

ТЕХНОЛОГИЯ



МАШИНОСТРОЕНИЯ

**ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ**

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:**

Гл. редактор

В. А. Казаков

Зам. гл. редактора

Н. В. Посметная

Н. П. Бирюкова
Р. С. Голов
В. Д. Горбач
С. Н. Григорьев
Б. В. Гусев
А. В. Дуб
В. М. Ермаков
А. С. Зубченко
А. В. Иванайский
Е. А. Калашников
В. В. Капустин
А. Л. Карунин
И. П. Ксенович
А. Е. Лигачев
А. А. Лозован
В. П. Лялякин
А. В. Медарь
Б. А. Никитин
Г. В. Самодуров
В. Н. Семенов
О. С. Сироткин
А. К. Скворчевский
Н. В. Смирнов
А. В. Телушкин
А. Н. Феофанов
В. А. Фролов
В. К. Шелег
И. Н. Шиганов

Редакция:

С. В. Богус,

Л. Т. Мартыненко,

Т. П. Маслик

Компьютерная верстка:

Е. В. Конова

Дизайн обложки:

Е. С. Благовидов

*Специальные
корреспонденты:*

А. Н. Иванов, А. В. Казаков,

Ан. А. Суслев

Редактор-переводчик

Е. О. Егорова

Корректор

Е. В. Комиссарова

**9 (75)
Сентябрь
2008**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр

"Технология машиностроения"

Журнал издается при содействии

Министерства промышленности

и торговли РФ,

Министерства образования и науки РФ,

Российской инженерной академии,

Союза машиностроителей России,

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:

129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

Бухгалтерия: 8 910 414 9184

E-mail: tm@folium.ru

(с пометкой для журнала

"Технология машиностроения")

[Http://www.tm.folium.ru](http://www.tm.folium.ru)

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-7779

**Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для
публикации трудов соискателей ученых степеней**

*Перепечатка материалов из журнала "Технология машиностроения" возможна
при обязательном согласовании с редакцией журнала*

*При перепечатке материалов ссылка
на журнал "Технология машиностроения" обязательна*

С. Г. ДОКШАНИН, канд. техн. наук, И. И. ДОКШАНИНА, аспирант
Сибирский федеральный университет

Моделирование контактных напряжений на поверхности качения с учетом сил трения

Касательные нагрузки, действующие на площадке контакта и зависящие от сил трения, существенно влияют на расчет напряженного состояния. Максимальные касательные напряжения, связанные с увеличением силы трения, повышают нормальные напряжения, что приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей. При этом скорость процесса изнашивания будет зависеть от свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки, разделяющей поверхности. Анализ напряженно-деформационного состояния контактирующих тел показывает, что при одновременном действии касательных и нормальных нагрузок наиболее значимыми для определения долговечности подшипников качения по критерию усталостного изнашивания являются не глубинные максимальные касательные напряжения, а поверхностные напряжения на контуре контакта, непосредственно связанные с силами трения. Установление степени влияния этих сил на усталостные процессы позволило бы разработать меры для повышения срока службы опор качения, работающих при значительных касательных нагрузках.

Данная работа является частью комплекса лабораторных исследований, связанных с повышением долговечности опор качения за счет применения в них смазочных материалов с добавками ультрадисперсного алмазографита. Эти добавки характеризуются высокой адгезионной способностью к металлическим поверхностям, вследствие чего слой смазочного материала прочно удерживается на поверхности трения, создавая за-

щитный экран и воспринимающая на себя основную долю касательной нагрузки. Снижение силы трения на контакте будет менять форму образования усталостных трещин на глубинное, что увеличивает время эксплуатации подшипников опор до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников. Применение смазочных материалов с такими антифрикционными свойствами в подшипниках качения способствует уменьшению трения и износа поверхностей, отводу выделяемой теплоты и защите поверхностей от коррозии.

Для разработки компьютерной модели контакта ролика с дорожкой качения использовали программный пакет ELCUT, позволяющий решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряженного состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов.

Рассматривали контакт, возникающий во время качения с проскальзыванием ролика по упругому основанию. Базируясь на положениях герцевской и упругогидродинамической теории контакта, а также учитывая условия работы роликовых подшипников качения для различных узлов, рассматривали задачу о контакте тел качения в роликовом подшипнике для режима граничного трения. Контактные поверхности задавали между роликом и поверхностью качения внутреннего кольца. В зоне контакта имеется герцевская площадка прямоугольной формы шириной $2b$ и длиной l , равной длине ролика, образованная упругими деформациями (рис. 1) и состоящая из двух участков. Участок II, расположенный на стороне набегания цилиндра, является зоной сцепления, а участок I — зоной, где имеет место проскальзывание контактирующих поверхностей. Координату точки c , разделяющей эти две зоны, определяли по формуле [1]

где b — полуширина площадки контакта, определенной по формулам Герца; f — коэффициент трения скольжения; ν — коэффициент Пуассона.

Расчетная схема состоит из двух блоков — ролика и дорожки качения. Каждый блок разбивали на ребра и вершины, к которым прикладывали действующие точечные или поверхностные нагрузки. Значения напряжений в упругом контакте ролика с поверхностью при наличии граничного слоя смазочного материала определяли как вдоль площадки контакта, так и по глубине по центру площадки. Условия, определяющие нагружение площадки контакта между

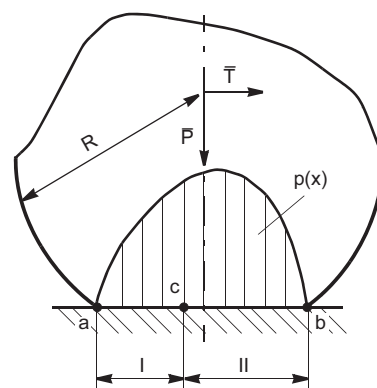


Рис. 1. Схема контакта ролика при качении по упругому основанию

двумя скользящими телами, для такой схемы представлены системой уравнений [2, 3]

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

где a — полуширина площадки контакта; x — расстояние от центра площадки до точки приложения нагрузки; q_0 — давление в центре площадки; τ_{xz} — тангенциальное напряжение на площадке контакта; $q(x)$ — нормальное напряжение.

Значения коэффициентов трения определяли экспериментально при исследовании ультрадисперсных порошков алмазографита в качестве антифрикционных добавок к смазочным материалам и их влияния на силу трения при условии проскальзывания ролика. Исходным и основным расчетным напряжением принимали максимальные касательные напряжения τ_{max} .

При наличии на участке скольжения силы трения точка, в которой касательные напряжения достигают максимального значения, перемещается к поверхности в направлении действия силы трения. Увеличение сил трения на участке скольжения приводит к перемещению максимальных касательных напряжений к поверхности в направлении действия силы трения, при этом максимальные срезающие напряжения будут располагаться на небольшой глубине или непосредственно на поверхности [4]. На рис. 2 приведены полученные с помощью компьютерной модели поля распределения касательных напряжений по глубине дорожки.

Значения сил трения, соответствующие действующим на поверхности касательным нагрузкам, взяты для коэффициентов трения 0,09 и 0,11. Наименьший коэффициент трения соответствовал скольжению при наличии смазочного материала с добавкой ультрадисперсного алмазографита (УДПАГ). Более темные области, соответствующие максимуму касательных напряжений, с увеличением

коэффициента трения смещаются ближе к поверхности.

Если абсолютный максимум касательных напряжений будет располагаться непосредственно на поверхности или на небольшой глубине под ней, то усталостное разрушение начинается с поверхности трения. Его можно уменьшить при применении смазочных материалов, которые наряду со снижением силы трения модифицируют поверхности трения, снижая контактные нагрузки, а следовательно, и напряжения в материале. Именно такой эффект отмечали при использовании в подшипниках качения смазочных материалов с добавками ультрадисперсного алмазографита.

На рис. 3, 4 приведено распределение касательных и нормальных напряжений, полученное при реализации компьютерной модели упругого контакта ролика с плоскостью в подшипнике качения. Значения сил трения, соответствующие действующим на поверхности касательным нагрузкам, взяты на основе экспериментальных данных для смазочных композиций на базе Литол-24 и ЦИАТИМ-201 с содержанием ультрадисперсного порошка алмазографита 1 %, радиальная нагрузка составляла 2,5 кН, частота вращения внутреннего кольца — 1200 об/мин.

Результаты исследования показали, что использование смазочных композиций с ультрадисперс-

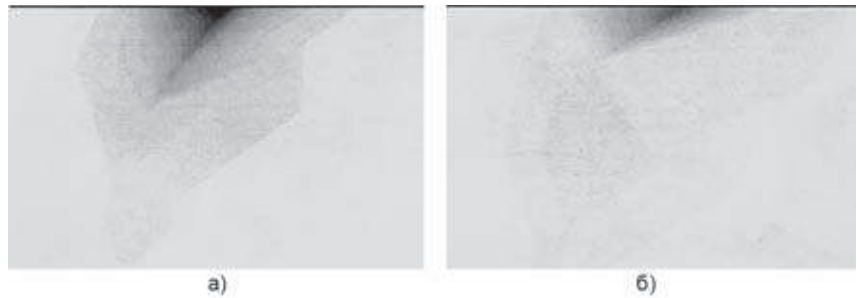


Рис. 2. Поля распределения касательных напряжений по глубине: а, б — коэффициент трения f равен 0,094 и 0,11 соответственно

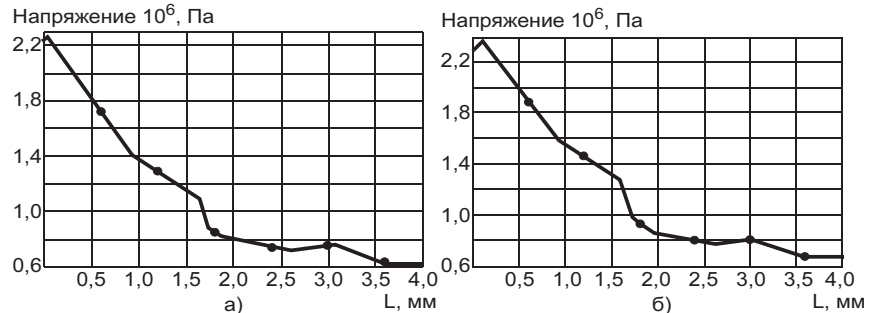


Рис. 3. Распределение касательных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала ЦИАТИМ-201 с добавкой (а) и без добавки (б) УДПАГ

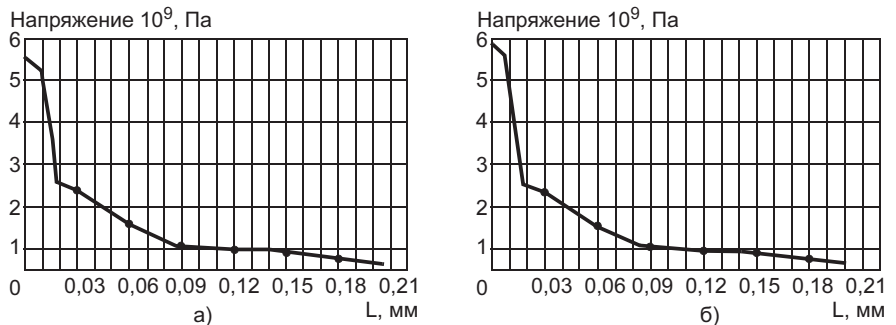


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала Литол-24: а, б — см. рис. 3

ным алмазграфитом снижает поверхностные касательные напряжения на дорожке качения. Анализ результатов моделирования показал, что наличие в зоне контакта пластичной смазки с добавкой УДПАГ снижает нормальное напряжение по сравнению со смазками-основами на 13—15 %.

