

К. Г. ШЕТНИКОВИЧ, канд. техн. наук
(Белорусский национальный технический университет, г. Минск),
e-mail: kazimir.shere@tut.by

Влияние профиля кольцевой канавки на формообразование сферической поверхности шариков при доводке

На основании гармонического анализа формы шарика в диаметральном сечении установлено влияние профиля кольцевой канавки на точность обработки. Показана возможность ускоренного исправления погрешностей формы шарика при доводке кольцевым инструментом по сравнению с обработкой в канавках V-образного профиля. Рассмотрена кинематика шариков в зоне обработки. Приведены точностные параметры шариков из хрупких материалов после доводки кольцевым инструментом.

Ключевые слова: шарики, доводка, кольцевой инструмент, гармонические составляющие, кинематика, хрупкие материалы.

On the basis of harmonic analysis of a ball's shape in the diametrical section the influence of annular groove profile on the machining accuracy has been stated. A possibility of rapid correction of the errors in the ball's shape at final dressing by an annular cutting tool as compared with handling in the grooves of V-shaped profile has been shown. The kinematics of the balls in the processing zone has been considered. The precision parameters of the balls from brittle materials after dressing by the annual tool have been presented.

Keywords: balls, dressing, annular tool, the harmonic components, kinematics, brittle materials.

Доводку шариков выполняют бесцентровой обкаткой между двумя соосными дисками, один из которых имеет кольцевые канавки сферического или V-образного профиля [1]. Более высокая точность обработки достигается при доводке шариков в канавках V-образного профиля, обеспечивающих трехточечный контакт с инструментом. Наиболее часто применяемые канавки симметричного профиля отобраны на основании практических результатов из большого числа возможных вариантов. Некоторое увеличение производительности доводки шариков достигается применением несимметричных канавок, однако необходимость частых переточек дисков для восстановления формы изношенных канавок ограничивает их применение. Быстрое достижение заданной точности при обработке шариков с использованием канавки несимметричного V-образного профиля в работе [2] объясняется дополнитель-

ным вращением шариков вокруг вертикальной оси. Однако при увеличении несимметричности канавки угловая скорость шарика вокруг вертикальной оси увеличивается, а точность обработки в какой-то момент начинает снижаться. Сокращение времени доводки, вероятно, связано не столько с изменением кинематики шариков, сколько с более быстрым уменьшением их отклонений от сферической формы при обработке в несимметричных канавках.

При доводке шариков кольцевым инструментом достигается их четырехточечный контакт с инструментом [3, 4]. Помимо увеличения скорости скольжения шариков в зоне обработки изменяется способность инструмента исправлять отклонения от сферической формы. Цель данной статьи — теоретический анализ влияния профиля кольцевой канавки на исправление отклонений формы шариков при доводке дисковым и кольцевым инструментом.

Доводка шариков дисковым инструментом в канавках V-образного профиля

В процессе доводки верхний диск находится в контакте с большим числом шариков одной точности. На начальном этапе обработки максимальное давление инструмента испытывают наиболее крупные шарики в партии. Выравнивание размеров шариков создает условия для исправления отклонений формы, так как участки "сферической" поверхности, наиболее превышающие средний ее диаметр, подвергаются большему абразивному воздействию. Величина натяга и, соответственно, воздействие абразивного инструмента на отдельный шарик зависят не только от нагрузки на прижимной диск, но и от радиуса шарика в точках его контакта с дисками.

При силовом замыкании инструмента шарик 2 (рис. 1) находится в контакте со стенками канавки нижнего вращающегося диска 1 и торцевой поверхностью верхнего диска 3, поэтому мгновенные условия доводки определяются текущими значениями отклонений формы шарика в этих трех точках контакта. Отклонение формы шарика в точке A непосредственно влияет на мгновенный натяг, а отклонения в точках B и D вызывают смещение центра шарика и их влияние за-

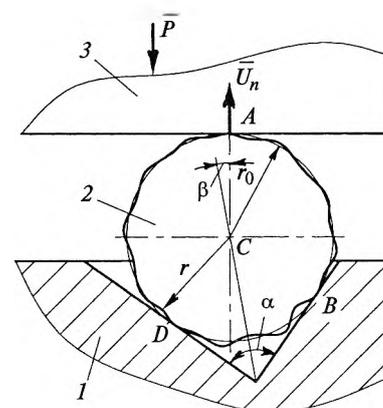


Рис. 1. Схема контакта шарика с дисковым инструментом

висит от угла α при вершине V-образной канавки. Чтобы оценить зависимость мгновенного натяга от указанного угла, воспользуемся гармоническим анализом профиля шарика в диаметральной сечении, т. е. в плоскости точек контакта с дисками. В полярной системе координат с полюсом в центре шарика профиль шарика в диаметральной сечении описывается рядом Фурье

$$r(\varphi) = r_0 + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \cos(n\varphi + \varphi_n),$$

где φ — полярный угол; r_0 — средний радиус шарика в диаметральной сечении; n — номер гармонической составляющей отклонения формы шарика в диаметральной сечении; C_n — амплитуда n -й гармоники; φ_n — фаза n -й гармоники.

Амплитуду проявления единичного гармонического отклонения в вертикальном направлении по аналогии с измерением отклонений от круглости цилиндрических деталей в призме можно выразить вектором U_n , величина которого определяется формулой [5]

$$U_n = 1 + \frac{1}{\sin \alpha} \times \left[\cos\left(\frac{\alpha}{2} - \beta\right) \cos n\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\alpha}{2} + \beta\right) + \cos\left(\frac{\alpha}{2} + \beta\right) \cos n\left(3\frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \beta\right) \right], \quad (1)$$

где α — угол при вершине канавки; β — угол между вертикалью и биссектрисой угла α .

Второе слагаемое в формуле (1) определяет вертикальное смещение центра S шарика. Вектор U_n , как и в случае бесцентрового шлифования, назовем коэффициентом исправления исходного отклонения [6, 7]. Он показывает во сколько раз мгновенный натяг, вызванный отклонением на n -й гармонике, больше, чем в случае, когда центр шарика не меняет своего положения по вертикали. Исправление данной гармоники возможно, если U_n положителен, при этом быстрее уменьшаются гармоники, для которых $U_n \geq 1$. В общем случае амплитуда гармоники с увеличением ее номера уменьшается, поэтому в первую очередь важно обеспечить исправление гармоник с малым номером.

В таблице представлены значения коэффициента U_n для кольцевых канавок с симметричными и несимметричными ($\alpha = 90^\circ$, $\beta = 10^\circ$) V-образными профилями, а также при двухточечном контакте шарика с инструментом ($\alpha = 180^\circ$). Отрицательное значение коэффициента U_n указывает на то, что смещение центра шарика происходит в направлении к вершине канавки и превышает отклонение на данной гармонике. Наиболее часто применяемый при доводке точных шариков симметричный профиль канавки

с углом 90° (см таблицу, третья графа) не исправляет гармоники с номерами 4, 7 и 9, но начиная с угла 90° полностью исправляется ($U_n = 1$) вторая гармоника. Данный профиль имеет преимущество по сравнению с профилем с углом $\alpha = 70^\circ$, который не только не исправляет гармоники 4, 7 и 10, но и медленно исправляет самую низшую гармонику 2.

Несимметричный профиль с углами $\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 10^\circ$ лучше устраняет низшие гармоники, чем симметричный, так как только гармоника 4 из первых десяти не устраняется. Это подтверждают экспериментальные исследования [2] точности доводки шариков в прямоугольных канавках симметричной и несимметричной форм. Наибольшая точность обработки достигнута в несимметричной канавке с углами $\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 10^\circ$. При двухточечном контакте интенсивно устраняются четные гармонические составляющие, но не исправляются нечетные гармоники. Анализ симметричных и несимметричных V-образных профилей кольцевой канавки показал, что для любого из них найдутся гармоники, которые будут устраняться медленно, что, естественно, увеличивает продолжительность обработки.

Приработка рабочих поверхностей дисков перед обработкой расширяет возможный диапазон углов α и β , что позволяет увеличить число исправляемых гармоник. Например, при длине дуги контакта $l = 0,2d$ (d — диаметр шарика) возможный диапазон угла α для симметричного профиля с углом 90° может изменяться от 67° до 113° , а угла β от 0° до $11,5^\circ$ или, если угол α не изменяется и равен 90° , то угол β может изменяться от 0° до 23° . Расчеты показали, что для симметричного профиля с углом $\alpha = 90^\circ$ длина дуги контакта $l = 0,2d$ обеспечивает $U_n \geq 1$ для всех гармоник. Для несимметричного профиля с $\alpha = 90^\circ$ и $\beta = 10^\circ$ достаточна длина дуги контакта после прикатки $l = 0,1d$, при которой достигается

Значения коэффициента U_n

Гармоника n	Углы профиля канавки							
	α	β	α	β	α	β	α	β
	70°	0	90°	0	90°	10°	180°	0
2	0,40		1,00		1,08		2,00	
3	2,68		2,00		1,77		0,00	
4	-0,34		-0,41		-0,07		2,00	
5	0,85		2,00		1,77		0,00	
6	2,51		1,00		0,79		2,00	
7	-0,58		0,00		0,84		0,00	
8	1,30		2,41		1,24		2,00	
9	2,23		0,00		0,83		0,00	
10	-0,72		1,00		1,91		2,00	

быстрое исправление гармонических составляющих отклонения формы шарика. Приведенные в работе [2] экспериментальные данные показали, что максимальная точность обработки в несимметричной канавке достигается при $l = (0,13 \div 0,21)d$.

Исправление низших гармонических составляющих отклонения формы шарика при обработке соосным кольцевым инструментом

Доводку шариков соосным кольцевым инструментом можно осуществлять на одной или нескольких кольцевых дорожках [3, 4]. При обработке шариков 1 (рис. 2) на одной кольцевой дорожке кроме нижнего диска 2 с приводом вращения можно связать также и внутреннее кольцо 5, закрепленное на оправке 4. Коническая фаска в этом случае выполняется на внутреннем кольце, а кольцевая проточка — на неподвижном кольце 3, которое устойчиво базируется по двум поверхностям на обрабатываемых шариках. При обработке шарик перемещается по кольцевой дорожке, образованной четырьмя рабочими поверхностями инструмента.

Противоположное вращение нижнего диска и внутреннего кольца значительно увеличивает их относительную скорость. Шарик разделяют с помощью сепаратора, устанавливаемого на нижнем диске. Нагрузка на наружное неподвижное кольцо регулируется сменными грузами или связанными с ним пружинами растяжения (на рисунке не показаны). Изменение осевой нагрузки как на внутреннее кольцо, так и на неподвижное позволяет менять соотношение нагрузок в широких пределах.

Усилие на шарик определяется суммарной нагрузкой на внутреннее приводное кольцо (P_m) и неподвижное кольцо (P_s), т. е. силовое замыкание инструмента обеспечивается по двум незави-

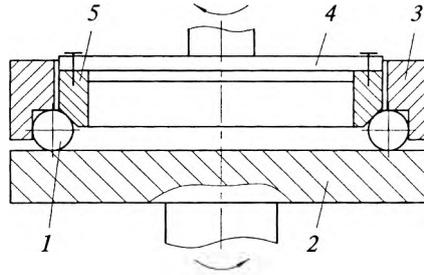


Рис. 2. Конструкция соосного кольцевого инструмента

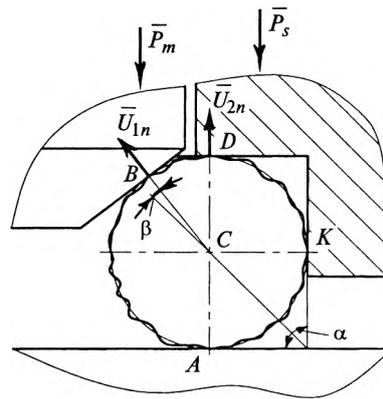


Рис. 3. Схема контакта шарика с кольцевым инструментом

симым направлениям (рис. 3). Коническая поверхность внутреннего кольца прижимает шарик к нижнему диску и цилиндрической поверхности проточки неподвижного кольца — реализуется трехточечный (A, B, K) контакт шарика с инструментом в V-образной канавке с углом $\alpha = 90^\circ$, образованной торцевой и цилиндрической поверхностями соответственно нижнего диска и неподвижного кольца. Гармонические отклонения формы шарика в диаметральном сечении проявляются в направлении вектора \bar{U}_{1n} , перпендикулярном к поверхности контакта и составляющем угол β с биссектрисой угла α . Выбирая угол конической фаски на приводном кольце, можно реализовать контакт шарика с несимметричной прямоугольной канавкой с углом $\beta = 10^\circ$, обеспечивающей исправление низших гармоник, кроме гармоники 4.

С помощью торцевой поверхности проточки неподвижного кольца, прижимающей шарик к

нижнему диску, одновременно реализуется двухточечный (A, D) контакт шарика с инструментом между параллельными поверхностями ($\alpha = 180^\circ$) и гармонические отклонения формы проявляются в направлении вектора \bar{U}_{2n} . Увеличение нагрузки на неподвижное кольцо с проточкой обеспечивает интенсивное исправление четных гармонических составляющих отклонений формы шарика. Суммарное силовое воздействие на шарик неподвижного и приводного колец ускоряет устранения отклонений шариков от сферической формы по сравнению с доводкой в V-образной канавке.

При обработке шарик взаимодействует с инструментом по четырем рабочим поверхностям, несимметрично расположенным относительно центра, поэтому перемещение шарика сопровождается обязательным скольжением по одной из них. Положение мгновенной оси вращения шарика зависит от частоты вращения инструмента и соотношения нагрузок на приводное и неподвижное кольца. При доминирующей осевой нагрузке P_m положение оси вращения шарика можно определить из условия отсутствия проскальзывания шарика во всех точках контакта [3], за исключением точки D контакта с горизонтальной поверхностью проточки (рис. 4). Мгновенная ось абсолютного вращения шарика проходит через точку K контакта с

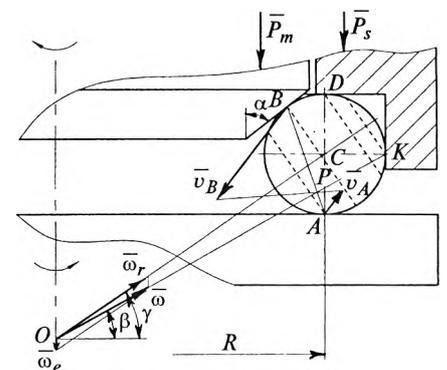


Рис. 4. Кинематика шарика в зоне обработки

неподвижным кольцом и полюс P скоростей v_A и v_B точек A и B контакта шарика с нижним диском и приводным кольцом. Увеличение частоты вращения приводного кольца сопровождается увеличением угла β наклона оси абсолютного вращения $\bar{\omega}$ шарика к горизонтали, так как полюс P смещается вниз. Угловые скорости относительного ($\bar{\omega}_r$) и переносного ($\bar{\omega}_e$) вращений шарика также возрастают.

Повышение нагрузки на неподвижное кольцо вызывает скольжение шарика по конической поверхности фаски и сопровождается уменьшением углов β и γ наклона оси относительного вращения шарика к горизонтали. Следы от контакта с инструментом (на рис. 4 показаны штриховыми линиями) располагаются на сферической поверхности шарика в плоскостях, перпендикулярных вектору $\bar{\omega}_r$, поэтому при повышенной нагрузке занимают другое положение на сферической поверхности. Неизбежные при обработке вибрации в технологической системе вызывают изменение соотношения усилий, действующих на шарики со стороны внутренних приводных и наружных неподвижных колец. Переменное усилие со стороны колец, вызывая постоянное изменение положения собственной оси вращения шарика относительно оси вращения инструмента, обеспечивает смещение сетки следов по сферической поверхности. Данный фактор в сочетании с быстрым исправлением низших гармонических составляющих

отклонений формы шарика обеспечивает высокую точность обработки.

Шарики можно обрабатывать на высокой скорости скольжения по рабочим поверхностям инструмента при относительно низкой скорости транспортирования их по кольцевой дорожке. Это обеспечивает интенсивную обработку шариков, изготовленных из различных материалов, в том числе и неметаллических. Обработка шариков из магнитотвердых спеченных материалов, корундовой керамики, оптического стекла и минералов показала высокую эффективность процесса доводки шариков кольцевым инструментом. Отклонения от сферической формы шариков диаметром $2,5 \div 10$ мм составляли менее $0,4$ мкм при скорости съема припуска $0,25$ мкм/мин для магнитотвердого спеченного материала КС37 и $0,15$ мкм/мин для вакуумплотной минералокерамики ВК 94-1.

Таким образом, при доводке шариков соосным инструментом исправление гармонических составляющих отклонений формы шарика зависит от поперечного профиля кольцевой канавки или дорожки, образованной рабочими поверхностями инструмента. Кольцевая конструкция инструмента обеспечивает контакт шарика одновременно по двухточечной и трехточечной схемам, что позволяет ускорить исправление различных гармонических составляющих отклонений формы шариков по сравнению с доводкой шариков в канавках V-об-

разного профиля. Высокая скорость скольжения шариков относительно инструмента и быстрое изменение положения собственной оси вращения обеспечивают высокую точность обработки шариков из хрупких материалов, в том числе и неметаллических.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Олендер Л. А., Добрынин Ю. А. Совершенствование формообразования сферических поверхностей. Минск: БелНИИТИ, 1980. 43 с.
2. Орлов П. Н., Иногамов Т. И., Наумов В. А. Влияние конструкции инструмента на качество доводки шариков // Станки и инструмент. 1972. № 3. С. 37, 38.
3. Шетникович К. Г. Исследование кинематики шариков из хрупких неметаллических материалов при тонком шлифовании соосным кольцевым инструментом из сверхтвердых материалов // Сверхтвердые материалы. 2010. № 1. С. 57—68.
4. Шетникович К. Г. Влияние осевой нагрузки на изменение условий скольжения при доводке шариков сборным инструментом // Вестник машиностроения. 2010. № 1. С. 13—17.
5. Авдулов А. Н. Контроль и оценка крутости деталей машин. М.: Изд-во стандартов. 1974. 176 с.
6. Романов В. Л. Динамическая теория формообразования при бесцентровом шлифовании // Труды института машиноведения. 1965. Вып. 19. С. 80—97.
7. Захаров О. В., Гаврилов А. Н. Гармонический анализ при моделировании бесцентрового суперфинишного формообразования // Актуальные проблемы электронного приборостроения и машиностроения: сб. науч. ст. / Отв. ред. Т. В. Конюшков. Саратов: СГТУ, 2002. С. 129—134.

ВНИМАНИЮ АВТОРОВ!

Правила подготовки рукописи
опубликованы
на 3-й полосе обложки журнала

"Вестник машиностроения" № 2 за 2010 г.