

УДК 621.822

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНО-УПОРНЫХ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ

*А.Л. САВЧЕНКО, канд. техн. наук, доц. Н.Т. МИНЧЕНЯ*  
(Белорусский национальный технический университет, Минск)

Современные методы восстановления подшипников качения не учитывают их износ, который для прецизионных подшипников, вышедших из строя по точности вращения, относительно невелик. Предлагается новый способ восстановления радиально-упорных шарикоподшипников, заключающийся в обкатке изношенного подшипника в абразивной среде. Для управления кинематикой шариков используется энергия ультразвуковых колебаний, приложенных к одному из колец. Таким образом осуществляется доводка шариков непосредственно в кольцах подшипника.

**Введение.** Известно, что долговечность шпиндельных узлов определяется, в основном, долговечностью их опор качения. Поэтому при проведении ремонтных работ в вышедших из строя шпиндельных узлах в большинстве случаев заменяются подшипники. Отказавшие подшипники качения сдаются в металлолом либо используются для внутризаводских нужд - в ролянгах конвейеров, колесах транспортных тележек и т.п. Учитывая то, что большая часть этих подшипников имеет износ в пределах нескольких микрометров и не имеет усталостных повреждений контактирующих элементов, такое использование вряд ли является целесообразным. Существующие методы восстановления подшипников, основанные на перешлифовании дорожек качения и замене шариков на новые либо на нанесении на дорожки качения и шарики слоя материала с последующим шлифованием и полированием. Такие методы не учитывают степень износа, которая для прецизионных подшипников качения незначительна. Износ тел качения в большинстве подшипников не превышает 5...6 мкм. Предлагается новый способ восстановления подшипников качения, заключающийся в обкатке изношенных подшипников в абразивной среде с использованием энергии ультразвуковых колебаний.

**Цель.** В данной работе выполнено теоретико-экспериментальное исследование возможности использования предлагаемого нами метода восстановления точностных параметров радиально-упорных шарикоподшипников.

**Методы исследований.** Для исследований была взята партия радиально-упорных подшипников типа 4-36204, которые проработали различное время во внутришлифовальных головках станков. Все шпиндельные узлы вышли из строя по точности вращения. Общее количество подшипников составило 100 штук.

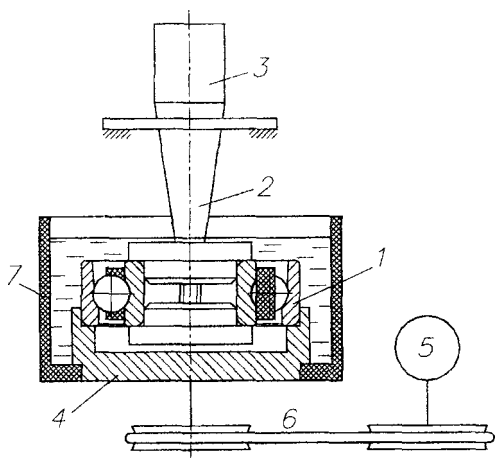


Рис. 1. Схема устройства для промывки подшипников

Как показали исследования, 86 % подшипников имели вблизи дорожек качения плотный налет, возникший по причине физико-химических процессов в смазочном материале, вызванных нагревом элементов подшипника. При вибрациях, возникающих в процессе шлифования, частицы налета могут попадать на дорожки качения, являясь причиной повышенного биения и колебания шпинделя. Обычным промыванием подшипника в ультразвуковой ванне снять налет не удалось, поэтому был предложен новый способ мойки. Схема, иллюстрирующая этот способ, приведена на рис. 1. Подшипник 1 крепится внутренним кольцом на концентраторе 2 ультразвукового преобразователя 3. Наружное кольцо подшипника устанавливается в оправку 4 и приводится во вращение электродвигателем 5 через ременную передачу 6. Посредством промывки с принудительным вращением в ванне 7 с мощным средством (керосин) и введением

ультразвуковых колебаний со специально подобранными параметрами непосредственно в рабочую зону удалось очистить от налета все подшипники. После этого измерялись точностные параметры (радиальное и осевое биения колец), момент трения, уровень вибраций и шума подшипников, отклонение угла контакта, а также состояние отдельных деталей (4 % подшипников имели усталостные повреждения в

виде шелушения дорожек качения; остальные 96 % подшипников имели различные степени абразивного износа дорожек качения и шариков, причем износ 9 % подшипников был незначительным; по точности вращения они соответствовали ГОСТ 520).

Радиальное биение остальных 87 % подшипников, вызванное абразивным изнашиванием, превышало допустимое значение на 1...10 мкм. Количественное соотношение подшипников в группах по степени износа представлено в виде гистограммы (рис. 2).

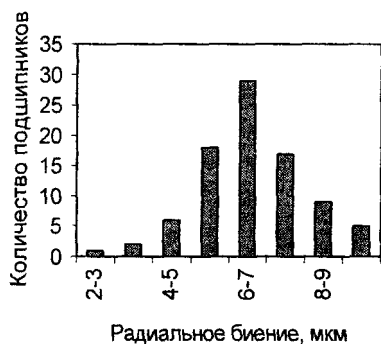


Рис. 2. Распределение подшипников по группам по степени износа

Спектры момента трения изношенных подшипников характеризуются более высоким по сравнению с новым подшипником уровнем в области низких частот (до 20 Гц), что, как показано в [1], обусловлено отклонениями геометрической формы беговых дорожек и шариков.

При сравнении статического момента трения в изношенных и новых подшипниках (в новых подшипниках, взятых для сравнения он был равен примерно  $2 - 10 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ) можно сделать вывод, что изменения момента при таких значениях износа сравнительно невелики (до  $3 \cdot 10^{-6} \text{ Н} \cdot \text{м}$ ). Причем среди изношенных подшипников встречаются экземпляры, момент трения в которых ниже по сравнению с новыми. Это, вероятно, вызвано приработкой тел качения и дорожек в процессе работы.

Уровень шумов изношенного подшипника выше примерно на 15 % по сравнению с новым подшипником, что может свидетельствовать о примерно такой же величине износа.

Кроме того, осциллограмма изношенного подшипника имеет больше высокочастотных составляющих.

При сравнении спектрограмм момента трения и шума нового и изношенных подшипников видно, что различия наблюдаются преимущественно в низкочастотной области, т.е. у изношенных подшипников более заметны погрешности формы колец и шариков, ухудшение шероховатости рабочих поверхностей практически незаметно (это согласуется с измерениями геометрических параметров и шероховатости поверхности колец и шариков).

Для нового подшипника 4-36204 отклонение поверхности шарика от сферической формы должно быть не более 0,4 мкм, разноразмерность - не более 0,8 мкм, отклонение диаметра дорожки качения внутреннего кольца не более 1 мкм, наружного - не более 1,5 мкм. По результатам измерений часть подшипников соответствует ГОСТ 520, остальные имеют различную степень износа, причем износ основного количества подшипников находится в пределах 6 мкм. В основном снижение точности подшипников связано с износом шариков. Износ колец значительно меньше, и во многих случаях размеры колец соответствуют ГОСТ 520, наружное кольцо изношено меньше внутреннего. Сепаратор изношен значительно больше, причем внутренние поверхности гнезд, как видно под микроскопом, шаржированы абразивными частицами и продуктами износа. Поэтому сепаратор непригоден для дальнейшего использования.

Шероховатость дорожек качения и шариков в основном отличается от номинала на один класс шероховатости, наиболее заметно изменение шероховатости у шариков, наименее - у наружного кольца.

Угол контакта в большинстве изношенных подшипников находится в пределах  $14...20^\circ$ . Это несколько больше, чем у новых ( $11...15^\circ$ ), что соответствует результатам экспериментов, изложенным в [2], где показано, что в результате абразивного износа угол контакта в подшипниках увеличивается.

Структура поверхностного слоя изношенных деталей подшипников практически не отличается от структуры поверхностного слоя деталей нового подшипника.

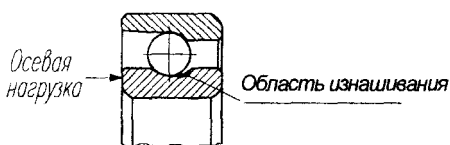


Рис. 3. Подшипник с перевернутым внутренним кольцом

Как видно из результатов исследования изношенных подшипников, дорожка качения внутреннего кольца изношена больше, чем у наружного. Конструкция подшипника 4-36204 такова, что на внутреннем кольце дорожка качения имеет симметричный профиль, а область ее износа, как показано на рис. 3, смещена в сторону от оси симметрии. Поэтому целесообразно не восстанавливать дорожку качения, а перевернуть кольцо (см. рис. 3). В этом случае шарики под осевой нагрузкой будут контактировать с неизношенной частью дорожки качения внутреннего кольца. Это техническое решение защищено патентом Республики Беларусь [3].

Около 80 % подшипников имеют отклонения диаметров посадочных поверхностей, соответствующие ГОСТ 520. Как показывает опыт работы шпиндельных мастерских предприятий, при качественной разборке узлов посадочные поверхности подшипников не повреждаются. В подшипниках, не соот-

ветствующих ГОСТ 520 по отклонениям посадочных диаметров, такое несоответствие, видимо, обусловлено несовершенством демонтажа или некачественной сборкой.

Подводя итог вышесказанному, можно отметить, что подшипники качения шпиндельных узлов металлорежущих станков, вышедшие из строя по точности вращения имеют различные степени абразивного износа рабочих поверхностей, причем у большинства подшипников износ невелик и составляет 2...6 мкм. Остальные показатели, характеризующие работоспособность изношенных подшипников, практически не отличаются от аналогичных показателей новых подшипников, соответствующих ГОСТ, поэтому при восстановлении необходимо только восстановить исходную точность вращения. Основное влияние на потерю точности оказывает износ тел качения, приводящий к их увеличенному отклонению от сферической формы. При изготовлении шариков исправление отклонений такой величины производится на финишной операции, т.е. в процессе доводки. Кинематика шарика при работе в радиально-упорном подшипнике аналогична кинематике шарика при его доводке, поэтому исправление формы шарика может быть достигнуто при его доводке непосредственно в кольцах подшипника.

Чтобы определить оптимальные параметры процесса доводки, необходимо найти кинематические и силовые соотношения, обеспечивающие требуемую точность и другие качественные показатели восстановленных подшипников. Для этого целесообразно использовать математические модели, описывающие кинематику элементов подшипника, их взаимодействие и съем припуска в процессе доводки.

Как показано в [4], для обеспечения требуемого соотношения скоростей сферического движения шарика  $\omega_k : \omega_v : \omega_{kp}$  ( $\omega_k$  – угловая скорость качения;  $\omega_v$  – угловая скорость вращения;  $\omega_{kp}$  – угловая скорость кручения шарика) и управления этим соотношением требуется принудительное вращение шариков поперек дорожек качения. Это достигается сообщением одному из колец ультразвуковых колебаний. Скорость вращения шарика при действии осевых колебаний  $\omega_{kp}$  определяется по методике, описанной в [4], либо с использованием методики, приведенной в [5].

Воспользуемся моделью, приведенной на рис. 4. Шарик радиусом  $R_w$  и массой  $m$  представим бесконечно тонким диском (плоская задача) с соответствующими параметрами.

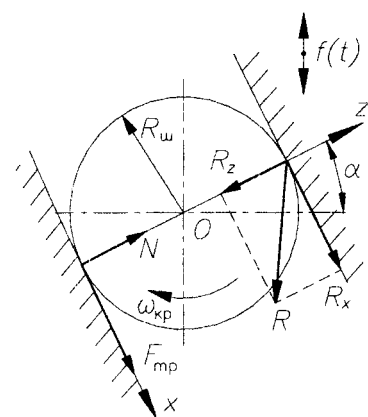


Рис. 4. К определению скорости вращения шарика

Вращение шарика происходит за счет импульсных сил, периодически сообщаемых ему внутренним кольцом, с частотой ультразвуковых колебаний.

Уравнение, описывающее вращательное движение шарика вокруг центра масс относительно оси  $OY$ , имеет вид:

$$J \omega'_{kp} = (R_x - F_{mp}) R_w = (R_x - \mu R_z) R_w, \tag{1}$$

где  $\mu$  – коэффициент трения.

Из условия равновесия

$$R_z = N; \quad R_z = R \sin \alpha; \quad R_x = R \cos \alpha.$$

С учетом этого уравнение (1) можно записать в виде

$$J \omega'_{kp} = R_w \cdot R (\cos \alpha - \mu \sin \alpha).$$

Примем  $R_w (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) = a$ , тогда

$$J \omega'_{kp} = Ra. \tag{2}$$

Чтобы найти значение  $\omega_{kp}$ , проинтегрируем выражение (2):

$$\omega_{kp} = \frac{a}{J} \int R dt.$$

Момент инерции шарика  $J = \frac{2}{5} m R_w^2$ . После подстановки получим

$$\omega_{kp} = \frac{5(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{2mR_w} \cdot I,$$

где  $I = \int R dt$  – импульс реакции  $R$  за время контакта шарика с внутренним кольцом.

Так как в начале каждого последующего цикла взаимодействия шарика с внутренним кольцом значение  $\omega_{кр} = 0$ , средняя скорость вращения равна

$$\omega_{кр.ср} = \frac{1}{2} \omega_{кр} = \frac{5(\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{4mR_{ui}} \cdot I. \tag{3}$$

Как показано в [5], импульс реакции  $R$  за время контакта определяется выражением:

$$I = \frac{8x_{cm} P_{cm} \pi}{A_0 \omega_{ак}} CD,$$

где  $x_{cm}$  – деформация контактирующих поверхностей при отсутствии колебаний;  $P_{cm}$  – значение осевой нагрузки при отсутствии колебаний;  $A_0$  и  $\omega_{ак}$  – амплитуда и частота ультразвуковых колебаний соответственно,  $\omega_{ак} = 2\pi f$ ;  $C$  и  $D$  – безразмерные коэффициенты.

С учетом этого формула (3) приобретет вид:

$$\omega_{кр} = \frac{5x_{cm} P_{cm} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{A_0 f m R_{ui}} CD.$$

В безотрывном режиме взаимодействия поверхностей, когда  $A_0 = 2x_{cm}$ , коэффициенты  $C$  и  $D$  равны единице, в этом случае  $I = P_{cm} f$ , тогда

$$\omega_{кр} = \frac{5P_{cm} (\cos \alpha - \mu \sin \alpha)}{4mR_{ui} f}.$$

В виброударном режиме, когда  $A_0 > 2x_{cm}$ , коэффициенты  $C$  и  $D$  определяются по формулам:

$$C = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(\alpha + \beta)}}{2 + (1 + \alpha / \beta)}; \quad D = 1 + \frac{\beta}{C},$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – безразмерные коэффициенты, которые вычисляются следующим образом:

$$\alpha = \frac{mv_1^2}{4P_{cm} x_{cm}}; \quad \beta = \frac{A_0 m \omega_{ак} v_1}{\pi P_{cm} x_{cm}},$$

где  $v_1 = 2\sqrt{g(A_0 - 2x_{cm})}$  – значение виброскорости.

С учетом выражения для  $v_1$

$$\alpha = \frac{mg(A_0 - 2x_{cm})}{P_{cm} x_{cm}}; \quad \beta = \frac{2A_0 m \omega_{ак} \sqrt{g(A_0 - 2x_{cm})}}{\pi P_{cm} x_{cm}}.$$

Как утверждается в работах по доводке шариков, сферическая поверхность образуется при любом соотношении скоростей сферического движения шарика, однако наилучшие условия формообразования достигаются в случае, когда  $\omega_{кр}$  больше остальных составляющих [6]. При использовании в качестве источника колебаний ультразвукового преобразователя можно достичь высоких значений  $\omega_{кр}$ . Оптимальное соотношение скоростей, вероятно, следует определять экспериментально, так как при построении траектории точки касания шарика с наружным кольцом, на котором происходит качение с проскальзыванием (т.е. обеспечиваются условия для съема металла), при различных соотношениях угловых скоростей трудно заметить существенную разность в расположении линий (рис. 5).

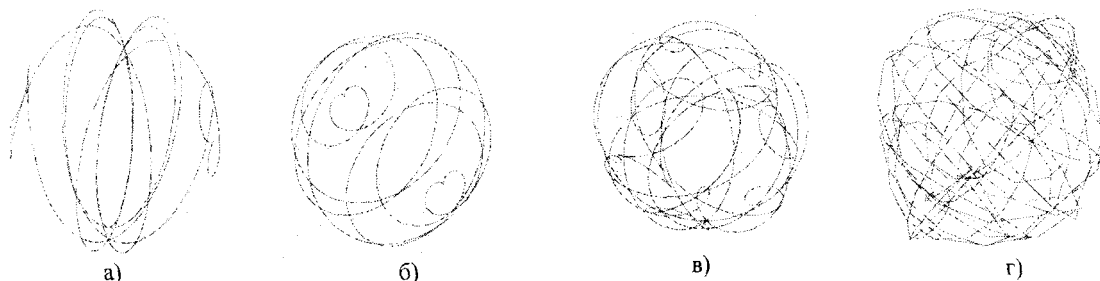


Рис. 5. Траектории точки касания шарика с наружным кольцом:

а – при  $\omega_{кр} = 0$ ; б – при  $\omega_{к}: \omega_{в}: \omega_{кр} = 1:0,28:0,2$ ; в – при  $\omega_{к}: \omega_{в}: \omega_{кр} = 1:0,28:1$ ; г – при  $\omega_{к}: \omega_{в}: \omega_{кр} = 1:0,28:2$

Для исследования процесса восстановления подшипников была разработана специальная установка, работающая следующим образом.

Восстанавливаемый подшипник устанавливается внутренним кольцом на оправку, которая жестко связана с концентратором ультразвукового преобразователя, предназначенного для создания осевых колебаний. Наружным кольцом подшипник устанавливается в оправку, которая находится в ванне с абразивной средой. Размеры ванны позволяют полностью разместить в ней подшипник. Ванна приводится во вращение электродвигателем.

Схема с неподвижным внутренним и вращающимся наружным кольцами наиболее просто может быть технически реализована. Подшипник также нагружается осевым усилием. Для контроля над ходом восстановления в процессе работы измеряются радиальное и осевое биения наружного кольца подшипника с помощью индуктивных преобразователей. Амплитуда ультразвуковых колебаний в процессе работы не контролируется, так как заранее известна зависимость амплитуды от частоты колебаний и осевой нагрузки на преобразователь. После восстановления подшипник разбирается, промывается и собирается с новым сепаратором.

**Результаты и их обсуждение.** С помощью описанной методики был проведен ряд экспериментов по восстановлению радиально-упорных подшипников типа 4-36204, вышедших из строя по точности вращения. При этом определялись оптимальные значения соотношения скоростей сферического вращения шарика и осевой нагрузки, при которых качественные параметры восстановленного подшипника и время восстановления будут наиболее приемлемыми. Полученные результаты могут быть использованы для создания технологического оборудования, предназначенного для восстановления изношенных подшипников, а также для обработки новых подшипников с целью повышения их точности или уменьшения уровней вибраций и шумов.

**Выводы.** В результате теоретических и экспериментальных исследований создана новая технология восстановления радиально-упорных шарикоподшипников, вышедших из строя по критерию точности вращения. Технология также может быть использована для обработки новых подшипников с целью повышения их качественных показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Юркаускас А.Ю. Исследование моментов сопротивления вращению и случайных колебаний прецизионных подшипников: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.121. - Каунас, 1970. - 20 с.
2. Кинематика и долговечность подшипников качения машин и приборов / И.С. Цитович, Ю.В. Скорынин, Н.Т. Минченя, И.В. Каноник. - Мн.: Наука и техника, 1977. - 344 с.
3. Пат. 5071 ИВУ, МКИ В23Р 6/00. Способ восстановления работоспособности радиально-упорного шарикоподшипника / Н.Т. Минченя, А.Л. Савченко; Заявл. 23.07.98; Опубл. 30.03.03 // Афіцыйны бюлетэнь / Дзярж. пат. ведамства Рэсп. Беларусь. - 2003.
4. Савченко А.Л. Работа радиально-упорного подшипника в условиях осевых колебаний // Весці НАН Беларусі Сер. фіз.-тэхн. навук. - 2005. - № 1. - С. 20 - 24.
5. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Ибрагимов В.А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. - Мн.: Тесей, 2001. - 344 с.
6. Филонов И.П. Механика процессов обкатки / Под ред. П.И. Ящерицына. - Мн.: Наука и техника, 1985. - 328 с.