

УДК 621.822.67:621.892.5:541.183

НАНОАЛМАЗЫ В СМАЗОЧНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ**Л.Н. ОБРАЗЦОВ***(Кузбасский государственный технический университет, Кемерово, Россия)*

Исследуется применение наноалмазов в смазочных композициях для подшипников качения. Установлено, что применение наноалмазов в качестве модификатора смазочного материала позволяет увеличить долговечность подшипников и, как следствие, всего механизма, где применяется подшипники. Разработана физическая модель взаимодействия наноалмазов с поверхностным слоем дорожек качения колец подшипников. Показана роль технологической наследственности в увеличении контактной долговечности подшипников качения.

Введение. К числу ключевых методов обеспечения долговечности подшипников качения относят использование рациональных смазочных материалов, которые позволяют увеличить долговечность деталей, расширить температурный диапазон работы механизмов и т.д. Основными функциями смазочного материала являются: снижение трения до необходимого уровня; предотвращение заедания узла трения; уменьшение интенсивности изнашивания трущихся тел; обеспечение отвода теплоты из зоны фрикционного контакта и уноса продуктов износа или коррозии; защита поверхностей трения и других элементов конструкции от действия внешней среды или уплотнение зазоров.

Для обеспечения требуемой надежности функционирования узла трения следует стремиться к тому, чтобы смазочный материал наиболее полно отвечал условиям работы трибосистемы [1 – 4]. Введение в смазочные материалы антифрикционных, противозадирных и противоизносных присадок и добавок позволяет существенно повысить долговечность и экономичность эксплуатации смазываемых узлов трения. Наиболее простым и логичным развитием достижений явилось использование для модифицирования смазочных композиций нанодисперсных порошков металлов и углерода. Существует широкая номенклатура нанопорошков, которые используются при создании нанофазных и нанокпозиционных материалов. К их числу следует отнести [3]:

- ультрадисперсные углеродсодержащие продукты детонационного синтеза – ультрадисперсные алмазы и ультрадисперсный алмазоподобный графит – шихта;
- фуллерены и фуллереноподобные структуры, ультрадисперсные металлы, полученные термическим разложением прекурсоров, химическим восстановлением, распылением в вакууме;
- оксиды металлов, образующиеся при термохимическом восстановлении, имплантации;
- ультрадисперсные керамики на основе простых, двойных, тройных нитридов и оксинитридов переходных материалов;
- сиалоны, полученные по технологии плазмо- и механохимического синтеза.

Нанопорошки различного состава и строения применяют для получения композиционных материалов различного функционального назначения – конструктивных композитов, покрытий, смазочных материалов и смазочно-охлаждающих технологических сред, жидкофазных материалов с регулируемыми реологическими характеристиками и т.д.

Наибольший интерес представляют исследования триботехнических характеристик смазочных материалов с нанодисперсными частицами, так как такие композиции имеют специфические особенности, состоящие в повышении нагрузочно-скоростного диапазона применения, обеспечении проводимости контакта, снижении интенсивности коррозионно-механического изнашивания трибосистемы.

Главным подходом в разработке таких материалов является создание в зоне контакта надежного разделительного слоя, препятствующего взаимодействию деталей узла трения. Данный слой могут формировать частицы металлов или металлосодержащие соединения, деформированные под действием контактных давлений и сдвиговых напряжений. Такие частицы способны изменить микрорельеф контактной зоны, заполняя микронеровности поверхностей трения и уменьшая тем самым величину контактного давления. Однако смазочные материалы, модифицированные нанопорошками, разработаны сравнительно недавно и физико-химические аспекты их создания и применения требуют дальнейшего изучения.

Механизм действия нанопорошков на антифрикционные свойства трибосопряжений. Нанодисперсные частицы углерода, сиалонов и других материалов обладают собственным зарядом, величина которого является функцией размера. Причиной возникновения заряда у дисперсных частиц являются несовершенство их строения, особенности получения (детонационный синтез, термолиз) или влияние внешних факторов: трибоактивации, триборазрушения и т.п. Наличие собственного заряда у частиц модификатора обуславливает протекание в среде смазочного материала различных электрофизических процессов, оказывающих существенное влияние на его структуру.

В мировой практике известны *направления разработки смазочных составов с наномодификаторами различного состава*:

- введение нанокластерных образований на основе металл- и углеродсодержащих компонентов, способствующих реализации процессов микрорезания, удаления дефектного слоя с поверхности трения и образования ювенильных поверхностей;
- введение наномодификаторов типа углеродсодержащих соединений с высокой адсорбционной активностью для формирования разделительных слоев из ориентированных структур с повышенной устойчивостью к разрушению под действием сдвиговых напряжений и тепловых нагрузок;
- применение наномодификаторов в качестве носителей функциональных добавок, транспортирующих их к рабочим поверхностям компонентов трибосистемы;
- применение наномодификаторов для создания присадок, способных к трансформированию под действием эксплуатационных факторов с образованием продуктов трибохимических превращений со свойствами смазочного материала.

Помимо традиционных методов модификации порошками металлов, весьма перспективными в смазочных материалах различного назначения оказались ультрадисперсные алмазографитовые порошки, которые добавляются не только в масла, но и в пластичную смазку [5]. Следует отметить, что наличие адсорбированных слоев частиц ультрадисперсного алмазографита в значительной мере ослабляют силы адгезионного взаимодействия между трущимися поверхностями. Наноалмазы (НА), введенные в материал, играют роль мощного структурообразователя, обеспечивая дисперсионное упрочнение композиции.

При поиске оптимального соотношения цена – качество для изделий с наноалмазами следует учитывать следующее:

- простая технология синтеза наноалмазов позволяет создать промышленное производство с низкой себестоимостью, определяемой в основном стоимостью взрывчатых веществ;
- во многих областях вместо наноалмазов допустимо использовать неочищенную алмазную шихту, которая в несколько раз дешевле очищенной;
- положительный эффект достигается при введении в материал добавок наноалмазов, как правило, от 0,01 до 1,0 мас. %.

Можно отметить следующие преимущества НА в качестве модификаторов поверхностей трения перед другими типами веществ такого рода:

- эффективность при очень низких концентрациях в базовой смазке;
- совместимость с различными видами синтетических и минеральных масел;
- экологическая безопасность углеродной добавки в смазки по сравнению с металлическими частицами или фторуглеродными веществами.

При наличии большого количества сверхмалых графитоподобных частиц и наноалмазов в алмазо-содержащей шихте свойства смазки и характер взаимодействия поверхностей трения изменяются: увеличиваются вязкость жидкости, прочность смазочной пленки и, как следствие, несущая способность трибосопряжения [5]. Наиболее интересными параметрами являются крайне низкое содержание наноалмазов, существенное увеличение предельных нагрузок, снижение износа деталей, уменьшение продолжительности обкатки двигателей и повышение ресурса инструмента.

Механизмы действия НА в смазочной композиции проявляются в нескольких направлениях [5]:

- неоднородности на поверхностях трения заполняются углеродными кластерами, за счет этого уменьшаются граничное трение и износ;
- повышается вязкость смазочной композиции в тонких пленках за счет дисперсного структурирования углеродных кластеров;
- при низких температурах уменьшается вязкость смазочной композиции вследствие снижения порога стеклования дисперсно-наполненной среды;
- наблюдается эффект последствия (свыше 60 ч) после замены смазочной композиции на маслооснову; этот эффект связан с прочным механическим, адсорбционным и диффузионным закреплением углеродных кластеров на поверхностях трения;
- кластеры наноалмазов при больших нагрузках и максимальном вытеснении жидкой фазы между поверхностями трения работают как микроподшипники качения, что обеспечивает рост предельных нагрузок, которые выдерживает пара трения.

Известно, что для повышения эффективности работы трибосопряжений, в базовую смазку вводят алмазографитовые порошки, очищенные от механических примесей, являющиеся смесью «не сгоревшей органики взрывчатых веществ», неалмазного углерода (графит, сажа), наноалмазов и примесей металлов. Для повышения стабильности таких многокомпонентных систем используют различные добавки. Работы по применению очищенных наноалмазов, обладающих поверхностными свойствами, позволяющими непосредственно вводить их в смазку и масла без применения стабилизирующих систем, практически отсутствуют. Известно, что модифицированные наноалмазы за счет изменения физико-химических свойств поверхности частиц, принципиально отличаются по поведению в гидрозолях и органозолях от классических наноалмазов [10].

