

Кузьменко А.Г.,***Криворотько В.М.*****Хмельницкий национальный университет,
г. Хмельницкий, Украина,**Национальный авиационный университет,
г. Киев, Украина**МЕТОД ИСПЫТАНИЙ И РАСЧЕТОВ ШАРИКОПОДШИПНИКОВ НА ИЗНОС.
ЧАСТЬ I. МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ
И ИСПЫТАНИЙ****Содержание****Введение**

1. Теория экспериментов и расчетов
 - 1.1. Схема, начальные и текущие условия испытаний
 - 1.1.1. Начальный контакт шара и плоскости
 - 1.1.2. Контакт шара и кругового желоба
 - 1.2. Путь трения для шара и дорожки качения
 - 1.3. Расчет износа дорожки качения
 - 1.3.1. Осевой шарикоподшипник
 - 1.3.2. Радиальный шарикоподшипник
 - 1.4. Зависимости для определения параметров модели изнашивания
 - 1.4.1. Случай $a_0 = 0$
 - 1.4.2. Случай $a_0 \neq 0$
 - 1.5. Определение параметров аппроксимирующей функции методом наименьших квадратов
2. Техника эксперимента
 - 2.1. Установка и порядок испытаний
 - 2.2. Порядок обработки результатов
 - 2.2.1. Испытания при начальной нулевой площадке контакта
 - 2.2.2. Обработка результатов при $a_0 \neq 0$

Выводы по части I

Литература

Введение

1⁰. Подшипники качения (ПК) – самый совершенный и самый распространенный вид опор вращающихся валов и осей. Все виды наземных транспортных средств реализуют конечное движение через ПК. В то же время ПК колес это один из самых нагруженных узлов транспортных машин.

В процессе эксплуатации ПК выходят из строя по двум основным механизмам: 1) дорожки качения ПК – разрушаются от усталости;

2) дорожки качения изнашиваются до предельно допустимой величины.

Процесс усталостного разрушения дорожек качения ПК изучается более ста лет и в настоящее время имеет свои стандартизованные методы расчетов и испытаний. Изучение процесса изнашивания ПК находится в начальной стадии. Практически отсутствуют методы расчетов и испытаний ПК на износ.

2⁰. Одной из основных причин слабой изученности износа ПК является сложность их контактной механики: в процессе контакта с износом тел качения с изнашивающимися дорожками качения условия контактирования меняются настолько, что перестают соответствовать основному допущению герцевского контакта – малая площадка контакта в сравнении с размерами тел качения.

Для этого случая, когда по одной оси площадки контакта (вдоль движения) размер оси мал и удовлетворяет требованию относительной малости, а по другой оси (перпендикулярно качению) размер соизмерим с радиусом шарика, нами [1] предложен новый метод решения контактных задач. Такие задачи названы квазигерцевскими, а метод квазигерцевским или *QH* – методом.

3⁰. Квазигерцевский контакт изучен также для случая с износом [2]. Решены, как прямая, так и обратная задачи о взаимодействии шарика с дорожкой качения ПК как без износа, так и с износом. Решения обратных квазигерцевских контактных задач с учетом износа являются теоретической основой для испытаний пар трения качения со скольжением с определением параметров моделей изнашивания.

В данной работе изложена и реализована эта методика испытаний и расчетов шарикоподшипников на износ.

4⁰. Задача повышения ресурса и надежности ПК решается в двух направлениях: 1) созданием поверхностей дорожек качения с более совершенными механическими свойствами (материалы, покрытия, термообработки и т.д.); 2) созданием новых видов смазок и присадок к этим смазкам.

Как в одном, так и в другом случаях критерием эффективности мероприятий по повышению долговечности по износу являются испытания сопряжения. Натурные стендовые испытания ПК на износ затруднены из-за большой продолжительности испытаний и неизбежного при этом разброса результатов испытаний.

В данной работе на основе предложенных моделей и решений контактных задач разработан и реализован метод модельных испытаний на износ при качении с проскальзыванием по схеме осевого подшипника качения.

5⁰. В первом разделе этой части обобщены теоретические основы испытаний; во втором разделе описана техника эксперимента и прежде всего установка для испытаний.

1. Теория эксперимента

1.1. Схема, начальные и текущие условия испытаний

1.1.1. Начальный контакт шара и плоскости

1⁰. В качестве схемы для испытаний на износ при качении с проскальзыванием принята схема осевого шарикоподшипника рис. 1.1.

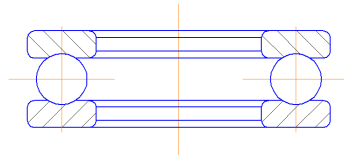


Рис. 1.1 – Испытания по схеме осевого шарикоподшипника

Принципиальное отличие от осевого подшипника состоит в том, что на установке нижнее кольцо с желобом заменено плоским испытываемым кольцом.

Таким образом, расчетной схемой начального состояния является контакт шара с плоскостью. По мере износа и образования дорожки качения схема преобразуется в контакт шара с кольцевым желобом без зазора.

2⁰. Для начального упругого контакта шарика и плоскости из разных материалов по [3] радиус a площадки контакта определяем по формуле:

$$a = 0,9086 \sqrt[3]{\frac{QR}{E_*}} \quad (1.1.1)$$

где Q – нагрузка на один шарик;

R – радиус шарика.

$$\eta = \frac{1}{E_*} = \frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \quad (1.1.2)$$

где E_* – приведенный модуль упругости материалов сопряжения;

E_1, E_2, μ_1, μ_2 – модули упругости и коэффициенты Пуассона сопрягаемых материалов.

В случае, если плоскость и шарик из стали обычно принимается $E_1 = E_2 = 2,1 \cdot 10^4$ кг/мм², $\mu_1 = \mu_2 = 0,3$.

В этом случае получаем:

$$\frac{1}{E_*} = 2 \frac{0,91}{2,1 \cdot 10^4} = 0,8667 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2/\text{кг};$$

$$E_* = 1,1538 \cdot 10^4 \text{ кг/мм}^2$$

Максимальное контактное давление в начальный момент испытаний определяется по формуле:

$$\sigma_0 = 0,5784 \sqrt[3]{\frac{Q E_*^2}{R^2}} \sqrt[3]{\frac{c}{\psi}} \quad (1.1.3)$$

1.1.2. Контакт шара и кругового желоба

1⁰. Если известны максимальные эллиптические размеры проекции площадки контакта $2a$ и $2b$ (рис. 1.2), то между малым размером b и большим размером a получена зависимость [1]:

$$b = \frac{\sqrt[3]{16\pi Q R}}{3 \sqrt[3]{a E_*}} \sqrt[3]{\frac{c}{\psi}} \quad (1.1.4)$$

или
$$b = \frac{B}{\sqrt{a}}, \quad (1.1.5)$$

где
$$B = \frac{\sqrt[3]{16\pi Q R}}{3 \sqrt[3]{E_*}} \sqrt[3]{\frac{c}{\psi}} \quad (1.1.6)$$

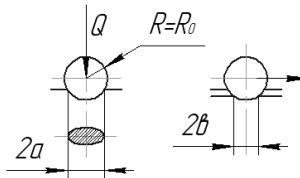


Рис. 1.2 – Схема площадки контакта

Если из эксперимента определен размер площадки a , то второй размер b определяется по (1.4) или (1.5).

Для примера при $Q_{к2,5}$ кг, $E_* = 1,1538 \cdot 10^4$ кг/мм², $R = 3,57$ мм:

$$B = \frac{\sqrt[3]{16\pi}}{3} \frac{2,5 \sqrt[3]{3,57}}{1,1538 \cdot 10^4} \sqrt[3]{\frac{c}{\psi}} = 0,1138 \text{ мм}^{3/2}.$$

2⁰. Среднее давление по площадке контакта можно определить по зависимости:

$$\sigma = \frac{Q}{\pi a b} = \frac{Q}{\pi B \sqrt{a}} \quad (1.1.7)$$

Например, при $Q_{к2,5}$ кг, $B = 0,1138$ мм^{3/2}, $a = 0,15$ мм, имеем:

$$\sigma = \frac{2,5}{\pi \cdot 0,1138 \sqrt{0,15}} = 15,63 \text{ кг/мм}^2.$$

1.2. Путь трения для шара и дорожки качения

1⁰. Пути трения для контактирующих точек шара s_1 , и дорожки s_2 разные. Эта величина не менее, а иногда даже более важная чем давление.

