

УДК 621.822.:62 – 408.8.

ВЛИЯНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ ОПОРНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЗАМКНУТОГО ОСЕВОГО ГИДРОСТАТИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

© 2011 Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Поступила в редакцию 18.03.2011

Разработана математическая модель и проведены исследования влияния шероховатости опорных поверхностей на статические характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника. Показано влияние высоты и шага шероховатости на расходные и нагрузочные характеристики.

Ключевые слова: гидростатические подшипники, математическая модель, шероховатость опорных поверхностей

В гидростатических опорах (подшипниках и направляющих) несущие поверхности разделены слоем смазки толщиной h , величина которого составляет сотые доли миллиметра и существенно влияет на нагрузочные и расходные характеристики опоры. При расчете характеристик гидростатических опор принимают номинальное (расчетное) значение толщины слоя смазки. Реальное же значение определяется зазором между опорными поверхностями и зависит от точности изготовления и монтажа опоры. В радиальном гидростатическом подшипнике зазор определяют как разность между наименьшим диаметром отверстия и наибольшим диаметром вала. В незамкнутой осевой опоре (подшипнике или направляющей) зазор определяется величиной подъема подвижной части опоры относительно неподвижной под действием давления смазки. В любом случае толщину слоя смазки определяют как расстояние между поверхностями, эквидистантно прилегающим к реальным опорным поверхностям гидростатической опоры. Погрешность изготовления и монтажа любых поверхностей характеризуются не только погрешностью их размеров, но и реальными погрешностями формы и расположения поверхностей, а также шероховатостью последних. Большая часть расчетов параметров гидростатических опор осуществляется для идеального варианта:

реальная толщина масляного слоя по всей поверхности опорных поверхностей одинакова и равна номинальному значению. При расчете характеристик радиальных гидростатических опор в ряде случаев учитывают изменение формы толщины слоя смазки, обусловленное смещением оси вала относительно оси втулки под действием внешней нагрузки. В [1] проведено исследование и даны рекомендации по нормированию отклонений размеров опорных поверхностей. В [2] рассмотрено влияние отклонения расположения опорных поверхностей на характеристики гидростатического подшипника.

Цель работы: провести анализ влияния шероховатости опорных поверхностей на нагрузочные и расходные характеристики незамкнутого осевого гидростатического подшипника.

Величина шероховатости во многом зависит от материала деталей гидростатических подшипников и от способа механической обработки. Неподвижную деталь подшипника изготавливают, как правило, из бронзы, а подвижную – из закаленной стали. Такое сочетание материалов позволяет получить антифрикционную пару, снижающую износ при пуске и остановке узла. При чистовом обтачивании опорных поверхностей поперечной подачей или при чистовом растачивании шероховатость по параметру R_a может меняться от 3,2 до 0,8 мкм [3]. По параметру R_z , который наиболее полно подходит к математической модели исследуемого подшипника, указанная выше шероховатость составит 12,5-3,2 мкм. Учитывая, что опорных поверхностей две, суммарная высота микронеровностей может быть соизмерима

Строк Лилия Владимировна, аспирантка. E-mail: klw111@mail.ru

Пикалов Яков Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения. E-mail: Yarpibest@mail.ru

Секацкий Виктор Степанович, кандидат технических наук, заведующий кафедрой стандартизации и управления качеством. E-mail: sekackiy@rambler.ru

с величиной несущего слоя смазки. Что касается среднего шага неровностей профиля, то он определяется в основном величиной подачи инструмента при обработке на металлорежущих станках и находится в пределах от 0,1 до 0,3 мм. Кроме того при чистовом обтачивании поперечной подачей на опорных поверхностях осевого гидростатического подшипника шероховатости будут иметь кругообразное направление (ГОСТ 2789).

Исследования проведены на примере осевого гидростатического подшипника с центральной несущей камерой. Схема подшипника и его параметры показаны на рис. 1. При нагнетании давления p_n в подшипник подвижная часть 2 поднимается на величину h_0 . Сопротивление дросселя $R_{др}$ рассчитано исходя из условия $p_{к0} / p_n = 0,5$. Здесь $p_{к0}$ – давление в несущем кармане, соответствующее расчетному зазору h_0 при гладких опорных поверхностях. С учетом шероховатости усредненный зазор будет иметь вид:

$$h_0' = h_0 + R_z / 2 \quad (1)$$

где R_z – высота шероховатости.

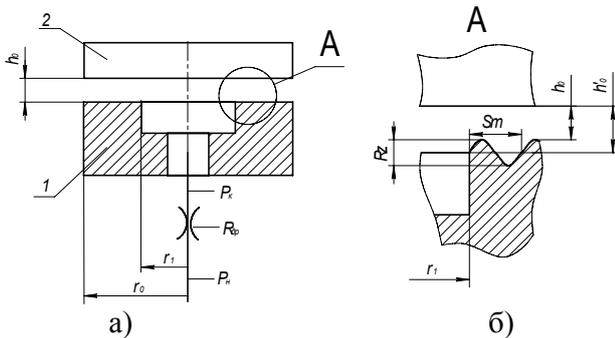


Рис. 1. Гидростатический подшипник: а) схема подшипника; б) форма опорной поверхности

При круговом направлении шероховатости считаем, что толщина слоя смазки h_0 не зависит от угловой координаты, а определяется текущим значением радиуса r_i подшипника на опорной перемычке, ограниченной наружным r_0 и внутренним r_1 радиусами. Таким образом, текущее значение толщины слоя смазки h_i можно представить следующей зависимостью:

$$h_i = h_0 + 0,5R_z \cos x \quad (2)$$

где $x = \frac{2\pi \cdot m(r_i - r_1)}{r_0 - r_1}$, $m = (r_0 - r_1) / S_m$ – количество

волн шероховатости на опорной перемычке подшипника; S_m – средний шаг шероховатости.

Для большей общности результатов и для сокращения вычислений сравнительное исследование проводили в безразмерной форме, для этого в математической модели размерные величины (как правило, обозначены строчными буквами) заменяли безразмерными (как правило, обозначены аналогичными прописными буквами) следующим образом: $P_i = p_i / p_n$ – безразмерный параметр давления; $H_i = h_i / h_0$ – безразмерный параметр толщины несущего слоя; $R_i = r_i / r_0$ – безразмерный параметр радиальных размеров; $W = w / (\pi r_0^2 p_n)$ – безразмерный параметр несущей способности; $Q = q \mu / (\pi h_0^3 p_n)$ – безразмерный параметр расхода смазки. С учетом принятых допущений выражение, характеризующее зазор, будет иметь вид:

$$H_i = 1 + 0,5 \cdot RZ \cdot \cos \left[\frac{2\pi \cdot m(R_i - R_1)}{1 - R_1} \right], \quad (3)$$

где $RZ = R_z / h_0$.

Распределение давления P_i в несущем слое смазки незамкнутого осевого гидростатического подшипника, удовлетворяет решению частного вида дифференциального уравнения Рейнольдса

$$H^3 \frac{\partial P}{\partial R} + R \frac{\partial}{\partial R} \left(H^3 \frac{\partial P}{\partial R} \right) = 0 \quad (4)$$

с граничными условиями

$$P|_{R=R_1} = P_k; \quad P|_{R=1} = 0, \quad (5)$$

где P_k и 0 – значения функций P_i на границах зазора.

Точное аналитическое решение уравнения (4) получить не удастся, поэтому для определения функции распределения давления смазки P_i используем метод прогонки. От дифференциального уравнения (4) перейдем к конечно-разностному уравнению. Для этого разобьем отрезок $[R_1, 1]$ на n равных частей с шагом $v = (1 - R_1) / n$. Полагая, что точки разбиения имеют абсциссы $R_i = R_1 + iv$, ($i = 0, 1, 2, \dots, n$) и зная $P_0 = P_k$, $P_n = 0$, вместо дифференциального уравнения (4) получим систему конечно-разностных уравнений

$$H_i \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2v} + R_i \left[H_i \frac{P_{i+1} - 2P_i + P_{i-1}}{v^2} + 3 \frac{H_{i+1} - H_{i-1}}{2v} \cdot \frac{P_{i+1} - P_{i-1}}{2v} \right] = 0 \quad (6)$$

относительно неизвестных $P_1, P_2, P_3, \dots, P_{n-1}$. Решение системы (6) будем искать в виде:

$$P_{i-1} = F_i P_i + V_i \quad (7)$$

где F_{i+1} , V_{i+1} – рекуррентные формулы для вычисления прогоночных коэффициентов.

$$F_{i+1} = \frac{A}{1 - BF_i}, \quad V_{i+1} = \frac{B \cdot V_i}{1 - BF_i} \quad (8)$$

Согласно уравнению (6), получим:

$$A = \left(\frac{\nu}{4R_i} + \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right), \quad (9)$$

$$B = \left(-\frac{\nu}{4R_i} - \frac{3(H_{i+1} - H_{i-1})}{8H_i} + \frac{1}{2} \right)$$

Сравнив первое граничное условие (5) с (7), найдем начальные значения прогоночных коэффициентов:

$$F_1 = 0, \quad V_1 = P_k \quad (10)$$

Используя (10), (8) для $i = 1, 2, \dots, n-1$ прямым ходом через предыдущие последовательно найдем последующие значения прогоночных коэффициентов $F_2, V_2, F_3, V_3, \dots, F_{n-1}, V_{n-1}, F_n, V_n$.

Воспользовавшись вторым граничным условием (5), формулой (7) и известными прогоночными коэффициентами F_i, V_i , обратным ходом при $i = n, n-1, \dots, 2, 1$ найдем недостающие неизвестные значения функции $P_{n-1}, P_{n-2}, \dots, P_n$. Зная функцию распределения давлений P_i в несущем слое смазки рассматриваемого подшипника, определим несущую способность и расход смазки. Значение несущей способности на перемычке находили численным методом Симпсона:

$$W_{nep} = \frac{1-R}{3n} [P_0 + P_n + 2(P_2 + \dots + P_{n-2}) + 4(P_1 + \dots + P_{n-1})] \quad (11)$$

Несущая способность гидростатического всего подшипника имеет вид:

$$W = W_{nep} + P_k R_1^2 \quad (12)$$

Расход смазки описывается формулой

$$Q = -\frac{H_0^3 R_1}{6} \cdot \left[\frac{-3P_0 + 4P_1 - P_2}{2\nu} \right] \quad (13)$$

Дальнейшее исследование проводили с использованием программной реализации, составленной на языке Object Pascal в среде Delphi. Для корректного сравнения полученных результатов несущей способности и расхода смазки при различной шероховатости и установления рекомендаций по допустимой

шероховатости была определена относительная погрешность расчетов равная 10^{-6} . На рис. 2 показано изменение давления смазки по ширине опорной перемычки. Из графиков видно, что на величину и форму распределения давления в большей степени влияет количество шагов шероховатости на ширине опорной перемычки, чем величина шероховатости. Это объясняется тем, что чем больше шагов шероховатости в пределах граничных условий (от P_k до 0), тем меньше перепад давления на каждом шаге.

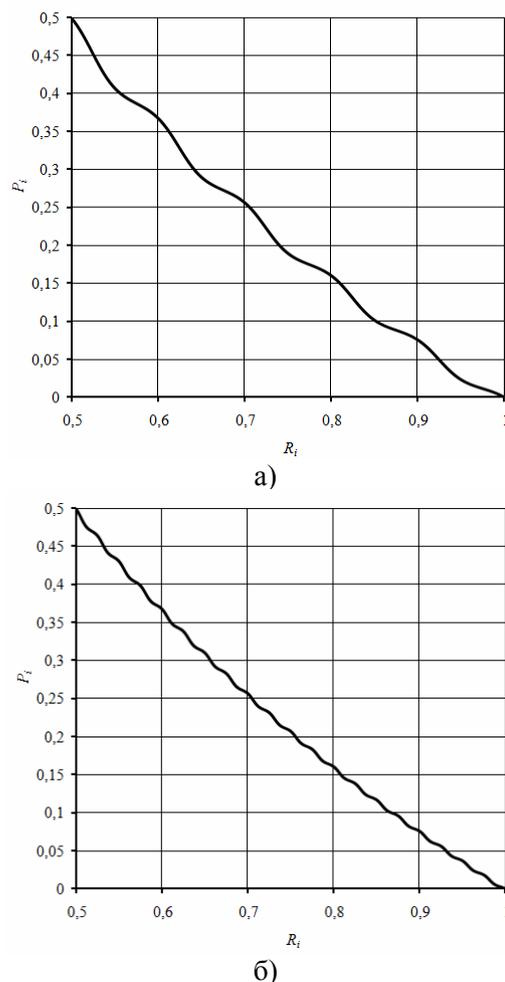


Рис. 2. Графики распределения давления по ширине опорной перемычки: а) $m=5$ $RZ=0,4$; б) $m=20$ $RZ=0,4$

Аналогичная картина наблюдается и при оценке несущей способности гидростатической опоры (рис. 3, а). На расход смазки шаговой параметр практически не влияет. Расход в большей степени зависит от величины шероховатости (рис. 3, б), так как в его выражение входит зазор в третьей степени.

Из графиков видно, что при увеличении шероховатости и уменьшения количества волн происходит незначительное уменьшение несущей способности (0,1-0,3%) и существенное

уменьшение расхода смазки. При переходе к размерным параметрам получим, что в гидростатическом подшипнике с номинальными параметрами $r_0=36$ мм, $r_1=18$ мм, $h_0=20$ мкм, $P_H=2$ МПа, $\mu=0,005$ Па·с изменение шероховатости в пределах от 0,05 до 0,4 приведет к изменению расхода смазки на $0,069 \cdot 10^{-6}$ л/мин (5,7%).

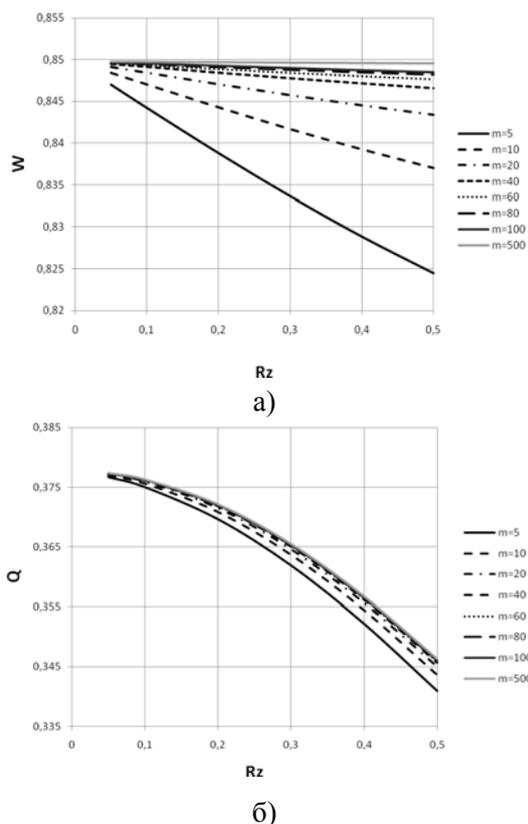


Рис. 3. Влияние шероховатости поверхности на: а) несущую способность; б) расхода смазки

INFLUENCE OF BASIC SURFACES ROUGHNESS ON CHARACTERISTICS OF NOT CLOSED AXIAL HYDROSTATIC BEARING

© 2011 L.V. Strok, Yu.Yu. Pikalov, V.S. Sekatskiy

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

The mathematical model is developed and researches of basic surfaces roughness on static characteristics of not closed axial hydrostatic bearing are conducted. Influence of roughness height and step on account and loading characteristics is shown.

Key words: *hydrostatic bearing, mathematical model, roughness of basic surfaces*

Liliya Strok, Post-graduate Student. E-mail: klw111@mail.ru
 Yakov Pikalov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Machine Building Technology Department. E-mail: Yapibest@mail.ru
 Viktor Sekatskiy, Candidate of Technical Sciences, Head of the Standartization and Quality Management Department. E-mail: sekackiy@rambler.ru

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Касьянова, Л.В. Назначение классов точности гидростатических подшипников / Л.В. Касьянова, Н.В. Мерзликина, В.С. Секацкий // Сборник материалов V Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 7 частях, часть 4 / СФУ. Красноярск, 2009. С. 75-77.
2. Секацкий, В.С. К вопросу о нагрузочной способности осевых гидростатических подшипников / В.С. Секацкий, Н.В. Мерзликина // Перспективные материалы, технологии, конструкции. Тезисы докладов Всероссийской научно-технической конференции. САА, Красноярск, 1998.
3. Справочник технолога - машиностроителя: в 2-х т. / ред. А.М. Дальский. – 5-е изд., испр. – М.: Машиностроение-1, т. 2, 2003. 943 с.
4. Строк, Л.В. Расчет статических характеристик гидростатического подпятника с учетом шероховатости / Л.В. Строк, Я.Ю. Пикалов, В.С. Секацкий // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611329, 2011.