В Кемеровском филиале Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (КФ ИХТТМ СО РАН) совместно с Кузбасским государственным техническим университетом (КузГТУ) созданы нанодиазмы детонационного синтеза, выделенные из алмазно-углеродной шихты и очищенные от различных примесей по запатентованной технологии [6]. Полученные по этому способу нанодиазмы характеризуются повышенной дисперсностью и однородностью со стабильным разбросом размера частиц 3...6 нм и удельной поверхностью 250...350 м²/г. Кроме того, они не подвержены графитизации при длительном хранении и использовании и по качеству соответствуют требованиям международных стандартов (по данным японской фирмы «Tajirinu Trading Co., Ltd.»). Кроме того, разработаны нанопорошки меди по методу химического восстановления из растворов ее солей под действием различных восстановителей [7]. Варьируя природу восстановителя, методы стабилизации и условия процесса получения, возможно в широких пределах регулировать размер (от 30 до 500 нм) и форму частиц, а следовательно, и целенаправленно менять их свойства.

Экспериментальные исследования. Для подшипников качения одним из важнейших показателей качества является контактная долговечность – продолжительность работы подшипника до усталостного выкрашивания материала (обычно выражается числом оборотов или часами работы до выхода подшипника из строя, или числом циклов нагружения участка детали, на котором произошло усталостное выкрашивание). Контактная долговечность подшипников зависит от многих факторов, к числу которых относятся: физико-механические свойства конструкционного материала, степень загрязненности стали неметаллическими включениями; состояние контактирующих поверхностей дорожек и тел качения, определяемое технологией изготовления и наследуемыми свойствами; схема напряженно-деформированного состояния в процессе нагружения; количество и качество смазочного материала и др. [8].

После проведения обзора литературных данных, а также патентов в области модифицированных смазочных композиций были выбраны рациональные концентрации наноматериалов в смазке, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Концентрации наноматериалов в смазке

Добавка	Различные концентрации добавки, % масс.			
Нанодиазм	0,01	0,05	0,1	0,3
Алмазграфитовая шихта	0,01	0,05	0,1	0,3

Выбор обусловлен тем, что при проведении исследований с данными концентрациями возможно выявление закономерностей влияния добавки на контактную долговечность подшипников качения, а также выявления рационального состава смазочной композиции.

В качестве базовой смазки был взят Литол-24 (ГОСТ 21150-87). Равномерность распределения наноматериалов в смазке достигалась путем механического диспергирования.

В экспериментальных исследованиях использовались подшипники 6208-2RS. Выбор данного типа подшипника качения обусловлен его распространенностью, особенно в сельскохозяйственной технике.

В условиях эксплуатации, а также в процессе испытаний наблюдаются следующие виды отказов подшипников качения: усталостное разрушение (выкрашивание) дорожек качения на внутренних и наружных кольцах и поверхностях тел качения; потеря точности; разрушение сепараторов; повреждения рабочих поверхностей в результате совместного действия нагружения и повышенного нагрева; смятие рабочих поверхностей в результате значительных перегрузок; изнашивание при фреттинг-коррозии; раскалывание колец и тел качения. Причины разрушений можно разделить на конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Ресурс подшипника в результате испытаний определяют с учетом только усталостного разрушения, причем другие виды отказов рассматриваются как аварийные и не учитываются при оценке расчетных характеристик [9]. Были проведены расчеты номинальной долговечности подшипников качения. Для шариковых подшипников 6208-2RS она составила 7,5 ч из расчета, что заданная динамическая нагрузка была равна 75 % от максимально допустимой.

При испытаниях подшипников использовалась форма испытательной головки, показанная на рисунке 1. В массивном жестком литом корпусе 1 устанавливали сменную оснастку с четырьмя подшипниками: испытываемыми 3 и коренными 4. Коренные подшипники тоже являются испытываемыми.

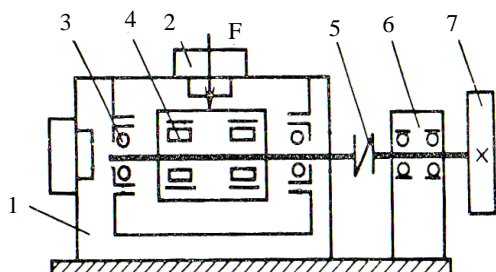


Рис. 1. Испытательная головка

Через систему 2 задается нагрузка F , на подшипники. Привод машины состоит из электродвигателя, клиноременной передачи со сменными шкивами 7 и муфты 5. Для повышения частоты вращения между ременной передачей и коренным валом испытательной головки установлен дополнительный зубчатый ускоритель 6. В испытательную машину устанавливалось сразу 4 подшипника, затем создавалась нагрузка P , после чего подшипники работали в течение различного периода времени.