1. Путь трения для точек поверхности шара при качении с проскальзыванием за один оборот определяется как длина дорожки качения:

$$s_1 = 2t R_{cp} \pi R_{cp}, \quad (1.2.1)$$

а за время t :

$$s_1 = 2 R_{cp} \pi n t. \quad (1.2.2)$$

Это условный путь трения для одной фиксированной точки шара. Условность заключается в том, что этот путь не для точки, а для совокупности точек некоторого меридиана на шарике. Эта условность здесь допустима, так как мы не рассматриваем износ шара, а используем эту величину как пере-

ходную к износу дорожки качения s_2 . Суть дела в том что $s_1 \check{y}(a)$ – это легко вычисляемая величина, а s_2 в (a) , величина зависящая от процесса. В методе мы выражаем величину s_2 через s_1 .

2. Путь трения s_2 для дорожки качения с размером площадки по направлению качения равным $2b$ при качении с проскальзыванием за контакт с одним шарикам равен:

$$s_2 \check{y} = 2b \varepsilon, \quad (1.2.3)$$

где ε – коэффициент проскальзывания шариков по дорожке качения.

За один оборот через заданную точку на дорожке качения пробегают z шариков, то есть за один оборот вала путь трения по заданной точке дорожки будет:

$$s_2 \check{y} = 2b z, \quad (1.2.4)$$

а за время t с n оборотов в единицу времени путь трения для заданной точки дорожки качения:

$$s_2 = s_2 \check{y} n t = 2b z n t. \quad (1.2.5)$$

3. Выразим путь трения для дорожки качения через условный легко определяемый путь трения (1.2.4). Возьмем отношения выражений (1.2.5) к (1.2.2):

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{2b z n t}{2\pi R_{cp} n t} = \frac{b z}{\pi R_{cp}}, \quad (1.2.6)$$

отсюда имеем:

$$s_2 = s_1 \frac{b \varepsilon z}{\pi R_{cp}} \quad (1.2.7)$$

или

$$s_2 = c s_1 b, \quad (1.2.8)$$

где

$$c = \frac{\varepsilon z}{\pi R_{cp}}. \quad (1.2.9)$$

1.3. Методика расчета износа дорожки качения

1.3.1. Осевой шарикоподшипник

1⁰. В соответствии с решением прямой задачи для износа плоского кольца вращающимся шариком расчет износа ведется по следующим зависимостям:

1) в случаи первоначального контакта по нулевой площадке $a_0 = 0$ размер площадки контакта $a(s)$ при заданном пути трения:

$$a^{\frac{m+5}{2}} = \frac{3}{\pi B \Psi} \frac{Q}{\Psi} k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_1 \varepsilon z}{\pi R_2}; \quad (1.3.1)$$

2) в случаи первоначального контакта по площадке $a(s=0) = a_0$ размер текущей площадки контакта $a(s)$ вычисляется по формуле:

$$a^{\frac{1}{2}} \frac{3}{\pi B \Psi} a^{\frac{m}{2}+2} - a_0^{\frac{m}{2}+2} \frac{3}{\pi B \Psi} = \frac{3}{\pi B \Psi} \frac{Q}{\Psi} k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_1 \varepsilon z}{\pi R_2}. \quad (1.3.2)$$

Напомним, что в этих формулах путь трения s_1 определяется для шарика по зависимости (1.2.7).

2⁰. В случае, если шар катится не по плоскости, и по поверхности, имеющей, первоначальную форму желоба (рис. 1.3) или более сложную в решении (1.3.1) и (1.3.2) необходимо вместо величины радиус шара R следует в соответствии с методом подобия подставить приведенный эквивалентный радиус R_* по зависимости:

$$R_* = (R_1^* R_2^*)^{1/2} \quad (1.3.3)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{21}}; \quad \frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{22}}$$

так как

$$R_{22} = r ; R_2^* = R_{12} \quad (1.3.4)$$

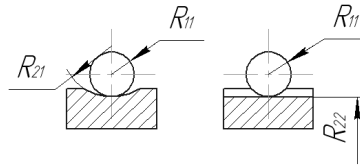


Рис. 1.3 – Схема контакта шарика и дорожки осевого подшипника

3⁰. Например, для подшипника № 8204

$$R_{11} = 3,57 \text{ мм};$$

$$R_{21} = 1,08 \text{ мм}, R_{11} = 3,86 \text{ мм};$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{3,57} - \frac{1}{3,86} = 0,02104;$$

$$R_1^* = 47,518 \text{ мм};$$

$$R_2^* = 3,57 \text{ мм};$$

$$R_* = (47,518 \cdot 3,57)^{1/2} = 13,025 \text{ мм};$$

$$R_* = 13,025 \text{ мм}.$$

1.3.2. Радиальный шарикоподшипник

Для контакта шарика и внутреннего кольца радиального подшипника схема приведена на рис. 1.4.

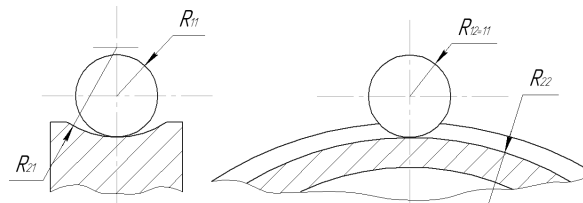


Рис. 1.4 – Схема контакта шарика и дорожки внутреннего кольца радиального подшипника

1⁰. Приведенный эквивалентный радиус R_* в этом случае определяется по зависимости:

$$R_* = (R_1^* R_2^*)^{1/2}, \quad (1.3.5)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{21}} \frac{b}{\pi} \quad (1.3.6)$$

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_{22}} \frac{a}{\pi}$$

2⁰. Формула для расчета размеров площадки контакта по (1.3.1) с учетом (1.3.5) при $a_0 = 0$ приводится к виду:

$$a^{(m+5)/2} = \frac{3}{\pi} \frac{Q}{B_*} \frac{4}{\pi} k_w R_* \frac{3}{\pi} \frac{m}{2} + 2 \frac{4}{\pi} \frac{B_* \varepsilon z}{\pi R_2} s_1, \quad (1.3.7)$$

где

$$B_* = \frac{\text{ж} 16\pi}{\text{и} 3} \frac{QR_*}{E_*} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^{1/2}. \quad (1.3.8)$$

При $a_0 \neq 0$ расчет ведется по формуле (1.3.2) с подстановкой $R = R_*$:

$$a^{1/2} \left(a^{(m+4)/2} - a_0^{(m+4)/2} \right) = \frac{\text{ж} Q}{\text{и} \pi B} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^m k_w R_* \frac{\text{ж} m}{\text{и} 2} + 2 \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{B_* \varepsilon z}{\pi R_2} s_1. \quad (1.3.9)$$

Заметим, что в этом случае определение a сводится к решению нелинейного алгебраического уравнения и выполняется численно.

4⁰. Для контакта шарика и наружного кольца радиального подшипника рис. 1.5 приведенный эквивалентный радиус определяется по зависимости.

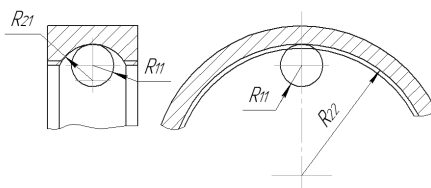


Рис. 1.5 – Схема контакта шарика и дорожки наружного кольца радиального подшипника

$$R_* = \left(R_1^* R_2^* \right)^{1/2} \quad (1.3.10)$$

$$\frac{1}{R_1^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{21}} \frac{\text{в}}{\text{п}} \quad (1.3.11)$$

$$\frac{1}{R_2^*} = \frac{1}{R_{11}} - \frac{1}{R_{22}} \frac{\text{а}}{\text{ю}}.$$

Расчет ведется по формулам (1.3.7) - (1.3.10).

1.4. Зависимости для определения параметров k_w, m модели изнашивания

1.4.1. Случай $a_0 = 0$

1⁰. На первом этапе обрабатываются результаты испытаний износа кольцевого образца шаром по схеме осевого подшипника. Методом наименьших квадратов (п. 1.5) определяются параметры аппроксимации степенной функции:

$$a(s_1) = cs_1^\beta \quad (1.4.1)$$

По этой зависимости определяется величина площадки контакта при любом пути трения.

2⁰. На аппроксимирующей функции (1.4.1) выбираем две базовые точки $(a_1, s_{11}) ; (a_2, s_{12})$. Для этих точек записываем уравнение (1.3.1), получаем систему двух уравнений с двумя неизвестными k_w, m .

$$a_1^{m+5} = \frac{\text{ж} Q}{\text{и} \pi B} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^m k_w R_* \frac{\text{ж} m}{\text{и} 2} + 2 \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{B s_{11} \varepsilon z}{\pi R_2} \frac{\text{в}}{\text{п}} \quad (1.4.2)$$

$$a_2^{m+5} = \frac{\text{ж} Q}{\text{и} \pi B} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^m k_w R_* \frac{\text{ж} m}{\text{и} 2} + 2 \frac{\text{ц}}{\text{ш}} \frac{B s_{12} \varepsilon z}{\pi R_2} \frac{\text{а}}{\text{ю}}.$$

Разделив одно уравнение на другое получаем:

$$\frac{\text{ж} a_1}{\text{и} a_2} \frac{\text{ц}}{\text{ш}}^{\frac{m+5}{2}} = \frac{s_{11}}{s_{12}}, \quad (1.4.3)$$

отсюда имеем:

$$\frac{m+5}{2} = \frac{\lg(s_{11}/s_{12})}{\lg(a_1/a_2)}, \quad (1.4.4)$$

или окончательно:

$$m = 2 \frac{\lg(s_{11}/s_{12})}{\lg(a_1/a_2)} - 5. \quad (1.4.5)$$

Второй параметр k_w модели определяем из первого уравнения (1.4.2):

$$k_w = \frac{a^{\frac{m+5}{2}}}{\frac{\frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^m}{R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_{11}}{\psi \pi R_2}}}. \quad (1.4.6)$$

3⁰. Если в результате обработки данных эксперимента получены параметры c, β аппроксимирующей функции:

$$a = c s^\beta, \quad (1.4.7)$$

то из этой зависимости для двух координатных точек $(a_1, s_1); (a_2, s_2)$ следует выражение:

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\frac{s_1}{s_2}^\beta}{\frac{1}{1}}. \quad (1.4.8)$$

Выражая из (1.4.8) величину:

$$\frac{s_1}{s_2} = \frac{\frac{a_1}{a_2}^{1/\beta}}{\frac{1}{1}}, \quad (1.4.9)$$

и приравнявая (1.4.5), получаем:

$$\frac{m+5}{2} = \frac{1}{\beta}. \quad (1.4.10)$$

Отсюда следует:

$$m = \frac{2 - 5\beta}{\beta}. \quad (1.4.11)$$

1.4.2. Случай $a(s=0) = a_0 \neq 0$

1) на первом этапе определяем методом наименьших квадратов параметры аппроксимирующей кривой:

$$a - a_0 = c_1 s_1^{*\beta}, \quad s_1^* = s_1 - s_0; \quad (1.4.12)$$

2) на аппроксимирующей кривой выбираем две базовые точки:

$$(a_1; s_{11}^*), (a_2; s_{12}^*)$$

и для них записываем решение (1.3.2):

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_1^2} \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^{m+2} - a_0^{\frac{m+2}{2}} \frac{1}{\psi} &= \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^m k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_{11}^* \varepsilon z}{\psi \pi R_2} \frac{1}{\psi}; \\ \frac{1}{a_2^2} \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^{m+2} - a_0^{\frac{m+2}{2}} \frac{1}{\psi} &= \frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^m k_w R \frac{m}{2} + 2 \frac{B s_{12}^* \varepsilon z}{\psi \pi R_2} \frac{1}{\psi}; \end{aligned} \quad (1.4.13)$$

3) разделив одно уравнение на другое, получаем уравнение относительно m :

$$\frac{(a_1/a_0)^{\frac{m+2}{2}} - 1}{(a_2/a_0)^{\frac{m+2}{2}} - 1} = \frac{\frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^m \frac{1}{\psi} \frac{s_{11}^*}{s_{12}^*}}{\frac{Q}{\pi B} \frac{1}{\psi}^m \frac{1}{\psi}}; \quad (1.4.14)$$

4) второй параметр модели K_w определяем из первого уравнения (1.4.14) с учетом определенного значения m :

$$k_w = \frac{a_1^{1/2} \frac{3}{\pi} a_1^{\frac{m+2}{2}} - a_0^2 \frac{2}{\pi}}{\frac{3}{\pi} \frac{Q}{B} \frac{2}{\pi} R^{\frac{3}{2}} \frac{m}{2} + 2 \frac{2}{\pi} \frac{Bs_{11}^* \varepsilon z}{\pi R_2}}. \quad (1.4.15)$$

1.5. Обработка данных для функции $a(s)$

1⁰. Приближенная аппроксимация степенной функции $a(s)$ по двум точкам. Пусть заданы координаты (a_i, s_i) точек зависимости $a(s)$, полученные экспериментально, но имеющие разброс:

1) на первом этапе выполним приближенное визуальное представление зависимости в виде монотонного графика;

2) на приближенном монотонном графике выбираем две базовые точки (a_1, s_1) , (a_2, s_2) через которые пройдет функция:

$$a(s) = cs^\beta; \quad (1.5.1)$$

3) параметры аппроксимирующей степенной функции определяются по формулам:

$$\beta = \frac{\lg(a_1/a_2)}{\lg(s_1/s_2)}, \quad (1.5.2)$$

$$c = \frac{a_1}{s_1^\beta}. \quad (1.5.3)$$

2⁰. Определение параметров функции МНК

Если из эксперимента известны случайные точки (a_i, s_i) зависимости:

$$a(s) = cs^\beta, \quad (1.5.4)$$

то параметры c и β этой зависимости можно найти методом наименьших квадратов по зависимостям:

$$\lg c = \frac{\sum \lg a \sum (\lg s)^2 - \sum \lg a \lg s \sum \lg s}{k \sum (\lg s)^2 - (\sum \lg s)^2}, \quad (1.5.5)$$

$$\beta = \frac{k \sum \lg a \lg s - \sum \lg s \sum \lg a}{k \sum (\lg s)^2 - (\sum \lg s)^2}. \quad (1.5.6)$$

3⁰. Если из экспериментов известны случайные точки степенной зависимости вида:

$$a = a_0 + cs^\beta, \quad (1.5.7)$$

или

$$\Delta a = a - a_0 = cs^\beta, \quad (1.5.8)$$

то чтобы получить формулы для определения c и β достаточно в формулах (1.5.5) и (1.5.6) вместо величины $\lg a$ подставить величину:

$$\lg \Delta a = \lg(a - a_0). \quad (1.5.9)$$

4⁰. Нормировка в МНК. При вычислениях c и β по (1.5.5) и (1.5.6) возникают высокие показатели степени. Это затрудняет вычисление и требует повышения их точности. В значительной степени точность может быть повышена при использовании нормировки числителя и знаменателя в этих расчетных формулах.

Разделим в (1.5.5) и (1.5.6) числитель и знаменатель $(\sum \lg s)^2$, в результате имеем:

$$\lg c = \frac{\frac{\sum \lg a \sum (\lg s)^2}{(\sum \lg s)^2} - \frac{\sum \lg a \lg s}{e \lg s}}{k \frac{\sum (\lg s)^2}{(\sum \lg s)^2} - 1}, \quad (1.5.10)$$

$$\beta = \frac{k \frac{\sum \lg a \lg s}{(\sum \lg s)^2} - \frac{\sum \lg a}{e \lg s}}{k \frac{\sum (\lg s)^2}{(\sum \lg s)^2} - 1}. \quad (1.5.11)$$

2. Техника эксперимента

2.1. Установка для испытаний и порядок испытаний

1⁰. Испытания производятся на установке (рис. 2.1) состоящей из сверлильного станка и испытательной рабочей головки.

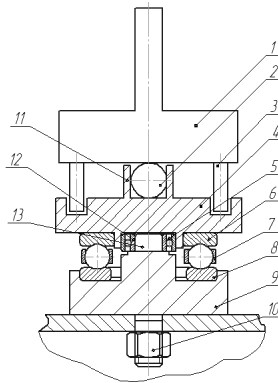


Рис. 2.1 – Схема рабочей головки для испытаний ПК на износ:

- 1 – водило; 2 – опорный шарик; 3 – штыри вилок; 4 – верхний опорный передаточный диск;
 5 – центрирующий радиальный подшипник качения; 6 – верхнее кольцо испытываемого УПК; 7 – сепаратор УПК;
 8 – нижнее кольцо УПК; 9 – нижний опорный диск; 10 – винт крепления нижнего опорного диска;
 11 – направляющий цилиндр нагрузочного шарика; 13 – опорная ось центрирующего подшипника

Подробное описание установки и рабочей головки приведено в [5] при определении величины проскальзывания в осевых подшипниках. Одним из основных достоинств использованной рабочей головки является способность компенсировать неизбежное биение шпинделя сверлильного станка до размеров соизмеримых с зазором в центрирующем (5, рис. 2.1) подшипнике рабочей головки.

Ширина a_0 , образующая при износе дорожки, измеряется с точностью до 1 мкм на приборе ИЗА-2. Менее точные измерения недопустимы, так как уже через час испытаний изменения размеров дорожки износа находятся в пределах нескольких мкм.

2⁰. Испытания выполняются в следующем порядке:

1) исходя из эксплуатационных условий устанавливается нагрузка Q на один шарик; общая нагрузка на осевой подшипник равна

$$Q_n = Q \cdot z,$$

где Z – число шаров в испытательном подшипнике;

2) измерения начинаются с момента обнаружения измеряемой ширины желоба; начиная от нескольких секунд, до нескольких минут;

3) разбивка на отрезки во времени, после которых проводятся испытания определяется экспериментально: по принципу примерно одинакового увеличения ширины желоба износа; на выбранном интервале времени между измерениями;

4) результаты испытаний заносятся в таблицу; для каждого замера вычисляется итоговый путь трения S_1 для дорожки качения по (1.2.7); при этом коэффициент проскальзывания определяется по методике эксперимента [5].

2.2. Порядок обработки результатов

2.2.1. Испытания при начальной нулевой площадке контакта $a_0 = 0$

Обработка данных проводится в следующем порядке:

1) по результатам испытаний строится график зависимости $a(s_1)$ – ширины желоба износа a от пути трения s_1 ;

2) линия графика спрямляется максимально плавно и максимально усреднено; лучше спрямление произвести методом наименьших квадратов с учетом степенной функции;

3) по приближенной методике, на спрямленном графике выбираются две базовые точки (a_{01}, s_{11}) , (a_{02}, s_{12}) ;

4) по координатах двух базовых точек параметры c , β аппроксимирующей функции:

$$a = cs^\beta. \quad (2.1.1)$$

Определяются по зависимостям:

$$\beta = \frac{\lg a_1 / a_2}{\lg s_1 / s_2}, \quad (2.1.2)$$

$$c = \frac{a_1}{s_1^\beta}; \quad (2.1.3)$$

5) искомые параметры k_w и m в случае $a_0 = 0$ модели изнашивания определяются по формулам (1.4.11), (1.4.6)

6) при уточненных расчетах параметры c и β аппроксимирующей функции определяются методом наименьших квадратов по зависимостям (1.5.5), (1.5.6).

2.2.2. Обработка результатов при $a_0 \neq 0$

1^o. В большинстве реальных случаев, на первом этапе зависимость $a(s)$ имеет крутовосходящий характер (рис.2.2).

При наличии круто-восходящего участка функции $a(s)$ и ненулевой начальной точки $a(\gamma = 0) \neq 0$ порядок обработки результатов следующий:

1) по Герцу определяется начальный радиус площадки контакта a_0 при статической нагрузке в начале испытаний;

2) методом наименьших квадратов определяются параметры кусочно степенной аппроксимации функции $\Delta a(s)$; по формулам (1.5.5), (1.5.6) с соответствующей подстановкой Δa , вместо a ;

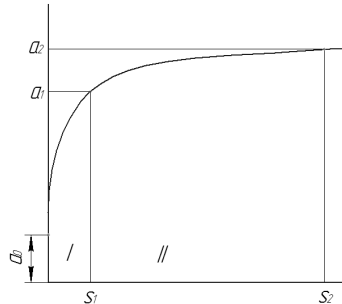


Рис. 2.2 – Вид экспериментальной функции $a(s)$

3) параметр m модели определяется из решения уравнения (1.4.14), в котором базовые точки a_1 и a_2 выбираются с учетом сглаживания МНК;

4) второй параметр k_w модели изнашивания определяется по формуле (1.4.15).

Выводы по части I

Разработана методика расчетов и испытаний на износ радиальных и осевых шарикоподшипников. Методика включает два этапа:

1. Испытания на износ при качении с проскальзыванием шарика по плоскому кольцу по схеме осевого шарикоподшипника.

Параметры β и c , из эксперимента из зависимости ширины дорожки износа от пути трения можно получать как приближенно по двум базовым точкам, так и уточнено методом наименьших квадратов.

2. Для расчета износа шарикоподшипников при заданных параметрах модели изнашивания выполняются по зависимостям, полученным из решения соответствующих контактных задач квазигерцевским методом с использованием метода подобия при эквивалентном радиусе.

Эксперименты и расчеты выполнены во второй части работы.

3. Разработана техника эксперимента, обеспечивающая реализацию предложенной в п.1 методики испытаний и расчетов шарикоподшипников на износ.

Техника включает:

1) установку для испытаний, обеспечивающую микронное биение шариков по дорожке качения;
2) последовательность испытаний с измерением размера изнашиваемой дорожки качения с точностью до 1 мкм;

3) последовательность обработки результатов испытаний с определением на первом этапе параметров β , c аппроксимации функции $a(s)$; а на втором этапе определение параметров k_w , m модели изнашивания.

Литература

1. Кузьменко А.Г. Метод решения квазигерцевских задач (QH – метод) // Проблемы трибологии. – 2005. – №3, 4. – С. 139 – 177.
2. Кузьменко А.Г. Метод решения квазигерцевских контактных задач с учетом износа (QH_w – метод) // Проблемы трибологии. – 2006. – № 1. – С. 49-75.
3. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов. – К.: Наукова думка, 1988. – 736 с.
4. Кузьменко А.Г. Проскальзывание в подшипниках качения. Часть I. Общие положения // Проблемы трибологии. – 2010. – № 2. – С. 61-72.
5. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М., Савчук А.Е. Проскальзывание в подшипниках качения. Часть II. Экспериментальное определение коэффициентов проскальзывания // Проблемы трибологии. – 2010. – № 2. – С. 73-82.
6. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Расчеты и испытания на износ и надежность упорных шарикоподшипников качения (УПК) // Проблемы трибологии. – 2009. – № 4. – С. 30-52.
7. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Распределение нагрузки между шариками в радиальном подшипнике качения // Проблемы трибологии. – 2010. – № 1. – С. 29-41.
8. Кузьменко А.Г., Криворотько В.М. Контактная механика плоской комбинированной опоры при одновременном качении шариков и скольжении плоскости // Проблемы трибологии. – 2010. – № 1. – С. 86-97.

Надійшла 10.06.2010