УДК621.923.1

ИССЛЕДОВАНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНИЧЕСКИХ РОЛИКОВЫХ ПОДШИПНИКОВ

© 2018 Н.В. Носов, Л.Н. Михайлова

Самарский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 25.06.2018

В статье основное внимание уделено исследованию шероховатости поверхностей роликов конических подшипников. Анализ схем шлифования и сферошлифовальных станков по критериям универсальности, производительности и качеству обработки показал, что непрерывное шлифование обеспечивает заданное качество обработки при высокой производительности и в широком диапазоне размеров. На первом этапе исследования поверхностей были выполнены на специализированном исследовательском комплексе, включающем профилограф и компьютер с программным обеспечением, позволяющем записывать и обрабатывать профилограммы. На следующем этапе были выполнены исследования шероховатости участков рабочей и торцовых поверхностей ролика с помощью оптико-электронного комплекса и разработанной методики на основе использования квазиоптимального корреляционного алгоритма. Установлено, что изменение шероховатости подчиняется нормальному закону распределения и, используя метод наименьших квадратов, получена аналитическая зависимость. Найденные значения среднего арифметического отклонения профиля рабочей поверхности ролика согласуются со значениями, полученными с помощью профилографа. Сравнительный анализ результатов параметров шероховатости поверхностей роликов, найденные с помощью измерительного оптико-электронного комплекса и профилографа, отличаются между собой на 0,1%, что подтвердило эффективность применения измерительного оптико-электронного комплекса.

Ключевые слова: Шлифование, сферических торцов роликов, конических подшипников

введение

Долговечность подшипника в значительной степени определяется работоспособностью тел качения – роликов. Наиболее целесообразной формой рабочего торца конического ролика и упорного борта внутреннего кольца является сфера. При этом контакт происходит по площади, что обеспечивает благоприятное распределение напряжений.

Требования к качеству конических роликовых подшипников постоянно повышаются. Твердость рабочей поверхности ролика после термической обработки составляет 58...63 HRC. На основании анализа существующих схем шлифования и сферошлифовальных станков по критериям универсальности, производительности и качеству обработки рассмотрено исследование процесса непрерывного шлифования на станке для шлифования сферических торцов конических роликов подшипников качения, обеспечивающее заданное качество обработки при высокой производительности и в широком диапазоне радиусов сферы. Качество поверхности конических роликов с точки зрения шероховатости поверхности во многих случаях является определяющим фактором, влияющим на долговечность и надёжность роликовых подшипников при их эксплуатации.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Технология производства конических роликов предусматривает на заключительных операциях технологического процесса применение операций шлифования. Окончательную обработку наружной конической поверхности дорожки качения осуществляют на бесцентрово- шлифовальных станках СВААКМ 25/1 абразивными кругами на вулканитовых связках (14А6HCM2B1). Режимы шлифования были следующие:

- скорость абразивного круга 55 м/с;
- скорость вращения ведущего круга 70 м/мин;
- снимаемый припуск 0,01 мм;
- скорость продольной подачи 300 мм/мин;

 обработку проводили с охлаждением и периодической правкой алмазным карандашом.

Торцы роликов обрабатывались на двухстороннем торцешлифовальном станке ЗАЗ43 абразивными кругами размером 600×63×305 и характеристиками 14А 25П СМ1 10Б. Обработка торцов производилась на следующих режимах:

- окружная скорость шлифовального круга 35 м/с;
 общий припуск 0,01 мм;
- oommin inpuniyek 0,01 mm,
- скорость подачи ролика в зону обработки

Носов Николай Васильевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения». E-mail: nosov@samgtu.ru

Михайлова Людмила Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные станочные и инструментальные системы». E-mail: mih_ln@mail.ru

2,5 м/мин;

- шлифование осуществлялось с подачей смазывающей охлаждающей жидкости (СОЖ) и периодической правкой круга алмазом в оправке.

На первом этапе исследования шероховатости поверхностей были выполнены на специализированном исследовательском комплексе, включающем профилограф модели SJ – 201Р, компьютер и соответствующее программное обеспечение, позволяющее записывать и обрабатывать профилограммы. На торцах ролика профилограммы снимались в радиальном и окружном направлениях.

Одной из первых задач по повышению качества обработки сферических торцов роликов является подбор инструмента. Особенностью инструмента сферошлифовального станка является то, что он после правки по радиусу образует рабочую зону.

Шлифовальный круг профилируется по заданному радиусу алмазным карандашом. Существует два способа правки круга: от приводной головки со стороны рабочей зоны и по копиру в стороне (перпендикулярно или противоположно) от рабочей зоны.

Правка с приводной головки производится алмазным карандашом, расположенным в специальном гнезде сепаратора и закрепленным в одном из подающих дисков. Движение алмаза при правке осуществляется от гидроцилиндра. Карандаш устанавливается по середине жёлоба, образованного дисками приводной головки, и тем самым проходит через ось шлифовального круга.

Для правки с противоположной стороны от рабочей зоны применяют специальное приспособление, в котором алмазный карандаш крепится на скалке, а от гидроцилиндра получает качательное движение по радиусу. Скорость правки регулируется скоростью перемещения гидроцилиндра. В зависимости от типа обрабатываемого ролика изменяется положение скалки и соответственно радиус движения алмаза. Правка шлифовального круга осуществляется с продольной подачей 0,5 – 0,6 м/мин.

При определении радиуса правки шлифовального круга учитывалась жёсткость приводной головки, так как в процессе обработки торцов роликов под воздействием усилий резания детали вдавливались в пространство между дисками.

Радиус правки в данном случае определялся по формуле:

$$R_{\rm np} = R_{\rm n} + h - k - T,$$

где R_{π} - радиус дисков приспособления, мм;

h – вылет ролика над дисками в месте загрузки, мм;

k – величина осевого перемещения ролика в дисках, зависящая от податливости приспособления, принимает значение 0,2 – 1,0 мм; *Т* – припуск на обработку сферического торца ролика, мм.

При исследованиях шлифовальный круг профилировался корригированным радиусом обработки:

$$R = R_c - \Delta R$$

где R_{c} – радиус сферы, заданный чертежом, мм;

 ΔR – величина корригирования радиуса, мм, определяемая по формуле:

$$\Delta R = \frac{\Delta \Pi \left(\sqrt{R_c^2 - r_{\rm B}^2} - \frac{\Delta \Pi}{2} \right)}{\sqrt{R_c^2 - r_{\rm B}^2} - \Delta \Pi - \sqrt{R_c^2 - r_{\rm p}^2}},$$

4

где ∆П – величина погрешности профиля сферы торца, мм;

 $r_{\rm p}$ – радиус обрабатываемого торца ролика, мм;

 $\dot{r_{_{\rm B}}}$ – радиус технологической выемки на торце ролика, мм.

При исследованиях применялась смазочно-охлаждающая жидкость от цеховой системы. В зону шлифования СОЖ подаётся в количестве 7 л/мин.

Влияние режимов обработки на погрешность сферы при непрерывном шлифовании сферических торцов исследовались на станке модели БСШ-200М [1]. После выявления оптимальных режимов обработки проводились исследования точности, устойчивости и стабильности процесса.

Шлифовальный круг профилировался рассчитанным радиусом обработки и балансировался. Наблюдение за процессом обработки проводилось в течение 3-4 часов межправочного периода работы станка.

В процессе экспериментов исследовались факторы, характеризующие точность профиля сферической поверхности торца ролика: радиус сферы, торцовое биение, огранка и шероховатость сферического торца ролика.

На следующем этапе были выполнены исследования шероховатости выбранных участков рабочей и торцовых поверхностей ролика с помощью оптико-электронного комплекса и разработанной методики на основе использования квазиоптимального корреляционного алгоритма [2].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При шлифовании роликов 7606 на станке ВШ-680 корригированным радиусом обработки были получены хорошие результаты, а именно, в поле допуска находилось торцовое биение, огранка и шероховатость. Ролики шлифовались без правки круга в течение трёх часов, и при этом средняя величина радиуса сферы постоянно находилась в допуске. Исследование высоты микронеровностей по длине рабочей поверхности ролика показало, что среднее арифметическое отклонение профиля *Ra* по этой длине изменяется незначительно от: *Ra*=0,105 мкм до *Ra*=0,094 мкм.



Рис. 1. Вид интерфейса с профилограммой и параметрами шероховатости для рабочей поверхности ролика

Исследование высоты микронеровностей поверхности торцов ролика во взаимно перпендикулярных направлениях показало, что параметр *Ra* по этим направлениям практически не отличается друг от друга для одной и той же поверхности.

Однако на разных торцах ролика формиру-



Рис. 2. Вид интерфейса с профилограммой и параметрами шероховатости для торца ролика 1 в радиальном направлении

ется различный микрорельеф. При этом на торцевой поверхности №1 величина Ra составила 0,13 мкм в радиальном направлении и 0,15 мкм в осевом направлении, а для торцовой поверхности №2 Ra = 0,09 мкм в радиальном направлении и Ra = 0,105 мкм в осевом направлении. Отмеченная особенность микрорельефа торцов ролика приведена на рис. 4. Такое распределение высотных параметров микрорельефа по торцам ролика связано с тем, что угол захода конуса на шлифовальных кругах разный и в связи с этим с обрабатываемых торцовых поверхностей снимается различный припуск. В частности, с торца №1 снимается больший припуск.

На следующем этапе исследования шероховатости поверхностей ролика выполнены с помощью оптико-электронного комплекса и разработанной методики [2]. Полутоновые и бинарные изображения участков рабочей поверхности ролика, а также графики изменения коэффициента корреляции и корреляционные поверхности приведены на рис. 5 – 9. Результаты измерения средней амплитуды переменной составляющей корреляционных функций для выделенных участков дали следующие значения от $U_{cp} = 17,9$ отн. ед.; до $U_{cp} = 16,3$ отн. ед.;

Таким образом, все найденные значения U_{cp} попадают в диапазон 6 – 21 отн. ед., что предполагает использование зависимости Ra=0,0065 $\times U_{cp}$ – 0,02 мкм для определения среднего арифметического отклонения профиля рабочей поверхности ролика. Подставляя найденные значения U_{cp} в это выражение, получим:

для участка №1 – *Ra* = 0,096 мкм; для участка №2 – *Ra* = 0,089 мкм; для участка №3 – *Ra* = 0,086 мкм; для участка №4 – *Ra* = 0,094 мкм; для участка №5 – *Ra* = 0,087 мкм.

Для определения доверительных интервалов I_{β} , в которые попадает случайная величина U_{cp} , зададим вероятность распознавания шероховатости поверхности, равной P=0,99. Про-



Рис. 3. Вид интерфейса с профилограммой и параметрами шероховатости для торца ролика 2 в осевом направлении



Рис. 4. Шероховатость торцовых поверхностей ролика



Рис. 5. Результаты обработки изображения участка №1 рабочей поверхности ролика



Рис. 7. Результаты обработки изображения участка №3 рабочей поверхности ролика

ведённые исследования с использованием квазиоптимального корреляционного алгоритма позволили найти величины среднего квадратического отклонения (СКО) σ от U_{cp} для образцов с шероховатостями:

$$Ra = 0,13$$
 mkm $-U_{cp} = 21,6$ oth. eq.,
 $\sigma = 2,0$ oth. eq.;
 $Ra = 0,084$ mkm $-U_{cp} = 13,2$ oth. eq.,
 $\sigma = 0,8$ oth. eq.;
 $Ra = 0,048$ mkm $-U_{cp} = 10,8$ oth. eq.,
 $\sigma = 0,6$ oth. eq.;
 $Ra = 0,025$ mkm $-U_{cp} = 6,8$ oth. eq.,
 $\sigma = 0.07$ oth. eq.

При этом также было установлено, что сама случайная величина U_{cp} подчиняется нормальному закону распределения. В этом случае число СКО, которое нужно отложить вправо и влево от центра рассеивания для того, чтобы вероятность попадания случайной величины U_{cp} в полученный интервал была *P*=0,99, составляет $t_{\beta} = 2,576$.

Для каждого образца было обработано по 30 изображений с различных участков исследуемой поверхности, то есть n = 30. Тогда СКО оценки при определении U_{cp} определяется по формуле:

$$\sigma_t = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} . \tag{1}$$

Следовательно, для образцов поверхности с шероховатостью Ra = 0,13 мкм имеем $\sigma_t = 0,37$ отн.ед., с шероховатостью Ra = 0,084



Рис. 6. Результаты обработки изображения участка №2 рабочей поверхности ролика



Рис. 8. Результаты обработки изображения участка №4 рабочей поверхности ролика

мкм – $\sigma_t = 0,15$ отн.ед., с шероховатостью Ra = 0,048 мкм – $\sigma_t = 0,11$ отн. ед. и с шероховатостью Ra = 0,025 мкм – $\sigma_t = 0,013$ отн. ед. Через величины t_{β} и σ_t доверительный интервал выражается в виде:

$$\Delta_{\beta} = (U_{cp} - t_{\beta} \times \sigma_t; U_{cp} + t_{\beta} \times \sigma_t).$$
(2)

Округляя вычисленные значения $I_{\beta} = t_{\beta} \times \sigma_t$ в сторону увеличения, получим для отмеченных значений шероховатости следующие величины доверительных интервалов:

Ra = 0,13мкм – $I_{\rm b}$ = 1,0 отн. ед.; 20,6 отн. ед.
 $\leq U_{cp} \leq$ 22,6 отн. ед.;

Ra = 0,084мкм – $I_{\beta} = 0,4$ отн. ед.; 12,8 отн. ед. $\leq U_{cp} \leq 13,6$ отн. ед.;

Ra =0,048мкм − *I*_β = 0,3 отн. ед.; 10,5 отн. ед. *U*_{cp} ≤ 11,1 отн. ед.;

Ra = 0,025мкм − *I*_β = 0,03 отн. ед.; 6,77 отн. ед. ≤ *U_{ca}* ≤ 6,83 отн. ед.



