

УДК 621.774

DOI: 10.30987/article_5bf70416c07a10.01524769

А.В. Королев, д.т.н.,

М.Ю. Захарченко, к.т.н.

К.С. Мищенко, ассистент каф.

(Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, д.77)

E-mail: science7@bk.ru; tms@sstu.ru

Технологическое повышение статической грузоподъемности локальных дорожек качения шарикоподшипников шариковой раскаткой

Рассмотрен механизм шариковой раскатки колец шариковых подшипников. Установлены закономерности распределения внешней комбинированной нагрузки между шариками. Предложена математическая модель процесса раскатки, позволяющая установить соотношение между нагрузкой на шарики и действующими факторами, в том числе углом контакта шариков с дорожкой качения и соотношением радиальной и осевой внешних нагрузок.

Ключевые слова: подшипник; шариковая раскатка; деформация колец; дорожка качения.

A.V. Korolyov, Dr. Sc. Tech.,

M.Yu. Zakharchenko, Can. Sc.Tech.,

K.S. Mishchenko

(Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Polytechnicheskaya Str., Saratov, 410054)

Technological increase of static load carrying capacity of local raceways in ball bearings through ball rolling-off

The paper reports the consideration of the ball rolling-off mechanism of ball bearing rings. The regularities of the distribution of external combined load between balls are defined. There is offered a simulator of a rolling-off process allowing the ratio definition between a load upon balls and acting factor including the angle of balls contact with a race and a correlation of a radial and axial external loads.

Keywords: bearing; ball rolling-off; ring deformation; race.

Целью работы является повышение статической грузоподъемности шариковых подшипников на основе совершенствования и исследования способа формирования локальных дорожек качения шариковой раскаткой.

Известны многочисленные попытки ряда авторов, таких как R. Stribeck, Д.Н. Решетова, М.П. Белянчикова, Е. Meldau и других, определить распределение нагрузки между телами качения, так как оно оказывает существенное влияние не только на процесс раскатки, но и

на грузоподъемность и долговечность подшипников. К сожалению, достаточно точного решения получено не было, и в настоящее время эти нагрузки определяют по эмпирическим коэффициентам. Поэтому исследование механизма распределения внешней нагрузки между шариками является важным для повышения эффективности процесса шариковой раскатки.

На рис. 1 показана схема шариковой раскатки, позволяющая осуществлять раскатку

дорожек качения как радиально-упорных, так и упорно-радиальных шариковых подшипников. Раскатка дорожки качения кольца 2 шарикового подшипника осуществляется раскатником, состоящим из набора шариков 1 с числом z , и оправки 3, прижимающей шарики к обрабатываемой поверхности под углом контакта P . На оправку действует внешняя нагрузка P , направленная в центр симметрии расположения шариков под углом α к оси вращения кольца 1. Необходимо определить распределение нагрузки P между шариками.

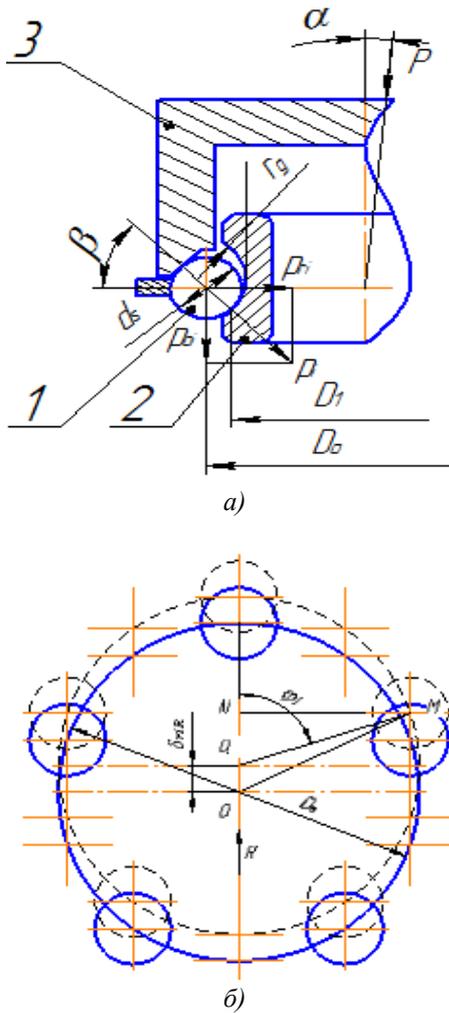


Рис. 1. Схема шариковой раскатки:
а – поперечное сечение; б – вид в плане

Примем следующие допущения:

1. Деформация колец под действием внешней нагрузки пренебрежимо мала по сравнению с локальной деформацией тел и дорожки качения.

2. Осевая нагрузка на подшипник превышает радиальную нагрузку и обеспечивает непрерывный контакт всех тел качения с дорожками качения так, что осевой и радиальный

зазоры между обрабатываемой поверхностью, поверхностью оправки и шариками отсутствуют.

3. Разноразмерностью шариков пренебрегаем, так как их точность на порядок выше точности колец.

4. Угол контакта тел и дорожки качения в подшипнике постоянный и мало зависит от деформации тел и дорожки качения.

Обозначим нагрузку на шарик, действующую вдоль линии контакта с дорожкой качения, через p_i ; осевую нагрузку, действующую вдоль оси кольца, через p_{oi} , а радиальную нагрузку p_{ri} . Рассмотрим распределение этих сил, возникающих от действия внешней нагрузки P , между шариками. Внешняя нагрузка P , действующая под углом α к оси вращения кольца подшипника, раскладывается на две составляющие: осевую $A = P \cdot \cos \alpha$ и радиальную $R = P \cdot \sin \alpha$. Момент этой силы P относительно центра симметрии шариков равен нулю, так как сила направлена в этот центр.

Отличие существующей методики расчета распределения нагрузки между шариками от существующих (Белянчиков и др.) состоит в том, что нагрузка на шарики определяется не простым разложением составляющих внешней нагрузки, а по величине упругой деформации шариков с дорожкой качения:

$$p_i = p_o \cdot \left(\frac{\delta_{roR} \cdot \cos \varphi + \delta_{riA}}{K_g \cdot \cos \beta} \right)^{\frac{3}{2}} = p_o \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$p_{ri} = p_{ro} \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}};$$

$$p_{oi} = p_{oo} \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}},$$

где $c = \delta_{roR} / \delta_{riA}$; φ_i – угол расположения i -го шарика относительно направления радиальной нагрузки; β – угол контакта шариков и дорожек качения; K_g – коэффициент пропорциональности между деформацией и нагрузкой на шарик; δ_{roR} – составляющая деформация наиболее нагруженного шарика в радиальном направлении, возникающая от внешней радиальной нагрузки R ; δ_{riA} – составляющая деформации шарика в радиальном направлении, возникающая от внешней осевой нагрузки A ; p_{ro} и p_{oo} – соответственно радиальная и осевая составляющие максимальной нагрузки p_o на шарик.

После операции суммирования равенств (1) по всем шарикам можно определить:

$$R = p_{ro} \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \frac{2\pi}{z});$$

$$A = p_{oo} \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}},$$
(2)

где z – число раскатных шариков; φ_0 – угол расположения наиболее нагруженного шарика: $0 \leq \varphi_0 \leq \pi/z$.

Обозначим:

$$m_r = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \frac{2\pi}{z});$$

$$m_a = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}.$$
(3)

Разделив равенства (2) друг на друга и учитывая обозначения (3), получим:

$$\frac{m_r}{m_a} = \frac{R \cdot \sin \beta}{A \cdot \cos \beta} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (4)$$

Таким образом, решение поставленной задачи зависит от возможности определения величины C . Так как эта величина зависит от m_r / m_a в неявном виде, решение осуществляется численными методами. Для этого разработана программа расчета, а результаты расчета сведены в таблицу.

Определив значение, по формулам (3) определяем значения m_r и m_a . Далее находим максимальную нагрузку на шарики p_o и распределение нагрузки p_i между шариками:

$$p_o = \frac{P}{z} \cdot \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{m_r^2} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_a^2}}; \quad (5)$$

$$p_i = p_o \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}.$$

Анализ показал, что при числе шариков $z \geq 5$ их число не оказывает значительного влияния на величины c , m_r и m_a , а также на

колебание величины максимальной нагрузки на шарик p_o при его перемещении в пределах угла $0 \leq \varphi_0 \leq \pi/z$. Но при числе шариков $z < 5$ максимальная нагрузка на шарик при его перемещении в пределах угла $0 \leq \varphi_0 \leq \pi/z$ существенно изменяется, что может вызвать вибрации в подшипнике.

На основе определения характера распределения нагрузки между шариками разработан способ шариковой раскатки дорожек качения упорно-радиальных подшипников. Сущность способа (Пат. РФ № 2583510) поясняется на рис. 2.

Для осуществления процесса раскатки верхнее 1 и нижнее 2 кольца упорно-радиального подшипника собирают с шариками 3, разделенными сепаратором 4. Дорожки качения колец 1 и 2 имеют круговую форму профиля с радиусами r_{g1} и r_{g2} . Шариками 3 имеют твердость на 5...8 HRC выше твердости колец 1 и 2 подшипника. Число шариков 3 устанавливают равным четырем. Диаметр шариков ds берут равным диаметру шариков в собранном шарикоподшипнике. Диаметры по дну дорожек качения $D1$ и $D2$ у кольца 1 и кольца 2 различные, поэтому между шариками 3 и дорожками качения колец 1 и 2 подшипника устанавливается угол контакта $\beta \neq 0$.

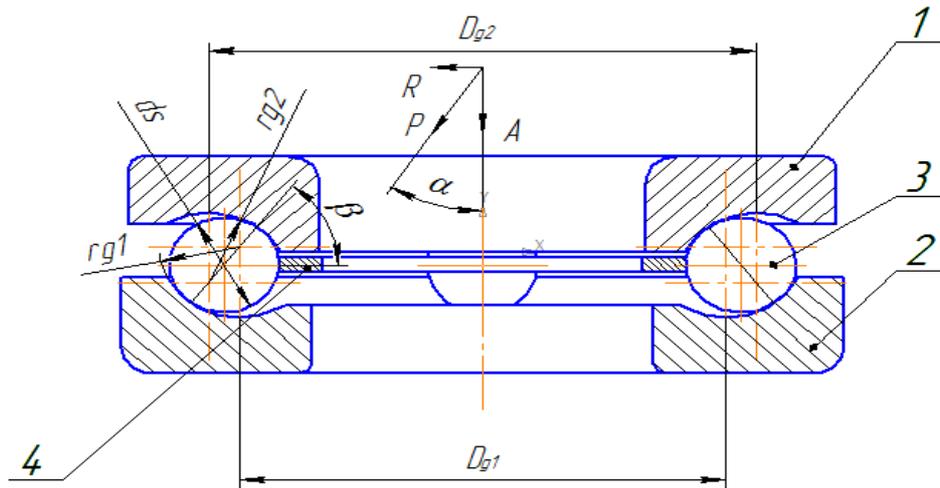


Рис. 2. Схема шариковой раскатки упорно-радиального шарикового подшипника в собранном виде

Процесс раскатки осуществляется следующим образом. Подшипник устанавливают на оправке, имеющей привод вращения. К верхнему кольцу 1 подшипника прикладывают внешнюю нагрузку P , направленную под углом α к оси вращения подшипника так, что линия действия нагрузки P проходит через точку симметрии O расположения шариков 3. Угол действия нагрузки определяют из равенства:

$$\alpha = \arctg \frac{R}{A},$$

где A и R – осевая и радиальная внешние нагрузки на подшипник, действующие в процессе эксплуатации, соответственно.

Нижнему кольцу 2 подшипника придают вращение с частотой n_2 . После раскатки дорожки качения нижнего кольца подшипник переворачивают на 180° так, что верхнее кольцо располагается снизу, и осуществляется раскатка верхнего кольца. Способ может осуществляться при $\alpha = 0$. При этом требуется более значительная внешняя нагрузка, но в этом случае оба кольца могут вращаться одновременно в разные стороны.

Внешнюю нагрузку P определяют из условия, что шарики воздействуют на дорожки качения с силой, вызывающей пластическую деформацию поверхности дорожек:

$$P_r = \frac{P \cdot p_r \cdot z_r}{p_o \cdot z}, \quad (6)$$

где P – рабочая нагрузка на подшипник, рав-

ная $P = \sqrt{A^2 + R^2}$, Н; p_o – максимальная рабочая нагрузка на шарики, определяемая по описанной ранее методике и равенством (5), Н; z – число шариков в шарикоподшипнике; z_r – число раскатанных шариков; p_r – максимальная нагрузка на шарики в процессе раскатки, определяемая по формуле

$$p_r = \frac{\pi H B^2 \eta b_l d_s D_1}{2(d_s + D_1)}, \quad (7)$$

где $\eta = (1 - m_1^2) / E_1 + (1 - m_2^2) / E_2$; m_1 и m_2 – коэффициенты Пуассона материала шариков и колец подшипника; E_1 и E_2 – модули упругости материала шариков и колец подшипника, МПа;

$$\Sigma p = 4/d_s \pm 2/D_k - 1/r_g, \text{ мм}^{-1};$$

d_s – диаметр шариков, мм; D_k – диаметр дорожки качения, мм; r_g – радиус профиля желоба, мм; σ_s – предел текучести материала колец, МПа; μ и ν – табличные коэффициенты, определяемые в зависимости от геометрии контакта тел и дорожек качения; β – угол контакта в подшипнике.

После осуществления процесса раскатки подшипник разбирают, а затем его вновь собирают с установкой полного комплекта шариков, предусмотренных конструкторской документацией.

Допустимая нагрузка на подшипник, при которой на дорожке качения останется след пластической деформации от наиболее нагру-

женного шарика и является статической грузоподъемностью подшипника.

Статическая грузоподъемность подшипника после раскатки определяется по формуле

$$C = \frac{P_r \cdot z}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}} \quad (8)$$

Расчеты показывают, что статическая грузоподъемность подшипника после предложенного способа раскатки возрастает более чем на 80 % по сравнению со стандартным подшипником. Особенно это важно для тихоходных подшипников, работающих в условиях ударной нагрузки, типа 1118-2902840, устанавливаемых в верхних опорах передней подвески автомобилей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Королев, А.А.** Математическое моделирование упругих тел сложной формы. – Саратов: СГТУ, 2001. – 128 с.
2. **Королев А.В., Королёв, Ан.А., Королёв, Ал.А.** Совершенствование технологии изготовления тонкостенных колец подшипников. – Саратов: СГТУ, 2004. – 136 с.
3. **Королев, А.В., Королёв, Ан.А.** Точная холодная торцовая раскатка. – Саратов: СГТУ, 2003. – 142 с.
4. **Пат. РФ 2222392**, МПК В21В19/06. Способ раскатки деталей / В.Б. Годунов, А.В. Королев, А.А. Королев.
5. **Королев, А.В., Воробьев, Р.В.** Новая прогрессивная технология получения сложнопрофильных заготовок колец подшипников из трубного проката // Состояние и перспективы развития электротехнологии (X Бернардовские чтения): тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч.1. Иваново, – 2001. – С. 221.
6. **Королев, А.В., Воробьев, Р.В.** Прогрессивная технология получения кольцевых заготовок из трубного проката // Вестник инженерной Академии Украины. – КВ № 2635. – № 3. – 2001. – Ч. 1. – С. 211-214.
7. **Королев, А.В., Воробьев, Р.В.** Математическое мо-

делирование процесса холодной раскатки // Динамика технологических систем: тр. VI Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. Ростов н/Д.: ДГТУ, 2001. – С. 55-59.

8. **Пат. РФ 2094158**, МПК В21Н1/02, В21Д37/12. Королев А.В., Полстьянов П.Ф., Козин В.А., Атоян В.Р.

9. **Королев, А.В., Ефимов, С.А., Меркулов, А.А.** Технология окончательной обработки дорожек качения подшипников // Современные материалы, техника и технология: материалы 3-й Междунар. науч. конф. Курск, – 2013.

REFERENCES

1. Korolyov, A.A. *Complex Elastic Solid Mathematical Modeling*. – Saratov: SSTU, 2001. – pp. 128.
2. Korolyov, A.V., Korolyov, An.A., Korolyov, Al.A. *Technology Improvement in Manufacturing Thin-Walled Rings for Bearings*. – Saratov: SSTU, 2004. – pp. 136.
3. Korolyov, A.V., Korolyov, An.A. *Precise Cold End Rolling-Off*. – Saratov: SSTU, 2003. – pp. 142.
4. Pat. RF 2222392, IPC B21B19/06. *Method for Parts Rolling-Off* / V.B. Godunov, A.V. Korolyov, A.A. Korolyov.
5. Korolyov, A.V., Vorobyov, R.V. New efficient technology for manufacturing complex blanks of bearing rings made of pipe rolling // *State and Outlooks of Electro-Technology Development (the X-th Bernard's readings): Proceedings of the Inter. Scientif.-Tech. Conf. Part.1. Ivanovo*, – 2001. – pp. 221.
6. Korolyov, A.V., Vorobyov, R.V. Updated technology for manufacturing ring blanks of pipe rolling // *Bulletin of Engineering Academy of the Ukraine*. – KV No.2635. – No.3. – 2001. – Part.1. – pp. 211-214.
7. Korolyov, A.V. Vorobyov, R.V. Mathematical modeling of cold rolling-off // *Dynamics of Technological Systems: Proceedings of the VI-th Inter. Scientif.-Tech. Conf. Vol.1. Ros-tov-upon-Don: DSTU*, 2001. – pp. 55-59.
8. Pat. RF 2094158, IPC B21H1/02, B21D37/12. Korolyov A.V., Polstyanov P.F., Kozin V.A., Atoyan V.P.
9. Korolyov, A.V., Efimov, S.A., Merkulov, A.A. Technology of bearing race finishing // *Modern Materials, Engineering and Technology: Proceedings of the III-d Inter. Scientif. Conf. Kursk*, – 2013.

Рецензент д.т.н. А.Н. Васин

