

$n_{\text{общ}}$  - общее число циклов нагружения  $dv$ ;

$$a = \frac{n_{\text{общ}}}{N_0} \int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} \frac{p(\sigma) d\sigma}{10^{\frac{\sigma-1-\sigma_i}{k}}}, \quad (7)$$

$$\int_{\sigma_{\min}}^{\sigma_{\max}} 10^{\sigma/k} p(\sigma) d\sigma = I. \quad (8)$$

Циклические упругопластические деформации в микрообъемах приводят к разрушению подшипника, поэтому разноразмерность шариков не должно превышать допустимого значения. При испытаниях подшипников на усталостную прочность также необходимо учитывать влияние разноразмерности шариков.

#### Литература

1. Lundberg, G. und Palmgren, A. Dynamic capacity of rolling bearings, Acta Polytechnica, mechanical engineering series, vol.1, Nr.3, 7 (1947)
2. Гребник В.М. Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования. М., Машиностроение 1969. 256 с. с ил.
3. Циклическая прочность металлов / Под ред. И.А.Одинга: М.: изд. АН СССР, 1962: 3340 с.
4. Надежность металлургического оборудования: справочник / Гребник В.М., Цапко В.К.: М.: Металлургия, 1980: 344 с.

УДК 621.88.084

Скойбеда А.Т., Кривко Г.П., Эльмессауди Д.

## ВЛИЯНИЕ РАЗНОРАЗМЕРНОСТИ ШАРИКОВ ПОДШИПНИКОВ КАЧЕНИЯ НА КОНТАКТНУЮ УСТАЛОСТЬ

*Белорусский национальный технический университет*

*Минск, Беларусь*

Качение шариков по желобу шарикоподшипника вызывает деформацию, интенсивность которой зависит от уровня нормальных и касательных напряжений. На работоспособность деталей подшипников оказывает существенное влияние также характер нагружения. Особенно это относится к начальному периоду эксплуатации. Это объясняется тем, что скорость протекания различных стадий усталостного разрушения определяется не только свойствами металла, но и условиями нагружения, которые и определяют контактную долговечность. Так как шарики различаются по диаметру  $D_{wi}$ , то площадь контакта их с желобом различна и представляет некоторую криволинейную поверхность в виде

эллипса, площадь которого равна  $S_i = \pi a_i b_i$ , где  $a_i$  и  $b_i$  - соответственно, большая и малая полуоси эллипса;  $i=1, 2, \dots, 7$  - номер шарика.

Суммарное упругое смещение точек шариков (1) и желоба (2) (рис.1) равно:

$$u_{xi} = \delta_i - z_i - h_{1xi} - h_{2x}, \quad (1)$$

где  $\delta_i$  - общее сближение тел под нагрузкой  $P$ ,  $h_{1xi}$  и  $h_{2x}$  - износ соответствующих тел подшипника;  $z_i$  - зазор между реальными телами без нагрузки.

Учитывая, что износ с шара очень мал и значительно меньше износа желоба ( $h_{1xi} \ll h_{2x}$ ), допустим  $h_{1x} = 0$ . Тогда уравнение (1) принимает вид.

$$u_x = \delta_i - z_i - h_{2x}. \quad (2)$$

По [3] упругое смещение  $u_x$  равно:

$$u_x = \mathcal{G} \int_{-a}^{+a} \int_{-b}^{+b} \frac{P_{xy}}{r} dx dy, \quad (3)$$

где 
$$\mathcal{G} = \left( \frac{1}{\pi} \right) \left[ (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2 \right];$$

$\mu$ ,  $E$  - коэффициент Пуассона и модуль упругости материалов контактирующих тел 1, 2;

$P_{x_i, y_i}$  - контактное давление в точке  $(x_i, y_i, 0)$ ;

$a$ ,  $b$  - полуоси эллипса площадки контакта.

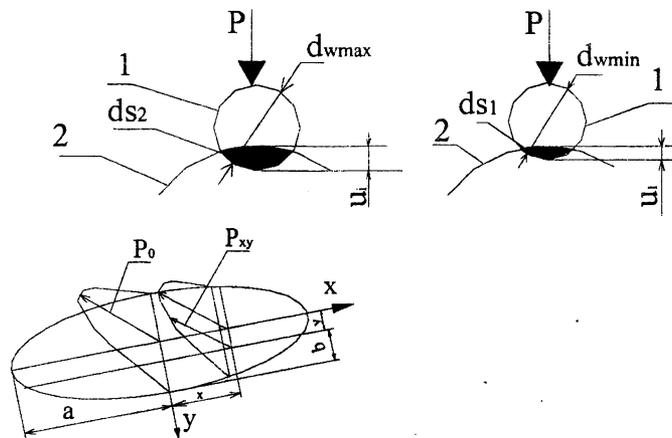


Рис. 1

Учитывая, что шарики отличаются по диаметру (рис.1) упругое смещение  $u_i$  от площади контакта  $S_i$  (от  $D_{wi}$ ) и определяется уравнением

$$\begin{aligned}
 u_{x_1} &= \mathcal{G} \int_{-a_1}^{+a_1} \int_{-b_1}^{+b_1} \frac{P_{x_1 y_1}}{r} dx dy; \\
 u_{x_2} &= \mathcal{G} \int_{-a_2}^{+a_2} \int_{-b_2}^{+b_2} \frac{P_{x_2 y_2}}{r} dx dy; \\
 &\dots \\
 u_{x_i} &= \mathcal{G} \int_{-a_i}^{+a_i} \int_{-b_i}^{+b_i} \frac{P_{x_i y_i}}{r} dx dy,
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Кольцо подшипника кроме нормальных напряжений сжатия воспринимает касательные напряжения сдвига  $\tau_i$ , достигающие максимального значения на некоторой глубине под площадкой контакта и являющиеся основной причиной образования первых следов усталостного разрушения.

Как видно из Рис.2.  $\tau_i$  зависит от  $D_{wi}$ , и увеличивается при уменьшении  $D_{wi}$ .

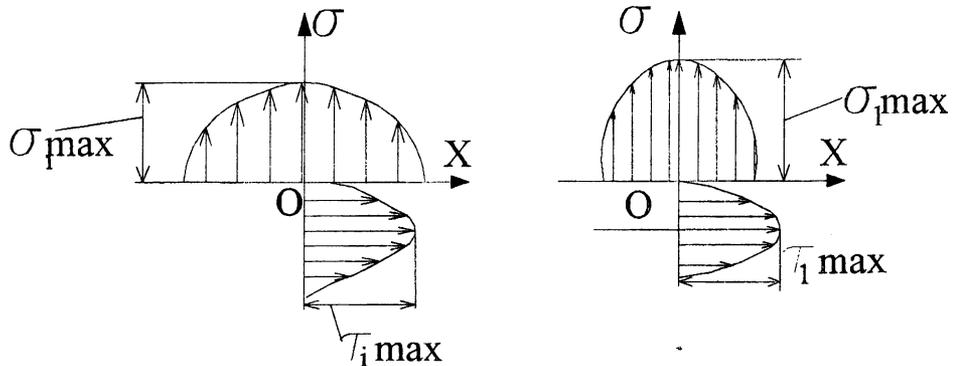


Рис. 2. Зависимость нормального  $\sigma_i$  и касательного  $\tau_i$  напряжений от  $D_{wi}$

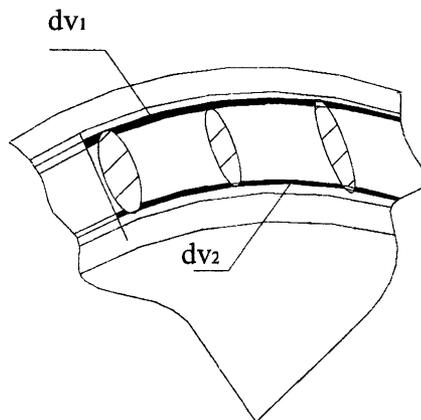


Рис.3. Изменение нагруженности микрообъемов  $dv_1$  и  $dv_2$  за один оборот в зависимости от диаметра  $D_{wi}$

За один оборот нагруженные участки ( $dv_1$  и  $dv_2$ ) (Рис.3.) воспринимают нестационарные нагружения и через некоторое число повторных циклов в пластически деформированном материале происходят сдвиги, приводящие к усталостным повреждениям и снижению долговечности.

Нормальное напряжения в любой точке контакта зависят от  $D_{wi}$  и равно:

$$\sigma_i = \frac{3P}{\pi a_i b_i} \left[ 1 - \left( \frac{x}{a_i} \right)^2 - \left( \frac{y}{b_i} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

Уравнение кривой усталости имеет вид

$$\sigma_i^m N_i = \sigma_{-1}^m N_0 = \text{const}, \quad (6)$$

где  $\sigma_i$  – действующие напряжения;

$\sigma_{-1}$  – предел выносливости;

$N_i$  – Числа циклов, соответствующие напряжениям разрушения;

$m = \text{ctg} \beta$  – параметр, определяющий наклон левой ветви кривой усталости в логарифмических координатах;

$N_0$  – число циклов, соответствующее точке перелома кривой усталости (рис.4).

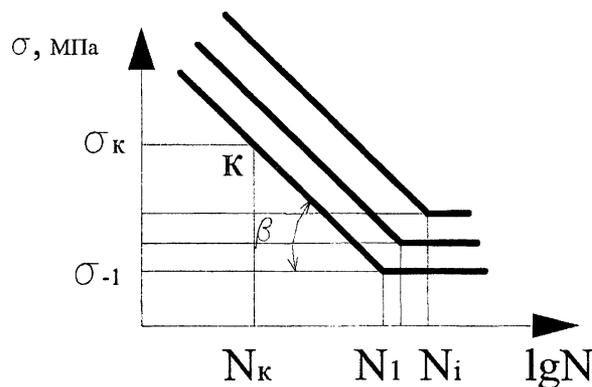


Рис.4. Зависимость логарифма  $\lg N$  числа циклов подшипника до усталостного разрушения от среднего нормального контактного напряжения

Приняв одну из точек усталости условно за базовую, можно записать в соответствии с уравнением (6)

$$\sigma_{ni}^m N_{ci} = \sigma_{n0}^m N_{y0} \quad (7)$$

Откуда следует зависимость для вычисления ресурса  $N_{ci}$  при действующем контактом напряжении  $\sigma_{ni}$ :

$$N_u = N_{y0} \left( \frac{\sigma_{H0}}{\sigma_H} \right)^m, \quad (8)$$

где  $N_{y0}$  – число циклов нагружения, условно принятое за базовое;  $\sigma_{H0}$  – контактное напряжение, соответствующее  $N_{y0}$ .

Однако  $\sigma_H$  является случайной величиной, зависящий от  $D_{wi}$ . Если  $D_{w1} < D_{w2} < \dots < D_{wi}$ , тогда и  $\sigma_{H1} > \sigma_{H2} > \dots > \sigma_{Hi}$

Тогда ресурс

$$N_u = N_{y0} \left( \frac{\sigma_{H0}}{\xi \sigma_H} \right)^m, \quad (9)$$

где  $\xi$  – коэффициент, учитывающий влияние разноразмерности шариков на контактное напряжения.

$$\xi = \frac{1}{\sigma_H} \cdot \frac{\sigma_{H0}}{\sqrt[m]{\frac{N_y}{N_{y0}}}}$$

Во время работы подшипника с разноразмерными шариками, критическое число циклов  $N_{kp}$  будет соответствовать наиболее опасной зоне микрообъема  $dv$ . В этой зоне происходят дислокации и зарождаются трещины, которые достигают критического размера  $l_{kp}$ . Скорость распространения микротрещин равна  $\frac{dl}{dN}$ . С увеличением разноразмерности шариков увеличивается скорость усталостного разрушения.

Из произведенного анализа следует, что разноразмерность диаметров шариков выше допустимой величины, приводит к снижению долговечности подшипника. Это указывает на необходимости ограничения разноразмерности шариков, учета ее при испытаниях и определений статической и динамической грузоподъемности подшипников.

### Литература

1. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин.-М.: Высшая школа, 1991.-319 с.
2. Орлов А. В. Оптимизация рабочих поверхностей опор качения.-М.: Наука, 1973.-83с.
3. Папов В.Г. Расчетная оценка ресурса работы опор качения по критерию износа // Вестник машиностроения, 2002-№ 7-с. 27-30.
4. Пинегин С.В., Шевелев И. А. Исследование влияния касательных сил на усталостную прочность при качении // Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении.-М.: Наука, 1972-с. 19-47.