диском 16 и двумя кольцами 11 и 14. Внутреннее приводное кольцо 11 имеет коническую фаску и закреплено на оправке 10 верхнего шпинделя 8. Наружное кольцо 14 имеет кольцевую проточку прямоугольного профиля и базируется на обрабатываемых шариках. Стопорный винт 12 кронштейна 13 фиксирует наружное кольцо от вращения.

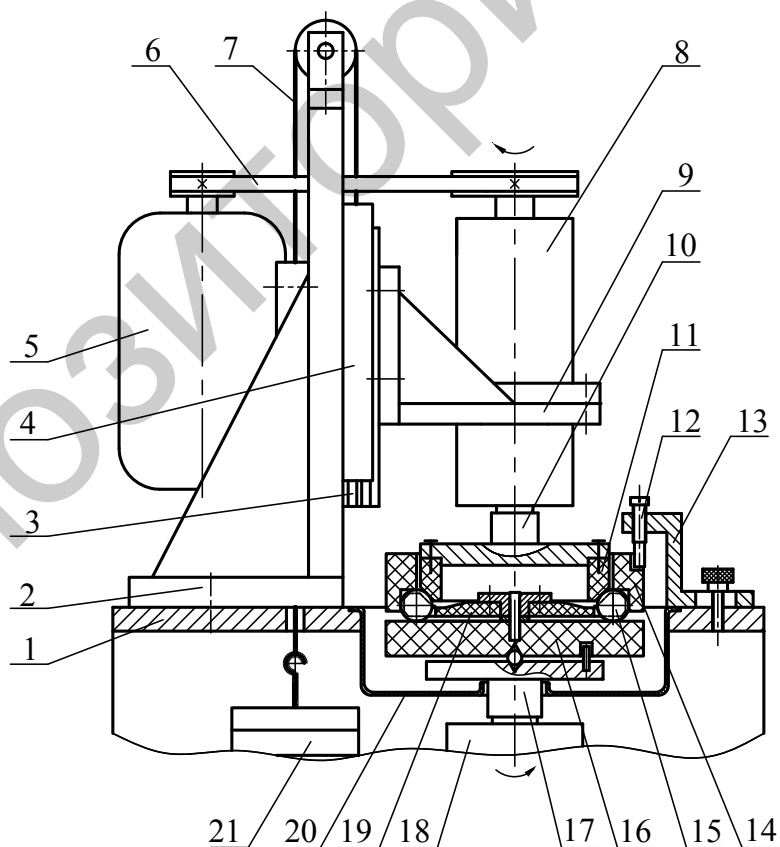


Рис. 2. Установка для полирования стеклянных шариков

Нижний диск 16 установлен на опорном шарике оправки 17, которая закреплена на нижнем шпинделе 18. На нижнем диске на оси установлен полистироловый сепаратор 19 с прорезями для шариков. Излишки полирующей суспензии стекают в таз 20. Верхний шпиндель 8 с помощью кронштейна 9 установлен на каретке 3 и получает вращение от регулируемого электродвигателя 5 через клиноременную передачу 6. Электродвигатель также закреплен на каретке, которая перемещается по направляющим 4. Направляющие установлены на сварном угольнике 2, который крепится к столу 1 станка. Осевая нагрузка на внутреннее кольцо устанавливается с помощью сменных грузов 21, связанных с помощью трособлочной системы 7 с кареткой. Усилие прижима неподвижного наружного кольца к полируемому шарикам регулируется с помощью устанавливаемых на него дополнительных грузов (не показаны).

Наружное кольцо устанавливается на обрабатываемые шарики по двум базовым поверхностям, которые однозначно определяют его положение в пространстве. С помощью цилиндрической поверхности кольцевой проточки кольцо устанавливается соосно оси верхнего шпинделя, а торцевая поверхность проточки обеспечивает его параллельность нижнему диску. Установка нижнего диска на опорном шарике позволяет компенсировать биение конической поверхности верхнего приводного кольца. Следовательно, по жестко закрепленному на верхнем шпинделе приводному кольцу устанавливаются остальные элементы инструмента. Самоустановка в процессе обработки в требуемом положении наружного кольца и нижнего диска обеспечивает высокую точность полирования и понижает точностные требования к шпинделям установки.

