

УДК 621.822.811

## УСЛОВИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЗАЕДАНИЯ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОМ ТРЕНИИ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ

Клебанов Я.М., Москалик А.Д., Бражникова А.М.

Самарский государственный технический университет, г. Самара, Россия, jklebanov@mail.ru

*Ключевые слова: саморазогрев, модель трения, относительное скольжение, мощность тепловыделения, критическое скольжение*

Одной из характеристик гидродинамического контактного взаимодействия деталей подшипников качения является их взаимное проскальзывание. Чрезмерное проскальзывание в контактах тел и дорожек качения часто становится причиной отказов подшипников: возникает перегрев и заедание с последующим прогрессирующим изнашиванием рабочих поверхностей [1]. Целью данной работы явилось определение критической для наступления заедания величины относительного скольжения между телами и дорожками качения подшипника в соответствии с особенностями гидродинамики их контактного взаимодействия. Для ее достижения решались задачи выбора адекватной модели контактного гидродинамического трения, учитывающего саморазогрев масляной пленки, и изучение условий, в которых при работе подшипника может наступить заедание.

В настоящее время имеется два основных подхода к учету саморазогрева контактного масляного слоя при определении реологических характеристик масла. Один из подходов основывается на построении модели контактного трения, частью которой является расчёт мощности тепловыделения в масляной пленке с последующим учётом влияния повышенной температуры на свойства масла. С этой целью учитываются теплофизические свойства и смазки, и контактирующих деталей. Такая модель предложена и экспериментально проверена, например, в работах [2]. В рамках второго подхода предлагается определять реологические характеристики масла по восстановленным изотермическим кривым трения [3]. Такой подход усложняет решение практических задач определения условий контактного взаимодействия и саморазогрева, так как в каждом конкретном случае требует решения связанной задачи контактного трения и теплопроводности как в масляном слое, так и в прилегающих к зоне контакта областях контактирующих деталей.

В вопросе о допустимом, не вызывающем заедание проскальзывании в подшипниках нет единого мнения. Предложенные разными авторами критерии заедания: по максимальному контактному давлению, по предельной толщине масляной пленки [4] и другие [5] были разработаны на основе ограниченных экспериментальных данных и при применении к отличающимся условиям часто показывают нереалистичные результаты.

В работе используется предложенная в [2] модель гидродинамического трения, основанная на обобщенной зависимости Эйринга. Для практических расчетов гидродинамического коэффициента трения  $\mu_{hd}$  в [2] была получена следующая зависимость:

$$\mu_{hd} = \frac{\tau_0}{p} S,$$

где  $\bar{p}$  – среднее давление Герца;  $\tau_0$  – характеристическое напряжение, соответствующее началу неньютоновского поведения жидкости;  $S$  – безразмерное напряжение сдвига. При его определении в модели учитывается саморазогрев масляной пленки.

Полученные на машине трения экспериментальные кривые зависимости коэффициента трения от относительного скольжения – отношения скорости скольжения в контакте к скорости качения – строятся для постоянной величины скорости качения. Они разделяются на три зоны. Область малого относительного скольжения является линейной. Во второй, нелинейной зоне коэффициент трения растёт до достижения максимального значения. В третьей зоне коэффициент трения постепенно уменьшается, поскольку в результате саморазогрева в контакте происходит снижение вязкости смазки и изменение ее структуры. Эта зона называется термической. Уменьшение коэффициента трения с ростом относительного скольжения в термической зоне на экспериментальных кривых трения вызвано ростом мощности тепловыделения.

При работе роликового или шарикового подшипника скорость качения в контактах тел и дорожек качения не является постоянной. Однако и в этих условиях увеличение относительного скольжения сопровождается увеличением мощности самовыделения в контактах. Рассмотрим в качестве примера роликовый подшипник с цилиндрическими роликами с вращающимся с постоянной скоростью внутренним кольцом и неподвижным наружным. Нетрудно получить, что изменение мощности тепловыделения в контакте между внутренним кольцом и роликом описывается зависимостью

$$\frac{dN_i}{ds_i} = Q\mu_{hd} \frac{2s_i[\omega_i R_i(1-\varphi) + \varphi v_o]}{2+s_i(1-2\varphi)} \left\{ \frac{1}{\mu_{hd}} \frac{d\mu_{hd}}{ds_i} + \frac{2}{s_i[2+s_i(1-2\varphi)]} \right\},$$

где  $Q$  – нормальная сила;  $v_o$  – скорость скольжения в контакте ролика и наружного кольца;  $s_i$  – относительное скольжение в контакте ролика и внутреннего кольца;  $\omega_i$  – угловая скорость внутреннего кольца; параметр  $\varphi = R_i/(2R_m)$ ;  $R_i$  – радиус дорожки качения внутреннего кольца;  $R_m$  – радиус окружности центров роликов.

Для типовых размеров рассматриваемых подшипников условие  $dN_i/ds_i > 0$  выполняется при  $s_i < 0,9$ .

Изменение мощности тепловыделения в контакте между наружным кольцом и роликом описывается зависимостью

$$\frac{dN_o}{ds_o} = Q\mu_{hd} \frac{2s_o(1-\varphi)[\omega_i R_i - v_i]}{2+s_o(1-2\varphi)} \left\{ \frac{1}{\mu_{hd}} \frac{d\mu_{hd}}{ds_o} + \frac{2}{s_o[2+s_o(1-2\varphi)]} \right\},$$

где  $v_i$  – скорость скольжения в контакте ролика и внутреннего кольца;  $s_o$  – относительное скольжение в контакте ролика и наружного кольца.

Из этих зависимостей видно, что при одинаковых значениях нормальной силы, относительного скольжения и коэффициента трения выполняется неравенство  $dN_i/ds_i > dN_o/ds_o$ . Таким образом, условия контакта между роликами и внутренним кольцом в большей степени способствуют росту мощности тепловыделения, чем условия контакта между роликами и наружным кольцом. Кроме того, результаты экспериментальных и теоретических исследований показывают, что при работе подшипников с вращающимся внутренним и

неподвижным наружным кольцами относительное скольжение на внутреннем кольце заметно выше, чем на наружном. Оба эти обстоятельства указывают на существенно более высокую опасность заедания на внутреннем кольце, чем на наружном, что подтверждается статистикой отказов подшипников качения.

Работа подшипника в термической зоне является недопустимой: уменьшение коэффициента трения с ростом скольжения при работе подшипника в свою очередь приводит к ещё большему относительному скольжению и увеличению тепловыделения. Процесс с такой положительной обратной связью сопровождается уменьшением толщины масляного слоя и, если его не прервать, неизбежно приводит к граничному трению и заеданию. Для исключения работы подшипника в термической зоне необходимо, чтобы относительное скольжение в подшипнике при работе было бы меньше критической величины, которая на кривой трения соответствует максимальному значению коэффициента трения и началу термической зоны.

### Список литературы

1. Ган, К.Г. Методика расчета минимально допустимой нагрузки в скоростных малонагруженных подшипниках качения / К.Г. Ган // Вестник МГТУ, серия Машиностроение. - 1994. – №1. – С. 32-38.
2. Murak, I.M. Molecular structure of synthetic hydrocarbon oils and their rheological properties governing traction characteristics / M.I. Muraki // Tribology International. – 1987. – Vol. 20. – No. 6. – P. 347-354.
3. Zhang, J. Effect of base oil structure on elastohydrodynamic friction / J. Zhang, A. Tan, H. Spikes // Tribology Letters. – 2017. – Vol. 65. – No. 1. – P. 1-24.
4. Иванов, Б.А. Оценка противозадирной стойкости подшипниковых узлов качения при высоких частотах вращения / Б.А. Иванов // Динамика и прочность механических систем. Пермь: Издательство ППИ, 1982. – С. 3-6.
5. Morales-Espejel, G.E. Rolling bearing seizure and sliding effects on fatigue life / G.E. Morales-Espejel, A. Gabelli // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2019. – Vol. 233. – No. 2. – P. 339-354.

### Сведения об авторах

Клебанов Яков Мордухович, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, прочность машин и конструкций, методы компьютерного моделирования.

Москалик Анна Давидовна, к.т.н., доцент. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, методы компьютерного моделирования.

Бражникова Александра Максимовна, ассистент. Область научных интересов: механика деформируемого твердого тела, методы компьютерного моделирования.

## SEIZING FORMATION CONDITIONS AT HYDRODYNAMIC FRICTION IN ROLLING BEARINGS

Klebanov I.M., Moskalik A.D., Brazhnikova A.M.  
Samara State Technical University, Samara, Russia

*Keywords: self-heating, friction model, slide-roll ratio, frictional power loss, critical sliding.*

Excessive sliding in the contacts of rolling elements and raceways causes bearing failures. The purpose of this work was to determine the value of the slide-roll ratio between the rolling elements and the raceways critical for the onset of seizing. The tasks of choosing an adequate model of contact hydrodynamic friction were solved. It is shown that the operation of the bearing in the thermal zone inevitably leads to seizing.