

УДК 621.892

ПОВЫШЕНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ОПОР СКОЛЬЖЕНИЯ С РЕВЕРСИВНЫМ ТРЕНИЕМ

© 2016 С.Г. Докшанин

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск

Статья поступила в редакцию 23.03.2016

Предлагается метод обеспечения длительного срока службы подшипников скольжения на основе модификации пластичных смазочных материалов. Исследуется влияние силы трения на повышение долговечности подшипников скольжения, работающих в режиме реверсивного движения. Показано, что применение смазочных материалов с ультра-дисперсными добавками уменьшает значение силы трения для образцов, снижает величину температуры трения. Представлены результаты анализа распределения нормальных и касательных напряжений на площадке контакта подшипника скольжения. Сделан анализ состояния поверхностей трения и изменение микрорельефа после применения исследуемых смазочных материалов.

Ключевые слова: касательные напряжения, площадь контакта, смазочный материал, ультрадисперсная добавка, реверсивное трение

Подшипники скольжения чаще всего выходят из строя вследствие износа и заедания поверхности. Главным образом эти патологические процессы трения происходят при пуске и останове механизма. В такой период работы в опорах валов наблюдаются наиболее тяжелые условия трения, что обусловлено очень малым действием гидродинамического эффекта или полным его отсутствием. Перегрев подшипникового узла, вызванный усиленным образованием тепла трения при работе подшипника скольжения, может привести к возникновению заедания [1]. Отрицательное действие реверса связано с деформационно-напряженным состоянием материала. Постоянное изменение направления движения заставляет деформации в течение короткого времени изменяться с растяжения на сжатие и наоборот. В зоне контакта на элементарный объем материала будут действовать циклически изменяющиеся напряжения от нормального сжатия и знакопеременных касательных напряжений от сил трения, возникающих на поверхности контакта. В результате такое сочетание условий работы, как проскальзывание при трении контактирующих поверхностей и повышение нагрузок, может вызвать рост напряжений на площадке контакта, что приводит к ускорению усталостных процессов [2].

Многочисленное повторно-переменное деформирование трущихся поверхностей снижает износостойкость материала, как при трении скольжения, так и при трении качения [3, 4]. Действующие силы трения значительно влияют на напряженное состояние материала подшипника, поэтому снижение этих сил позволит снизить отрицательный эффект реверсивного трения. Одним из методов защиты от усталостных повреждений являются снижение коэффициента трения и предотвращение проскальзывания контактирующих поверхностей. Снизить скорость изнашивания и повысить долговечность узлов в режиме реверсивного трения можно за счет используемого смазочного материала, а также толщины смазочной пленки на трущихся поверхностях. Применяемые смазочные материалы должны обладать преимущественно антифрикционными свойствами для снижения сил трения, при этом механизм смазочного действия может быть различным и зависеть от условий контактирования. В этом

случае для улучшения антифрикционных свойств применяемых смазочных материалов могут быть использованы функциональные твердые добавки, например ультрадисперсные порошки алмазографита (УДПАГ).

Цель работы: оценка возможности использования пластичных смазочных материалов с добавкой ультрадисперсного алмазографита в узлах с реверсивным трением, в частности, опорах скольжения.

Эффективность применения смазочных композиций с ультрадисперсным алмазографитом оценивалось в соответствии с методами рационального цикла трибологических испытаний. Исследования проводились на машине трения по схеме «вал-полувтулка». Подвижным образцом служил вал из стали 30ХГСА, термообработанный до твердости HRC 30–32. Неподвижный образец (полувтулка) изготавливался из бронзы марки БрАЖН 10–4–4. Испытания проводились при удельном давлении в зоне трения 20 МПа без пополнения смазочного материала. Вал совершал возвратно-вращательное движение с частотой 1,8 Гц и углом качения 28° при скорости трения скольжения 2,58 см/с. Перед началом и после окончания экспериментов для поверхностей образцов, вала и полувтулки, определялись параметры шероховатости R_a , для определения массового износа полувтулки взвешивались. В процессе испытаний измерялся момент трения и температура.

Для создания смазочных композиций с ультрадисперсным алмазографитом применялись пластичные смазочные материалы марок ЦИАТИМ-201 (ГОСТ 6267-74) и Солидол С (ГОСТ 4366-76). ЦИАТИМ-201 – это литиевый смазочный материал, механически стабилен, имеет хорошие морозостойкие свойства и может работать в широком интервале температур. Смазочный материал Солидол С относится к кальциевым смазочным материалам, обладает несколько узким диапазоном рабочих температур и низкой механической стабильностью, тем не менее имеет хорошие антифрикционные свойства по сравнению с литиевыми.

Вводимая в базовый смазочный материал твердая добавка представляла углеродсодержащий ультрадисперсный порошок, полученный детонационным синтезом в среде углекислого газа. Размер частиц порошка до 40 нм, доля графита в шихте – около 80%, другая часть находится в виде высокодисперсной алмазоподобной фаз; концентрация алмазографита в пластичных смазочных материалах составляла от 0,5 до 1,5 масс. %, что является наиболее оптимальным для

Докшанин Сергей Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика». E-mail: Sergey_dokshantin@mail.ru

данных добавок [5].

Изображенные на рис. 1 и 2 графики показывают зависимости изменения коэффициента трения и температуры от пути трения при использовании базовых смазочных материалов и созданных на их основе смазочных композиций. Смазочный материал наносился на поверхности однократно, далее испытания проводились без пополнения подшипникового узла смазочным материалом на всем пути трения. Для каждого смазочного материала испытания проводились до достижения коэффициентом трения заданного значения 0,2. После чего определялся путь трения и значение прироста температуры трения при прохождении этого пути.

Определение эффективности вводимой добавки, ее влияние на эксплуатационные свойства разрабатываемых смазочных композиций, а также установление условий их применения в узлах с реверсивным трением выполнялись по величине силы трения, температуры подшипника и состоянию контактирующих поверхностей. Исследования добавки УДПАГ в различных смазочных материалах показали, что их введение положительно сказывается для всех смазочных материалов, используемых в качестве базовых, однако наиболее эффективна при введении в Солидол. Как показали результаты, смазочные композиции с УДПАГ позволили увеличить путь трения до достижения заданного коэффициента трения 0,2 по сравнению с базовыми смазочными материалами в 1,7 – 1,9 раза, коэффициент трения при приработке уменьшается на 32-55%, интенсивность изнашивания образцов снизилась на 27-32%.

Анализ снимков трущихся поверхностей после проведения испытаний позволяет судить о влиянии ультрадисперсных порошков алмазографита на образование качественного микрорельефа. При использовании смазочных композиций наблюдалось сглаживание неровностей, снижение количества раковин, царапин, следов коррозии.

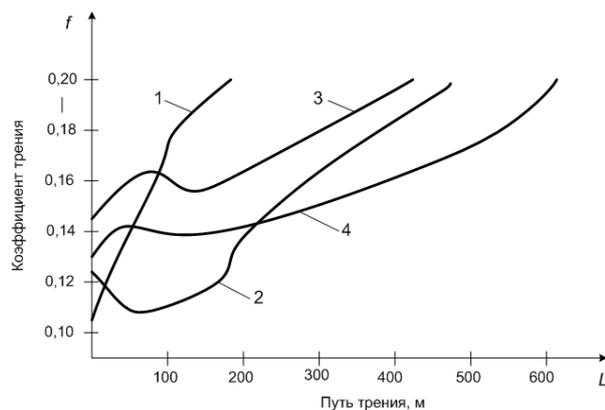


Рис. 1. Изменение коэффициента трения для смазочного материала: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+УДПАГ; 3 – Солидол С; 4 – Солидол С+УДПАГ

Такое изменение шероховатости увеличивает фактическую площадь контакта, что снижает контактные давления и более равномерно распределяет нагрузки по контурным площадям контакта. Так, на рис. 3 представлены фотографии состояния дорожек трения, полученные после проведения испытаний со смазочными материалами без добавки и после её введения.

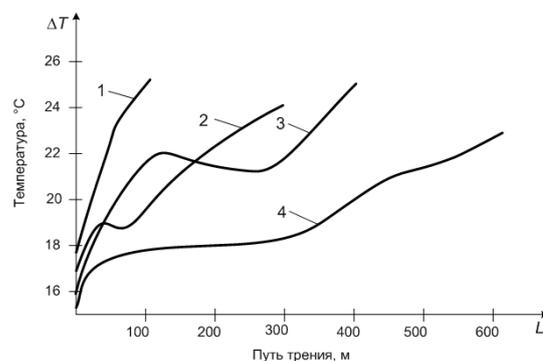


Рис. 2. Изменение приращения температуры трения для смазочного материала: 1 – ЦИАТИМ-201; 2 – ЦИАТИМ-201+УДПАГ; 3 – Солидол С; 4 – Солидол С+УДПАГ

Рассмотрение других результатов, полученных в ходе проведения исследований, также позволяет сделать выводы об эффективности введения твердой добавки УДПАГ в пластичную смазку. Определялась глубина повреждений, изменение величины шероховатости R_a/R_{a0} до и после испытаний, а также общее состояние поверхности.

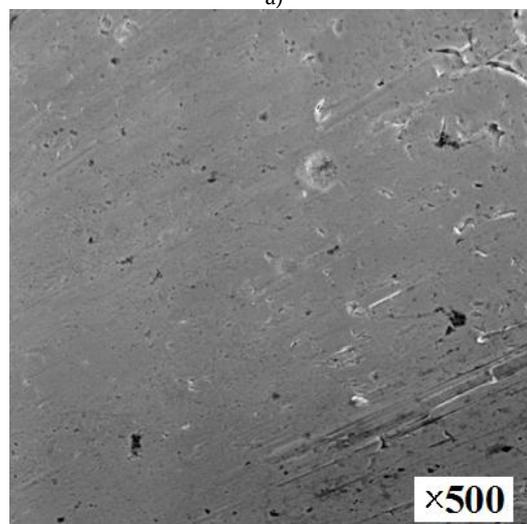
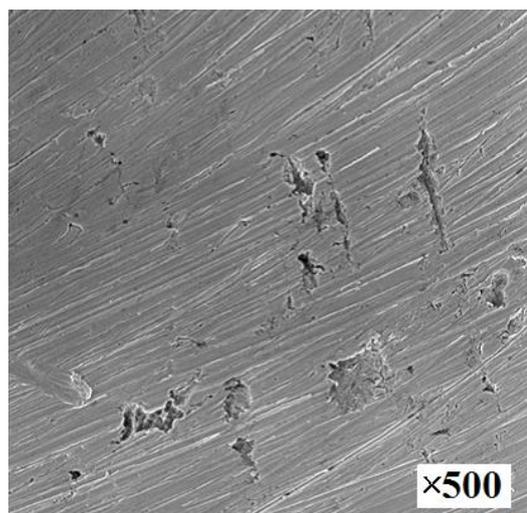


Рис. 3. Внешний вид дорожек трения на пластине после испытаний со смазочным материалом ЦИАТИМ-201: а) без добавки УДПАГ; б) с добавкой УДПАГ

Рассмотрение других результатов, полученных в ходе проведения исследований, также позволяет сделать выводы об эффективности введения твердой добавки УДПАГ в пластичную смазку. Определялась глубина повреждений, изменение величины шероховатости R_a/R_{a0} до и после испытаний, а также общее состояние поверхности. Исследования обнаружили, что по этим показателям после введения ультрадисперсного алмазографита лучшим является смазочный материал ЦИАТИМ-201, приводящий к качественному изменению микрорельефа трущейся поверхности. После испытаний для ЦИАТИМ-201 средняя величина отношения R_a/R_{a0} для смазочного материала без добавки составила $R_a/R_{a0}=2,7$, при введении УДПАГ оно снизилось и равнялось $R_a/R_{a0}=1,61$. Для Солидола (С) это отношение изменилось незначительно: 1,14 и 1,06 – без добавки УДПАГ и с добавкой соответственно.

Результаты проведенных исследований позволили предположить причины проявления хороших триботехнических характеристик смазочных материалов с добавкой ультрадисперсного порошка алмазографита. Основная причина повышенного износа при реверсивном трении – интенсивное развитие усталостных трещин, вызванное знакопеременными деформациями. Пластические деформации возникают в материале тогда, когда касательное напряжение по площадке результирующего сдвига достигает определенной величины, свойственной данному материалу. Из условий пластичности можно установить определенные соотношения между возникающей на поверхности силы трения и пределами текучести на сжатие, растяжение и сдвиг, определяющие разрушение материала.

Наиболее всего сила трения влияет на сдвиговые напряжения, которые при смене направления движения приводят к частому пластическому деформированию. Растягивающие компоненты напряжений и деформаций, вызванные повышением силы трения, приводят к снижению критического уровня нагрузки, которую деталь может выдержать без катастрофических разрушений. В этом случае снижение предела выносливости материала приводит к возможности скорого образования в поверхностных слоях материала усталостных трещин. На рис. 4 представлены графики распределения нормальных напряжений на поверхности вкладыша подшипника скольжения. Исследования проводились для смазочных композиций с концентрацией ультрадисперсного алмазографита 1 масс. %.

Для определения влияния добавки на напряженное состояние была рассмотрена компьютерная модель подшипникового узла при контакте вала с полувтулкой, сила трения определялась из эксперимента. Для реализации модели использовался программный пакет ELCUT, моделирующий условия плоских двумерных полей методом конечных элементов. Напряжения определялись по критерию прочности Мора, в соответствии с которым условие разрушения зависит как от нормальных, так и от касательных напряжений на площадке контакта. Результаты моделирования показали что применение пластичных смазок с добавкой УДПАГ снижает величину нормального напряжения, по сравнению со смазкой-основой, на 8–11% и 13–15% соответственно.

Смазочный процесс при использовании пластичного смазочного материала несколько отличается от смазки жидкими маслами. Применение масел способствует установлению в подшипнике скольжения жидкостного режима трения и контактирующие поверхности деталей будут полностью разделены

смазочным слоем, антифрикционные свойства масел связаны с вязкостью. В случае применения пластичных смазочных материалов в узлах трения в основном устанавливаются граничный или смешанный режимы, что обусловлено состоянием смазочного материала. В условиях работы происходит его выдавливание с пути трения и на контактирующих поверхностях остается только тонкая пленка смазочного материала, которая и воспринимает в процессе работы все контактные нагрузки. Вязкость смазочного материала при этом не оказывает влияния на качество смазывания поверхностей, а эффективность смазки и прочность оставшейся смазочной пленки определяют только эксплуатационные свойства. Однако действие больших нагрузок и значительный рост поверхностной температуры может привести к ее разрыву и, как следствие, схватыванию контактирующих поверхностей. В этом случае и требуется использование твердых добавок, которые могут создать на поверхности детали прочный слой с хорошими адгезионными способностями, воспринимающий на себя нормальные и касательные нагрузки, удерживающий смазочную пленку на трущихся поверхностях и предотвращающий ее разрыв.

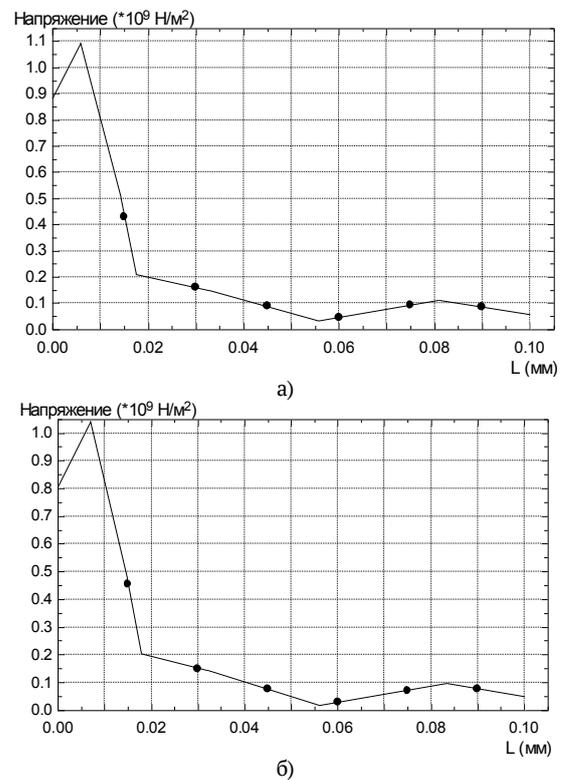


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений для смазочного материала ЦИАТИМ-201 без добавки (а) и с добавкой УДПАГ (б)

Заметное улучшение эксплуатационных свойств пластичных смазочных материалов при введении в них УДПАГ наблюдается именно для граничных режимов трения. При жидкостных режимах нерастворимый и химически инертный порошок алмазографита не влияет на изменение состава смазочного материала. Он «теряется» в его объемах, слабо выражая свои свойства. При граничном режиме УДПАГ начинает хорошо проявлять свои адгезионные способности к металлическим поверхностям благодаря повышенной поверхностной энергии, которой частицы порошка обладают за счет способа получения. Довольно малый размер частиц

УДПАГ позволяет им проникать в структурный каркас пластичного смазочного материала, что приводит к упрочнению граничной пленки и повышению сопротивляемости к разрушению. Наличие собственного заряда образует ориентированные слои и прочно удерживает смазочную пленку на контактирующих поверхностях. Это повышает способность пленок смазочного материала выдержать значительные нагрузки без разрушения и препятствует образованию локальных металлических связей.

Положительный эффект от использования в смазочных материалах ультрадисперсного алмазографита можно связать с процессами приработки трущихся поверхностей, когда происходит образование новой шероховатости при сглаживании наиболее выступающих неровностей. Это увеличивает интенсивность приработочного износа в начальный момент работы узла трения, чем и можно объяснить быстрый нагрев и повышение коэффициента трения в этот период работы. Процесс приработки будет происходить до тех пор, пока микронеровности не приобретут размеры, обеспечивающие увеличение фактической площади контакта и приводит к перераспределению нагрузки и снижению контактных напряжений, что подтверждают ранее проведенные исследования. При этом сокращается времени приработки трущихся поверхностей до начала выхода на эксплуатационный режим позволяет стабилизировать значения поверхностной температуры и исключить возможное в этот период схватывание трущихся поверхностей.

Таким образом, наличие смазочного материала, способного значительно снизить силы трения, снижает величину внутренних напряжений и задерживает развитие усталостных трещин на участках перемены направления движения. В это же время происходит уменьшение процессов пластического деформирования поверхностных слоев за счет снижения величины сдвиговых напряжений на площадке контакта. Зона

образования усталостных трещин будет перемещаться вглубь материала, что приводит к увеличению времени до начала наступления катастрофического усталостного износа материала на контактирующих поверхностях.

Выводы: с введением ультрадисперсного порошка алмазографита в пластичный смазочный материал, используемый в узлах с реверсивным трением, происходит снижение величины силы трения на 65–70% и уменьшает глубину повреждений трущейся поверхности на 24–28%. Сравнительный анализ значений контактных напряжений, определенных с помощью компьютерного моделирования, показал, что при включении в пластичный смазочный материал добавки УДПАГ происходит снижение величины контактных напряжений на 18–20%, что позволяет продлить срок службы подшипникового узла в 1,5–2 раза по сравнению с базовыми смазочными материалами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Гаркунов, Д.Н.* Триботехника (износ и безысность). – М.: «Издательство МСХА», 2001. 617 с.
2. *Евдокимов, В.Д.* Реверсивность трения и качество машин. – Киев, «Техника», 1977. 148 с.
3. *Козаев, В.П.* Прочность и износостойкость деталей машин / *В.П. Козаев, Ю.Н. Дроздов.* – М.: Высшая школа, 1991. 319 с.
4. *Биргер, И.А.* Расчет на прочность деталей машин: Справочник / *И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, Г.Б. Иосилевич* – М.: Машиностроение, 1995. 640 с.
5. *Терентьев, В.Ф.* Трибонадежность подшипниковых узлов в присутствии модифицированных смазочных композиций / *В.Ф. Терентьев, Н.В. Еркаев, С.Г. Докшанин.* – Новосибирск: Изд-во «Наука» СО РАН, 2005. 142 с.
6. *Махутов, Н.А.* Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. В 2 ч. – Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние. 2005. Ч. 1. 494 с.
7. *Сосновский, Л.А.* Трибофатика: износоусталостные повреждения в проблемах ресурса и безопасности машин / *Л.А. Сосновский, Н.А. Махутов.* – М.-Гомель: НПО «Трибофатика», 2000. 304 с.

INCREASING THE SERVICE LIFE OF SLIDING SUPPORTS WITH REVERSIBLE FRICTION

© 2016 S.G. Dokshinin

Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Investigates the influence of the friction force at the possibility of increasing the service life of sliding bearings operating in a mode of reverse motion. methods to provide for long service life of bearing are proposed based on the modification lubricating grease. It is shown that the use of lubricants with ultra-dispersive additives reduces friction force test sample, reduces temperature of friction. There is represented the analysis results distribution a normals and tangent of loads on the contact area of the sliding bearings. The analysis of the condition of the friction surfaces and changing the micro-relief after applying the test lubricants.

Key words: *tangential stress, contact area, lubricant, ultra-dispersive additive, back-and-forth motion*