

На правах рукописи

АНЦИФОРОВА Елена Владимировна

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ТРИБОМОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ
РЕМОНТНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ УЗЛОВ ТРЕНИЯ
(НА ПРИМЕРЕ ПОДШИПНИКОВ)

05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Орел – 2015 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Государственный университет – учебно-научно-производственный комплекс» (г. Орёл).

- Научный руководитель: Пахолкин Евгений Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
- Официальные оппоненты: Шкатов Пётр Николаевич,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет приборостроения и информатики», профессор кафедры «Материаловедение и технологии материалов и покрытий»
- Шалобаев Евгений Васильевич,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики», профессор кафедры компьютерного проектирования и дизайна
- Ведущая организация: Муромский институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

Защита состоится «07» апреля 2015 г. в 11 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.182.01 при ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: 302020, г. Орел, Наугорское шоссе, д. 29, ауд. 212, официальный сайт: www.gu-unpk.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» и на официальном сайте www.gu-unpk.ru

Материалы по защите диссертации размещены на официальном сайте ФГБОУ ВПО «Госуниверситет – УНПК» по адресу: www.gu-unpk.ru/defence

Автореферат разослан «____» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.Н. Волков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Актуальность. Состояние рабочих поверхностей определяет надежность и долговечность узлов трения. В настоящее время существует множество технологий восстановления трущихся поверхностей. При этом перспективными и экономически эффективными представляются способы безразборного восстановления узлов трения путем введения различных добавок (модификаторов) в смазочный материал. К таким добавкам относятся ремонтно-восстановительные составы (РВС) на основе мелкодисперсных частиц природных минералов, в частности, серпентинов в качестве геомодификаторов трения. Серпентины в зоне трения способны взаимодействовать с поверхностью металлов, результатом чего является модифицирование трущихся поверхностей. Многочисленные публикации, описывающие исследование рассматриваемых процессов, отмечают улучшение микрогеометрии пар трения, а также образование слоя с особыми физико-механическими свойствами, обеспечивающего улучшение триботехнических характеристик узлов трения.

Гипотезы о принципах действия РВС имеются в трудах К.Н. Долгополова, Д.Н. Любимова, М.Г. Перепелицына, В.Н. Кузьмина, П.М. Быкова, Г.И. Шарова, А.Т. Козакова, А.В. Никольского и др. Гипотезы содержат немало противоречий, при этом в настоящее время отсутствует общепринятая теория, объясняющая сущность явлений в зоне трения при наличии геомодификаторов, и, как следствие, отсутствует теоретически обоснованное диагностическое обеспечение данных технологий. