
**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

УДК 678.5.046 : 621.762;629.423 : 621.891 + 06

МАКРОКОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОЛИМЕРПОРОШКОВЫЕ ПОДШИПНИКИ© 2019 г. В. А. Кохановский¹, Д. В. Глазунов^{1,*}, И. А. Зориев²¹ ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения», г. Ростов-на Дону, Россия² «Ростелеком», г. Ростов-на-Дону, Россия

* e-mail: glazunovdm@yandex.ru

Поступила в редакцию 04.05.2017 г.

Принята к публикации 24.12.2018 г.

В статье описана разработанная конструкция упорного подшипника. Данная конструкция испытана при работе специализированного смесителя эпоксидных компаундов. Конструкция упорного подшипника полностью подтвердила свои высокие триботехнические характеристики и ресурс работы в режиме самосмазывания.

Ключевые слова: подшипник скольжения, триботехнические исследования, смазочный материал, графическая интерпретация, режим нагружения, сила трения

DOI: 10.1134/S0235711919020081

Анализ современного состояния рассматриваемой проблемы. Уменьшение сил трения в подшипниках скольжения необходимо, чтобы снизить непроизводительные затраты энергии и износ контактирующих деталей. Для этой цели разработано большое количество различных конструкций опор скольжения, включая пористые порошковые подшипники, пропитанные разнообразными смазочными материалами [1–6]. Выделяясь в результате терморасширения при работе подшипника, смазочный материал обеспечивает смазку рабочей зоны. Основным недостатком подобных опор является их повышенный износ в моменты пуска–выбега, обусловленный дефицитом смазки при пуске, из-за низкой температуры зоны трения, и малой скорости при выбеге, недостаточной для образования гидродинамического клина.

Изложение существа решения проблемы. Описываемая конструкция оригинальных подшипников скольжения [7] имеет комбинированную полимерпорошковую контактную поверхность (рис. 1), отличающуюся от аналогичных решений тем, что она покрывается регулярной сеткой выступов, образованных полимерными вставками.

Увеличивая маслоемкость контактной области, выступы предотвращают сухой контакт металлической поверхности вала и пористого подшипника в момент пуска. Эти вставки оказывают демпфирующее действие, исключая жесткое динамическое контактирование в нестационарных условиях трения при пусках–выбеге (ПВ%). Разработанный подшипник имеет пористую матрицу, спеченную из металлических порошков (ЖГР1; 5Д2.5; К0.8 при П-20%). Вставки выполнены из полиамида ВА6 210/310. Таким образом подшипник представляет собой составную полимерпорошковую

конструкцию. Технология изготовления включает формование и спекание опорной части подшипника (матрицы) необходимого размера. Далее на рабочей поверхности матрицы выполняют расположенные в узлах регулярной сетки конические отверстия заданного диаметра, сужающиеся от наружной поверхности к внутренней. На наружной поверхности матрицы выполняют бандажные канавки, связывающие отверстия и

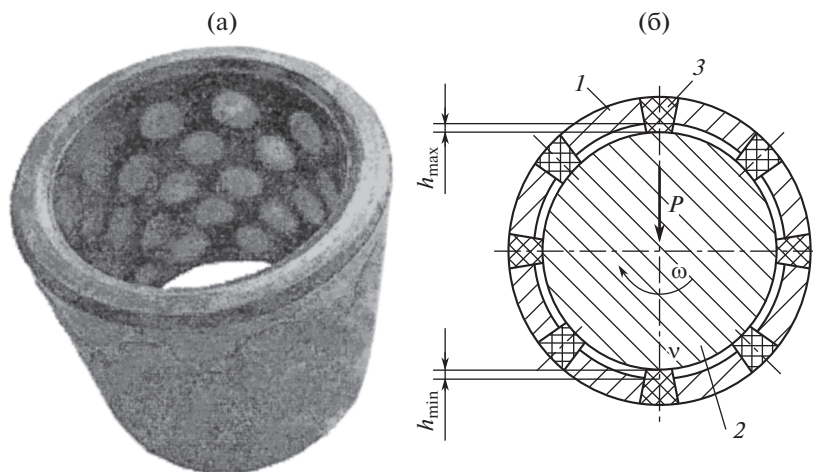


Рис. 1. Полимерпорошковый подшипник (а) общий вид, (б) схема: 1 – порошковая матрица, 2 – вал, 3 – полимерные вставки.

предотвращающие выдавливание вставок из матрицы. Втулка с отверстиями устанавливается в литевную пресс форму и подвергается заливке расплавом полимера. Бандажные канавки также заполняются полимером, что способствует фиксации вставок. Полученную полимерпорошковую конструкцию пропитывают маслом в вакууме. Для обеспечения размерной точности и упрочнения рабочей поверхности опорную втулку радиального подшипника дорнуют в жесткой обойме с определенной степенью деформации. При изготовлении упорных подшипников используется обработка поверхностным пластическим деформированием методом выглаживания. Ее результатом является образование полимерных выступов микронной высоты. Из-за различной величины пластических деформаций спеченной пористой матрицы и полимерного материала (пористая матрица при малых степенях деформации деформируется пластически, а полимер упруго) полимерные вставки выступают над рабочей поверхностью подшипника.

Параметрами, определяющими работоспособность подобных подшипников скольжения, являются температура и толщина разделительной смазочной пленки, характеризующая режим жидкостной смазки. В подшипниках скольжения разделение трущихся поверхностей вкладыша и вала наступает при толщине смазочного слоя $h_{кр}$ равной 0.1–0.3 мкм. Работа таких подшипников устойчива при соблюдении условия $h_{мин} > h_{кр} + 2$ мкм. Контактное трение вызывает разогрев матрицы и смазочного материала, активируя выделение смазки из пор, что создает устойчивую разделительную пленку в течение всего времени работы трибоузла. Упруговосстанавливающие свою форму полимерные выступы являются армирующими элементами разделительной пленки. Их высота соизмерима с толщиной пленки и может меняться для различных конструкций и типоразмеров от единиц мкм до 20 мкм. При пуске вала, поддерживаемый полимером, не имеет фрикционного контакта с пористой матрицей, что исключает пусковой износ. Износ при выбеге устраняется за счет демпфирования и упругой поддержки вала полимером. Исследования разработанной конструкции проводились на триботехническом компьютеризированном испытательном комплексе Т11 (трение по схеме “палец–диск”). Машина трения Т-11 предназначена для определения трибологических свойств материалов таких как металлы, пластики, керамики, покрытия в

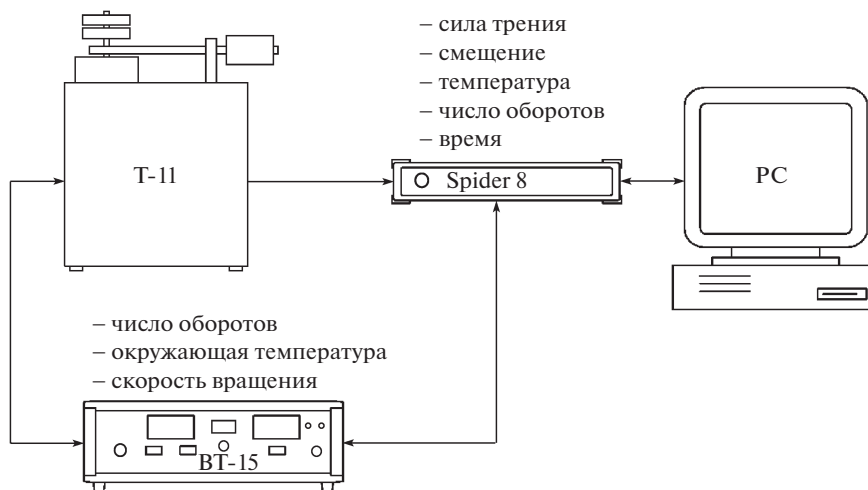


Рис. 2. Структура установки Т-11.

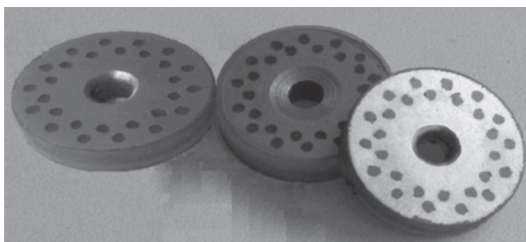


Рис. 3. Опорные элементы образцов упорных подшипников скольжения.

условиях сухого трения или со смазкой в воздушной среде или в среде других газов, при комнатной или более высокой температуре. Трибологические исследования на машине Т-11 соответствуют стандарту ASDTM G 99-90 “Стандартный метод испытания на износ при трении стержня о поверхность диска”. Трибологическая установка Т-11 включает (рис. 2): машину Т-11 с датчиком и системой управления ВТ-15, аналого-цифровой преобразователь – усилитель Spider 8, персональный компьютер (PC) с работающей программой Т-11-в2, которая принимает от пользователя скрипты, обрабатываемые затем компьютерной программой Catman v.4.5 rel.1.

Полнофункциональная система Т-11 позволяет измерять, захватывать, сохранять, демонстрировать на экране и печатать данные: о силе трения, о перемещении стержня в процессе трения, о температуре держателя стержня/шарика, о времени, а также задавать число оборотов, окружающую температуру в испытательной камере, скорость вращения образца. Измеряемые сигналы преобразуются соответствующими датчиками, и через соединительные кабели подаются на ВТ-15 и Spider8, который преобразует их в цифровую форму и передает на компьютер. Скрипт Т-11-в2 позволяет сохранить, затем отпечатать или выдать на экран захваченные данные.

Образцы представляли собой порошковые диски с полимерными вставками (рис. 3).

Жидкий смазочный материал подавали непосредственно под контртело, представляющее собой призматический палец со скосом для перехода в гидродинамический режим. В процессе эксперимента регистрировали следующие параметры: силу трения, температуру и толщину масляной пленки. Регистрируемые параметры обрабатыва-

лись в реальном времени компьютерной информационно-измерительной системой машины трения. Испытания проводились в диапазоне нагрузок 20...50 Н, скоростей 0.5...1.0 м/с, пути трения 3000...6000 м. Установленный в экспериментах темп изменения толщины масляной пленки при пуске машины трения увеличивается первые 2–3 минуты, а затем стабилизируется. Исследованием образцов с различным числом и диаметром полимерных вставок установлено, что процесс трения существенно зависит от соотношения площадей полимера и металлической поверхности, названного коэффициентом топологии $K_T = \frac{S_{\text{пол}}}{S_{\text{пор}}}$, где $S_{\text{пол}}$ – площадь полимерной поверхности трибосистемы; $S_{\text{пор}}$ – площадь пористой металлической поверхности.

Имеющиеся конструкции образцов позволили моделировать различные значения коэффициента топологии в пределах $K_T = 0.250–0.700$. Для его оптимизации в качестве выходного критерия была выбрана сила трения, переменными факторами являлись K_T и параметр PV . Оптимизационная задача решалась в рамках полнофакторного двухуровневого центрального композиционного экспериментального плана второй степени. В каждой точке выполнялось три параллельных опыта.

В результате исследований получена адекватная регрессионная модель в виде многочлена второй степени. В кодовых переменных эта модель имеет следующий вид

$$Y = 2.046 + 0.255X_1 + 1.368X_2 + 0.868X_1^2 + 0.385X_1X_2 \quad (1)$$

Здесь переменная X_1 соответствует коэффициенту топологии K_T , а X_2 соответствует параметру нагружения PV . Регрессионный коэффициент при квадрате параметра X_2 (0.056) отсутствует, так как является статистически незначимым при принятом уровне достоверности 0.95.

Анализ выражения (1) позволяет сделать заключение о том, что описываемая им поверхность отклика имеет желобообразную форму с прямолинейной наклонной осью. На силу трения наибольшее влияние оказывают режимы нагружения трибосистемы. При этом во всем исследованном диапазоне имеет место экстремальная зависимость силы трения от коэффициента топологии. Перейдя в выражении (1) к натуральным переменным будем иметь

$$F = 4.318 - 16.724K + 0.725(PV) + 16.057K^2 + 2.08K(PV), \text{ (Н)} \quad (2)$$

Наибольшая погрешность модели (2) в сравнении с экспериментальными данными (их порядок приведен в таблице) не превышает 10%, а ее средняя величина равна 5.5%. Графическая интерпретация этой модели выполнена на рис. 4.

Двойной линией обозначена зона минимума силы трения. При отклонении обеих переменных факторов в связи со случайными колебаниями технологических и нагрузочных параметров в пределах $\pm 10\%$ величина силы трения будет изменяться от +14.9% до –10.1%. Это связано в большей степени с изменениями режимного параметра, а не коэффициента относительной площади. Величину минимальной силы трения, соответствующей оптимальному значению коэффициента “ K ”, находим дифференцируя выражение (2) по K_T и приравняв производную нулю.

$$\frac{dF}{dK} = -16.724 + 2 \times 16.05K + 2.08(PV) = 0 \quad (3)$$

Из (3) видно, что оптимальное значение K_T зависит от режимов трения и может быть легко определено для любого значения (PV) как

$$K = [16.724 - 2.08(PV)]/32.114 \quad (4)$$

График зависимости влияния режимного параметра на силу трения при оптимальном значении коэффициента “ K_T ” приведен на рис. 5.

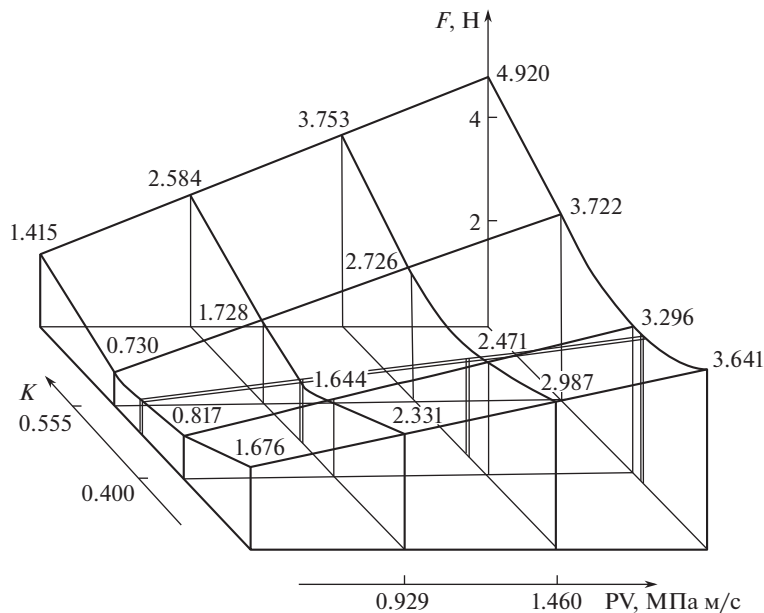


Рис. 4. Влияние коэффициента относительной площади полимера K и параметра нагрузки PV на величину силы трения.

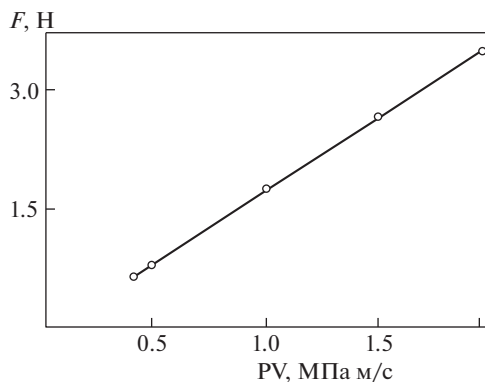


Рис. 5. Влияние режимов нагружения на силу трения при оптимальном значении коэффициента " K_T ".

Вариации оптимальной величины коэффициента относительной площади в пределах $\pm 10\%$ приводят к колебаниям силы трения не более 7.1% (таблица 1). Причем, с ростом нагружения чувствительность силы трения вариациям коэффициента относительной площади полимера снижается. Это связано как с общим ростом уровня сил трения и, очевидно, с составляющей гидродинамического трения.

Обсуждение результатов в научном и прикладном аспектах. Таким образом, величиной оптимального значения коэффициента относительной площади для исследованного диапазона конструктивных параметров подшипника можно считать 0.45 ± 0.05 . Разработанная конструкция подшипника скольжения с комбинированной металлополимерной поверхностью трения, покрытой регулярной сеткой полимерных выступов, образованных вставками, предотвращает сухость поверхностей вала и пористого

Таблица 1. Вариации силы трения при смещении оптимума коэффициента “ K_T ” на $\pm 10\%$

Параметр	Числовые значения				
PV, Мпа м/с	0.40	0.7	1.00	1.50	1.99
$K_{\text{опт}}$	0.500	0.475	0.460	0.420	0.395
F, Н	0.673	1.196	1.704	2.524	3.295
$K_{\text{опт}} + 10\%$	0.550	0.523	0.506	0.462	0.435
F, Н	0.721	1.232	1.744	2.548	3.325
% var F	7.1	3.0	2.3	1.0	1.0
$K_{\text{опт}} - 10\%$	0.45	0.427	0.414	0.378	0.356
F, Н	0.705	1.234	1.732	2.557	3.316
% var F	4.8	3.2	1.6	1.3	0.6

подшипника при пуске. Полимерные выступы оказывают демпфирующее действие, исключая жесткое динамическое контактирование металлических поверхностей подшипника и вала при критических и нестационарных нагрузках. Повышение температуры трибоузла вызывает расширение жидкой смазки, находящейся в порах матрицы, выполненной из металлических порошков, усиленное поступление смазки в зону трения и автоматическое поддержание температурного режима.

Триботехническими исследованиями установлено соотношение площадей металла и полимера на контактной поверхности подшипника скольжения. Это соотношение характеризуется максимальной стабильностью толщины разделительной масляной пленки и минимальным коэффициентом трения при вариации рабочих нагрузок.

В исследованном диапазоне конструкций упорных и радиальных составных подшипников скольжения длину полимерных вставок следует назначать из конструктивных соображений или выбирать равной 5 мм как обеспечивающую скорейший выход на стационарный температурный режим.

Разработанная конструкция упорного подшипника была испытана при работе специализированного смесителя эпоксидных компаундов, полностью подтвердив свои высокие триботехнические характеристики и ресурс работы в режиме самосмазывания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорченко И.М. Композиционные спеченные антифрикционные материалы / И.М. Федорченко, Л.И. Пугина. Киев: Наукова думка, 1980. 404 с.
2. Хасьянова Д.У., Мукутадзе М.А. Оптимизация опорной поверхности подшипника скольжения по параметру несущей способности с учетом зависимости вязкости смазочного материала от давления и температуры // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 66–72.
3. Шамаев В.А., Паринюв Д.А., Полилов А.Н. Исследование подшипников скольжения из модифицированной древесины для тяжело нагруженных узлов трения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2018. № 4. С. 54–59.
4. Ахвердиев К.С.О., Задорожная Н.С., Мукутадзе А.М., Флек Б.М. Расчетная модель составного цилиндрического подшипника, работающего в устойчивом режиме, при неполном заполнении смазочным материалом зазора // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 4. С. 64–69.
5. Дроздов Ю.Н., Надеин В.А., Пучков В.Н. Опыт применения фрикционных маятниковых подшипников скольжения для сейсмической изоляции // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 6. С. 74–81.
6. Ахвердиев К.С., Флек Б.М., Ванев К.А. Расчетная модель сжимаемой электропроводящей смазки упорных подшипников скольжения при гармоническом характере изменения магнитного поля // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 4. С. 82–88.