Рис. 9. Результаты обработки изображения участка №5 рабочей поверхности ролика



Рис. 10. Зависимость *I*_в от средней амплитуды переменной составляющей корреляционной функции U_ при использовании формата 320 × 240 пикселей для изображения поверхности

Как видно из приведенных данных, доверительные интервалы для U_{cp} с увеличением шероховатости возрастают, и что очень важно, не перекрываются. График зависимости $I_{\beta} = f(U_{cp})$ приведён на рис. 10.

Согласно приведённому графику, зависимость $I_{\beta} = f(U_{cp})$ имеет нелинейный характер. Используя метод наименьших квадратов, для данного доверительного интервала была получена аналитическая зависимость

 $I_{\beta} = (3,4 \times U_{cp}^{2} + 14,4 \times U_{cp} + 1) \times 10^{-3}.$ (3) Подставляя в найденное выражение U_{cp} , получим:

от I_{β} = 1,35 отн. ед., до $U_{cp_{max}}$ = 19,25 отн. ед., следовательно, $R_{a_{min}}$ = 0,088 мкм и $R_{a_{max}}$ = 0,105 мкм;

мкм; для участка N^o2 – $I_{\beta} = 1,19$ отн. ед., $U_{cp_{min}} = 15,51$ отн. ед. и $U_{cp_{max}} = 17,89$ отн. ед., следовательно, но, $R_{a_{min}} = 0,081$ мкм и $R_{a_{max}} = 0,096$ мкм; для участка N^o3 – $I_{\beta} = 1,14$ отн. ед., $U_{cp_{min}} = 15,16$ отн. ед. и $U_{cp_{max}} = 17,44$ отн. ед., следовательно, но, $R_{a_{min}} = 0,079$ мкм и $R_{a_{max}} = 0,093$ мкм; для участка N^o4 – $I_{\beta} = 1,29$ отн. ед., $U_{cp_{min}} = 16,21$ отн. ед. и $U_{cp_{max}} = 18,79$ отн. ед., следовательно,

отн. ед. и $U_{cp_{max}} = 18,79$ отн. ед., следовательно, $R_{a_{min}} = 0,085$ мкм и $R_{a_{max}} = 0,102$ мкм;



Рис. 12. Результаты обработки изображения торцовой поверхности ролика №1



Рис. 11. Значения *Ra* на выделенных участках рабочей поверхности:

1 – полученные с помощью профилографа,

2 - полученные с помощью оптико-электронного комплекса

для участка N°5 – I_{β} = 1,16 отн. ед., $U_{cp_{min}}$ = 15,340 отн. ед. и $U_{cp_{max}}$ = 17,66 отн. ед., следовательно, $R_{a_{min}}$ = 0,08 мкм и $R_{a_{max}}$ = 0,095 мкм; Найденные значения среднего арифмети-

ческого отклонения профиля рабочей поверхности ролика вполне согласуются со значениями, определёнными с помощью профилографа модели SJ – 201Р. Графики зависимости средних значений Ra от исследуемого участка рабочей поверхности, полученные с помощью профилографа и оптико-электронного исследовательского комплекса, приведены на рис. 11. Незначительное расхождение ~0,1% в значениях Ra, полученных разными методами можно объяснить невозможностью абсолютно точно совмещения участков поверхности для записи профилограмм и видеосъёмки и, кроме того, разной размерностью профилограмм и видеоизображений.

Полутоновые и бинарные изображения характерных участков торцовых поверхностей ролика №1 и №2, а также графики изменения коэффициента корреляции и корреляционные поверхности для этих участков приведены на рис. 12 и 13.

Результаты измерения средней амплитуды переменной составляющей корреляционных функций для выделенных участков дали следующие значения:

- для торцового участка №1 U_{cp} = 23,6 мкм, - для торцового участка №2 U_{cp} = 17,5 мкм.



