

С. Г. Докшанин, И. И. Докшанина

**СНИЖЕНИЕ КОНТАКТНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОДШИПНИКАХ КАЧЕНИЯ
ЗА СЧЕТ ПРИМЕНЕНИЯ СМАЗОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ С НАНОЧАСТИЦАМИ**

Рассмотрена возможность повышения долговечности подшипников качения за счет использования пластичных смазочных материалов с наночастицами, снижающих контактные напряжения на дорожке качения. Приведен анализ результатов распределения нормальных и касательных напряжений на площадке контакта в роликовом подшипнике качения.

Вопрос повышения долговечности и надежности опор качения требует изучения явлений, протекающих в зоне контакта и определяющих процессы усталостного разрушения. Типичной причиной потери работоспособности подшипников качения при нормальных условиях эксплуатации является усталостное выкрашивание поверхностей качения. Циклически изменяющиеся контактные нагрузки передаются через малые площадки контакта, и возникающие на них напряжения достигают больших значений, которые могут превышать пределы прочности материалов контактирующих деталей.

Большое влияние на характер поверхностных повреждений оказывают силы трения. Установление степени влияния этих сил на усталостные процессы при качении под нагрузкой позволило бы разработать меры по повышению долговечности опор качения для эффективного использования машин и механизмов.

Существенное влияние на расчет напряженного состояния оказывают касательные нагрузки, зависящие от действующих сил трения. Формулы Герца, которыми пользуются в расчетах, не учитывают воздействие значительных касательных сил. Между тем они меняют вид напряженного состояния в зоне контакта, и при увеличении силы трения происходит повышение контактных напряжений и их перемещение ближе к поверхности контакта [1; 2].

В этом случае наиболее корректной расчетной схемой является рассмотрение одновременного действия нормальных и тангенциальных напряжений, действующих на площадке контакта. Материал в поверхностном слое в первом приближении рассматривается как упругий, а условия деформирования поверхностного слоя удовлетворяют гипотезе об упругих свойствах материала.

Максимальные касательные напряжения, связанные с увеличением силы трения, повышают значения нормальных напряжений на площадке контакта. Такой рост приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей. При этом скорость процесса изнашивания будут зависеть от свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки. Предполагается, что в зоне контакта выполняется закон трения Кулона–Амонтона, в соответствии с которым каса-

тельные и нормальные нагрузки связаны зависимостью [3]

$$|\tau(x)| = \mu \cdot |p(x)|,$$

где $|\tau(x)|$ – тангенциальные контактные нагрузки; $|p(x)|$ – контактные давления; μ – коэффициент трения.

Усталостное разрушение деталей подшипника в большинстве случаев начинается на поверхности. Снижение силы трения на контакте меняет форму образования усталостных трещин на глубинную, что увеличивает время до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников.

Немаловажная роль в этом случае отводится смазочным материалам. Их применение в подшипниках качения преследует такие цели, как уменьшение трения и износа поверхностей трущихся деталей подшипников, отвод выделяемого тепла и защита поверхностей от коррозии. Наиболее важным из них является уменьшение сил трения в зоне контакта, однако механизм смазочного действия может быть различным и зависеть от условий контактирования. Анализ использования пластичных смазочных материалов в подшипниках качения дает основание полагать, что данный вопрос до сих пор остается нерешенным. Большое количество видов подшипников качения, а также многообразие сочетаний условий эксплуатации подшипниковых опор не позволяет сформировать конкретные указания по применению смазочного материала.

Условия смазки оказывают важное влияние как на усталостное выкрашивание, так и на другие виды износа. Очевидно, что имеет место наличие определенной связи между эксплуатационными свойствами смазочных материалов, изнашиванием контактирующих поверхностей и контактными нагрузками. Хорошие антифрикционные свойства способствуют снижению коэффициента трения, приводя тем самым к уменьшению касательных напряжений. А это в свою очередь снижает склонность поверхностей к выкрашиванию.

Повышающиеся требования к эксплуатационным свойствам смазочных материалов, применяемых в узлах с трением качения, а также появ-

ление современных нанофазных материалов способствовали появлению нового направления в создании смазочных материалов с улучшенными свойствами. Основные цели введения в пластичные смазочные материалы подобных добавок – улучшение смазочной способности, увеличение прочности смазочного слоя в зоне контакта, повышение герметизирующих и защитных свойств, снижение коэффициента трения и износа деталей подшипников качения.

