



УДК 621.774

К.С. Нейгебауэр, А.В. Королев
ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.»
г. Саратов, Россия
E-mail: Kristina.neigebauer@yandex.ru
Дата поступления 05.02.2015

РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВНЕШНЕЙ КОМБИНИРОВАННОЙ НАГРУЗКИ МЕЖДУ ШАРИКАМИ И ВЫЯВЛЕНИЕ КРИТИЧЕСКОЙ СИЛЫ УДАРА ПРИ ШАРИКОВОЙ РАСКАТКЕ УПОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ¹

Аннотация

В статье 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, раскатник, дорожка качения.

Введение

Известны многочисленные попытки ряда авторов, таких как, R. Stribeck (Р. Стрибек), Д.Н. Решетова, М.П. Белянчикова, Е. Meldau (Е. Мелдау) 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.

Для автомобильных подшипников типа 1118-2902840, которые используются в верхней опоре передней подвески автомобилей Калина, Приора, Гранта, основную опасность при эксплуатации составляют удары. Фактически для подшипников, кольца которых подвергались шариковой раскатке, критической силой удара является сила, при которой нагрузка на наиболее нагруженный шарик равна аналогичной силе воздействия на шарик при

раскатке. Под действием этой силы в течении нескольких первых оборотов осуществляется пластическая деформация дорожек качения, которая затем переходит в упругую деформацию и обеспечивает стабилизацию геометрических параметров подшипника. Поэтому исследование механизма распределения внешней нагрузки между шариками является важным для повышения эффективности процесса шариковой раскатки.

Основная часть

Раскатка дорожки качения кольца 2 (рисунок 1) шарикового подшипника осуществляется раскатником, состоящим из набора шариков 1 с числом z и оправки 3, прижимающей шарики к обрабатываемой поверхности под углом контакта β . На оправку действует внешняя нагрузка P , направленная в центр симметрии расположения шариков под углом α к оси вращения кольца 1. Требуется определить распределение нагрузки P между шариками.

¹

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России - УИН ФЦП RFMEFI57414X0015

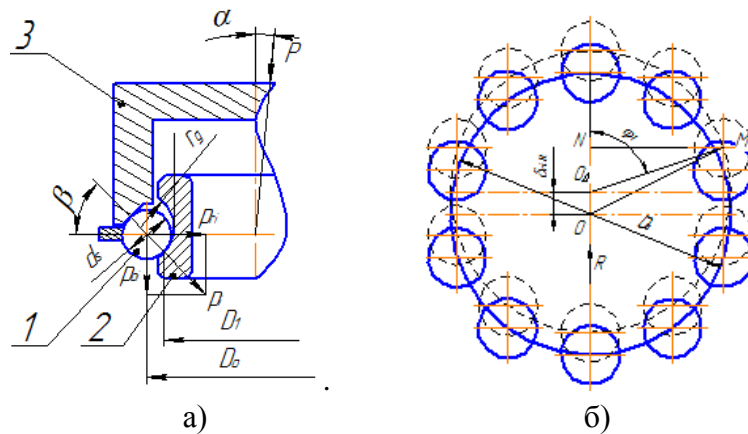


Рисунок 1. Схема контакта тел и дорожки качения:
а) поперечное сечение; б) вид в плане

Примем следующие допущения:

1. Деформация колец под действием внешней нагрузки пренебрежимо мала по сравнению с локальной деформацией тел и дорожки качения.
2. Осевой и радиальный зазоры между обрабатываемой поверхностью, поверхностью оправки и шариками отсутствуют.
3. Угол контакта тел и дорожки качения в подшипнике постоянный и пренебрежимо 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} .

$$P_{iA} = \frac{A}{z \cdot \sin \beta}, P_{riA} = p_{iA} \cdot \cos \beta = \frac{A}{z \cdot \operatorname{tg} \beta}; P_{oiA} = p_{iA} \cdot \sin \beta = \frac{A}{z}, \quad (1)$$

где P_{iA} - нагрузка, действующая на шарик вдоль линии его контакта с дорожкой качения, вызванная внешней осевой нагрузкой A ; P_{riA} - составляющая нагрузки на шарик, возникающая под действием нагрузки A , в радиальном направлении; P_{oiA} - составляющая нагрузки на

$$\delta_{iA} = K_g \sqrt[3]{p_{iA}^2}, \delta_{riA} = K_g \sqrt[3]{\frac{A^2}{z^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}} \cdot \cos \beta; \delta_{oiA} = K_g \sqrt[3]{\frac{A^2}{z^2}} \cdot \sin \beta \quad (2)$$

где δ_{iA} - деформация шарика с дорожкой качения кольца под действием осевой нагрузки; δ_{riA} - составляющая деформации δ_{iA} , действующая в радиальном

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 , равную $A = P \cdot \cos \alpha$ и радиальную R , равную $R = P \cdot \sin \alpha$. Момент этой силы P относительно центра симметрии шариков равен нулю, так как сила P направлена в этот центр. Составляющие внешней нагрузки A и R передаются на шарик под углом контакта β .

Внешняя нагрузка, действующая вдоль оси подшипника A , равномерно распределяется между шариками:

шарик, возникающая под действием нагрузки A и действующая в осевом направлении.

Под действием нагрузки P_{iA} между шариками и дорожкой качения возникает упругая деформация, равная [1, 2]:

направлении; δ_{oiA} - составляющая деформации δ_{iA} , действующая в осевом направлении; K_g - коэффициент, определяемый в зависимости от размеров тел и

дорожки качения и упругих свойств их материалов.

Под действием радиальной внешней нагрузки R по линии контакта шариков, находящихся в поле действия этой нагрузки, вдоль линии контакта возникает сила, равная (рисунок 1 б):

$$P_{iRr} = P_{oR} \cdot \cos \varphi_i \cdot \cos \beta, \quad (3)$$

при $-(\pi/2) < \varphi < \pi/2$

где φ_i - угол расположения i -ого шарика относительно направления действия радиальной нагрузки (рисунок 1б); P_{oR} - максимальная нагрузка, вызванная действием силы R на шарик, расположенный под углом $\varphi=0$; p_{iR} - нагрузка, действующая на i -ый шарик, находящийся под углом φ_i .

Составляющие силы p_{iR} (3) равны:

$$\begin{aligned} P_{riR} &= p_{iR} \cdot \cos \beta; \\ P_{oiR} &= p_{iR} \cdot \sin \beta, \end{aligned} \quad (4)$$

где P_{riR} - составляющая нагрузки на i -й шарик, возникающая под действием нагрузки R и действующая в радиальном направлении; P_{oiR} - составляющая нагрузки на i -й шарик, возникающая под действием нагрузки R и действующая в осевом направлении.

Под действием нагрузки P_{iR} между шариками и дорожкой качения возникает упругая деформация, равная:

$$\begin{aligned} \delta_{iR} &= K_g \cdot \sqrt[3]{p_{iR}^2} \\ \delta_{riR} &= K_g \sqrt[3]{p_{riR}^2 / \cos \beta \cdot \cos \beta} \\ \delta_{oiR} &= K_g \sqrt[3]{p_{riR}^2 / \cos^2 \beta \cdot \sin \beta} \end{aligned} \quad (5)$$

где δ_{iR} - деформация i -ого шарика с дорожкой качения от действия радиальной нагрузки; δ_{riR} - составляющая деформации i -ого шарика и дорожки качения, возникающей под действием нагрузки R и действующая в радиальном направлении; δ_{oiR} - составляющая деформации i -ого шарика и дорожки качения, возникающей под действием нагрузки R и действующая в осевом направлении подшипника.

Определим зависимость деформацию δ_{riR} i -ого шарика от деформации δ_{roR} максимально нагруженного шарика, находящегося к направлению действия нагрузки R под углом φ . Обозначим точку контакта i -ого шарика с дорожкой качения внутреннего кольца через M . Из рисунка 1б видно, что величина упругой деформации дорожки качения и шарика, расположенного к оси $O_v Y$ под углом φ , равна:

$$\delta_{riR} = \Delta_i = OM - O_{\Delta}M,$$

где $O_{\Delta}M = 0,5 \cdot D_o$.

Из треугольника ONM после преобразований находим:

$$\delta_{riR} = \frac{D_o}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4\delta_{roR}}{D_o} \cos \varphi_i + \frac{4\delta_{roR}^2}{D_o^2}} - 1 \right). \quad (6)$$

Так как деформация тел δ_{roR} намного меньше их размера D_o , то раскладывая выражение (6) в ряд и отбрасывая малозначимые члены ряда с погрешностью менее 0,1% получим:

$$\delta_{riR} = \delta_{roR} \cdot \cos \varphi_i. \quad (7)$$

Далее определим суммарную силу, действующая на i -ый шарик от сил A и R . Деформация от этой силы равна сумме деформаций от ее составляющих:

$$\delta_i = \delta_{iR} + \delta_{iA}.$$

Тогда сила, действующая на i -ый шарик от силы P , равна

$$\begin{aligned} p_i &= (\delta_i / Kg)^{\frac{3}{2}} = ((\delta_{iR} + \delta_{iA}) / Kg)^{\frac{3}{2}} = \\ &= ((\delta_{roR} \cdot \cos \varphi + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \end{aligned}$$

Силу p_i (7), действующую на i -ый шарик, разложим на две составляющие:

$$\begin{aligned} p_{ri} &= ((\delta_{riR} + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \cdot \cos \beta; \\ p_{oi} &= ((\delta_{riR} + \delta_{riA}) / (Kg \cdot \cos \beta))^{\frac{3}{2}} \cdot \sin \beta. \end{aligned} \quad (8)$$

Так как связь между силой и деформацией не является линейной, то это существенно усложняет механизм влияния геометрических параметров подшипника на распределение нагрузки между шариками. Разделим равенства (8) на максимальные значения соответствующих нагрузок P_{ro} и P_{oo} ($\varphi_o = 0$) и получим:

$$\begin{aligned}
 p_{ri} &= p_{ro} \cdot \left(\frac{\delta_{roR} \cos \varphi_i + \delta_{rA}}{\delta_{roR} + \delta_{rA}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}; \\
 p_{oi} &= p_{oo} \cdot \left(\frac{\delta_{roR} \cos \varphi_i + \delta_{rA}}{\delta_{roR} + \delta_{rA}} \right)^{\frac{3}{2}} = \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}},
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где $c = \delta_{roR} / \delta_{rA}$.

После операции суммирования равенств (9) по всем шарикам можно найти максимальные значения взаимно перпендикулярных нагрузок на шарики. Учитывая направление действия радиальной нагрузки R , а также то, что угол между шариками равен $2\pi/z$, получим систему двух уравнений:

$$R = p_{ro} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) ; A = p_{oo} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}, \tag{10}$$

где φ_o угол расположения наиболее нагруженного шарика $0 \leq \varphi_o \leq \pi/z$.

Система уравнений (10) не решается, так как неизвестно значение c . Третье уравнение можно определить, если взять отношение первых двух.

Обозначим:

$$m_r = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) ; m_a = \frac{1}{z} \cdot \sum_{i=0}^{z_a-1} \left(\frac{c \cdot \cos(\varphi_o + i \cdot \frac{2\pi}{z}) + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}}. \tag{11}$$

Разделив равенства (10) друг на друга и учитывая обозначения (11), получим:

$$\frac{m_r}{m_a} = \frac{R \cdot \sin \beta}{A \cdot \cos \beta} = \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta. \tag{12}$$

Так как зависимости m_r и m_a от значения c находятся в неявном виде, то их решение осуществляется численными методами. Результаты расчета представлены в таблице.

Таблица 1

Значения коэффициентов m_r , m_a и m_r/m_a при $\varphi_o = 0$

	n	c										
		0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
m_r	3	0	0,066	0,117	0,157	0,189	0,215	0,237	0,255	0,269	0,281	0,292
m_a		1	0,868	0,767	0,686	0,623	0,571	0,530	0,496	0,470	0,448	0,433
m_r/m_a		0	0,076	0,171	0,229	0,303	2,82	2,40	2,12	1,91	1,76	0,674
m_r	5	0	0,065	0,114	0,151	0,180	0,203	0,220	0,233	0,243	0,250	0,256
m_a		1	0,868	0,766	0,866	0,622	0,570	0,528	0,494	0,466	0,443	0,425
m_r/m_a		0	0,075	6,72	4,53	3,45	2,82	2,40	2,12	1,92	1,77	0,602
m_r	0	0	0,065	0,114	0,151	0,180	0,202	0,220	0,233	0,243	0,250	0,255
m_a		1	0,868	0,766	0,866	0,622	0,570	0,528	0,494	0,466	0,443	0,424
m_r/m_a		0	0,075	0,149	0,175	0,289	0,354	0,417	0,472	0,521	0,536	0,601

Важно отметить, что процесс раскатки будет устойчивым, если $c < 1$, а, следовательно, как следует из таблицы, $m_r/m_a < 0,6$. Этому соответствует $tg\alpha < 0,6/tg\beta$. В противном случае часть шариков будет выходить из контакта с дорожкой качения и могут возникнуть вибрации.

Как видно из таблицы при $n > 5$ значения коэффициентов практически не зависят от числа шариков.

Расчеты также показали, что при $n = 3$ значение коэффициента m_r колеблется в зависимости от значения φ_0 от 5% при $c = 0.1$ до 30% при $c = 1$. Следовательно, осуществлять шариковую раскатку тремя шариками не рационально, так как при этом могут возникнуть вибрации и погрешности формы обработанной поверхности. С увеличением числа шариков раскатного инструмента колебание нагрузки уменьшается и при $z \geq 5$ эта разница не достигает 1%.

С учетом (9) определим искомую зависимость нагрузки на i -ый шарик от нагрузки, действующей на наиболее нагруженный шарик.

$$P_u = \frac{P_o \cdot z_p}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}} = \frac{6549 \cdot 46}{\sqrt{\frac{\cos^2 7^\circ}{0,137} + \frac{\sin^2 7^\circ}{0,726}}} = 110600 \text{ Н.} \quad (15)$$

Найдем силу, при которой начинается пластическая деформация дорожек качения, не подвергавшихся раскатке. Используя формулу при $p_p = 0$, найдем силу воздействия на наиболее нагруженный

$$P_u = \frac{P_o \cdot z_p}{\sqrt{\frac{\cos^2 \alpha}{m_r} + \frac{\sin^2 \alpha}{m_a}}} = \frac{3556 \cdot 46}{\sqrt{\frac{\cos^2 7^\circ}{0,137} + \frac{\sin^2 7^\circ}{0,726}}} = 60070 \text{ Н.}$$

Как видно из результатов расчета, подшипник после раскатки выдерживает на 84% большую силу удара, чем стандартный подшипник.

Таким образом, решена задача определения механизма распределения внешней нагрузки, действующей на раскатник, между шариками и выявлена критическая сила удара на наиболее нагруженный шарик.

$$p_i = p_o \cdot \left(\frac{c \cdot \cos \varphi_i + 1}{c + 1} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (13)$$

Равенство (13) показывает распределение внешней нагрузки между шариками. Как видно, оно существенно зависит от значения c . При $c = 0$, что соответствует $\alpha = 0$, нагрузка между шариками распределяется равномерно. С увеличением значения c неравномерность нагрузки на шарик возрастает. При $c > 0$ нагрузка на шарик уменьшается при увеличении угла их расположения φ_i от нуля до $\varphi_i = \pi$. При дальнейшем увеличении угла φ_i нагрузка на шарик возрастает.

В свою очередь, как не сложно определить:

$$p_o = \frac{P}{z} \cdot \sqrt{\frac{\sin^2 \alpha}{m_r \cdot \cos^2 \beta} + \frac{\cos^2 \alpha}{m_a \cdot \sin^2 \beta}} \quad (14)$$

Как было сказано ранее критической силой удара является сила, при которой нагрузка на наиболее нагруженный шарик равна аналогичной силе воздействия на шарик при раскатке.

Значение этой силы равно p_o . Тогда критическая сила удара равна:

шарик, при котором начинается пластическая деформация дорожек качения в стандартном подшипнике:

Тогда критическая сила удара равна:

Заключение

В результате определения механизма распределения внешней нагрузки, действующей на раскатник между шариками достигается следующий эффект:

- Снижение контактных напряжений в шарикоподшипнике, так как радиус локальных дорожки качения наружного и внутреннего колец, по кото-

рым катятся шарики в шарикоподшипнике, близок к радиусу шариков, а контактные напряжения распределены по поверхности контакта более равномерно, чем в стандартном подшипнике.

- Упрочнение поверхности в зоне контакта с шариками компенсирует эффект, получаемый от снижения твердости колец подшипника.
- Снижение момента трения в подшипнике, так как размеры площадки контакта ограничены размером поперечного сечения локальной дорожки качения даже при больших внешних нагрузках.
- Снижение требований к точности предшествующих технологических операций механической обработки колец шарикоподшипника, так как процесс шариковой раскатки устраняет такие дефекты, как волнистость, отклонение от круглости, шероховатость.

Все это обеспечивает повышение качества изготовления подшипников и снижение затрат на их производство.

Библиографический список

1. Королев А.А. Математическое моделирование упругих тел сложной формы/ А.А. Королев.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2001. 128с.
2. Королев А.В. Совершенствование технологии изготовления тонкостенных колец подшипников/ А.В. Королев, Королёв Ан.А., Королёв Ал.А.- Саратов: Изд-во СГТУ, 2004. 136 с.
3. Королев А.В. Точная холодная торцовая раскатка/ А.В. Королев , Королев Ан.А. - Саратов: Изд-во СГТУ, 2003. 142 с.
4. Патент РФ 2222392 Годунов В.Б., Королев А.А., Королев А.А. Способ раскатки деталей. МПК В21В19/06.
5. Королев А.В. Воробьев Р.В. Новая прогрессивная технология получения сложнопрофильных заготовок колец подшипников из трубного проката. Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. Ч.1: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (X Бернардовские чтения) Т1 - 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. 2001г. Ч1 С. 211-214.
7. Королев А.В., Воробьев Р.В. Математическое моделирование процесса холодной раскатки. «Динамика технологических систем». Труды VI Международной научно-технической конференции Т1. - Ростов н/Д., ДГТУ. 2001-С.55-59
8. Патент РФ 2094158 Королев А.В., Полстьянов П.Ф., Козин В.А. Устройство для раскатки деталей // Патент РФ №2094158, МПК В21Н1/02, В21D37/12.
9. Королев А.В. Технология окончательной обработки дорожек качения подшипников / А.В. Королёв, С.А. Ефимов, А.А. Меркулов. 3-я международная научная конференция "Современные материалы, техника и технология" Курск 2013.
10. Королев А.В. Момент сопротивления вращению упорно-радиального подшипника / А.В.Королёв К.С., Нейгебауэр, Е.В Мухина. Материалы 3-ей Международной научно-практической конференции "Перспективное развитие науки, техники и технологий" Курск 2013, с. 161-165