Процесс влияния наноматериалов на качество дорожек качения очень сложен и зависит от многих факторов. Для детального анализа процесса требуется большее количество испытаний, которое резко возрастает с увеличением числа факторов. Поэтому, учитывая новизну процесса, когда основные его закономерности не изучены, либо изучены недостаточно, целесообразно применить методику многофакторного эксперимента. Подобный подход к исследованию при неполном знании механизма явлений позволяет построить математическую модель процесса, провести анализ влияния на качество дорожек качения различных технологических факторов и их взаимодействий. Методы многофакторного планирования подробно изложены в литературе [10, 11].

В эксперименте в качестве варьируемых факторов выбраны такие, как концентрация наноалмазов в смазке K , % масс. и время работы подшипников под нагрузкой, T , ч. Неизменными в течение всех опытов поддерживались следующие факторы: физико-механические свойства материала подшипников; геометрия нагружающего устройства, т.е. направление силы нагрузки; скорость вращения подшипников; конструкция испытательных приспособлений; нагрузка P , Н.

Значения замеров шероховатости дорожек качения наружных колец подшипников на профилографе-профилометре модели «Talysurf-5M» представлены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты исследований на профилографе-профилометре

№ образца	Время испытания, T , ч	Тип модификатора	Концентрация модификатора, K , %	R_a , мкм
0	0	–	–	0,0803
1	1,5	–	–	0,0757
2	3,5	–	–	0,0677
3	5,5	–	–	0,0613
4	7,5	–	–	0,0114
5	1,5	НА	0,3	0,0697
6	3,5	НА	0,3	0,0587
7	5,5	НА	0,3	0,051
8	7,5	НА	0,3	0,071
9	1,5	НА	0,1	0,07263
10	3,5	НА	0,1	0,0619
11	5,5	НА	0,1	0,0487
12	7,5	НА	0,1	0,0627
13	1,5	НА	0,05	0,0713
14	3,5	НА	0,05	0,063
15	5,5	НА	0,05	0,0467
16	7,5	НА	0,05	0,0533
17	1,5	НА	0,01	0,0753
18	3,5	НА	0,01	0,0657
19	5,5	НА	0,01	0,0477
20	7,5	НА	0,01	0,0483
21	1,5	АГШ	0,3	0,073
22	3,5	АГШ	0,3	0,051
23	5,5	АГШ	0,3	0,0592
24	7,5	АГШ	0,3	0,079
25	1,5	АГШ	0,1	0,0726
26	3,5	АГШ	0,1	0,0543
27	5,5	АГШ	0,1	0,0539
28	7,5	АГШ	0,1	0,0673
29	1,5	АГШ	0,05	0,0738
30	3,5	АГШ	0,05	0,059
31	5,5	АГШ	0,05	0,0498
32	7,5	АГШ	0,05	0,0653
33	1,5	АГШ	0,01	0,0742
34	3,5	АГШ	0,01	0,0613
35	5,5	АГШ	0,01	0,048
36	7,5	АГШ	0,01	0,0573

Базовая смазка – Литол-24; НА – наноалмаз; АГШ – алмазо-графитовая шихта.

Значения шероховатостей, представленные в таблице 2, являются усредненными, так как для более достоверного результата значения шероховатости измерялись в трех различных точках каждого из образцов.

Также результаты представлены в виде графических зависимостей шероховатости поверхности дорожек качения наружных колец подшипников от вида, концентрации наноматериалов в базовой смазке и времени испытания (рис. 2...4).

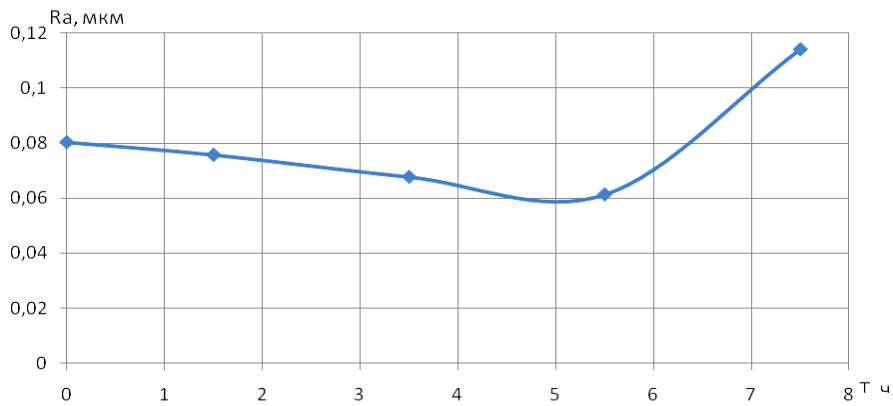


Рис. 2. Зависимость шероховатости дорожек наружных колец подшипников качения от времени испытания при использовании смазки Литол-24 без модификаторов (образцы 1...4)

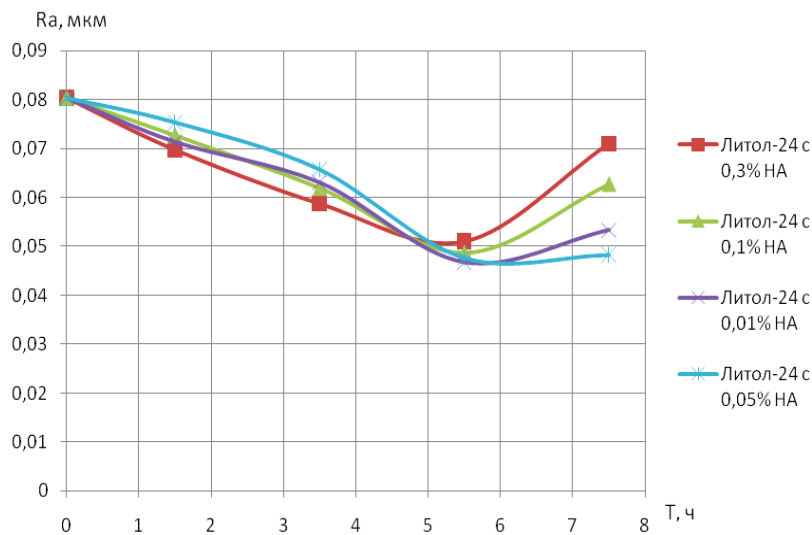


Рис. 3. Зависимость шероховатости дорожек наружных колец подшипников качения от концентрации в базовой смазке наноалмазов (НА) и времени испытания (образцы 5...20)

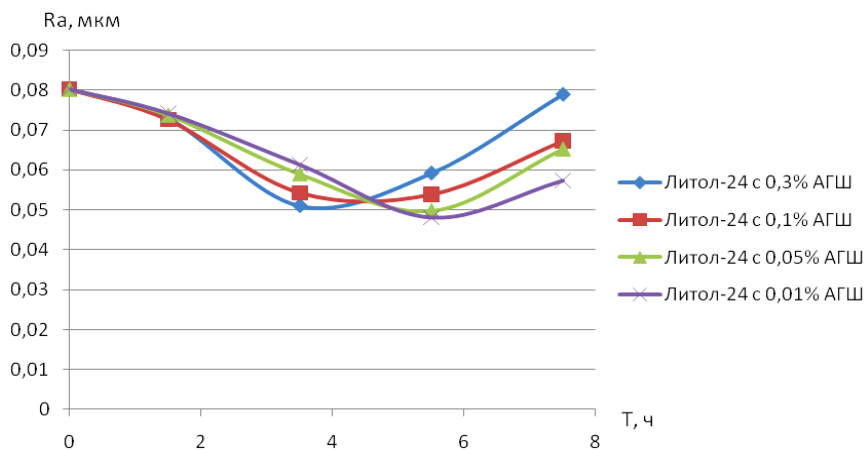


Рис. 4. Зависимость шероховатости дорожек наружных колец подшипников качения от концентрации в базовой смазке алмазо-графитовой шихты (АГШ) и времени испытания (образцы 21...36)

Теоретическая кривая износа, как известно, имеет три основных участка на протяжении времени (срока службы) механизма (рис. 5):

- процесс прикатки, характеризующийся некоторым повышением концентраций элементов износа трущихся пар;
- период со стабилизированным количеством элементов износа (основной ресурс до ремонта);
- нарастание концентраций элементов износа (достижение предельных зазоров и необходимость восстановления к моменту окончания ресурса механизма).

