

## КИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ ТОНКОМ ШЛИФОВАНИИ МЕЖДУ НЕСООСНЫМИ ДИСКАМИ В КОНИЧЕСКИХ ОТВЕРСТИЯХ

*Канд. техн. наук, доц. ЩЕТНИКОВИЧ К. Г., докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г.*

*Белорусский национальный технический университет*

Тонкое шлифование шариков из оптического стекла 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, и под действием сил сцепления с резиной шарики вращаются в конических отверстиях шлифовальника, изготовленного из чугуна или латуни. В результате скольжения шариков относительно инструмента в присутствии абразивной суспензии происходит взаимная притирка контактирующих поверхностей. Поступательное движение планшайбы обеспечивает одинаковую скорость скольжения и равенство пройденного пути шариками независимо от их расположения на неподвижном диске. Первоначальный контакт шарика с коническим отверстием по окружности после приработки превращается в контакт по шаровому поясу. Эластичное покрытие планшайбы и взаимодействие шариков со шлифовальником по поверхности обеспечивает малые контактные нагрузки, что позволяет получить высокое качество сферической поверхности шариков. Однако по мере повышения точности заготовок, изменения положения мгновенной оси вращения шарика замедляются. Кроме того, при перемещении планшайбы по криволинейной траектории возникают неуравновешенные центробежные силы переменного направления, вызывающие большие динамические нагрузки на узлы станка. Данные факторы снижают точность и производительность процесса тонкого шлифования шариков.

Для более быстрого изменения положения мгновенной оси вращения шарика авторы [2] предлагают при шлифовании мелких шариков диск с коническими отверстиями перемещать по сложной траектории переменной кривизны, что позволяет в некоторой степени расширить диапазон изменений угла наклона мгновенной оси вращения шарика к вертикали. Однако, как показывают эксперименты, значительных изменений в кинематике шариков при этом не наблюдается, а возрастают динамические нагрузки и усложняется конструкция станка. В способе обработки сферических поверхностей [3] шлифование шариков осуществляется путем планетарного вращения инструментальных втулок нижнего диска с установленными шариками и вращения плоского верхнего диска, которому сообщается дополнительное колебательное движение в плоскости, перпендикулярной оси вращения втулок. Привод нижнего инструментального диска сложен, так как вращательное движение необходимо передать каждой втулке в отдельности. Предлагаемый способ обеспечивает многоосное вращение шариков, однако зависимость скорости шарика от его положения на нижнем диске вызывает различную интенсивность съема припуска. Малое количество заготовок, размещаемых на нижнем диске, и необходимость перемены местами деталей периферийной и центральной зон в пределах цикла обработки снижают производительность шлифования.

Поступательное перемещение дисков в относительном движении проще реализуется сочетанием вращательных движений эксцентрично установленных дисков с одинаковыми угло-

выми скоростями [4]. Конструкция оборудования при этом упрощается, снижаются динамические нагрузки. Вращательное движение дисков допускает более высокую скорость перемещения инструмента. Быстрые изменения положения мгновенной оси вращения шарика при шлифовании достигаются изменением конфигурации эластичного покрытия плоского диска. Данная работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию кинематики шариков в процессе их шлифования между двумя приводными дисками, на торцевой поверхности одного из них выполнены конические отверстия, а второй диск имеет сплошное или с канавками эластичное покрытие.

**Кинематика шариков при использовании диска со сплошным эластичным покрытием.** Вначале тонкое шлифование шариков 1 (рис. 1), имеющих после предшествующей обработки значительные отклонения от сферической формы, осуществляется при верхнем положении диска 2 с коническими отверстиями 3 и нижнем положении плоского диска 4 со сплошным эластичным покрытием 5. При вращении дисков вследствие разности линейных скоростей точек контакта шарика под действием сил сцепления с плоским диском вращаются в конических отверстиях. Нижнее положение плоского диска исключает возможность остановки вращения шарика в коническом отверстии даже при отсутствии натяга между шариком и инструментом.

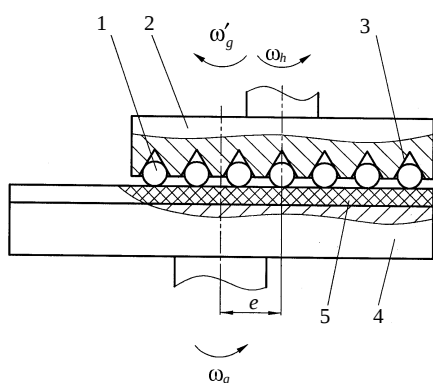


Рис. 1. Расположение дисков на начальном этапе шлифования

Одинаковая угловая скорость шариков в конических отверстиях может быть достигнута

при одинаковой разности линейных скоростей противолежащих точек на дисках. Последнее условие выполняется при вращении несоосных дисков в одном направлении с одинаковыми по модулю угловыми скоростями  $\omega_g = \omega_h$  [5]. Относительное движение дисков проще рассмотреть, если всей системе сообщить вращение вокруг оси плоского диска в противоположном направлении с угловой скоростью  $\bar{\omega}'_g = \bar{\omega}_g$ .

Относительное движение дисков от этого не изменится. Плоский диск становится неподвижным, а диск с коническими отверстиями участвует в двух противоположно направленных вращениях вокруг параллельных осей с равными по модулю угловыми скоростями  $\omega'_g = \omega_h$ , т. е. совершает поступательное движение. Траектория точки, лежащей на оси верхнего диска, представляет собой окружность радиусом, равным расстоянию  $e$  между осями дисков. По окружности точка перемещается по часовой стрелки, следовательно, любая точка на верхнем диске также будет перемещаться относительно плоского диска по окружности радиусом  $e$ .

Поступательное перемещение конического отверстия по окружности можно представить как результат сложения противоположных вращений вокруг параллельных осей, одна из которых является осью самого конического отверстия, а вторая проходит через центр этой окружности (рис. 2).

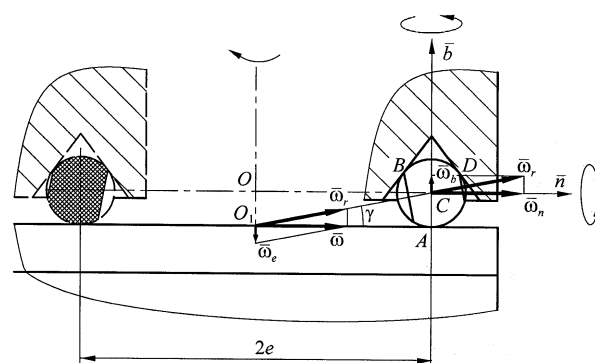


Рис. 2. Кинематика шарика при нижнем положении плоского диска со сплошным эластичным покрытием

Шарик, находящийся в коническом отверстии, вместе с ним перемещается по окружности радиусом  $e$  по часовой стрелке. Это перемещение представляет собой переносное вра-

шение шарика вокруг вертикальной оси, проходящей через центр  $O$  окружности, с угловой скоростью  $\bar{\omega}_e = \bar{\omega}'_g$  и вращение вокруг вертикальной оси  $\bar{b}$ , проходящей через центр шарика, с угловой скоростью  $\bar{\omega}_b = \bar{\omega}_h$ . Модуль вектора  $\bar{\omega}_b$  равен модулю вектора  $\bar{\omega}_e$ , т. е.  $\omega_b = \omega_e$ . Так как нижний диск остановлен, то точка  $A$  контакта шарика с ним неподвижна, поэтому переносное вращение шарика сопровождается его вращением вокруг горизонтальной оси  $\bar{n}$  с угловой скоростью  $\bar{\omega}_n$ . Величина этой угловой скорости определяется линейной скоростью центра шарика  $v_C$  и его радиусом  $r$

