

# Исследование процессов обработки

УДК 621.822.71: 666.22.037

К. Г. Щетникович (г. Минск)

## **Исследование кинематики шариков из хрупких неметаллических материалов при тонком шлифовании соосным кольцевым инструментом из сверхтвердых материалов**

*Приведено описание конструкции инструмента для шлифования шариков из хрупких неметаллических материалов между соосно установленными нижним приводным диском и прижимными кольцами. Рассмотрена кинематика шариков при скольжении по одной и двум поверхностям контакта с инструментом. Определены силы сцепления и трения шарика с инструментом при повышенной нагрузке на неподвижное кольцо. Получена зависимость между нагрузками на кольцо и углом наклона мгновенной оси вращения шарика.*

***Ключевые слова:** инструменты для тонкого шлифования шариков, хрупкие неметаллические материалы, силы сцепления и трения, кинематические характеристики.*

### **ВВЕДЕНИЕ**

При традиционном способе шлифования шариков между двумя соосными дисками в кольцевых канавках обработка происходит в условиях трения качения при дифференциальном проскальзывании шариков относительно рабочих поверхностей инструмента [1, 2]. Низкая скорость проскальзывания и медленное изменение положения мгновенной оси вращения шарика значительно ограничивают возможности повышения интенсивности шлифования. Обработка шариков между диском и двумя приводными кольцами [3, 4], конические фаски которых образуют кольцевую канавку, позволяет изменять положение мгновенной оси вращения шарика путем изменения угловой скорости колец. В процессе шлифования шарик находится в контакте с тремя поверхностями инструмента, имеющими разные линейные скорости. Обработка шариков осуществляется в условиях трения качения и верчения, поэтому скорость проскальзывания несколько возрастает, тем не менее, она составляет незначительную часть от линейной скорости инструмента. Малая скорость проскальзывания шариков не позволяет существенным образом увеличить скорость съема припуска.

© К. Г. ЩЕТНИКОВИЧ, 2010

Увеличение скорости скольжения шариков достигается применением соосного кольцевого инструмента с базированием неподвижного кольца непосредственно на обрабатываемых изделиях с помощью кольцевой проточки прямоугольного профиля [5, 6]. Данная конструкция обеспечивает четырехточечный контакт заготовок с инструментом и перемещение шариков по кольцевой дорожке сопровождается их скольжением относительно одной из поверхностей контакта с неподвижным кольцом. Анализ кинематики шариков в указанных работах производили для случая, когда осевая нагрузка на изделия, прикладываемая к внутреннему приводному диску с конической фаской, намного выше давления неподвижного кольца на заготовки. Положение мгновенной оси вращения шариков в этом случае определяется соотношением угловых скоростей нижнего диска и приводного кольца.

При повышенных нагрузках на неподвижное кольцо шарик скользит уже по двум поверхностям контакта с инструментом и наблюдается зависимость кинематики шариков от нагрузки на кольца. Данная работа посвящена исследованию кинематики шариков в процессе шлифования соосным кольцевым инструментом с независимой регулировкой нагрузки на шарики, оказываемой неподвижным и приводным кольцами.

### КОНСТРУКЦИЯ ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ТОНКОГО ШЛИФОВАНИЯ ШАРИКОВ

В состав инструмента (рис. 1) для обработки шариков входят следующие основные детали: нижний приводной диск, внутреннее приводное кольцо с конической фаской, наружное неподвижное кольцо, базирующееся на обрабатываемых шариках с помощью кольцевой проточки прямоугольной формы и сепаратор, установленный на оси. Приводное кольцо закреплено на оправке верхнего шпинделя, а нижний диск установлен на оправке нижнего шпинделя. Контакт неподвижного кольца с обрабатываемыми шариками по двум поверхностям обеспечивает его самоустановку в осевом и радиальном направлениях относительно оси вращения инструмента.

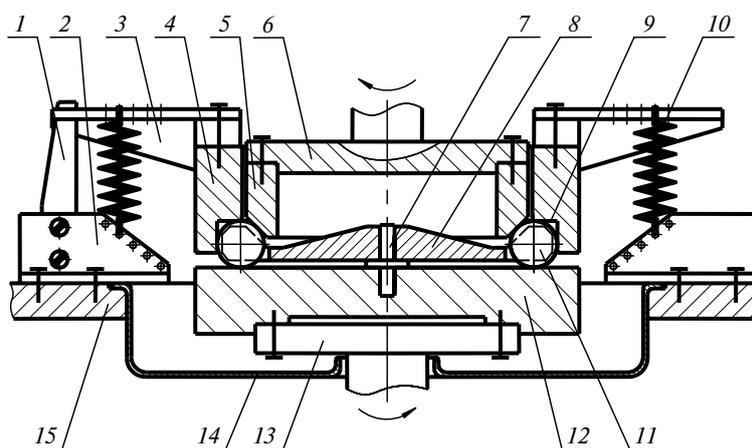


Рис. 1. Конструкция инструмента для шлифования шариков: 1 — стойка; 2 — уголки; 3 — кронштейны; 4 — наружное неподвижное кольцо; 5 — внутреннее приводное кольцо; 6 — оправка верхнего шпинделя; 7 — ось; 8 — сепаратор; 9 — кольцевая проточка прямоугольной формы; 10 — пружины растяжения; 11 — шарики; 12 — нижний приводной диск; 13 — оправка нижнего шпинделя; 14 — таз; 15 — стол.

Общая нагрузка на шарики складывается из осевой нагрузки, прикладываемой к приводному кольцу и нагрузки, создаваемой неподвижным коль-

цом. Последняя определяется весом неподвижного кольца и суммарным усилием пружин растяжения. Зацепы пружин входят в отверстия уголков, установленных на столе, и кронштейнов, закрепленных на неподвижном кольце. Регулировка усилия пружин достигается их переустановкой в соответствующие отверстия уголков и кронштейнов. Стойка, закрепленная на уголке и входящая с зазором в прорезь на кронштейне, фиксирует неподвижное кольцо от вращения. Таз предохраняет рабочую зону от разбрызгивания абразивной суспензии. При вращении инструмента шарики перемещаются по кольцевой дорожке, образованной торцевой поверхностью нижнего приводного диска, конической фаской верхнего приводного кольца и двумя поверхностями кольцевой проточки на неподвижном кольце.

Контакт шарика с инструментом по четырем точкам, расположенным несимметрично относительно его центра, исключает возможность качения шарика по всем поверхностям одновременно. При малых нагрузках на неподвижное кольцо шарик скользит по горизонтальной поверхности кольцевой проточки, что позволяет повысить интенсивность шлифования шариков по сравнению с обработкой при трехточечном контакте с инструментом. Однако высокая скорость скольжения шариков относительно неподвижного кольца возможна только при большой угловой скорости шариков, увеличение которой сопровождается ростом динамических нагрузок, действующих на них в зоне обработки. При обработке хрупких материалов допустимая угловая скорость заготовок, имеющих значительные отклонения от сферической формы, мала. Данный фактор существенно ограничивает максимальную скорость вращения инструмента и производительность шлифования.

#### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ ШАРИКА С ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ НАГРУЗКЕ НА НЕПОДВИЖНОЕ КОЛЬЦО**

Теоретический анализ динамики шариков базируется на следующих допущениях: контакт шарика с рабочими поверхностями инструмента происходит в точках и отсутствует проскальзывание шариков относительно нижнего диска и цилиндрической поверхности кольцевой проточки на неподвижном кольце. Мгновенная ось абсолютного вращения шарика (рис. 2) проходит через точку  $K$  на неподвижном кольце и точку  $P$ , являющуюся полюсом скоростей  $v_A$  и  $v_B$  точек  $A$  и  $B$  контакта шарика с нижним диском и приводным кольцом [5]. Разложив на составляющие вектор  $\bar{\omega}$  абсолютной угловой скорости шарика, направленный под углом  $\beta$  к горизонтали, получим вектор  $\bar{\omega}_r$  относительного вращения, проходящий через центр, и вертикальный вектор  $\bar{\omega}_e$  переносного вращения.