Рис. 13. Результаты обработки изображения торцовой поверхности ролика №2

Используя найденные значения U_{cp} для определения $I_{\beta}, Ra, R_{a_{min}}$ и $R_{a_{max}}$ по выражению (3) определили, что для торцовой поверхности №1 Ra= 0,13 мкм, $R_{a_{min}}$ = 0,12 мкм и $R_{a_{max}}$ =0,15 мкм. Для торцовой поверхности №2 Ra=0,095 мкм, $R_{a_{min}} = 0,086$ мкм и $R_{a_{max}} = 0,10$ мкм. Таким образом, в этом случае, параметры

шероховатости торцовых поверхностей ролика, найденные с помощью измерительного оптикоэлектронного комплекса, вполне согласуются с аналогичными параметрами, измеренными с помощью профилографа модели SJ-201P.

выводы

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением шероховатости поверхности средняя амплитуда колебания автокорреляционной функции А ст повышается. Обработка экспериментальных данных позволила получить регрессионные зависимости, связывающие амплитуду автокорреляционной функции и параметры шероховатости поверхности образца.

Получены регрессионные уравнения идентификации микрогеометрии поверхности прецизионных деталей подшипника на основе вычисления номинальных значений параметров шероховатости $Ra, Rp, Rmax, S_m, t_m$ в зависимости от средней амплитуды автокорреляционной функции, вычисленной по изображению исследуемой поверхности. Для базового окна размером эталона 6х6 получены следующие аналитические зависимости:

$$\begin{aligned} Ra &= 0,004 \times A_{cp} - 0,016, \text{ мкм} \\ Rp &= 0,17 + 0,01 \times A_{cp}, \text{ мкм} \\ Rmax &= 0,88 + 0,052 \times A_{cp}, \text{ мкм} \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$S_m = 46,8 - 0,91 \times A_{cp}$$
, MKM
 $t = 0,7 + 3,3 \times A$, %.

Для базового окна размером эталона **8х8** получены следующие аналитические зависимости:

$$Ra = 0,0391 \cdot A_{cp} - 0,4794,$$
 мкм
 $Rp = 0,16 + 0,013 \times A_{cp},$ мкм
 $Rmax = 0,84 + 0,056 \times A_{cp},$ мкм
 $t_m = 0,8 + 3,5 \times A_{cp},$ %
Для базового окна размером эталона **9х9**:
 $Ra = 0,0644 \cdot A_{cp} - 0,8082,$ мкм
 $Rp = 0,14 + 0,015 \times A_{cp},$ мкм
 $Rmax = 0,82 + 0,058 \times A_{cp},$ мкм
 $t_m = 0,85 - 0,93 \times A_{cp},$ мкм
 $t_m = 0,85 + 3,6 \times A_{cp},$ %.

Анализ полученных данных показал, что с увеличением формата эталона от 6 × 6 до 9 х 9 пикселей разница в средней амплитуде переменной составляющей корреляционной функции А для образцов с различной шероховатостью остаётся постоянной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Михайлова Л.Н. Исследование шлифования сфери-1 ческих поверхностей с целью повышения стабильности процесса // Сб. трудов XII международной научной конференции «Научные перспективы XXI века. Достижения и перспективы нового столетия». Новосибирск: Международный научный институт «Educatio», 2015. № 5(12). Часть 1. С.77-81.
- 2. Носов Н.В., Михайлова Л.Н. Исследование структуры сферических поверхностей роликов при шлифовании // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2014. № 5(47). Часть 3. С.113-118.

RESEARCH SURFACE ROUGHNESS OF THE TAPERED ROLLER BEARING

© 2018 N.V. Nosov, L.N. Mikhailova

Samara State Technical University, Samara

The article focuses on the research surface roughness of the tapered roller bearings. Analysis circuits sferoshlifovalnyh grinding machines and on criteria versatility, productivity and quality of treatment showed that secures the maintenance of continuous grinding processing quality at high productivity and in a wide range of sizes. In the first stage of the research of surfaces were carried out at a specialized research complex, which includes profiler and a computer with software that allows you to record and process profilograms.At the next stage of research were carried out rough spots and the end surfaces of the working roll using opto-electronic complex and developed a technique based on the use of quasi-correlation algorithm. It was found that the roughness of the change is subject to the normal distribution law and using the method of least squares, an analytical dependence. Naydennye values of arithmetic average roughness of the working surface of the roller are consistent with the values obtained using the profiler.Comparative analysis of results of roughness the roller surface parameters found by the measuring optical-electronic complex and profiler differ from one another by 0.1%, confirming the effectiveness of measuring opto-electronic complex.

Keywords: Grinding, spherical ends of the rollers, tapered roller bearings

Nikolai Nosov, Doctor of Technics, Professor, Head at the Machine-Building Technology Department. E-mail: nosov.nv@samgtu.ru Liudmila Mikhailova, Candidate of Technics, Associate Professor at the Automated Machining and Tool Systems

Department. E-mail: mih_ln@mail.ru