$$\omega_n = \frac{v_C}{r} = \frac{\omega_e e}{r}.$$

Сложив векторы угловых скоростей  $\bar{\omega}_n$  и  $\bar{\omega}_b$ , получим вектор относительной угловой скорости шарика  $\bar{\omega}_r$

$$\bar{\omega}_r = \bar{\omega}_n + \bar{\omega}_b.$$

Модуль вектора  $\bar{\omega}_r$

$$\omega_r = \frac{\omega_e}{r} \sqrt{r^2 + e^2}.$$

Угол наклона вектора  $\bar{\omega}_r$  к горизонтали

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega_b}{\omega_n} = \frac{r}{e}.$$

Векторы  $\bar{\omega}_r$  и  $\bar{\omega}_e$  пересекаются в точке  $O_1$ , лежащей на поверхности нижнего диска, поэтому вектор абсолютного вращения шарика  $\bar{\omega}$  также лежит в плоскости нижнего диска. Модуль вектора  $\bar{\omega}$  найдем из треугольника, построенного на векторах  $\bar{\omega}$  и  $\bar{\omega}_e$ :

$$\omega = \frac{\omega_e}{\operatorname{tg} \lambda} = \frac{\omega_e e}{r}.$$

Следовательно, векторы  $\bar{\omega}$  и  $\bar{\omega}_n$  одинаковы по модулю и параллельны. Точка  $O_1$  в процессе перемещения шарика остается неподвижной, поэтому движение шарика относительно плоского диска является сферическим. Движение

шарика можно представить как качение конуса с вершиной в точке  $O_1$ , углом при вершине  $2\gamma$  и осью, совпадающей с вектором  $\bar{\omega}_r$ , по поверхности плоского диска. Следы от контакта шарика с инструментом располагаются в плоскостях, перпендикулярных вектору  $\bar{\omega}_r$ . Поверхность контакта шарика с коническим отверстием представляет собой шаровой пояс, заключенный между плоскостями, проходящими через точки  $B$  и  $D$  контакта с коническим отверстием. Мгновенная ось относительного вращения, всегда направленная к точке  $O_1$ , не меняет своего положения в движущемся шарике и проходит через одни и те же точки на сфере. Два участка сферы в виде сегментных поверхностей не будут взаимодействовать с инструментом в процессе шлифования. Таким образом, поступательное движение инструмента не обеспечивает, как утверждается в [1], автоматическое приобретение шариками правильной геометрической формы. Несмотря на постоянное изменение направления вектора скорости центра шарика, мгновенная ось его вращения не смещается относительно сферы.

Мгновенная ось вращения шарика равномерно поворачивается относительно вертикальной оси  $OO_1$  и за один оборот инструмента поворачивается на  $360^\circ$ . Относительно конического отверстия, движущегося поступательно, ось вращения также поворачивается равномерно. Если разбить контактный шаровой пояс секциями плоскостями, параллельными основаниям, на множество узких элементарных поясов, то любой участок рабочей поверхности конуса будет в одинаковой степени подвергаться абразивному воздействию каждого из этих узких поясов. Суммарное воздействие элементарных поясов на поверхность отверстия при равномерном повороте мгновенной оси вращения шарика будет одинаковым, поэтому и износ отверстия также будет равномерным. Здесь проявляется одно из главных достоинств поступательного движения инструмента: даже при неравномерной обработке сферической поверхности шарика достигаются равномерный износ и высокая точность рабочих поверхностей конических отверстий.