При полировании шарики перемещаются вдоль кольцевой дорожки, обработанной четырьмя рабочими поверхностями диска и колец. Несимметричное расположение площадок контакта с инструментом исключает возможность каче-

ния шарика одновременно по всем рабочим поверхностям. Максимальная скорость проскальзывания будет наблюдаться относительно поверхности, к которой в данный момент шарик прижат с минимальным усилием. Учитывая, что основная рабочая нагрузка прикладывается к внутреннему кольцу, наименее нагруженной будет горизонтальная поверхность кольцевой проточки на наружном кольце.

Таким образом, рассмотренная конструкция инструмента обеспечивает скольжение шариков при их перемещении по кольцевой дорожке. При обработке шариков между соосными кольцами и диском сохраняется одно из основных достоинств традиционного способа полирования – постепенная взаимная приработка рабочих поверхностей инструмента и шариков, обеспечивающая высокую точность последних.

Кинематика шариков

Теоретический анализ кинематики шариков [7] основывается на допущениях отсутствия проскальзывания в наиболее нагруженных точках контакта A , B и K (рис. 3). 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 нижним диском и приводным кольцом.

Значения угловых скоростей шарика (абсолютной ω , относительной ω_r и переносной ω_e) вычисляются по формулам:

$$\omega = \frac{\omega_n R + \omega_b (R - r \cos \alpha)}{r [\sin(\alpha + \beta) + \cos \beta]},$$

$$\omega_r = \frac{\omega \cos \beta}{\cos \gamma}; \quad \omega_e = \frac{\omega r \sin \beta}{R}, \quad (1)$$

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.

Углы β и γ определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \beta &= \frac{\omega_{\text{в}}(R - r \cos \alpha) - \omega_{\text{н}} R \sin \alpha}{\omega_{\text{в}}(R - r \cos \alpha) + \omega_{\text{н}} R (1 + \cos \alpha)}; \\ \operatorname{tg} \gamma &= \frac{R + r}{R} \operatorname{tg} \beta. \end{aligned} \quad (2)$$

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 приводного кольца и нижнего диска обеспечивает более высокие значения угловой скорости шариков и скорости скольжения относительно неподвижного кольца по сравнению с вращением в одну сторону.

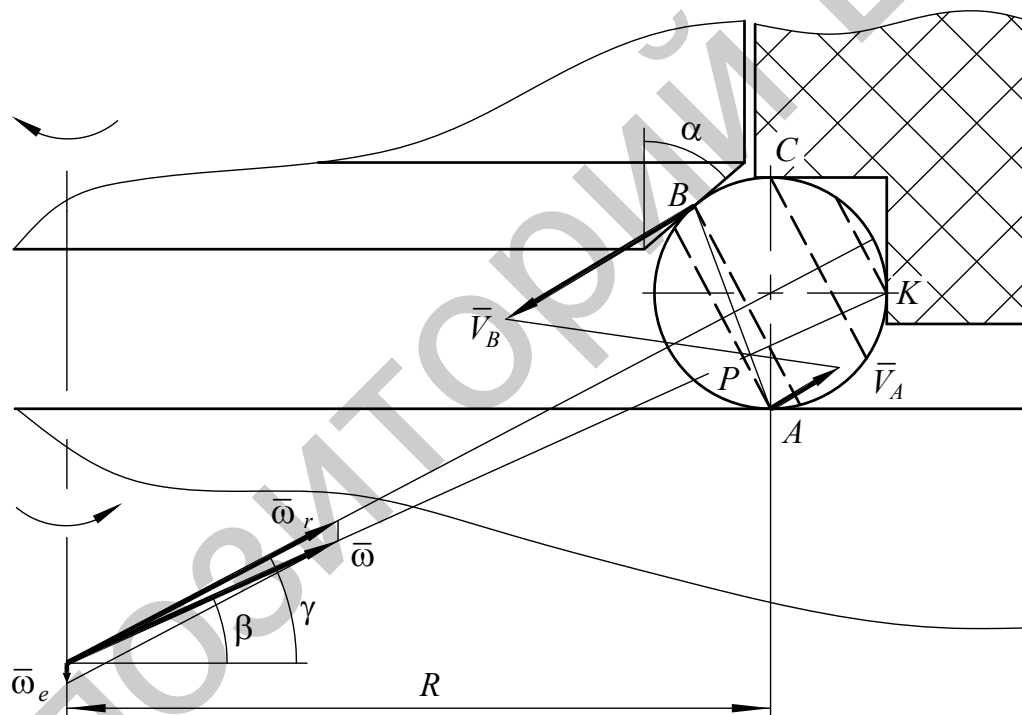


Рис. 3. Кинематика шарика в зоне обработки

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 полирова-

ния и при полировании предлагаемым методом показывает, что в последнем случае она возрастает в несколько раз. Увеличение частоты вращения приводного 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 (см. рис. 3) представляют собой окружности, расположенные в плоскостях, перпендикулярных вектору $\vec{\omega}_r$, и, следовательно, будут зависеть от угла 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 к 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 обработ-

ки на поверхности шарика, полученные при очень медленном вращении инструмента. Однако без учета динамических факторов нельзя составить полную картину движения шариков в зоне обработки.

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, наличие абразивной суспензии, 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 появление 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

Экспериментальные исследования процесса полирования проводились на шариках диаметром 5–6 мм, изготовленных из стекла марки К8, которые по-

сле операции тонкого шлифования имели разноразмерность и непостоянство единичного диаметра в пределах 0,005 мм. Нижний диск и кольца изготавливались из текстолита марки ПТК-40, материал сепаратора – ударопрочный полистирол. При полировании использовалась водная суспензия полирита. Разноразмерность шариков по диаметру в партии V_{DwL} и непостоянство единичного диаметра V_{DwS} измерялись оптикомером с ценой деления 0,1 мкм. Частота вращения нижнего диска выбиралась из условия удержания полирующей суспензии на его поверхности под действием центробежной силы и составляла $1,0 \text{ с}^{-1}$. Частота вращения верхнего кольца изменялась в диапазоне $1,0\text{--}2,5 \text{ с}^{-1}$. Осевая нагрузка в расчете на один шарик изменялась в пределах 0,2–1,2 Н/шар, усилие прижима неподвижного кольца составляло 0,2 Н/шар.

В процессе полирования точностные

параметры шариков (рис. 4) быстро изменяются в первые 15 мин обработки, а затем в последующие 30–40 мин происходит постепенное улучшение сферической формы и уменьшение разноразмерности шариков. Скорость съема припуска составляла 25–30 мкм/ч, что более чем в 2 раза превышает аналогичный показатель при традиционном методе полирования. В условиях эксперимента наилучшие точностные параметры шариков были достигнуты при частоте вращения внутреннего кольца $1,6\text{--}2,2 \text{ с}^{-1}$ и осевом давлении 0,7–0,9 Н/шар. Шероховатость поверхности шариков не превышала $Rz \ 0,05$. Достижение высоких точностных показателей шариков при повышенной скорости съема припуска указывает на интенсивное изменение положения мгновенной оси вращения шарика при его перемещении по кольцевой канавке.

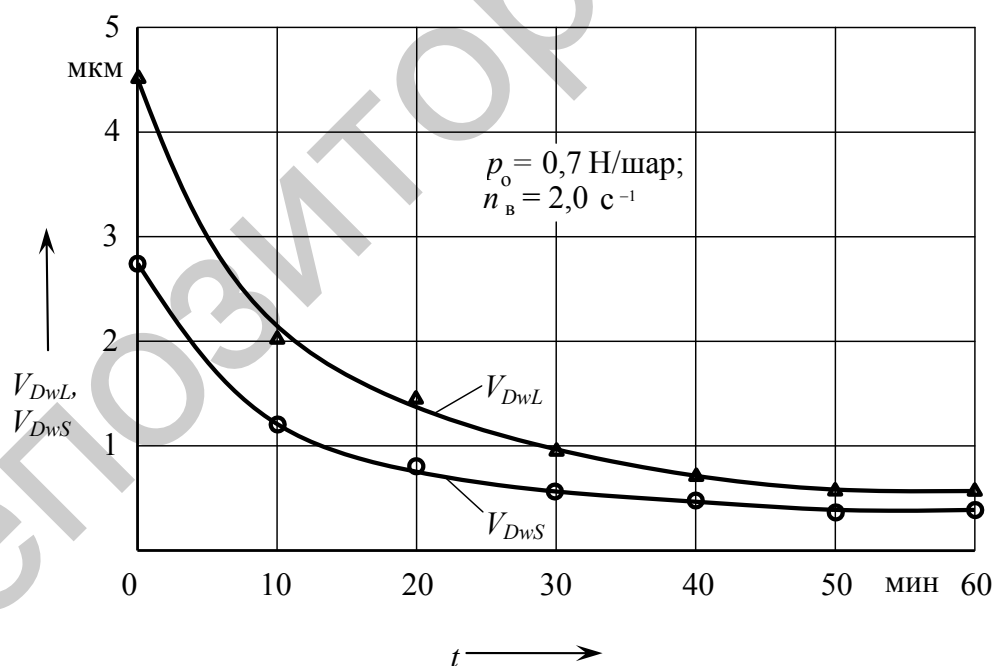


Рис. 4. Влияние продолжительности обработки t на точность полирования шариков

Качество поверхности шариков повышается, если заключительные 5–10 мин обработки полирование осуществляется

при остановленном внутреннем кольце. В этом случае изменения положения мгновенной оси вращения шарика не

сопровождаются большими изменениями величины его линейной скорости и, как следствие, уменьшаются силы трения шариков о полистироловый сепаратор.

Выводы

1. Использование при полировании стеклянных шариков соосного кольцевого инструмента с установкой одного из колец непосредственно на обрабатываемые шарики по двум базовым поверхностям дает возможность реализовать несимметричный четырехточечный контакт шариков с инструментом и обеспечить их скольжение в рабочей зоне.

2. Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить наиболее вероятное положение мгновенной оси вращения шарика, рассчитать величины абсолютной, относительной и переносной угловых скоростей шарика и скорость его скольжения относительно неподвижного кольца.

3. Интенсивное изменение положения мгновенной оси вращения шарика при его перемещении по кольцевой канавке позволяет полировать шарики при повышенной скорости съема припуска и достигать высокой точности обработки.

4. Определены рациональные режимы полирования шариков диаметром 5–6 мм: частота вращения внутреннего кольца составляет 1,6–2,2 с⁻¹ при частоте вращения нижнего диска 1,0 с⁻¹, осевое давление 0,7–0,9 Н/шар при давлении наружного кольца 0,2 Н/шар. Для повыше-

ния качества поверхности шариков на завершающем этапе обработки полирование производится при неподвижном внутреннем кольце.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.] ; под ред. М. А. Окатова. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб. : Политехника, 2004. – 679 с.
2. **Филонов, И. П.** Механика процессов обкатки / И. П. Филонов ; под ред. П. И. Ящерицына. – Минск : Наука и техника, 1985. – 328 с.
3. **Пат. 3984945 США, МКИ2 В 24 В 11/06.** Устройство для доводки шариков / Klaus Messerschmidt ; заявитель Sebastian Messerschmidt. – № 2202098 ; заявл. 18.01.72 ; опубл. 12.10.76 // Изобрет. за рубежом. – 1977. – № 4. – С. 29.
4. **А. с. 1060428 СССР, МКИЗ В 24 В 11/02.** Способ чистовой обработки шаров / А. Н. Резников, Б. Г. Яновский ; Тольят. политех. ин-т. – № 3476319 ; заявл. 11.06.82 ; опубл. 15.12.83 // Открытия. Изобрет. – Бюл. № 46.
5. **Пат. 3178771 Япония, МКИ5 В 24 В 37/02.** Устройство для обработки шариков / Onoda Makoto ; заявитель NTN Corp. – № 19900204846 ; заявл. 30.07.90 ; опубл. 02.08.91 // Изобрет. стран мира. – Бюл. № 2. – 15 с.
6. **Пат. 1969 Респ. Беларусь, МПК6 В 24 В 11/02** Устройство для обработки шариков / К. Г. Щетникович ; заявитель К. Г. Щетникович. – № 1836 ; заявл. 29.03.94 ; опубл. 30.12.97 // Официальный бюл. / Белгоспатент. – Бюл. № 4. – Ч. 1.
7. **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. – Минск, 2003. – Т. 1. – С. 78–82.

Белорусский национальный технический университет
Материал поступил 24.09.2007

K. G. Schetnikovich, M. G. Kiselev
Installation for glass balls polishing
Belarusian National Technical University

Construction of installation for polishing of the balls between coaxially installed lower drive disk and two rings (internal and external) is described. Kinematics of the balls in the work area in the case of four-point contact with the instrument is considered. Results of experimental investigations of the ball polishing process are presented.