В точках контакта с инструментом на шарик действуют силы нормального давления  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_D$  и  $N_K$ , вызванные осевой нагрузкой на приводное и нагрузкой на неподвижное кольца, а также касательные силы сцепления и трения  $F_A$ ,  $F_B$ ,  $F_D$  и  $F_K$ , вызванные вращением инструмента. Внутреннее приводное кольцо взаимодействует с шариком по конической поверхности с силой

$$N_B = \frac{P_m}{\sin \alpha},$$

где  $P_m$  — осевая нагрузка, приходящаяся на один шарик;  $\alpha$  — угол конической фаски на приводном кольце.

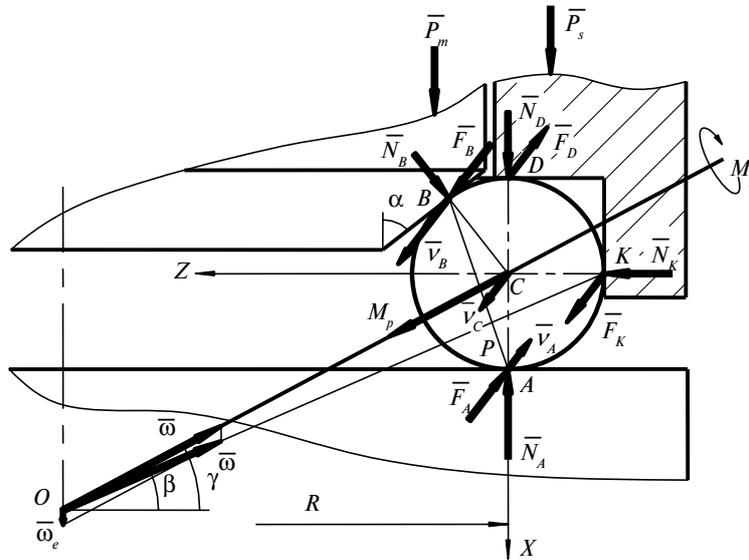


Рис. 2. Динамика шарика в зоне обработки.

Неподвижное кольцо давит торцевой поверхностью кольцевой проточки на каждый шарик с силой

$$N_D = P_s,$$

где  $P_s$  — нагрузка на один шарик, создаваемая неподвижным кольцом.

Сила трения скольжения шарика по горизонтальной поверхности кольцевой проточки на неподвижном кольце равна

$$F_D = fP_s,$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения шарика по материалу инструмента.

В процессе движения шарика испытывают силовое воздействие сепаратора. Из-за погрешности формы шариков и рабочих поверхностей инструмента линейные скорости шариков различаются. Одни шарика являются ведущими, другие — ведомыми, причем один и тот же шарик в разные моменты времени может являться и ведущим, и ведомым. Скорость сепаратора равна скорости ведущих шариков, которые испытывают силовое воздействие сепаратора пропорциональное силе трения скольжения шарика по рабочим поверхностям инструмента. Учитывая, что контакт сепаратора с шариком происходит на уровне его центра, максимальное усилие надавливания ведущего или ведомого шарика на сепаратор равно

$$N_{p\max} = 2f(N_B + N_D).$$

Усилие надавливания шариков на сепаратор изменяется от 0 до  $N_{p\max}$ , поэтому средняя сила давления составляет

$$N_p = f(N_B + N_D).$$

При трении шарика о сепаратор возникает тормозящий момент, направленный вдоль мгновенной оси относительного вращения шарика, величина которого определяется выражением

$$M_p = f_p N_p r = \frac{f_p f r}{\sin \alpha} (P_m + P_s \sin \alpha),$$

где  $f_p$  — коэффициент трения скольжения шарика по материалу сепаратора;  
 $r$  — радиус шарика.

Для определения неизвестных сил сцепления и давления необходимо составить уравнения движения шарика в рабочей зоне. Учитывая, что сила трения скольжения шарика по неподвижному кольцу намного превышает силы трения качения, последние не учитывали при составлении уравнений движения шарика. Дифференциальные уравнения относительного движения шарика в системе координат  $XYZ$ , проходящих через его центр, имеют вид [2]

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv_{CX}}{dt} = -N_A + N_B \sin \alpha + N_D + mg = 0; \\ m \frac{dv_{CY}}{dt} = -F_A + F_B - F_D + F_K = 0; \\ m \frac{dv_{CZ}}{dt} = -N_B \cos \alpha + N_K = 0; \\ I \frac{d\omega_{rX}}{dt} = -F_B r \cos \alpha + F_K r + M_p \sin \gamma = 0; \\ I \frac{d\omega_{rY}}{dt} = 0; \\ I \frac{d\omega_{rZ}}{dt} = -F_A r - F_B r \sin \alpha + F_D r + M_p \cos \gamma = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

где  $m, I$  — масса и момент инерции шарика;  $v_C$  — скорость центра шарика;  $\gamma$  — угол наклона мгновенной оси относительного вращения шарика.

Нормальное давление шарика на нижний диск и на боковую поверхность кольцевой проточки найдем из первого и третьего уравнений системы дифференциальных уравнений (1):

$$N_A = P_s + P_m + mg;$$

$$N_K = \frac{P_m}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

Расчеты показывают и исследование износа инструмента подтверждает, что при достаточной нагрузке на неподвижное кольцо скольжение начинается в точке  $B$  контакта шарика с приводным диском, где величина силы трения составит

$$F_B = f \frac{P_m}{\sin \alpha}. \quad (2)$$

Значение силы сцепления в точке  $K$  в этом случае может быть определено из четвертого уравнения системы (1):

$$F_K = \frac{f P_m}{\sin \alpha} (\cos \alpha - f_p \sin \gamma) - f f_p P_s \sin \gamma. \quad (3)$$

Значение силы сцепления  $F_A$  найдем из второго уравнения системы (1):

$$F_A = \frac{fP_m}{\sin \alpha} \left( 2 \cos^2 \frac{\alpha}{2} - f_p \sin \gamma \right) - fP_s (1 + f_p \sin \gamma) \quad (4)$$

Снижение скорости шарика в точке  $B$  вызывает уменьшение угла наклона мгновенной оси вращения из-за смещения полюса  $P$  скоростей  $v_A$  и  $v_B$  вверх по прямой  $AB$ . Подставив выражения (2)—(4) в последнее уравнение системы (1), получим

$$P_s [2 + f_p (\sin \gamma + \cos \gamma)] - P_m \frac{1 + \sin \alpha + \cos \alpha - f_p (\sin \gamma + \cos \gamma)}{\sin \alpha} = 0,$$

откуда находим зависимость между углом  $\gamma$  и отношением нагрузок на неподвижное и приводное кольца:

$$\frac{P_s}{P_m} = \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) - f_p \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right)}{\left[ \sqrt{2} + f_p \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) \right] \sin \alpha}. \quad (5)$$

График зависимости угла  $\gamma$  от отношения нагрузок на кольца  $\frac{P_s}{P_m}$  (рис. 3)

построен при следующих исходных данных:  $\alpha = 55^\circ$ ,  $f_p = 0,3$ . Он показывает, что, начиная с определенной рабочей нагрузки, малые изменения соотношения нагрузок на кольца сопровождаются значительными изменениями угла наклона мгновенной оси вращения шарика.

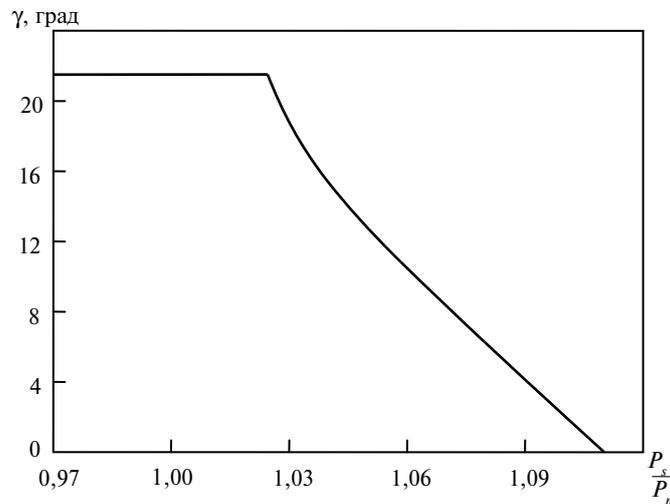


Рис. 3. Зависимость угла наклона мгновенной оси относительного вращения шарика от отношения нагрузок на неподвижное и приводное кольца.

Максимальное значение угла  $\gamma$  определяется из условия отсутствия скольжения шарика по приводному кольцу. Угол  $\gamma$  достигает максимума тогда же, когда его достигает и угол  $\beta$ , величина которого может быть определена из выражения [5]

$$\operatorname{tg} \beta_{\max} = \frac{\omega_m (R - r \cos \alpha) - \omega_d R \sin \alpha}{\omega_m (R - r \cos \alpha) + \omega_d R (1 + \cos \alpha)},$$

где  $\omega_m, \omega_d$  — угловые скорости приводного кольца и нижнего диска соответственно;  $R$  — радиус кольцевой дорожки.

Максимальный угол  $\gamma_{\max}$  связан с углом  $\beta_{\max}$  зависимостью

$$\operatorname{tg} \gamma_{\max} = \frac{(R+r) \operatorname{tg} \beta_{\max}}{R}.$$

Увеличение нагрузки на неподвижное кольцо сопровождается уменьшением угла наклона мгновенной оси вращения шарика. При достижении величины угла  $\gamma = 0$  поступательная скорость шарика принимает нулевое значение, которому соответствует соотношение нагрузок на кольца

$$\frac{P_s}{P_m} = \frac{2\sqrt{2} \cos \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \frac{\alpha}{2} \right) - f_p}{(2 + f_p) \sin \alpha}.$$

При дальнейшем увеличении нагрузки на неподвижное кольцо мгновенная ось абсолютного вращения шарика будет приближаться к точке  $D$  на горизонтальной поверхности кольцевой проточки и направление угловой скорости шариков изменится на противоположное.

Неизбежные вибрации в технологической системе вызывают постоянное изменение соотношения нагрузок на кольца, что обеспечивает быстрое нанесение сетки следов обработки на сферическую поверхность шарика. При скольжении шарика по приводному кольцу увеличение угловой скорости приводного кольца не влияет на угол наклона мгновенной оси вращения шарика, который определяется соотношением нагрузок на кольца.

#### **КИНЕМАТИКА ШАРИКОВ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ПО ПРИВОДНОМУ КОЛЬЦУ**

Для определения кинематических характеристик движения шарика (рис. 4) найдем вначале угол  $\beta$  наклона мгновенной оси абсолютного вращения шарика к горизонтали по значению угла  $\gamma$ , вычисленному из выражения (5):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{R \operatorname{tg} \gamma}{R+r}. \quad (6)$$

Абсолютная угловая скорость шарика при скольжении в точке  $B$  определяется угловой скоростью нижнего диска и соотношением нагрузок на кольца:

$$\omega = \frac{v_A}{AA_1} = \frac{\sqrt{2} \omega_d R}{2r \sin \left( \frac{\pi}{4} - \beta \right)}. \quad (7)$$

Используя выражения (6), (7), угловую скорость относительного вращения шарика находим из равенства проекций векторов  $\bar{\omega}$  и  $\bar{\omega}_r$  на горизонтальную линию:

$$\omega_r = \frac{\omega \cos \beta}{\cos \gamma} = \frac{\sqrt{2} \omega_d R \cos \beta}{2r \cos \gamma \sin \left( \frac{\pi}{4} - \beta \right)}. \quad (8)$$

Скорость центра шарика определим через угловую скорость абсолютного вращения шарика и расстояния точки  $C$  до линии действия вектора  $\bar{\omega}$ :



$$v_{sB} = \omega_m(R - r \cos \alpha) - \omega_{BB_1} = \omega_m(R - r \cos \alpha) - \frac{\sqrt{2}\omega_d R \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right) \cos \frac{\alpha}{2}}{\sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)}. \quad (12)$$

Выражения (6)—(12) позволяют по известному углу наклона мгновенной оси относительного вращения шарика рассчитать различные кинематические характеристики его движения. Скорость скольжения шарика по неподвижному кольцу может быть увеличена только при повышении угловой скорости шарика и скорости его поступательного движения. Значительное увеличение скорости скольжения шарика по приводному кольцу может быть достигнуто путем повышения угловой скорости кольца без увеличения угловой скорости шарика. Высокая скорость скольжения шариков при их низкой угловой скорости позволяет обрабатывать заготовки при меньших динамических нагрузках. Большие скорости резания делают целесообразным применение алмазного инструмента при шлифовании шариков из хрупких материалов высокой твердости.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальную проверку кинематических характеристик перемещения шариков осуществляли путем измерения угловой скорости сепаратора равной угловой скорости переносного вращения шариков в зависимости от соотношения нагрузок на кольца. В процессе экспериментальных исследований применяли строботометр мод. СТ-5. Для визуализации вращения сепаратора к нему припаивали отрезок медного провода, конец которого выводили в зазор между неподвижным кольцом и нижним диском. Геометрические параметры инструмента и режимы обработки были следующими:  $R = 71$  мм,  $\alpha = 55^\circ$ ,  $\omega_d = 1,68 \text{ с}^{-1}$ ,  $\omega_m = 3,77 \text{ с}^{-1}$ . Материал нижнего диска и колец — чугун марки СЧ 15-32, сепаратора — бронза БрАмц9-2. В ходе исследований использовали шарики диаметром 11 мм из стекла марки К8.

Экспериментально полученная зависимость (рис. 5) показывает, что при малых нагрузках на неподвижное кольцо скорость сепаратора постоянна и соответствует значениям, полученным из условия отсутствия проскальзывания шариков в наиболее нагруженных точках контакта с инструментом. Скольжение шариков по приводному кольцу начинается при нагрузках меньше расчетных и изменения угловой скорости переносного вращения шариков происходят постепенно по сравнению с быстрыми изменениями угла  $\gamma$  (см. рис. 3). Связано это главным образом с колебаниями в технологической системе, приводящими к периодическим изменениям нагрузки на кольца относительно установленных средних значений. При динамических изменениях нагрузки на кольца верхняя граница максимальных значений нагрузки на неподвижное кольцо периодически приближается к нижней границе минимальных значений нагрузки на приводное кольцо. В результате мгновенное значение соотношения нагрузок на кольца возрастает и достигает величины, при которой происходит скольжение шариков относительно приводного кольца. Скорость переносного вращения шариков при этом уменьшается и, согласно формуле (10), это снижение связано с уменьшением угла наклона мгновенной оси вращения шарика. С увеличением статической нагрузки на неподвижное кольцо временной промежуток, когда создаются условия для скольжения шариков, возрастает. В процессе шлифования шариков со скольжением по приводному кольцу необходимая нагрузка на неподвиж-

ное кольцо устанавливается по результатам измерения частоты вращения сепаратора.

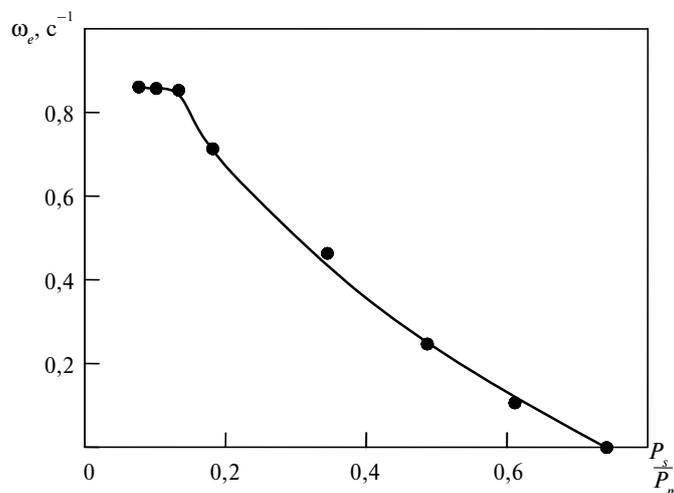


Рис. 5. Зависимость угловой скорости переносного вращения шариков от соотношения нагрузок на кольца.

Исследования процесса тонкого шлифования проводили на шариках диаметром 5,9 мм, изготовленных из стекла марки К8 после шлифования электрокорундом белым зернистостью М28. Нижний диск и кольца изготавливали из чугуна марки СЧ 15-32. Диаметр нижнего диска составлял 120 мм. Материал сепаратора — бронза БрАмц9-2. При шлифовании шариков использовали водную суспензию электрокорунда белого зернистостью М10. Разноразмерность  $V_{DwL}$  шариков в партии и непостоянство единичного диаметра  $V_{DwS}$  измеряли оптикатором (тип II, ГОСТ 10593) с ценой деления 0,1 мкм. Периодический контроль геометрических параметров проводили у десяти произвольно отобранных шариков из обрабатываемой партии. В процессе проведения экспериментов исследовали динамику изменений точностных параметров шариков и определяли влияние осевого давления  $p_o$ , оказываемого на шары приводным кольцом, на точность шариков. Частота вращения нижнего диска составляла  $1,0 c^{-1}$ , верхнего кольца —  $2,0 c^{-1}$ , давление наружного кольца на шарик составляло 0,25 Н/шар.

Наиболее интенсивно точностные параметры шариков улучшаются в начальный период обработки (рис. 6), когда давление инструмента в основном прикладывается к шарикам, имеющим максимальные размеры в партии. Уменьшение разноразмерности создает благоприятные условия для улучшения сферической формы шариков. Постепенно динамика изменений замедляется и через 30—35 мин обработки шарик достигают максимальной для данных условий обработки точности. Скорость съема припуска находилась в пределах 1,0—1,4 мкм/мин. Минимальные разноразмерность и непостоянство единичного диаметра были достигнуты при давлении приводного кольца на шарик 0,5—0,6 Н/шар (рис. 7), что в 2,0—2,4 раза больше давления неподвижного кольца. Шероховатость  $Ra$  поверхности шариков не превышала 0,63 мкм. При малых (менее 0,4 Н/шар) давлениях на приводное кольцо несколько увеличивается разноразмерность шариков в обрабатываемой партии вследствие значительного снижения скорости поступательного перемещения шариков относительно неподвижного кольца. Если давление на приводное

кольцо намного превышает давление на неподвижное, то мгновенная ось вращения шарика медленнее изменяет свое положение в пространстве и точность обработки снижается.

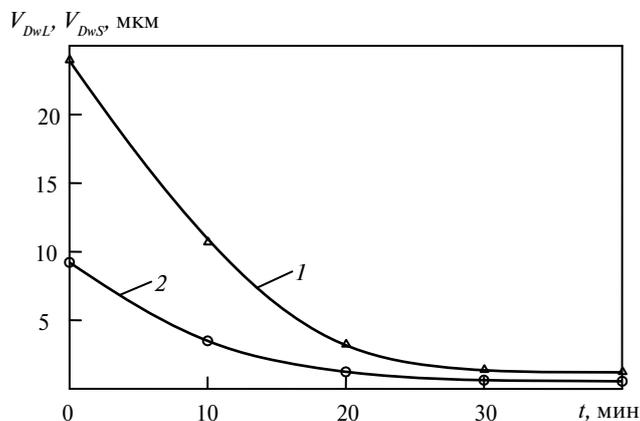


Рис. 6. Изменение точностных параметров шариков  $V_{DwL}$  (1) и  $V_{DwS}$  (2) во времени.

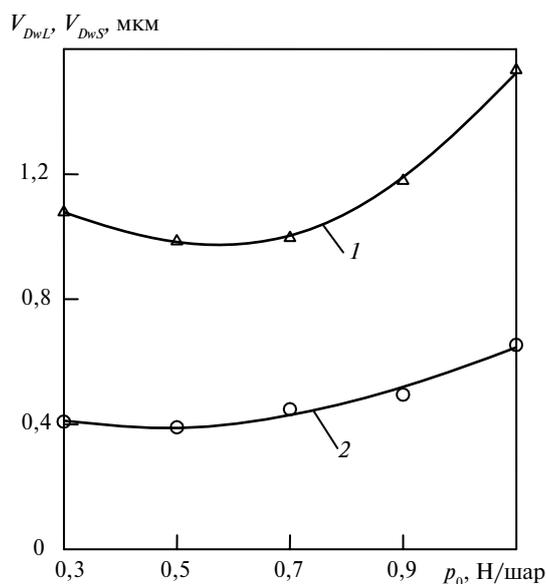


Рис. 7. Влияние осевой нагрузки на разноразмерность  $V_{DwL}$  (1) и непостоянство единичного диаметра  $V_{DwS}$  (2) шариков.

При обработке пробной партии шариков диаметром 6,3 мм из вакуум-плотной корундовой керамики ВК 94-1 достигнуты следующие точностные параметры: отклонение от сферической формы — 0,18 мкм; разноразмерность — 0,29 мкм; шероховатость  $Rz$  поверхности шариков — не выше 0,1 мкм. Исходные шарики имели отклонения от сферической формы 7 мкм, разноразмерность — 10 мкм. Материал инструмента — латунь ЛС59-1, сепаратора — ударопрочный полистирол. В процессе обработки использовали алмазную пасту марки АСМ 2/1 НОМГ. Скорость съема припуска на завершающем этапе обработки составила 0,15 мкм/мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Обработка шариков соосным кольцевым инструментом с регулированием нагрузки на неподвижное кольцо позволяет в широких пределах изменять кинематику шариков в зоне обработки. Изменение соотношения нагрузок на кольца дает возможность реализовать режим обработки со скольжением шариков одновременно относительно неподвижного и приводного колец. Высокая скорость скольжения шариков при низкой скорости транспортирования их по кольцевой дорожке обеспечивает возможность интенсивной обработки заготовок из хрупких материалов при сравнительно небольших динамических нагрузках. Получены аналитические зависимости для расчета угловых скоростей относительного, переносного и абсолютного вращений шарика и скорости скольжения относительно неподвижного и приводного колец. Основные закономерности изменения кинематики шариков подтверждаются экспериментальными исследованиями. Анализ силовых и кинематических характеристик движения шариков в рабочей зоне позволяет обоснованно выбирать режимы обработки при шлифовании шариков из различных материалов. Обработка шариков из оптического стекла и корундовой керамики подтвердила целесообразность применения соосного кольцевого инструмента на заключительной стадии обработки шариков, изготовленных из хрупких неметаллических материалов.

*Приведено опис конструкції інструмента для шліфування кульок з крихких матеріалів між співвісно встановленими нижнім приводним диском і притискними кільцями. Розглянуто кінематику кульок при ковзанні по одній і двох поверхнях контакту з інструментом. Визначені сили зчеплення і тертя кульки з інструментом при підвищеному навантаженні на нерухоме кільце. Отримана залежність між навантаженням на кільця і кутом нахилу миттєвої вісі обертання кульки.*

**Ключові слова:** інструмент для тонкого шліфування кульок, крихкі неметалічні матеріали, сили зчеплення та тертя, кінематичні характеристики.

*The description of the design of the tool for grinding the balls of fragile materials between the bottom drive plate and the draw ring arranged coaxially has been given. The kinematics of the balls when sliding over one and two surfaces of contact with the tool has been considered. The cohesive and friction forces between the ball and the tool in case of increased load on the stationary ring have been determined. The dependence between the loads on the rings and the tilt angle of the instantaneous axis of ball's rotation has been obtained.*

**Key words:** grinding, balls, fragile nonmetallic materials, the tool, sliding, forces of friction, an instant axis of rotation, kinematics.

1. Олендер Л. А. Технология и оборудование шарикового производства. — Минск: Вышэйшая школа, 1974. — 336 с.
2. Филонов И. П. Механика процессов обкатки. — Минск: Наука и техника, 1985. — 328 с.
3. А. с. 1060428 СССР, МКП<sup>3</sup> В 24 В 11/02. Способ чистовой обработки шаров / А. Н. Резников, Б. Г. Яновский. — Заявл. 11.06.82; Оpubл. 15.12.83, Бюл. № 46.
4. Pat. 3-178771 Japan, IC<sup>5</sup> В 24 В 37/02. Spherical body processing device / Onoda Makota. — Publ. 02.08.91.
5. Щетникович К. Г., Киселев М. Г. Шлифование стеклянных шариков между двумя соосными кольцами и диском // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. — 2007. — № 4. — С. 3—10.
6. Щетникович К. Г. Доводка шариков из магнитотвердых спеченных материалов // Механика машин, механизмов и материалов. — 2008. — № 2. — С. 76—79.