

УДК 621.822

## **КИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕЖДУ СООСНЫМИ ДИСКАМИ И КОЛЬЦОМ**

**Щетникович К.Г., Балашова О.В., Петренко И.Ф.**  
*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

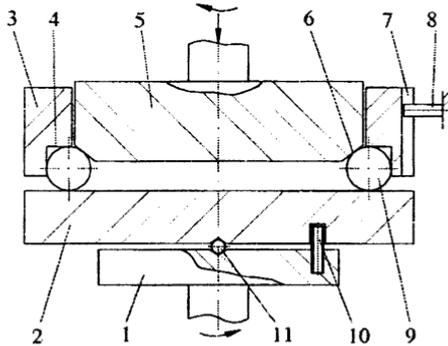
Шлифование и доводка шариков из хрупких и неметаллических материалов традиционным способом между двумя дисками в кольцевых канавках [1] вызывает большие технологические трудности, связанные с возможностью повреждения поверхностного слоя заготовок вследствие высоких контактных напряжений, возникающих на площадках соприкосновения заготовок с инструментом. Снизить динамические нагрузки можно путем уменьшения усилия прижатия и скорости вращения инструмента, но тогда значительно уменьшается и скорость съема припуска, так как резание материала происходит в условиях трения качения с незначительным дифференциальным проскальзыванием. Кроме того, при малых скоростях вращения инструмента положение мгновенной оси вращения шарика изменяется медленно, что отрицательно сказывается на точности обработки.

Простота реализации и постепенная взаимная приработка рабочих поверхностей инструмента и обрабатываемых шариков являются важными преимуществами способа обработки шариков между соосными дисками. В то же время низкая скорость проскальзывания шариков относительно рабочих поверхностей инструмента и медленное изменение положения мгновенной оси вращения шарика в зоне обработки ограничивают область применения данного метода.

Для увеличения скорости проскальзывания в устройствах [2,3] боковые стороны канавки выполнены в виде отдельных колец с независимым приводом. Использование этих устройств значительно расширяет возможности изменения кинематики шариков, так как обработка их происходит между тремя поверхностями, имеющими разные угловые скорости. Однако устройства конструктивно сложны и отрицательное влияние на точность шариков будет оказывать относительное биение приводных колец, установленных на разных шпинделях.

Более простую конструкцию имеет устройство [4] для обработки шариков между соосно установленными дисками и кольцом, свободно устанавливаемым на обрабатываемые шарики. В предлагаемом устройстве (рис. 1) шарики 9 обрабатываются между нижним приводным диском 2, верхним

приводным диском 5 с конической фаской 6 и кольцом 3, на внутренней поверхности которого выполнена кольцевая проточка 4. Для фиксации кольца 3 от вращения вдоль его наружной цилиндрической поверхности выполнен паз 7, в который входит неподвижный палец 8. Нижний диск 2 установлен на оправке 1 с помощью опорного шарика 11 и получает вращение от поводка 10. В зазоре между дисками может быть установлен сепаратор для размещения шариков (на рисунке не показан).



*Рис. 1. Схема устройства для обработки шариков между соосно установленными дисками и кольцом*

Осевая нагрузка прикладывается к верхнему диску, который конической поверхностью прижимает шарики к нижнему диску и боковой поверхности кольцевой проточки. Дополнительная нагрузка, действующая на обрабатываемые шарики, обусловлена весом кольца. Нижний диск при обработке устанавливается параллельно торцевой поверхности верхнего диска за счет шарового шарнира. Кольцо базируется по обрабатываемым шарикам и в процессе обработки самоустанавливается в осевом и радиальном направлениях, вследствие чего значительно снижается влияние биения рабочих поверхностей инструмента на точность шариков. Общее число площадок контакта шарика с инструментом четыре и расположены они несимметрично, поэтому перемещение шарика вдоль кольцевой канавки сопровождается значительным проскальзыванием относительно одной из поверхностей инструмента.

Теоретический анализ кинематики шарика в зоне обработки (рис. 2) базируется на следующих допущениях: контакт шарика с рабочими поверхностями инструмента происходит в точках и проскальзывание в них отсутствует за исключением точки контакта шарика с горизонтальной поверхностью

кольцевой проточки (точка  $C$ ). Второе допущение правомочно, так как нагрузка на верхний диск превышает вес кольца. Введем следующие обозначения:  $\omega_n$ ,  $\omega_s$  — угловые скорости нижнего и верхнего дисков соответственно;  $\alpha$  — угол конической фаски на верхнем диске;  $R$  — расстояние от центра шарика до оси вращения дисков;  $r$  — радиус шарика.

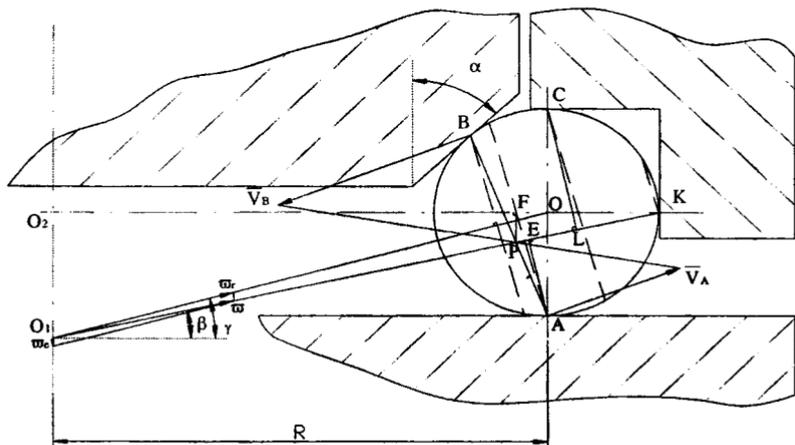


Рис. 2. Кинематика шарика в зоне обработки

Мгновенная ось абсолютного вращения шарика проходит через точку  $K$  на неподвижном кольце и точку  $P$ , которая является полюсом скоростей точек  $A$  и  $B$ . Точка  $P$  делит отрезок  $AB$  на части пропорциональные линейным скоростям дисков  $V_A$  и  $V_B$  в точках  $A$  и  $B$ .

$$AP = \frac{AB \cdot V_A}{V_A + V_B} = \frac{\sqrt{2}\omega_n R r (\cos \alpha + \sin \alpha)}{\omega_n R + \omega_s (R - r \cos \alpha)}$$

Выполнив необходимые геометрические построения можно получить аналитические выражения для расчета кинематики шарика. Угол  $\beta$  наклона мгновенной оси абсолютного вращения шарика определяется из  $\Delta PFK$

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\omega_s (R - r \cos \alpha) - \omega_n R \sin \alpha}{\omega_s (R - r \cos \alpha) + \omega_n R (1 + \cos \alpha)}$$

Величина угла  $\gamma$  наклона мгновенной оси относительного вращения шарика определяется из  $\Delta OO_1O_2$

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{R+r}{R} \operatorname{tg} \beta.$$

Для нахождения значения абсолютной угловой скорости шарика определим вначале расстояние от точки  $A$  до вектора  $\vec{\omega}$  из  $\Delta APE$

$$AE = AP \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} - \beta\right) = \frac{\omega_n R r [\cos \beta + \sin(\alpha + \beta)]}{\omega_n R + \omega_e (R - r \cos \alpha)}.$$

Абсолютная угловая скорость шарика равна

$$\omega = \frac{V_A}{AE} = \frac{\omega_n R + \omega_e (R - r \cos \alpha)}{r [\cos \beta + \sin(\alpha + \beta)]}.$$

Относительная  $\omega_r$  и переносная  $\omega_e$  угловые скорости шарика определяются из треугольников, построенных на векторах угловых скоростей шарика

$$\omega_r = \frac{\omega \cos \beta}{\cos \gamma}; \quad \omega_e = \frac{\omega r \sin \beta}{R}.$$

Скорость проскальзывания шарика относительно горизонтальной поверхности кольцевой проточки (в точке  $C$ ) вычисляется по формуле

$$V_C = \omega \cdot CL = \omega r (\sin \beta + \cos \beta)$$

Следы на поверхности шарика от контакта с инструментом представляют собой окружности, расположенные в параллельных плоскостях, перпендикулярных вектору  $\vec{\omega}$ . На рис. 2 следы контакта показаны пунктирными линиями.

Анализ полученных выражений позволил установить, что противоположное вращение дисков обеспечивает большую скорость вращательного движения шариков и, следовательно, более быстрое нанесение следов обработки на их сферическую поверхность. При небольших различиях величин угловых скоростей дисков скорость поступательного перемещения шариков мала, что позволяет уменьшать динамические нагрузки, возникающие при их контакте с сепаратором. Увеличение скорости вращения верхнего диска в большей степени влияет на максимальную скорость проскальзывания, чем увеличение скорости нижнего диска. Теоретические результаты хорошо согласуются с величинами угловых скоростей переносного вращения шариков, определенных экспериментально. Расхождение не превышает 20%.

Рассмотренный характер движения является преобладающим при перемещении шариков в рабочей зоне. На кинематику шарика влияют также его отклонение от сферической формы, приводящее к изменению давления по площадкам контакта с инструментом. Шарик в канавке может занять такое положение при котором давление по площадкам контакта  $B$  и  $K$  будет меньше, чем по площадкам  $A$  и  $C$ . Условия контакта шарика с инструментом в этот момент близки к двухточечному и мгновенная ось вращения займет приблизительно горизонтальное положение.

Помимо отклонения от сферической формы шарика на изменение положения его мгновенной оси вращения влияют радиальное и торцевое биение дисков и погрешности рабочих поверхностей инструмента. Сочетание всех этих факторов обеспечивает непрерывное изменение положения вектора  $\vec{\omega}$ , и, следовательно, быстрое нанесение следов обработки на поверхность шарика.

Большая скорость проскальзывания шариков в рабочей зоне дает возможность снизить усилие прижима верхнего диска при сохранении достаточной скорости съема припуска. Снижение контактных напряжений позволяет обрабатывать шарики из хрупких неметаллических материалов. Экспериментальные исследования показали высокую эффективность метода обработки при шлифовании точных шариков, изготовленных из стекла и минерального сырья.

### Литература

1. Окончательная беззеваторная доводка шариков I и 0 степеней точности по ГОСТ 3722-60: Обзор / С.П. Байков, Д.А. Пучков, Н.К. Бурчакова, З.П. Архангельская. — М.: НИИН Автопром, 1973-86с. 2. Пат. 3984945 США, МКИ В24В 11/06. Устройство для доводки шариков / Клаус Массершмидт. №2202098; Заявл. 18.01.72; Оpubл. 12.10.76 // Изобретения за рубежом. — 1977. — № 4. С. 29. 3. Заявка 3 — 178771 Япония, МКИ В24В 37/02. Устройство для обработки шариков / Макото Анодо. — № 65 — 204846; Заявл. 30.07.90; Оpubл. 02.08.91.

4. Пат. 1969 Беларусь, МКИ В24В 11/02. Устройство для обработки шариков / К.Г. Щетникович. — № 1836; Заявл. 29.03.94; Оpubл. 30.12.97 // Официальный бюллетень. — 1997. № 4 (ч.1). С. 120.