Одним из наиболее перспективных направлений создания смазочных материалов с наномодификаторами является использование наночастиц в качестве носителей функциональных добавок. Эффективность применения таких порошков является основанием для более детального их изучения [4; 5]. В настоящее время сложилось несколько представлений о механизме действия нанопорошков, а именно:

- частицы заполняют микровпадины трущихся поверхностей, увеличивая фактическую площадь контакта и повышая адгезионную способность смазочного материала;
- малые размеры частиц обладают высокой активностью, что способствует повышению адгезии и образованию прочной пленки из частиц;
- свободные частицы порошка образуют несущий слой смазочного материала, обладающий большим пределом прочности;
- наличие твердых частиц в смазочном материале приводит к образованию на поверхности трения защитного слоя, препятствующего адгезионному схватыванию;
- частицы способствуют быстрому процессу приработки поверхностей за счет своих абразивных свойств.

Такие объяснения в полной мере можно отнести лишь к поверхностным процессам, происходящим на границе раздела смазочного материала и трущихся поверхностей, и в меньшей степени – к влиянию размера частиц на свойства нанопорошков. Кроме того, следует учесть и возможность воздействия порошка на поверхностные слои материала.

Ниже будут приведены некоторые результаты исследований, установившие влияние пластичных смазочных материалов с углеродосодержащими добавками ультрадисперсного порошка алмазографита (УДПАГ) на снижение контактных напряжений, определяющих долговечность подшипников качения. Добавка с размером частиц 40...100 нм получена методом детонационного синтеза в среде углекислого газа. Для ультрадисперсного алмазографита, в отличие от широко применяемых порошковых добавок, характерна высокая адгезия к металлическим поверхностям за счет повышенной поверхностной энергии, что способствует удержанию слоя смазочного материала на поверхности трения. Таким образом, частицы будут прочно удерживать молекулярный

смазочный слой на поверхностях трения, создавая своего рода защитный экран.

Смазочные свойства и эффективность использования таких смазочных материалов в подшипниках оценивались по величине моментов трения, интенсивности изнашивания подшипников качения, реологических характеристик новых смазочных композиций и другим параметрам. Для смазочных композиций был выбран широко применяемый пластичный смазочный материал Литол-24. Концентрация УДПАГ в базовой смазке бралась в диапазоне от 0,5 до 5 массовых процентов. Испытания выполнялись на лабораторных установках, моделирующих работу подшипникового узла при однонаправленном вращении подшипника. Образцами служили роликоподшипники типа 32206, радиальная нагрузка – 2 кН, частота вращения – 960 об/мин.

По результатам экспериментов было установлено, что введение добавки УДПАГ в пластичный смазочный материал Литол-24 снижает величину момента трения на 31...33 %, износа подшипников – в 1,2...1,5 раза, а температуру подшипникового узла – на 16 % по сравнению с базовой смазкой.

Для определения влияния добавки на напряженное состояние была рассмотрена компьютерная модель контакта ролика с дорожкой качения. Расчетная схема (рис. 1) принята на основе анализа многочисленных работ, в которых рассматриваются вопросы качения тел.

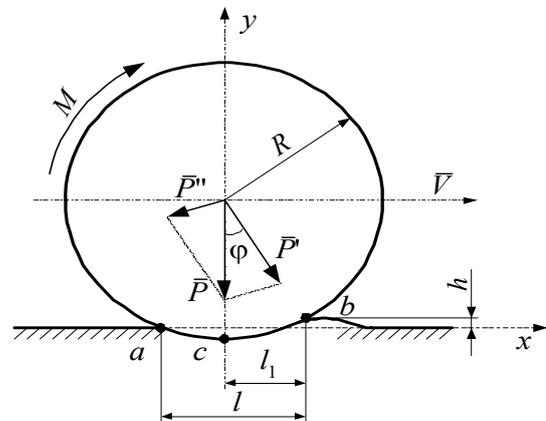


Рис. 1. Схема контакта ролика при качении по упругому основанию

Площадка контакта ab длины l состоит из двух участков: ac – участка с проскальзыванием контактирующих поверхностей (на этом участке касательные напряжения пропорциональны нормальному давлению) и bc – участка сцепления, где скорости цилиндра и поверхности равны. При наличии силы трения на участке скольжения l_1 точка, в которой касательные напряжения достигают максимального значения, перемещается к поверхности в направлении действия силы трения. Растягивающие напряжения σ_r в точке a имеют наибольшую величину, в связи с чем абсо-

лютный максимум срезающих напряжений располагается непосредственно на поверхности или на небольшой глубине под ней. Поэтому усталостное разрушение начинается с поверхности трения. Его можно уменьшить за счет применения смазочных композиций, которые, наряду со снижением силы трения, модифицируют поверхности трения, снижая контактные нагрузки, а следовательно, и напряжения в материале.

Компьютерная модель была выполнена с помощью программного пакета ELCUT, способного рассматривать плоские двумерные поля методом конечных элементов (рис. 2). Этот пакет позволяет решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряженного состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов.

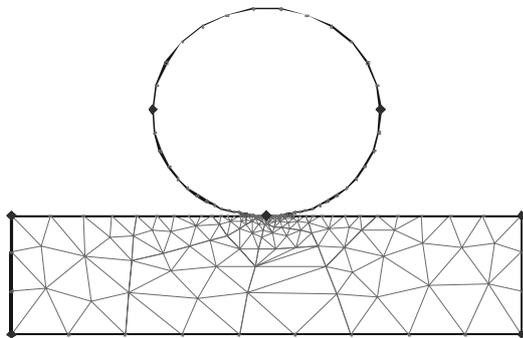


Рис. 2. Сетка конечных элементов модели контакта

Для составления компьютерной модели авторы рассматривали контакт, возникающий при качении с проскальзыванием ролика по упругому основанию. Для решаемой плоской задачи соответствующие напряжения определялись компонентами в каждой точке:

$$\{\sigma\} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}.$$

В зоне контакта имеется герцевская площадка прямоугольной формы, образованная вследствие упругих деформаций, полуширина a которой находилась по формуле [6]

$$a = 0,798 \sqrt{2pR(\Theta_1 + \Theta_2)},$$

где R – радиус ролика; $\Theta_i = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}$ – коэффициент; p – нагрузка; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

Условия, определяющие площадку контакта между двумя скользящими телами, для такой схемы представлены системой уравнений [2]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -q(x) = -\frac{q_0}{a} (a^2 - x^2)^{\frac{1}{2}}, \\ \tau_{xz} &= -\mu q(x), \end{aligned} \right\} z = 0, \quad -a \leq x \leq a,$$

где μ – коэффициент трения; a – полуширина площадки контакта; q_0 – давление в центре площадки; $\tau(x)$ – тангенциальное напряжение на площади контакта; $p(x)$ – нормальное напряжение.

Представим графики распределения касательных и нормальных напряжений, полученные при реализации модели упругого контакта ролика с плоскостью (рис. 3, 4). Значения сил трения, соответствующие действующим на поверхности касательным нагрузкам, взяты по экспериментальным данным для смазочной композиции на основе смазочного материала Литол-24 с концентрацией ультрадисперсного порошка алмазографита 1 массовый процент.

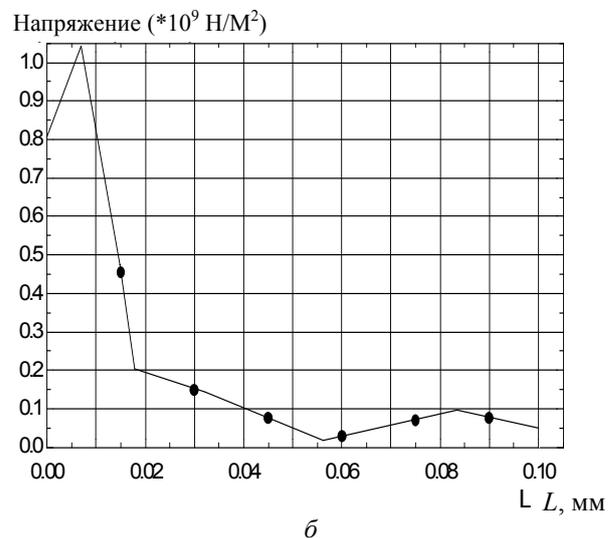
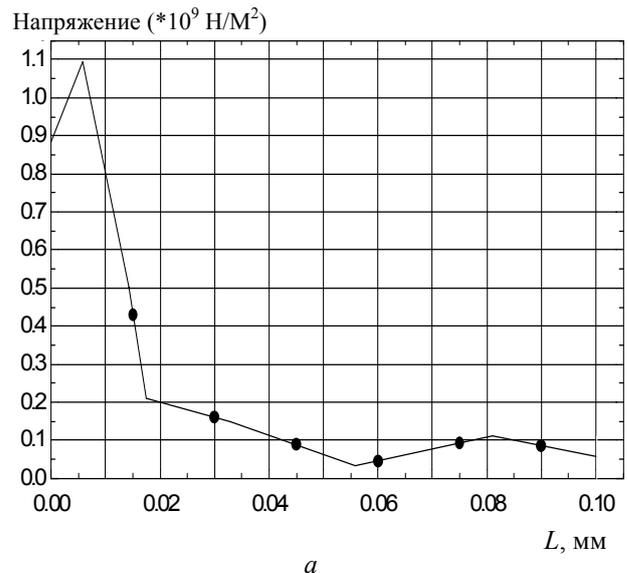


Рис. 3. Распределение касательных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала Литол-24 без добавки (а) и с добавкой УДПАГ (б)

При использовании смазочных композиций с ультрадисперсным алмазографитом величина поверхностных касательных напряжений на дорожке качения уменьшается, при этом увеличивается глубина, на которой действуют максимальные τ_{\max} касательные напряжения (см. рис. 3).

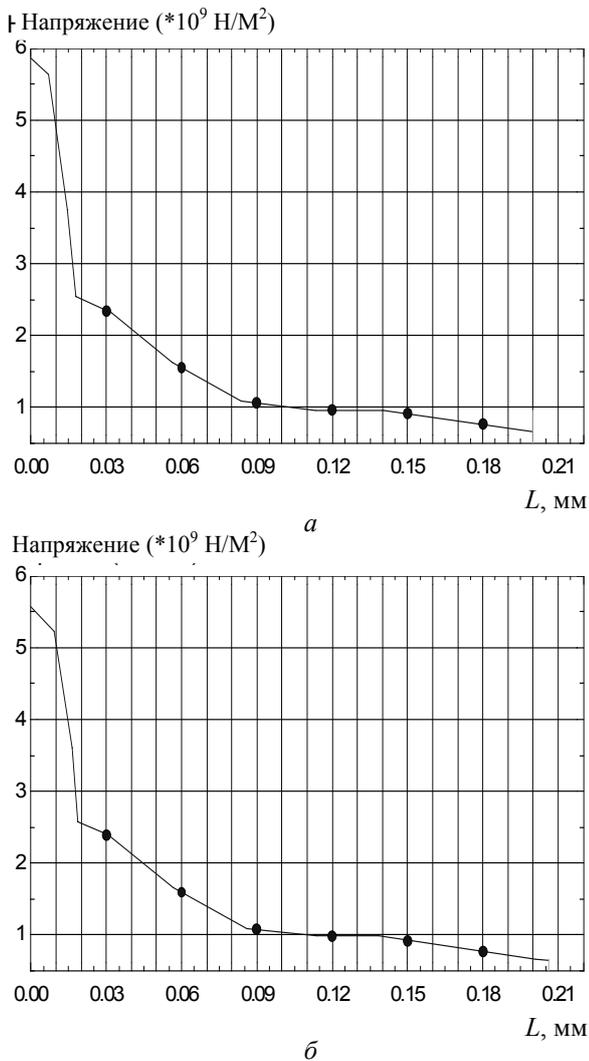


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала Литол-24 без добавки (а) и с добавкой УДПАГ (б)

Нормальные напряжения определялись по критерию прочности Мора (см. рис. 4). В соответствии с этим критерием условие разрушения зависит как от нормальных, так и от касательных

напряжений на площадке контакта. Как показывают результаты моделирования, наличие в зоне контакта пластичной смазки с добавкой УДПАГ снижает величину нормального напряжения, по сравнению со смазками-основами, на 13...15 %.

Таким образом, многочисленные лабораторные исследования и данные эксплуатационных испытаний, расчетные значения долговечности подшипников качения, а также результаты моделирования позволяют говорить о том, что пластичные смазки с добавкой ультрадисперсного порошка алмазографита способны в 1,5...2 раза увеличить срок службы подшипникового узла.

Библиографический список

1. Влияние внешних факторов на контактную прочность при качении / С. В. Пинегин, И. А. Шевелев, М. В. Гудченко и др. М. : Наука, 1975. 102 с.
2. Махутов, Н. А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность : в 2 ч. / Н. А. Махутов. Ч. 1. Новосибирск : Наука Сиб. отделение, 2005. 494 с.
3. Горячева, И. Г. Механика фрикционного взаимодействия / И. Г. Горячева. М. : Наука, 2001. 478 с.
4. О влиянии ультрадисперсных наполнителей на реологические свойства пластичных смазок / В. В. Жевнов, В. А. Смуругов, И. О. Деликатная и др. // Трение и износ. 2001. № 6. (22). С. 699–702.
5. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты, Г. А. Костюкович, А. А. Скаскевич и др. // Трение и износ. 2002. № 4 (25). С. 411–424.
6. Биргер, И. А. Расчет на прочность деталей машин : справ. / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, Г. Б. Иосилевич. М. : Машиностроение, 1993. 640 с.

S. G. Dokshanin, I. I. Dokshanina

DECREASING OF THE CONTACT VOLTAGE IN ROLLING BEARING USING LUBRICANTS WITH NANOPARTICLES

The possibility of increasing the durability of rolling bearings using elastic lubricants with nanoparticles, which decrease the contact voltage on the rolling surface is considered. The results of the analysis of distribution of normals and tangent voltage on the contact area of the rolling bearing are presented.