

УДК 621.822.71.002:666.22.037

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ СЦЕПЛЕНИЯ И ТРЕНИЯ ШАРИКА С ИНСТРУМЕНТОМ ПРИ ШЛИФОВАНИИ МЕЖДУ СООСНЫМИ КОЛЬЦАМИ И ДИСКОМ**

*Канд. техн. наук, доц. ЩЕТНИКОВИЧ К. Г.*

*Белорусский национальный технический университет*

При традиционном способе шлифования шариков между двумя соосными дисками в кольцевых канавках обработка происходит в условиях трения качения при дифференциальном проскальзывании шариков относительно рабо-

чих 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, конические фаски которых образуют кольцевую канавку, позволяет изменять положение мгновенной оси вращения шарика путем изменения угловой скорости колец [3, 4]. 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.

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]. Конструкция инструмента обеспечивает контакт заготовок с четырьмя рабочими поверхностями нижнего диска и колец, поэтому перемещение шариков по кольцевой дорожке сопровождается скольжением в зоне обработки. Движение шариков в данных работах рассматривалось при малых нагрузках на неподвижное кольцо, когда справедливо допущение о качении шарика по трем из четырех поверхностям контакта с инструментом.

Вследствие тормозящего действия на шарики силы трения скольжения по одной из рабочих поверхностей инструмента значительно возрастают силы сцепления по другим поверхностям контакта. При соответствующих нагрузках на кольца трение качения шариков может перейти в трение скольжения еще по одной из поверхностей контакта. Для нахождения условий, обеспечивающих дополнительное скольжение шариков в зоне обработки, необходимо рассмотреть силы, действующие на шарики при перемещении по кольцевой дорожке с учетом сопротивления сепаратора. Данная работа посвящена теоретическому исследованию сил, действующих на шарики в процессе шлифования между нижним приводным диском и двумя соосными кольцами: внутренним при-

водным и наружным неподвижным, устанавливаемом на обрабатываемых шариках.

**Конструкция инструмента и кинематика шариков при доминирующей осевой нагрузке.** В состав инструмента (рис. 1) для обработки шариков 11 входят следующие основные детали: нижний приводной диск 12, внутреннее приводное кольцо 5 с конической фаской, наружное неподвижное кольцо 4, базирующееся на обрабатываемых шариках с помощью кольцевой проточки 9 прямоугольной формы и сепаратор 8, установленный на оси 7. Приводное кольцо закреплено на оправке 6 верхнего шпинделя, а нижний диск установлен на оправке 13 нижнего шпинделя. Контакт неподвижного кольца с обрабатываемыми шариками по двум поверхностям обеспечивает его самоустановку в осевом и радиальном направлениях относительно оси вращения инструмента.

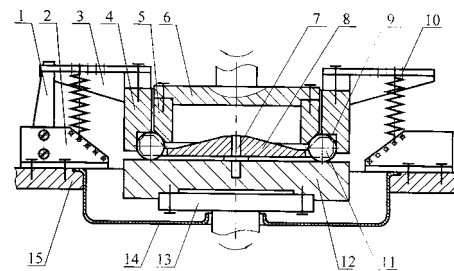


Рис. 1. Конструкция инструмента для шлифования шариков

Общая нагрузка на шарики складывается из осевой нагрузки, прикладываемой к приводному кольцу и нагрузки, создаваемой неподвижным кольцом. Последняя определяется весом неподвижного кольца и суммарным усилием пружин растяжения 10. Зацепы пружин входят в отверстия уголков 2, установленных на столе 15 и кронштейнов 3, закрепленных на неподвижном кольце. Регулировка усилия пружин достигается их переустановкой в соответствующие отверстия уголков и кронштейнов. Стойка 1, закрепленная на уголке и входящая с зазором в прорезь на кронштейне, фиксирует неподвижное кольцо от вращения. Таз 14 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 поверхно-

стями кольцевой проточки на неподвижном кольце.

Когда осевая нагрузка на приводное кольцо намного превышает нагрузку на неподвижное, кинематика шариков (рис. 2) может быть рассмотрена из условия отсутствия проскальзывания в наиболее нагруженных точках контакта с инструментом  $A$ ,  $B$  и  $K$  [6]. Мгновенная ось вращения шарика 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. Точка  $P$  делит расстояние  $AB$  на части, пропорциональные скоростям  $v_A$  и  $v_B$ .

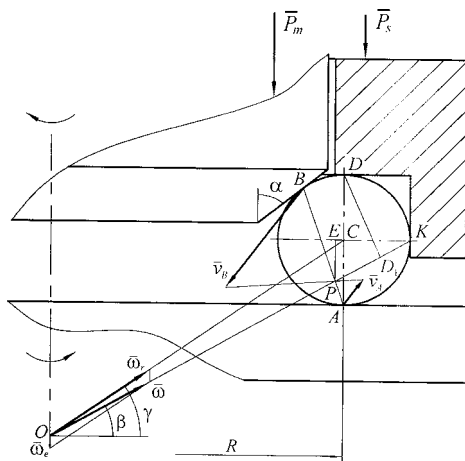


Рис. 2. Кинематика шарика при доминирующей осевой нагрузке

Угловая скорость абсолютного вращения шарика определяется угловой скоростью и геометрией инструмента

$$\omega = \frac{\sqrt{2}\omega_d R}{2r \sin\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right)}, \quad (1)$$

где  $\omega_d$  – угловая скорость нижнего диска;  $R$  – радиус кольцевой дорожки;  $r$  – радиус шарика;  $\beta$  – угол наклона мгновенной оси абсолютного вращения шарика.

Угол  $\beta$  зависит от отношения угловых скоростей приводного кольца и нижнего диска

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{\omega_m(R - r \cos\alpha) - \omega_d R \sin\alpha}{\omega_m(R - r \cos\alpha) + \omega_d R(1 + \cos\alpha)}, \quad (2)$$

где  $\omega_m$  – угловая скорость приводного кольца;  $\alpha$  – угол конической фаски на приводном кольце.

Угол  $\gamma$  наклона мгновенной оси относительного вращения шарика связан с углом  $\beta$  соотношением

$$\operatorname{tg}\gamma = \frac{R+r}{R} \operatorname{tg}\beta. \quad (3)$$

Угловая скорость относительного вращения шарика

$$\omega_r = \frac{\omega \cos\beta}{\cos\gamma}.$$

Угловая скорость переносного  $\omega_c$  вращения шарика определяется по формуле

$$\omega_c = \frac{\omega r \sin\beta}{R}. \quad (4)$$

Скорость скольжения шарика по горизонтальной поверхности кольцевой проточки может быть найдена следующим образом:

$$v_s = \sqrt{2}\omega r \cos\left(\frac{\pi}{4} - \beta\right).$$

Расчет скорости скольжения показывает, что ее величина более чем в четыре раза превышает максимальную скорость дифференциального проскальзывания шариков при дуге контакта с инструментом длиной  $0,3d$ , где  $d$  – диаметр шарика. Скольжение шариков по одной из поверхностей инструмента позволяет повысить интенсивность шлифования шариков по сравнению с обработкой при трехточечном контакте с инструментом.

При шлифовании шариков угловая скорость вращения сепаратора совпадает с угловой скоростью переносного вращения шариков. Измерения показывают, что отклонения величины угловой скорости вращения сепаратора от расчетного значения, найденного по формуле (4), возрастают по мере увеличения давления на шарики приводного кольца. Данный фактор указывает на дополнительное скольжение шариков в зоне обработки при росте нагрузки на неподвижное кольцо.

**Динамика шариков в зоне обработки.** В точках контакта с инструментом (рис. 3) на шарик действуют силы нормального давления  $N_A$ ,  $N_B$ ,  $N_D$  и  $N_K$ , вызванные осевой нагрузкой на приводное кольцо и нагрузкой на неподвижное кольцо, а также касательные силы сцепле-

ния

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.

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 составляет

$$F_D = fP_s.$$

где  $f$  – коэффициент трения скольжения шарика о материал инструмента.

В процессе движения шарика испытывают силовое воздействие сепаратора. Из-за погрешности формы шариков и рабочих поверхностей инструмента линейные скорости шариков различаются. Часть шариков являются ведущими, часть – 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. С учетом того, что контакт сепаратора с шариком происходит на уровне его центра, максимальное усилие надавливания ведущего или ведомого шарика на сепаратор

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

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

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

При трении шарика о сепаратор возникает тормозящий момент, направленный вдоль мгновенной оси относительного вращения ша-

рика, величина которого определяется выражением

$$\begin{aligned} M_p &= f_p N_p r = f_p f (N_B + N_D) r = \\ &= \frac{f_p f r}{\sin \alpha} (P_m + P_s \sin \alpha), \end{aligned}$$

где  $f_p$  – коэффициент трения скольжения шарика о материал сепаратора.

Для определения неизвестных сил сцепления и давления необходимо составить уравнения движения шарика в рабочей зоне. Поскольку сила трения скольжения шарика по неподвижному кольцу намного превышает силы трения качения, последние не учитывались при составлении уравнений движения шарика. Дифференциальные уравнения относительного движения шарика в системе координат  $XYZ$  (рис. 3) с началом в центре шарика имеют вид [2]:

$$m \frac{dv_{cx}}{dt} = -N_A + N_B \sin \alpha + N_D + mg = 0;$$

$$m \frac{dv_{cy}}{dt} = -F_A + F_B - F_D + F_K = 0;$$

$$m \frac{dv_{cz}}{dt} = -N_B \cos \alpha + N_K = 0;$$

$$I \frac{d\omega_{rx}}{dt} = -F_B r \cos \alpha + F_K r + M_p \sin \gamma = 0; \quad (5)$$

$$I \frac{d\omega_{ry}}{dt} = 0;$$

$$I \frac{d\omega_{rz}}{dt} = -F_A r - F_B r \sin \alpha + F_D r + M_p \cos \gamma = 0.$$

где  $m, I$  – масса и момент инерции шарика;  $v_c$  – скорость центра шарика.

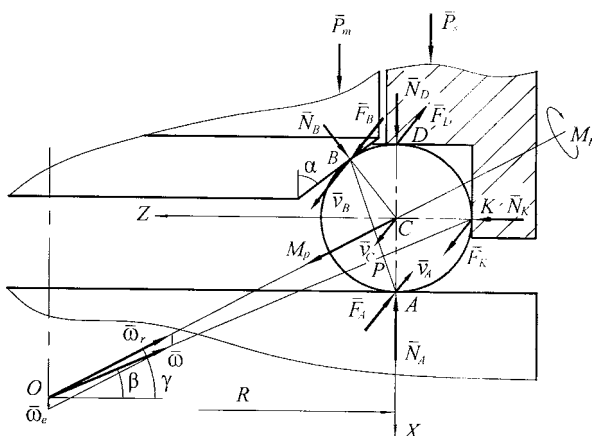


Рис. 3. Динамика шарика в зоне обработки

При нагрузках на приводное кольцо, превышающих нагрузку на неподвижное, шарик скользит по наименее нагруженной горизонтальной поверхности кольцевой проточки и положение мгновенной оси вращения может быть определено по формулам (1)–(3). Решение дифференциальных уравнений при известном угле  $\gamma$  позволяет определить силы, действующие на шарик при перемещении по кольцевой дорожке.

Нормальное давление шарика на нижний диск и на боковую поверхность кольцевой про-

точки найдем из первого и третьего уравнений системы (5) дифференциальных уравнений

$$N_A = P_s + P_m + mg,$$

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

Из четвертого уравнения выразим силу сцепления шарика с цилиндрической поверхностью проточки на неподвижном кольце через силу  $F_B$  и тормозящий момент  $M_p$

$$F_K = F_B \cos\alpha - \frac{M_p \sin\gamma}{r}. \tag{6}$$

Подставив значение силы  $F_K$  во второе уравнение системы (5), получим

$$-F_A + F_B(1 + \cos\alpha) - F_D - \frac{M_p \sin\gamma}{r} = 0.$$

Вычитая из данного уравнения последнее уравнение системы (5), находим значение силы сцепления шарика с конической фаской приводного кольца

$$F_B = f \frac{P_s \left[ \sqrt{2} + f_p \cos\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right) \right] \sin\alpha + f_p P_m \cos\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right)}{2 \sin\alpha \cos\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi - \alpha}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)}. \tag{7}$$

Значение силы  $F_K$  найдем, подставив найденное значение силы  $F_B$  в (6)

$$F_K = \frac{f P_s \left[ \sqrt{2} \cos\alpha + f_p \cos\alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right) + 2 f_p \cos\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi - \alpha}{4} - \frac{\alpha}{2}\right) \sin\gamma \right] \sin\alpha}{2 \sin\alpha \cos\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi - \alpha}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)} + \frac{f_r f P_m \left[ \cos\alpha \cos\left(\frac{\pi}{4} - \gamma\right) - 2 \cos\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi - \alpha}{4} - \frac{\alpha}{2}\right) \sin\gamma \right]}{2 \sin\alpha \cos\frac{\alpha}{2} \cos\left(\frac{\pi - \alpha}{4} - \frac{\alpha}{2}\right)}. \tag{8}$$

Силу сцепления шарика с нижним диском определим из последнего уравнения системы (5), используя выражение (7)

$$F_A = \frac{fP_s \left[ (1 + f_p \cos \gamma) \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{4} \right) - (\sqrt{2} + f_p) \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) \sin \frac{\alpha}{2} \right] \sin \alpha}{\sin \alpha \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{4} \right)} + \frac{ff_p P_m \left[ \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{4} \right) \cos \gamma - \sin \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) \right]}{\sin \alpha \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{4} \right)}. \quad (9)$$

По мере увеличения нагрузки  $P_s$  на неподвижное кольцо, силы сцепления шарика с инструментом, как следует из выражений (7)–(9), возрастают и их максимальная величина ограничивается значением сил трения скольжения. Дополнительное скольжение шарика начнется по той поверхности, где сила сцепления первой достигнет значения силы трения скольжения. Определим отношения сил трения и нормального давления в точках  $A$ ,  $B$  и  $K$ , например, при следующих значениях параметров обработки:  $\alpha = 55^\circ$ ;  $\gamma = 21^\circ$ ;  $f_p = 0,3$ :

$$\frac{F_A}{N_A} = 0,46 \frac{fP_s}{P_m + P_s} + 0,18 \frac{fP_m}{P_m + P_s};$$

$$\frac{F_B}{N_B} = 0,85 \frac{fP_s}{P_m} + 0,16;$$

$$\frac{F_K}{N_K} = 0,70 \frac{fP_s}{P_m} + 0,06.$$

Сравнивая отношения сил сцепления к соответствующим силам нормального давления и при других возможных значениях исходных данных, находим, что в точке  $A$  это отношение намного меньше, чем в точках  $B$  и  $K$ , а при положительных значениях угла  $\gamma$

$$\frac{F_B}{N_B} > \frac{F_K}{N_K}.$$

Следовательно, при достаточной нагрузке на неподвижное кольцо скольжение начнется в точке  $B$  контакта шарика с конической фаской на приводном кольце, где величина силы трения составит

$$F_B = f \frac{P_m}{\sin \alpha}.$$

Подставляя полученное выражение силы трения скольжения в формулу (7) найдем значение отношения между нагрузками на неподвижное и приводное кольца, при котором начинается скольжение шарика также и по приводному кольцу

$$\frac{P_s}{P_m} = \frac{2 \cos \frac{\alpha}{2} \cos \left( \frac{\pi - \alpha}{4} \right) - f_p \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right)}{\left[ \sqrt{2} + f_p \cos \left( \frac{\pi}{4} - \gamma \right) \right] \sin \alpha}. \quad (10)$$

Величину угла  $\gamma$  определим по формулам (2), (3) при следующих значениях параметров обработки:  $r = 5,5$  мм;  $R = 71$  мм;  $\alpha = 55^\circ$ ;  $\omega_d = 1,68$  с<sup>-1</sup>;  $\omega_m = 3,77$  с<sup>-1</sup>. Подставляя вычисленное значение угла  $\gamma = 21,07^\circ$  и коэффициент трения шарика о сепаратор  $f_p = 0,3$  в выражение (10), получаем величину нагрузок  $P_s/P_m = 1,03$ . Следовательно, если соотношение нагрузок на неподвижное и приводное кольца превышает полученное значение, шарики скользят не только по неподвижному кольцу, но и по конической фаске приводного кольца.

Когда осевая нагрузка на приводное кольцо намного превышает нагрузку на неподвижное, скольжение шариков происходит в основном относительно горизонтальной поверхности кольцевой проточки. Обработка шариков при повышенных нагрузках на неподвижное кольцо не только сопровождается увеличением силы трения скольжения в точке  $D$  (рис. 3), но и вызывает дополнительное скольжение шариков относительно приводного кольца в точке  $B$ . Указанные факторы способствуют значительному повышению интенсивности шлифования шариков. При большом давлении неподвижного кольца на шарики возрастают силы трения шариков о сепаратор, что может привести к снижению качества поверхностного слоя изделий.

При скольжении шарика относительно приводного кольца скорость точки  $B$  на его поверхности становится меньше линейной скорости приводного кольца. Смещение полюса  $P$  скоростей шарика  $v_A$  и  $v_B$  вдоль прямой  $AB$  к точке  $B$  (рис. 2) сопровождается изменением положения мгновенной оси абсолютного вращения шарика. Вследствие вынужденных колебаний оборудования при обработке давление колец на шарики непрерывно изменяется относительно установленных значений, вызывая изменения скорости скольжения в точке  $B$  и угла наклона мгновенной оси абсолютного вращения шарика. Быстрые изменения положения мгновенной оси вращения шарика обеспечивают высокую точность сферической формы, несмотря на повышенный съем припуска.

Высокую эффективность процесса шлифования шариков кольцевым инструментом с базированием неподвижного кольца на заготовках подтверждают результаты обработки заготовок из стекла и природных минералов различной твердости и прочности [5]. Отклонения от сферической формы окончательно обработанных стеклянных шариков не превышали 1 мкм.

#### ВЫВОДЫ

1. Шлифование шариков кольцевым инструментом с базированием неподвижного кольца на заготовках дает возможность реализовать разные варианты обработки в зависимости от соотношения нагрузок на кольца. При доминирующей осевой нагрузке шарик катится по трем поверхностям контакта и скользит только по наименее нагруженной горизонтальной поверхности кольцевой проточки на неподвижном кольце. Интенсивность шлифования в этом случае сравнительно небольшая, но достигает-

ся высокое качество поверхности шариков вследствие пониженного давления инструмента в зоне обработки. Данный вариант обработки может применяться на финишной стадии шлифования или при обработке шариков из материалов низкой прочности.

2. Шлифование шариков при повышенной нагрузке на неподвижное кольцо дает возможность обрабатывать заготовки со скольжением по двум поверхностям контакта с инструментом при высоком давлении на них. Интенсивность обработки возрастает, но и увеличиваются силы трения шариков о сепаратор. Этот вариант обработки может использоваться при шлифовании шариков из более прочных материалов высокой твердости либо на начальной стадии обработки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Олендер, Л. А. Технология и оборудование шарикового производства / Л. А. Олендер. – Минск: Вышэйш. шк., 1974. – 336 с.
2. Филонов, И. П. Механика процессов обкатки / И. П. Филонов. – Минск: Наука и техника, 1985. – 328 с.
3. 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.
4. 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.
5. Устройство для обработки шариков: пат. 1969 Респ. Беларусь, МПК7 В 24 В 11/02 / К. Г. Щетникович; заявитель К. Г. Щетникович. – № 1836; заявл. 29.03.94; опубл. 30.12.97 // Официальный бюл. / Нац. центр интеллектуал. собственности. – 1997. – № 4, ч. 1. – С. 120.
6. Щетникович, К. Г. Шлифование стеклянных шариков между двумя соосными кольцами и диском / К. Г. Щетникович, М. Г. Киселев // Вестник ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2007. – № 4. – С. 3–10.

Поступила 09.06.2009