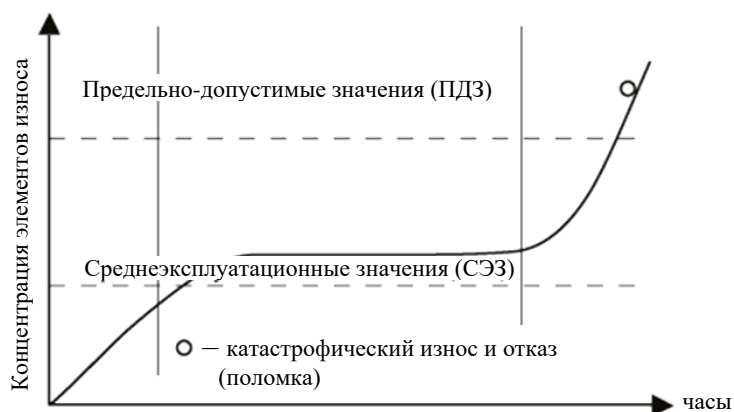


Рис. 5. Теоретическая кривая износа

Анализ показал, что опытные образцы в течение времени работы проходят все три стадии износа, но отличаются между собой только скоростью износа. Стоит отметить, что если стадия так называемой «прикатки» у всех образцов проходит примерно одинаково, то дальнейший износ существенно отличается в зависимости от вида и концентрации наномодификаторов в базовой смазке.

Причем с уменьшением концентрации модификаторов первичный износ происходит медленнее, так как в большем количестве наноматериал выступает в роли абразива и способствует возникновению дефектов. В то же время происходит эффект сдерживания развития процесса отслоения материала (основной вид дефектов при трении качения), который становится виден при уменьшении концентрации наноматериалов в базовой смазке.

Разница в шероховатости для образцов № 4 и № 20 составляет более 50 %. Это значит, что при использовании только базовой смазки расчетная долговечность подшипника совпадает с действительной, в то время как при использовании добавки 0,01 масс. % наноалмазов экспериментальная долговечность подшипника качения намного больше расчетной.

Ввиду этого появляется необходимость в разработке рекомендаций по изменениям методики расчета долговечности подшипников качения при использовании наномодифицированных смазочных композиций.

Физическая модель взаимодействия наноалмазов с поверхностным слоем дорожек качения колец подшипников. Результаты исследований показывают, что влияние таких модификаторов смазочного материала, как наноструктурированные порошки металлов и углеродосодержащие порошки (алмазо-графитовая шихта и наноалмазы), на контактную долговечность подшипников качения является сложным и неоднозначным.

На протяжении всей работы подшипника происходит не только физическое взаимодействие нанопорошков с поверхностным слоем дорожек и тел качения подшипника, но и химическое взаимодействие на атомарном уровне.

В результате исследований была разработана физическая модель взаимодействия наноалмазов с поверхностным слоем дорожек качения колец подшипников.

Ввиду небольшого размера кластеров наноалмазов относительно неровностей на поверхности дорожек качения колец при работе подшипника происходит частичное заполнение неровностей наноалмазами (рис. 6). При более высоких концентрациях модификатора в базовой смазке он выступает в качестве абразива, что подтверждается проведенными исследованиями. При этом благодаря активному заряду, который несет каждый отдельный наноалмаз, связь, образуемая между поверхностным слоем и частицами модификатора, намного выше, чем связь внутри кластера; благодаря этому не происходит отслаивания наноалмаза после заполнения неровностей.

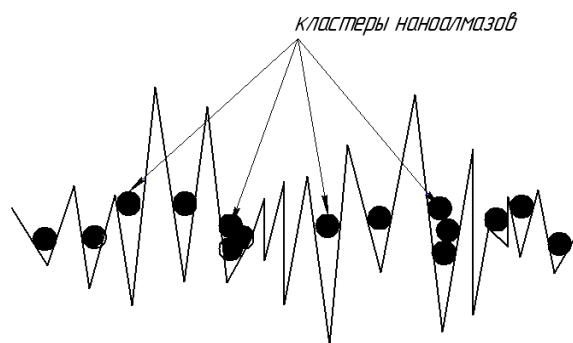


Рис. 6. Частичное заполнение неровностей наноалмазами

Со временем работы подшипника качения происходит исчерпание запаса пластичности поверхностного слоя дорожек качения колец подшипников и частичное отслаивание металла. Однако благодаря активной поверхности используемых наноалмазов порог усталостного разрушения наступает позже, так как происходит сдерживание развития трещин еще на стадии зарождения (рис. 7).

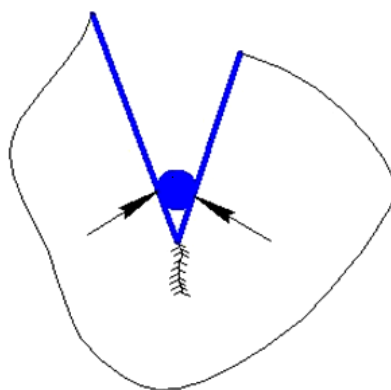


Рис. 7. Принцип действия наноалмаза

Следует также отметить, что состояние поверхностного слоя после обработки различными технологическими методами существенным образом влияет как на характер изменения свойств поверхностного слоя, так и на общую долговечность в процессе работы детали в условиях трения.

Роль технологической наследственности в повышении контактной долговечности подшипников качения. Технология изготовления деталей подшипников хорошо отработана и постоянно совершенствуется, что позволяет обеспечить качество изготовления деталей подшипника (кольца с дорожками качения, сепаратор и тела качения), соответствие характеристик подшипника требованиям действующих стандартов.

Обеспечение долговечности в процессе монтажа и эксплуатации подшипников возможно за счет соблюдения геометрии и шероховатости сопрягаемых с подшипником поверхностей шейки вала и корпуса подшипникового узла, правильного выбора посадок подшипника на вал и в корпус в зависимости от режима работы узла, выбора рациональной схемы нагружения на основе анализа схем напряженно-деформированного состояния деталей подшипника и др.

Нередко максимальная долговечность отличается от минимальной в 50...100 раз. Такой разброс объясняется случайным характером расположения дефектов и распределения физико-механических свойств поверхностного слоя дорожек и тел качения, попаданием в напряженную зону дорожек качения крупных включений, вызывающих появление усталостных трещин. Контактная усталость представляет собой процесс накопления повреждений и развития разрушения поверхностных слоев материала под действием переменных контактных напряжений, вызывающих образование трещин и ямок выкрашивания (питтинг) [1].

В процессе изготовления подшипников возникают первичные дефекты в виде нарушений микрогеометрических характеристик поверхности (шероховатости и волнистости), неравномерности микротвердости и остаточных напряжений и др. Согласно представлениям о технологической наследственности вторичные усталостные повреждения зависят от наследуемых свойств поверхностных слоев колец и тел качения.

Известно, что усталостное выкрашивание начинается с появления на дорожке качения ямки выкрошившегося металла, затем происходит откалывание металла у краев этой ямки, и площадь поврежденной поверхности интенсивно увеличивается [11].

В то же время, как показывают многочисленные исследования, повышение качества подшипников качения требует учета технологического наследования, т.е. совокупности сложных явлений переноса всего комплекса рассматриваемых параметров состояния детали, причем зависимых друг от друга.

Состояние детали формируется на протяжении всей ее технологической предыстории. Любое (технологическое, эксплуатационное и связанное с ними) воздействие на заготовку изменяет все показатели ее состояния. Любой показатель состояния, изменяясь, изменяет все остальные показатели состояния (свойства) заготовки [12].

В соответствии с разработанными положениями механики технологического наследования поверхностный слой дорожек и тел качения формируется на стадиях жизненного цикла, представленных резанием, термической обработкой, шлифованием, полированием и эксплуатационным усталостным нагружением [13].

В исходном состоянии металл не упрочнен, степень деформации сдвига, степень исчерпания запаса пластичности и тензор остаточных напряжений равны нулю.

В процесс токарной обработки, например, дорожек качения, в зоне очага деформации происходит течение металла, приводящее к накоплению деформаций, исчерпанию и частичному восстановлению запаса пластичности в условиях немоного нагружения, к формированию тензора остаточных напряжений и формированию поверхностного слоя с указанными свойствами.

Термическая обработка (как правило, закалка с низким отпуском) приводит к полному восстановлению запаса пластичности и снятию напряжений от токарной обработки. Материал приобретает высокую твердость), при этом возникают остаточные напряжения и наследуется микрогеометрия поверхности от токарной обработки.

Последующая шлифовальная обработка приводит к новому накоплению деформации и новому исчерпанию запаса пластичности металлом тонкого поверхностного слоя.

Полирование дорожки качения означает продолжающийся процесс накопления деформаций; свойства формирующегося тонкого поверхностного слоя зависят от истории нагружения (наследуемых свойств).