Таким образом, снижение действующих на площадке контакта сил трения уменьшает поверхно-

стные касательные напряжения на участке проскальзывания площадки контакта, что положительно сказывается на долговечности опор качения. Результаты экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний показали, что применение таких смазочных материалов позволяет увеличить срок службы подшипникового узла в 1,5—2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинегин С. В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.
2. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
3. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
4. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.

Е. Г. СИНЕНКО, канд. техн. наук, Д. Д. АБАЗИН, инж., О. В. КОНИЩЕВА, канд. техн. наук
Сибирский федеральный университет

Кинематика и динамика зубчатого эксцентричного дифференциала

В различных отраслях промышленности для воспроизведения заданной траектории движения либо для изменения и разложения скоростей вращения применяют соосные дифференциальные механизмы. Известен эксцентричный дифференциал¹, в котором применены сателлиты разных диаметров, вследствие чего оси центральных колес смещаются друг относительно друга на некоторую величину (эксцентриситет e), а выходное звено получает дополнительно сложное вращательно-вращательное движение (см. рисунок). При этом ось водила H может совпадать с осью колеса 3 или с осью колеса 1, а сателлиты имеют различные размеры r_{21} и r_{24} . При анализе кинематики и динамики эксцентричного механизма удобно рассматривать механизм с двумя сателлитами, хотя реально их может быть 3, 4, 5 и 6. Основной задачей исследования эксцентричного механизма является определение траекторий движения отдельных точек сателлитов, колес 3 и 1 и закона движения выходных звеньев φ_H и φ_3 .

Определим положения точек сателлитов и центральных колес (т. A, B, C, D) в неподвижной системе координат. Положение т. A колеса 3 определится следующим образом:

$$R_A = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{bmatrix} = T_3 R_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_3 \cos \varphi_3 \\ r_3 \sin \varphi_3 \\ 1 \end{bmatrix},$$

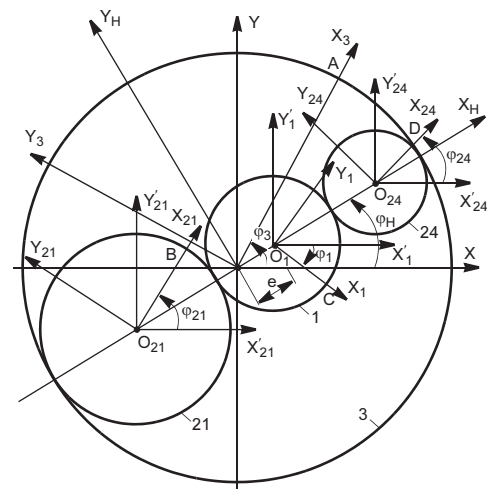
где T_3 — матрица перехода от системы OXY к системе Ox_3y_3 , а координаты т. A равны

$$\begin{cases} x_A = r_3 \cos \varphi_3; \\ y_A = r_3 \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (1)$$

Положение т. B сателлита 21:

$$R_B = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ 1 \end{bmatrix} = T_{21} R_{21} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{21} & -\sin \varphi_{21} & -(r_3 - r_{21}) \cos \varphi_H \\ \sin \varphi_{21} & \cos \varphi_{21} & -(r_3 - r_{21}) \sin \varphi_H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{21} \cos \varphi_{21} - (r_3 - r_{21}) \cos \varphi_H \\ r_{21} \sin \varphi_{21} - (r_3 - r_{21}) \sin \varphi_H \\ 1 \end{bmatrix},$$

где T_{21} — матрица перехода от неподвижной системы координат OXY к подвижной системе $O_1x_{21}y_{21}$.



Расчетная схема эксцентричного механизма (φ_1, φ_3 — абсолютные углы поворота колес; $\varphi_{21}, \varphi_{24}$ — то же, сателлитов; φ_H — угол поворота водила)

¹ Патент 2153612 (РФ).