

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ С ВТУЛКАМИ ИЗ КРИСТАЛЛОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Алисин В.В.

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,
Москва*

Ключевые слова: подшипник скольжения, диоксид циркония, трение и износ материалов, интенсивность изнашивания, ресурс работы подшипника.

Аннотация. Статья посвящена вопросам расчета подшипников скольжения, работающих в режиме сухого или граничного трения. Нагрузочные характеристики определялись в соответствии с общепринятыми методами расчета деталей машин. Основное внимание уделяется углу зоны контакта вала и втулки, которые зависят от физико-механических свойств материалов особенно втулки из кристаллов диоксида циркония. Отмечается, что размер контактной зоны и величину контактного давления p вдоль нее определяют интенсивность изнашивания подшипника. Для определения ресурса работы подшипника достаточно задаться предельно допустимым износом.

DESIGN OF PLAIN BEARINGS WITH SLEEVES MADE OF ZIRCONIUM DIOXIDE CRYSTALS

Alisin V.V.

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
Moscow*

Keywords: sliding bearing, zirconium dioxide, friction and wear of materials, wear intensity, bearing service life.

Abstract. The article is devoted to the calculation of sliding bearings operating in dry or boundary friction mode. The load characteristics were determined in accordance with generally accepted methods of calculating machine parts. The main attention is paid to the angle of the contact zone of the shaft and the sleeve, which depend on the physical and mechanical properties of the materials, especially the sleeve made of zirconium dioxide crystals. It is noted that the size of the contact zone and the value of the contact pressure p along it determine the wear intensity of the bearing. To determine the service life of the bearing, it is enough to set the maximum permissible wear.

Технология синтеза наноструктурированных частично стабилизированных кристаллов диоксида циркония разработана на уровне опытного производства [1]. Однако в настоящее время отсутствуют рекомендации по проектированию и изготовлению подшипников скольжения, работающих в условиях граничного и сухого трения. Износ трибосопряжений в условиях режимов граничного и сухого трения в основном определяет ресурс и надежность работы абсолютного большинства машин, оборудования, механизмов. Массовое применение материалов на основе диоксида циркония способно поднять на качественно новый уровень надежность и ресурс оборудования, машин и приборов практически во всех отраслях промышленности. Однако практически отсутствует системный подход к проектированию втулок подшипников, что требует разработки руководящих материалов по проектированию и изготовлению подшипниковых втулок. Вопросам конструирования подшипников скольжения,

работающих в условиях сухого и граничного трения, и анализу влияния геометрических факторов уделяется много внимания [2-4]. Новые материалы с высокой твердостью требуют разработки новых подходов к проектированию подшипников скольжения. Метод расчета подшипников скольжения основанный на давлении на проекцию диаметра цапфы не пригоден для материалов с очень высокой твердостью.

Цель работы состояла в определении основных триботехнических характеристик этих материалов (интенсивность изнашивания, коэффициент трения) с последующим представлением их в виде обобщенных зависимостей для прогнозирования ресурса работы различных узлов трения, выполненных из циркониевых керамик, работающих без смазки или в условиях граничной смазки.

Выполнен поиск оптимального количества стабилизирующей добавки Y_2O_3 , при котором кристаллы ЧСЦ приобретают наилучшие трибологические свойства. На основе экспериментальных исследований изучены механические и трибологические свойства нанокристаллического материала нового поколения на основе ZrO_2 , частично стабилизированного Y_2O_3 (кристаллы ЧСЦ). Показано, что наилучшими механическими свойствами обладают кристаллы ЧСЦ с добавкой 2,8% Y_2O_3 и триботехническими свойствами – кристаллы ЧСЦ с (2,5-4,0)% Y_2O_3 . Проведены исследования коэффициента интенсивности напряжения (K_{1c}) методом индентирования пирамидой Викерса.

Проведенные испытания показали что образцы исследованной керамики и кристаллов имеют трещиностойкость на уровне 9-12 МПа·м^{0,5}, что соответствует лучшим мировым аналогам. Известно несколько показателей триботехнических свойств материалов [2]. В качестве основных трибологических характеристик принимаются безразмерные параметры: f – коэффициент трения, J – интенсивность изнашивания; $f = F / P$; $J = \Delta h / L$; где F – сила трения, P – нагрузка; Δh – величина изношенного материала на пути трения L .

Установлено что, на указанные выше параметры влияют три группы факторов.

1. Величины, определяющие уровень внешнего воздействия на трибосистему: p – контактное давление, МПа; v – скорость скольжения, м/с; θ – температура, °С и др.

2. Физико-механические свойства материалов, из числа которых наибольшее значение имеют те величины, которые определяют свойства поверхностных слоев контактирующих материалов: модуль упругости E , твердость H , предельная относительная деформация образцов (при изгибе или разрыве) δ , а для хрупких материалов типа керамик – коэффициент интенсивности напряжений K_{1c} .

3. Микрогеометрия поверхностей трения. Для оценки трибологических свойств поверхностей важны следующие величины: среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности R_a (стандартизованная величина) и комплексная характеристика шероховатости поверхности $\Delta = R_{max} / r \cdot b^{1/v}$, где R_{max} – максимальная высота неровности поверхности, r – средний радиус закругления неровностей, b и v – параметры степенной аппроксимации начального участка опорной кривой профилограммы шероховатости поверхности (не стандартизованная величина).

4. На характер протекания трибологических процессов в зоне контакта влияют радиальный зазор в подшипнике скольжения, его макрогеометрия и материал контртела.

Методика расчета подшипников скольжения на ресурс основывается на усталостной природе изнашивания. При наложении одной детали на другую и прижатии их силой P формируется площадь контакта S , на которой в результате действия контактного давления $p = P / S$ и относительного смещения сопряженных тел со скоростью v происходит разрушение поверхностных слоев контактирующих материалов и отделение частиц износа. Размеры площади контакта, форма эпюры и величины контактных давлений зависят от геометрии сопряженных тел, механических свойств материалов, режимов нагружения трибосопряжения (нагрузка, скорость скольжения, температура) и величины износа деталей в процессе ее работы. Для описания этих взаимосвязанных процессов применяется математический аппарат одного из разделов теории упругости, описывающего механику контактного деформирования упругих тел с учетом изменения геометрии сопрягаемых поверхностей (контактные задачи с износом).

Понимая под величиной J элементный закон изнашивания материалов в трибосопряжении $J(p)$, а также, учитывая, что при достижении суммарного износа сопряженных тел h предельно допустимой величины $[h]$, время t принимает смысл ресурса работы T :

$$T = \frac{1}{v} \cdot \int_0^{[h]} \frac{dh}{J(p, H, \varepsilon \dots)},$$

где h – величина изношенного слоя материала на пути трения; p – контактное давление; H и ε – микротвердость и предельная деформация разрушения кристалла ЧСЦ.

Точность расчетов определяется [5], прежде всего, достоверностью установления элементного закона изнашивания $J(p, H, \varepsilon)$. Для керамических материалов типа модифицированных кристаллов ЧСЦ, характеризующихся хрупким разрушением при трении, такие закономерности установлены впервые. Метод универсален, может быть применен к различным типовым узлам трения. В данной работе он используется для оценки ресурса работы подшипников скольжения, втулки которого изготовлены из кристаллов ЧСЦ. Нагрузочные характеристики определялись в соответствии с общепринятыми методами расчета деталей машин. На рисунке 1 показаны принятые обозначения параметров: r_1 – радиус вала подшипника; r_2 – радиус втулки подшипника; ξ_0 – радиальный зазор в подшипнике; φ_0 – половина угла зоны контакта вала и втулки; φ – текущий угол зоны контакта; P – нагрузка на подшипник.

Ресурс работы подшипника скольжения T определяется соотношением

$$T = \frac{[h] - \varepsilon_0}{2\pi r_1 n_1 [J_2 + (\varphi_0 / \pi) J_1]},$$

где $[h]$ – суммарный предельно допустимый износ вала и втулки подшипника; ε_0 – радиальный зазор в подшипнике с учетом температуры окружающей среды; $\varepsilon_0 = r_2 - r_1$ (r_2 – радиус втулки, r_1 – радиус вала); n_1 – частота вращения вала; J_1 и J_2 – интенсивности изнашивания материалов вала и втулки подшипника; φ_0 – половина угла зоны контакта вала и втулки под нагрузкой P .

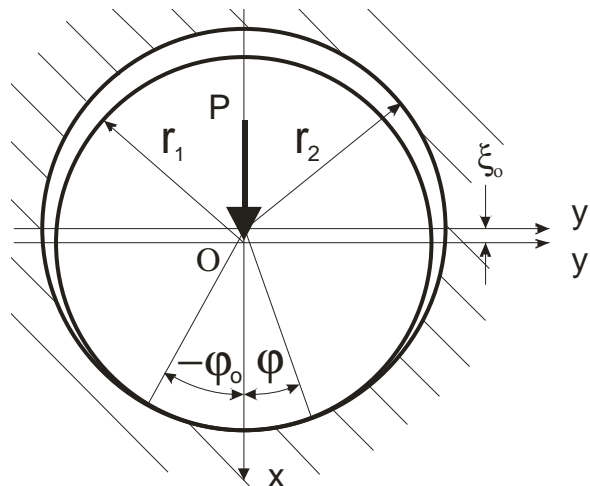


Рис. 1. Подшипник скольжения

Для определения ресурса работы подшипника скольжения необходимо знать геометрические размеры подшипника, режим его работы, триботехнические характеристики материалов подшипника, размер контактной зоны $2\varphi_0$ и величину контактного давления p вдоль нее, а также задаться предельно допустимым износом $[h]$. Контактные параметры сопряжения вал-втулка (подшипника скольжения) определяли из решения контактной задачи теории упругости при внутреннем сжатии двух цилиндрических тел, радиусы которых почти равны между собой. Ресурс работы подшипника скольжения T рассчитывается в следующей последовательности. Исходя из геометрических размеров подшипника, его теплофизических свойств и заданной температуры окружающей среды, определяется радиальный зазор в подшипнике ε_0 при температуре θ . Затем вычисляются угол контакта $2\varphi_0$ и максимальное контактное давление p_{\max} ; находятся интенсивности изнашивания для материалов вала и втулки J_1 и J_2 , и, далее устанавливается ресурс работы подшипника скольжения T .

Список литературы

1. Осико В.В., Алисин В.В., Вишнякова М.А., Игнатъева З.В., Ломонова Е.Е., Павлов В.Г. Трибологические свойства нанокристаллического материала нового поколения на основе диоксида циркония // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 285-289.
2. Żywica G., Olszewski A., Bagiński P., Andrearczyk A., Żochowski T., Klonowicz P. Theoretical analysis and experimental tests of tilting pad journal bearings with shoes made of polymer material and low-boiling liquid lubrication // Tribology International. 2023, vol. 189, p. 108991. doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108991.
3. Chakrapani V. Correlative trends between tribological and electronic properties of dry lubricants: Influence of humidity and dopants // Tribology International. 2023, vol. 177, p. 107951. doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107951.
4. Soleimani S.A., Konstantinidis D., Balomenos G.P. Effects of steel shim geometric characteristics and imperfections on the behavior of unbonded elastomeric bridge bearings subjected to large lateral displacements // Engineering Structures. 2023, vol. 291, p. 116179. doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116179.
5. Павлов В.Г. Расчетная оценка износа, ресурса работы и КПД конической ортогональной прямозубой зубчатой передачи // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2011. – № 5. – С. 44-52.

Сведения об авторе:

Алисин Валерий Васильевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник.