

ТРЕНИЕ И РЕСУРС ШАРНИРНЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ, РАБОТАЮЩИХ БЕЗ СМАЗКИ

© 2006 Ю.Н. Дроздов¹, В.А. Надеин², В.Н. Пучков¹, М.В. Пучков¹

¹Институт Машиноведения РАН, г. Москва

²НГБ «Энергодиагностика», г. Москва

Приведенная методика дает возможность производить приближенную оценку ресурса вкладышей шарнирных сферических подшипников, работающих без смазки.

Введение

Шарнирные сферические подшипники (ШСП), работающие без смазки, широко применяются в машиностроении - в робототехнических устройствах, в авиационно-космических механизмах, в ядерно-энергетическом машиностроении, в оборонной технике, в приборостроении, автомобилестроении, в дорожно-строительных машинах, в глубоководном транспорте, на нефтедобывающих платформах и в др. отраслях техники. Хорошо известны их преимущества по сравнению с подшипниками качения (существенное снижение габаритов и массы, бесшумность, демпфирующая способность, разнообразие условий применения и конструктивного исполнения). Шарнирные сферические подшипники сухого трения обладают высокой несущей способностью (до 500 МПа и выше) и могут работать в широком диапазоне температур (от -200 до +1000° С), в различных газовых средах, в вакууме, а также в жидких средах, не обладающих смазочным действием.

Анализ отечественной и зарубежной литературы, опыта известных подшипниковых фирм (SKF, ША, Glacier и др.) указывает на недостаточность и противоречивость имеющихся рекомендаций, отсутствие проверенной расчетной методики оценки ресурса самосмазывающихся трибосопряжений в зависимости от контактных параметров (контактного давления, скорости скольжения, температуры) и влияния окружающей среды. В работах [1-5] представлены результаты экспериментальных исследований и сделаны попытки объединения теоретических и экспериментальных исследований, которые позволяют рассчитывать ресурс ШСП, а также коэффициенты трения скольжения в заданных условиях эксплуатации.

В настоящее время расширилась сфера применения самосмазывающихся ШСП и возникает задача развития экспериментально-расчетной методологии.

Метод определения ресурса с использованием зависимости для определения интенсивности изнашивания, представленной в обобщенных переменных.

Постановка задачи и ее решение

Недеформируемый шар (рис. 1) радиусом $R_1 = R - \Delta \left(\frac{\Delta}{R} \ll 1 \right)$ вдавливается силой P в упругое (E_2, ν_2 - модуль Юнга и коэффициент Пуассона) кольцо со сферической полостью, с поверхностью которой жестко соединен тонкий

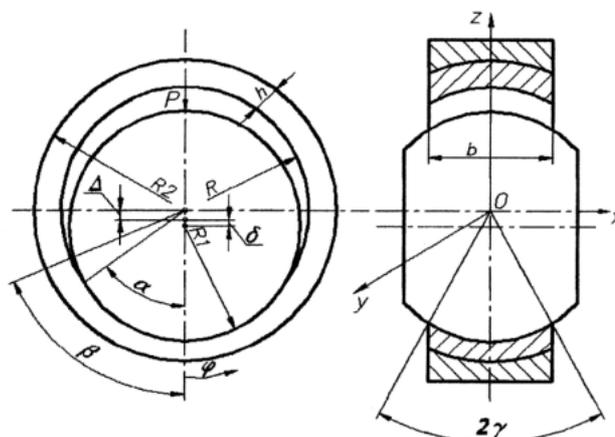


Рис. 1. Расчетная схема шарнирного сферического подшипника

($\varepsilon = \frac{h}{R} \ll 1, h = R_2 - R$) упругий (E_1, ν_1) вкладыш. Шар совершает качательные движения вокруг оси Ox с частотой ν (1/с) и амплитудой 2β (град). Требуется определить ресурс работы такого трибосопряжения, характеризуемый числом циклов качания N либо временем T (ч), когда задан предельно допустимый износ вкладыша $[h]$

(м), т.е. допустимое смещение центра шара в направлении действия нагрузки P .

Ресурс работы ШСП определяется по формулам:

$$T = \frac{0,398[w]}{\bar{I}_h R_1 \beta \nu} 10^{-2}, \quad N = \frac{14,327[w]}{\bar{I}_h R_1 \beta}, \quad (1)$$

где величина T имеет размерность (ч), а параметр N характеризуется числом циклов качания.

Математическая модель, характеризующая процесс изнашивания, формулируется с использованием методов теории подобия и анализа размерностей, посредством объединения теоретических представлений (фундаментальных уравнений), описывающих природу процесса и экспериментальных исследований и имеет вид:

$$I_h = K (\Phi_1)^{\alpha_1} (\Phi_2)^{\alpha_2} \dots (\Phi_n)^{\alpha_n} \quad (2)$$

В случае подшипника с тканым полимерным вкладышем, содержащим нити полиимида и политетрафторэтилена, следует применять детерминистическую формулу средней безразмерной интенсивности изнашивания в форме

$$\bar{I}_h = K \left(\frac{\bar{p}}{E_1} \right)^{\alpha_1} \left(\frac{U_g}{R_0 T_g} \right)^{\alpha_2} \left(\frac{\tau_g V_0}{R_1} \right)^{\alpha_3} \left(\frac{T_0}{T_g} \right)^{\alpha_4}. \quad (3)$$

Здесь \bar{p} - среднее максимальное контактное давление за период эксплуатации ШСП, T_0 - объемная температура трибосопряжения без учета саморазогрева от трения; T_g - температура стеклования полимера; U_g - энергия активации разрушения антифрикционного полимера при T_g ; R_0 - универсальная газовая постоянная; τ_g - время релаксации напряжений полимера при T_g ; $V_0 = 6,98 \cdot 10^{-2} \beta \nu R_1$ (м/с) - скорость скольжения точки поверхности шара с координатой $\varphi = 0$; $K = 6,0 \cdot 10^6$, $\alpha_1 = 1,3$; $\alpha_2 = -1$; $\alpha_3 = 0,54$; $\alpha_4 = 0,7$.

В формуле (3) K - интегральный коэффициент, учитывающий влияние шероховатости контртела, особенности технологии и другие факторы; $\Phi_1 = \frac{\bar{p}}{E_1}$ - деформационный критерий, характеризующий напряженное состояние полимера; $\Phi_2 = \frac{U_g}{R_0 T_g}$ - инвари-

ант, описывающий термофлуктуационную природу разрушения полимера, энергетический барьер разрушения химических связей, свойственный каждому такому материалу;

$\Phi_3 = \frac{\tau_g V_0}{R_1}$ - комплекс, моделирующий связь

вязкоупругих свойств полимера с длительностью процесса его деформирования и аналогичный по структуре известному критерию Деборы;

$\Phi_4 = \frac{T_0}{T_g}$ - температурный

комплекс.

Приведенная выше методика использует модель изнашивания, имеющую физический смысл, и дает возможность производить приближенную оценку ресурса вкладышей ШСП. Для оценки достоверности результатов, получаемых этим методом, можно воспользоваться экспериментальными данными, приведенными в [1, 2]. На рис. 2 приведено сравнение зависимостей без-

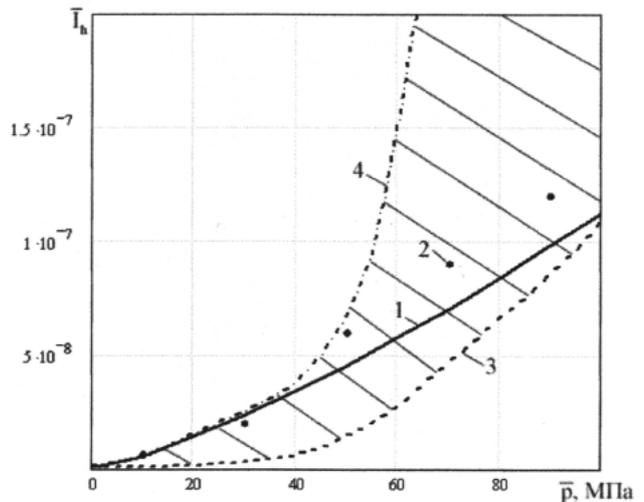


Рис. 2. Сравнение значений безразмерной интенсивности изнашивания, полученных экспериментально и с помощью зависимости в обобщенных переменных (1 - критериальная модель (8), 2 - эксперимент [2], 3,4 - нижняя и верхняя границы области экспериментальных результатов [1])

размерной интенсивности изнашивания от давления, построенных по экспериментальным данным и по значениям критериальной модели. Верхняя и нижняя границы [1] на этом рисунке образуют область, внутри которой находятся все экспериментальные результаты по интенсивностям изнашивания ШСП из раз-

личных материалов по имевшимся данным. На рис. 3 показано сравнение ресурсов, полученных экспериментально и с помощью методики, рассмотренной выше.

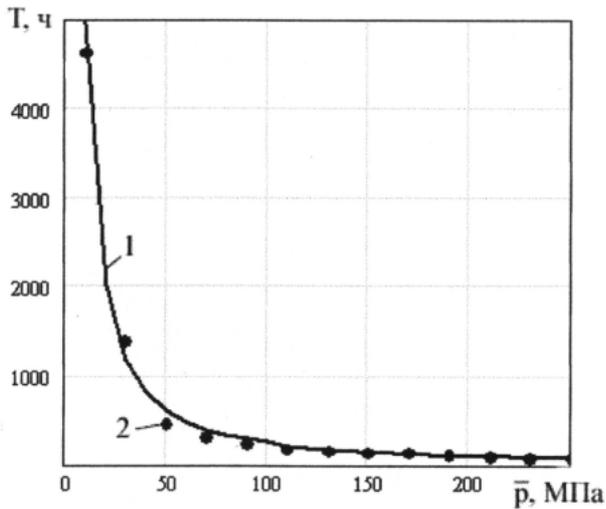


Рис. 3. Сравнение ресурсов, полученных экспериментально и с помощью приведенной выше методики (1 - зависимость (7), $v_o=0,005$ м/с; 2 - эксперимент [2], $v_o = 0,005$ м/с)

Коэффициент трения

Для определения коэффициента трения используется следующее выражение [1]:

$$f = \frac{K v_s^a}{p_0^b T_0^c}, \quad (9)$$

где K - размерный коэффициент a , b , c - экспериментально определяемые значения.

Область использования формулы:

$$0 < p_0 < 260 \text{ МПа},$$

$$273 < T_0 < 453 \text{ К},$$

$$0,0001 < v_s < 0,04 \text{ м/с}.$$

На рис. 4-6 приведены результаты

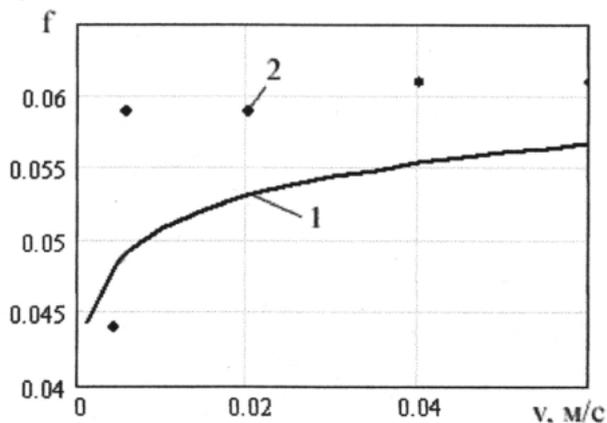


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей коэффициента трения от скорости скольжения (1 - расчет (9); 2 - эксперимент [2], $T=313$ К, $p=21,5$ МПа)

сравнения экспериментальных и теоретических зависимостей коэффициента трения от скорости, температуры и давления.

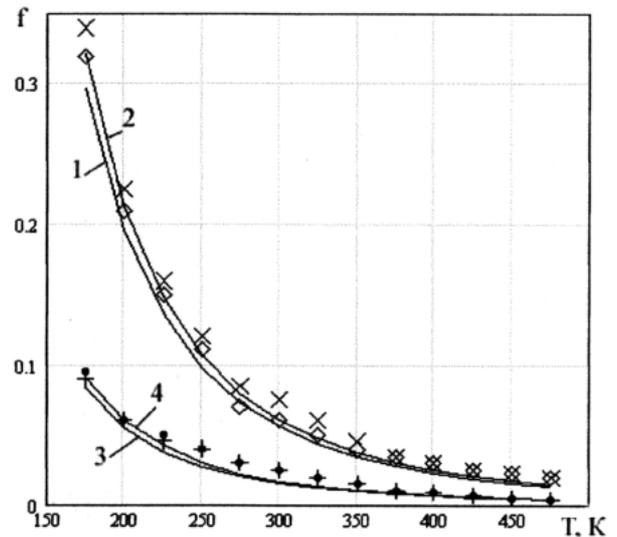


Рис. 5. Сравнение экспериментальных и расчетных зависимостей коэффициента трения от температуры:

- 1 - расчет (9), $p=20$ МПа, $v=0,005$ м/с;
- 2 - расчет (9), $p=20$ МПа, $v=0,02$ м/с;
- 3 - расчет (9), $p=200$ МПа, $v=0,005$ м/с;
- 4 - расчет (9), $p=200$ МПа, $v=0,02$ м/с;
- ◇◇ - эксперимент [2], $p=20$ МПа, $v=0,005$ м/с;
- ×× - эксперимент [2], $p=20$ МПа, $v=0,02$ м/с;
- ++ - эксперимент [2], $p=200$ МПа, $v=0,005$ м/с;
- - эксперимент [2], $p=200$ МПа, $v=0,02$ м/с

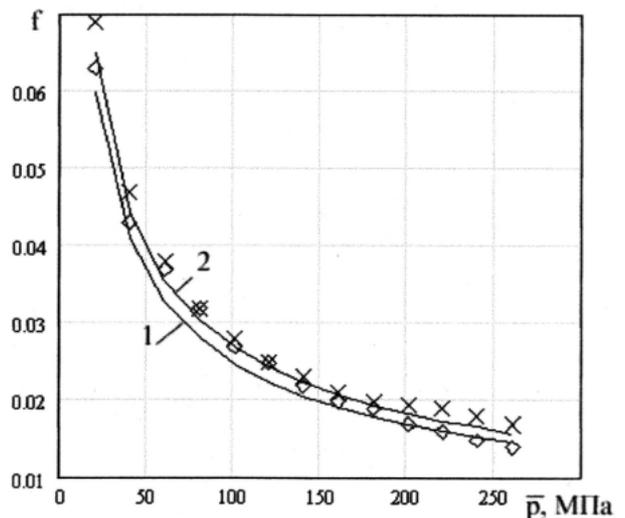


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от давления при комнатной температуре:

- 1 - расчет (9) $T=293$ К, $v=0,005$ м/с;
- 2 - зависимость (9) $T=293$ К, $v=0,02$ м/с;
- ○ - эксперимент [2] $T=293$ К, $v=0,005$ м/с;
- ×× - эксперимент [2] $T=293$ К, $v=0,02$ м/с

Выводы

Сравнение полученных расчетных зависимостей и результатов экспериментов для

ресурса и коэффициента трения скольжения ШСП показало удовлетворительное согласие. Предложенные в работе расчетные формулы для оценки ресурса и коэффициента трения скольжения ШСП, применимые в широком диапазоне изменения рабочих параметров: контактного давления, скорости скольжения, температуры, могут быть использованы для расчетов на стадии проектирования трибосопряжений.

Список литературы

1. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин.

М.: Высшая школа, 1991. 319 с.

2. Дроздов Ю.Н. Артамонов В.Н. Расчет сферических шарнирных подшипников // Вестник машиностроения. 1985. № 2. С. 17-20.

3. Spherical Plain Bearings and Rod Ends - Publication 4407 E, 2000.

4. <http://medias.ina.de> – объединенный сайт фирм INA и FAG промышленной группы Schaeffler.

5. Дроздов Ю.Н., Коваленко Е.В. Расчет долговечности сферических шарнирных подшипников скольжения по критерию износа. // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 6, 1999. С 38-44.

FRICITION AND RESOURCE OF ARTICULATE SPHERICAL BEARINGS WORKING WITHOUT LUBRICATION

© 2006 Yu.N. Drozdov, V.A. Nadein, V.N. Putchkov, M.V. Putchkov

The methodology of determination of a resource (with use of dependence for definition of intensity of the wear process submitted in generalized variables) and friction coefficient of spherical hinge plain bearings, working without lubrication is developed. Comparison of the results obtained from developed methodology and results of experiments which has shown the satisfactory consent is made. It has allowed to draw a conclusion that, the calculation formulas offered in work, can be used at the design stage of bearings.