Следствием этого является формирование поверхностного слоя с накопленной деформацией и исчерпанным запасом пластичности. Тензор остаточных напряжений сформирован также с учетом истории нагружения.

Технологическое наследование микрогеометрии достаточно хорошо изложено в базовом исследовании П.И. Ящерицына с соавторами [14]. Указывается, что токарная шероховатость влияет не только на шероховатость после шлифования и полирования, но и оказывает влияние на физико-механические свойства поверхностного слоя, в том числе в процессе эксплуатации.

В процессе эксплуатационного усталостного нагружения накопление деформаций продолжается до предельного уровня. В каждом цикле усталостного нагружения происходит трансформация тензора остаточных напряжений. В итоге происходит зарождение начальной трещины и окончание стадии циклической долговечности.

Дальнейшее развитие трещины описывается в категориях диаграмм циклической трещиностойкости с учетом роста трещины под воздействием наследственных параметров поверхностного слоя детали.

Таким образом, роль каждой операции технологического процесса в повышении контактной долговечности подшипников качения необходимо учитывать при изготовлении и дальнейшей эксплуатации.

Заключение. Добавление наноалмазов в базовую смазку подшипников качения в небольших концентрациях (около 0,01 % от массы смазки) значительно уменьшает шероховатость дорожек качения подшипника (более чем на 50 % по сравнению с исходной смазкой).

Установлено, что применение наноалмазов в качестве модификатора смазочного материала позволяет увеличить долговечность подшипников и, как следствие, всего механизма, где применяется подшипники.

Использование в подшипниках качения смазки с содержанием небольшого количества наноалмазов (менее 0,1 %) позволяет получить значительный экономический эффект в результате сокращения количества ремонтов ответственных узлов машин.

Установлено, что использование наноалмазов в качестве добавок возможно не только к пластичным смазкам, но также к маслам и СОЖ, что делает их применение универсальным для многих видов трибосопряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чичинадзе, А.В. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
2. Крагельский, И.В. Узлы трения машин / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
3. Поляков, С.А. Нанотехника в трибологии / С.А. Поляков // Нанотехника. – 2006. – № 1. – С. 42 – 51.

4. Суслов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.
5. Долматов, В.Ю. Детонационные наноалмазы: синтез, строение, свойства и применение / В.Ю. Долматов // Успехи химии. – 2007. – № 4. – С. 375 – 397.
6. Способы отделения ультрадисперсного алмаза: пат. 2081821 Рос. Федерация МПК⁶ C01B31/06 / Н.К. Еременко, И.И. Образцова, О.А. Ефимов, Ю.А. Коробов, Ю.Н. Сафонов, Ю.Ю. Сидорин. – № 5100317/25; заявл. 11.01.1995; опубл. 20.06.1997.
7. Способы получения ультрадисперсного медного порошка: пат. 2115516 Рос. Федерация МПК⁶ B22F9/30 / И.И. Образцова, Г.Ю. Сименюк, Н.К. Еременко. – № 97109435/02; заявл. 04.06.1997; опубл. 20.07.1998.
8. Черменский, О.Н. Подшипники качения: справочник-каталог / О.Н. Черменский, Н.Н. Федотов. – М.: Машиностроение, 2003. – 576 с.
9. Подшипники качения: справочник-каталог / под ред. В.Н. Нарышкина, Р.В. Коросташевского. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
10. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер. – М.: Наука, 1976. – 280 с.
11. Солонин, И.С. Математическая статистика в технологии машиностроения / И.С. Солонин. – М.: Машиностроение, 1972. – 216 с.
12. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А.М. Дальского. – М.: Изд-во МАИ, 2000. – 364 с.
13. Блюменштейн, В.Ю. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин: моногр. / В.Ю. Блюменштейн, В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 400 с.
14. Ящерицын, П.И. Технологическая наследственность в машиностроении / П.И. Ящерицын, Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – Минск: Наука и техника, 1977. – 256 с.

Поступила 02.09.2010

THE USE OF NANOSTRUCTURED DIAMONDS IN THE LUBRICATING COMPOSITIONS FOR ROLLER BEARINGS

L. OBRAZCOV

Established that the application of nanodiamonds as a modifier of the lubricant increases the durability of bearings and, consequently, the entire mechanism, where applicable bearings. Developed physical model of interaction of nanodiamond with the surface layer raceway roller bearings. The role of technological inheritance in the contact fatigue life of roller bearings is demonstrated.