Рассмотренная картина движения шарика в полной мере наблюдается при отсутствии

в технологической системе возмущающих факторов. Погрешности формы шариков и инструмента вызывают неравномерность распределения нагрузки по поверхностям контакта. Линия действия равнодействующей сил трения, приложенных к шарiku через коническую поверхность отверстия, и линия действия силы сцепления, приложенной к шарiku через эластичное покрытие, уже не находятся в одной плоскости. Обработка шариков сопровождается также колебаниями инструмента, причем в начальный этап обработки основным источником колебаний являются сами заготовки, имеющие большие отклонения от сферической формы. Указанные факторы вызывают изменение направления действия сил, приложенных к шарiku, что может вызвать изменение положения его мгновенной оси вращения. Наиболее значительные смещения оси вращения шарика происходят в моменты неполного контакта шарика с конической поверхностью отверстия из-за снижения давления на заготовку в результате колебаний инструмента. При каждом изменении положения оси вращения шарика в контакт с равномерно изношенным инструментом вступает новый участок сферы, что приводит через некоторый промежуток времени к обработке всей сферической поверхности шарика.

**Расчет скорости скольжения шарика в коническом отверстии.** Для определения скорости скольжения шарика относительно верхнего диска (рис. 3) выберем точку  $K$  на линии контакта с коническим отверстием с углом при вершине  $2\alpha$ . Положение точки  $K$  зададим углом  $\theta$ , который составляет радиус, проведенный из центра  $C_1$  окружности до контакта с прямой  $C_1G$ . Расстояние от точки  $K$  до мгновенной оси вращения найдем из прямоугольного треугольника  $KMM_1$

$$KM_1 = \sqrt{KM^2 + MM_1^2} = r \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + (1 + \sin \alpha)^2}.$$

Угол  $\delta$  между прямыми  $KM_1$  и  $MM_1$

$$\cos \delta = \frac{MM_1}{KM_1} = \frac{1 + \sin \alpha}{\sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + (1 + \sin \alpha)^2}}.$$

Скорость скольжения найдем как векторную разницу линейных скоростей точки  $K$ , принадлежащих шарiku и диску:

$$\bar{v}_s = \bar{v}_K - \bar{v}_d.$$

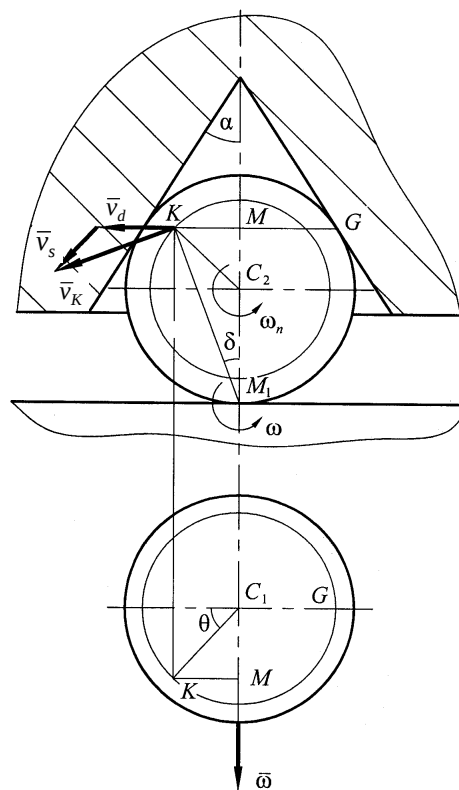


Рис. 3. К определению скорости скольжения шарика в коническом отверстии

Скорость точки  $K$ , лежащей на поверхности шарика:

$$v_K = \omega KM_1 = \omega r \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + (1 + \sin \alpha)^2} = \omega_e e \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + (1 + \sin \alpha)^2}.$$

Скорость точки  $K$ , лежащей на поверхности конического отверстия, равна поступательной скорости верхнего диска

$$v_d = \omega_e e = \omega r.$$

Модуль вектора  $\bar{v}_s$ , определяющий скорость скольжения, найдем из векторного треугольника скоростей

$$v_s = \sqrt{v_K^2 + v_d^2 - 2v_K v_d \cos \delta} =$$

$$= \omega_e e \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha} = \omega_e r \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha}.$$

Величина  $r \sqrt{\cos^2 \alpha \cos^2 \theta + \sin^2 \alpha}$  определяет расстояние от точки  $K$  до точки  $C_2$  на оси  $\bar{n}$ , поэтому скорость скольжения шарика равна вращательной скорости точки  $K$  вокруг оси  $\bar{n}$ . После приработки рабочих поверхностей инструмента и заготовок контакт шарика с коническим отверстием будет осуществляться по шаровому поясу. Все точки шарового пояса, находящиеся в плоскости, перпендикулярной вектору  $\bar{\omega}$ , будут иметь одинаковую скорость скольжения вследствие одинакового расстояния до оси  $\bar{n}$ .

Максимальная скорость скольжения шарика по коническому отверстию будет при угле  $\theta = 0$

$$v_{s \max} = \omega_e e.$$

Минимальная скорость скольжения имеет место при угле  $\theta = \frac{\pi}{2}$

$$v_{s \min} = \omega_e e \sin \alpha.$$

**Кинематика шарика при обработке плоским диском с канавками.** По мере повышения точности сферической формы шариков уменьшается неравномерность распределения нагрузки по поверхности контакта с диском и снижаются колебания инструмента. Мгновенная ось вращения шариков медленнее изменяет положения в шарике. На заключительном этапе обработки шариков 1 (рис. 4) шлифование выполняется при нижнем положении диска 2 с коническими отверстиями 3, а плоский диск 4, эластичное покрытие 5 которого имеет периодически повторяющиеся канавки 6, закрепляют на верхнем шпинделе. Диски вращаются в одном направлении с одинаковыми по модулю угловыми скоростями  $\omega_g = \omega_h$ . Погрешности формы и разноразмерность шариков незначительны, поэтому деформация эластичного покрытия верхнего диска обеспечивает необходимый натяг в зоне обработки для всех шариков в партии.

Применим метод обращения движения и в данном случае, т. е. сообщим всей системе вращение вокруг оси плоского диска в противоположном направлении с угловой скоростью

$\bar{\omega}'_g = -\bar{\omega}_g$ . Тогда плоский диск остановится, а диск с коническими отверстиями будет двигаться поступательно по окружности диаметром  $2e$  по часовой стрелке (рис. 5). При контакте с эластичным покрытием шарик будет обрабатываться по шаровому поясу, при этом вершины необработанных сегментных поверхностей будут находиться на линии действия вектора  $\bar{\omega}_r$  и точка  $T$  всегда будет обращена к оси переносного вращения. Основания сегментов имеют радиусы:

$$r_{s1} = r \sin(\alpha + \gamma); \quad r_{s2} = r \sin(\alpha - \gamma).$$

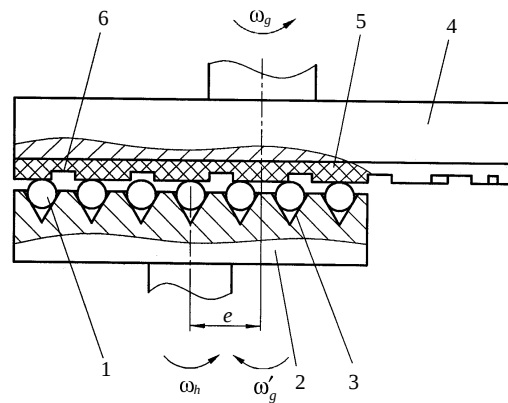


Рис. 4. Расположение дисков на завершающем этапе шлифования

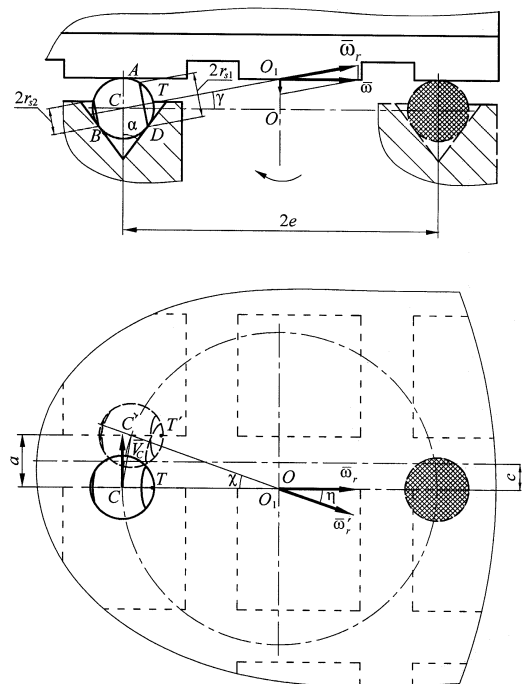


Рис. 5. Кинематика шарика при верхнем положении плоского диска с канавками

Для того чтобы сегментные поверхности вступили в контакт с инструментом, необходимо отклонение связанной с шариком прямой  $СТ$ , проходящей через его центр и вершину сегментной поверхности, от мгновенной оси относительного вращения на угол  $2(\alpha + \gamma)$ . При прохождении шарика под канавками на эластичном покрытии контакт с верхним диском прерывается и шарик вместе с нижним диском движется поступательно. Шарик сохраняет в пространстве ориентацию, соответствующую моменту разрыва контакта, т. е. прямая  $СТ$  перемещается параллельно самой себе в положение  $СТ'$ . При повторном контакте с верхним диском вектор относительной угловой скорости шарика  $\vec{\omega}'_r$  составит уже некоторый угол с прямой  $СТ'$ , равный углу  $\eta$  между векторами  $\vec{\omega}_r$  и  $\vec{\omega}'_r$ . Угол поворота мгновенной оси вращения шарика пропорционален длине дуги окружности диаметром  $2e$ , на которой отсутствует контакт с шариком. Длина хорды  $СС'$ , стягивающей дугу разрыва контакта, зависит от ширины канавки  $a$  и расстояния  $c$  от оси канавки до оси  $ОО_1$

$$l = \sqrt{a^2 + [\sqrt{e^2 - (c - 0,5a)^2} - \sqrt{e^2 - (c + 0,5a)^2}]^2} = \\ = \sqrt{1,5a^2 - 2c^2 + 2e^2 - 2\sqrt{e^4 - e^2(0,5a^2 + 2c^2)}}.$$

Центральный угол  $\chi$ , опирающийся на дугу разрыва контакта:

$$\chi = 2 \arcsin \frac{l}{2e}.$$

Угол между векторами  $\vec{\omega}_r$  и  $\vec{\omega}'_r$ , равный углу поворота мгновенной оси вращения шарика за время разрыва контакта:

$$\eta = 2 \arcsin \frac{l}{2\sqrt{e^2 + r^2}}.$$

Так как  $r \ll e$ , то  $\eta \approx \chi$ . Следовательно, угол поворота мгновенной оси вращения шарика приблизительно равен центральному углу, опирающемуся на дугу разрыва контакта. Ширина канавок и их шаг выбираются таким образом,

чтобы центральный угол, опирающийся на максимальную дугу разрыва контакта, приближался к углу  $2(\alpha + \gamma)$ . В этом случае за один оборот инструмента любая точка на сфере вступит в контакт с коническим отверстием. Изменения положения мгновенной оси вращения шарика происходят при каждом пересечении шариком канавок на верхнем диске и не зависят от амплитуды колебаний инструмента. При настройке инструмента устанавливается незначительная разница частот вращения дисков – менее 1 %. Траектория перемещения шарика относительно плоского диска постепенно сдвигается, и с каждым оборотом инструмента изменяется соотношение длин дуг разрыва контакта шарика с плоским диском. Быстрые изменения положения мгновенной оси вращения в движущемся шарике обеспечивают равномерное нанесение следов обработки на его сферическую поверхность.

**Экспериментальные исследования.** Экспериментальная проверка положения следов обработки осуществлялась путем обработки одиночного шарика на частоте вращения инструмента  $0,13 \text{ с}^{-1}$ . Низкая частота вращения инструмента позволяла свести к минимуму вибрации дисков. Шарик диаметром 12 мм, имеющий отклонения от сферической формы не более 0,03 мм и покрытый тонким слоем краски, при отведенном верхнем диске размещался

в коническом отверстии нижнего диска. С помощью стробоскопического тахометра мод. СТ-5 устанавливалась одинаковая угловая скорость дисков, и верхний диск со сплошным эластичным покрытием опускался до контакта с шариком. Через три-четыре оборота инструмента верхний диск быстро отводился вверх, и после прекращения вращения дисков шарик пинцетом извлекался из рабочей зоны. Участки сферической поверхности, на которых осталась краска, имели вид сегментных поверхностей. Измерение диаметров оснований сегментных поверхностей, выполненное на микроскопе типа БМИ, показало их близость к расчетным значениям.

Эксперименты проводились также и при вращении дисков на низких частотах с разли-

чием угловых скоростей до 10 %. В этом случае шарик описывает на нижнем диске кругобразную незамкнутую кривую, центр кривизны которой постоянно смещается по окружности с центром на оси нижнего диска. Тем не менее и в этом случае на шарике остались участки с нетронутой краской.

Экспериментальная проверка расположения следов обработки на одиночном шарике при контакте с плоским диском с канавками показала, что одного оборота инструмента на низких частотах достаточно для контакта шарика с коническим отверстием по всей сферической поверхности. Быстрая переориентация шариков в рабочей зоне способствует более равномерному нанесению сетки следов от контакта с коническим отверстием на сферическую поверхность и повышению точности обработки.

### ВЫВОД

Рассмотренный способ шлифования шариков позволяет получить поступательное движение диска с коническими отверстиями относительно плоского диска путем их вращения с одинаковыми угловыми скоростями. Динамические нагрузки на инструмент уменьшаются, что дает возможность обрабатывать шарики на более высоких скоростях резания. Получены аналитические зависимости для расчета угловой скорости и скорости скольжения шарика в коническом отверстии. Использование на заключительном этапе обработки плоского диска с канавками вызывает значительные смещения

положения мгновенной оси вращения шарика относительно оси переносного вращения и способствует более равномерному нанесению сетки следов на сферическую поверхность. Изменения положения мгновенной оси вращения шарика носят закономерный характер и не зависят от колебаний в технологической системе. Экспериментальная проверка расположения на шарике следов от контакта с инструментом подтвердила правильность теоретически полученных кинематических характеристик движения шариков в конических отверстиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Справочник** технолога-оптика / М. А. Окатов [и др.]; под ред. М. А. Окатова. – СПб.: Политехника, 2004. – 679 с.
2. **Способ** шлифования шариков: пат. 1510250 Российская Федерация, МПК<sup>6</sup> В 24 В 11/02 / Л. Н. Васин, И. А. Коробченко; заявитель и патентообладатель науч.-исслед. ин-т оптич. приборостроен. – № 4242987/08; заявл. 13.05.87; опубл. 10.12.95.
3. **Способ** обработки сферических поверхностей: пат. 2069 Респ. Беларусь, МПК<sup>6</sup> В 24 В 11/02 / А. С. Козерук, И. П. Филонов, В. И. Чембрович, В. И. Шамкалович, Т. А. Реут; заявитель и патентообладатель Белор. гос. политехн. акад. – № 88; заявл. 15.01.93; опубл. 30.03.98.
4. **Способ** обработки шариков: пат. 1444 Респ. Беларусь, МПК<sup>6</sup> В 24 В 11/02 / К. Г. Щетникович; заявитель и патентообладатель К. Г. Щетникович – № 525; заявл. 19.07.93; опубл. 16.12.96.
5. **Щетникович, К. Г.** Кинематика и динамика шариков при шлифовании между несоосными дисками в приводном сепараторе / К. Г. Щетникович, Е. В. Карман // Вестник БНТУ. – 2007. – № 2. – С. 55–59.

Поступила 11.11.2008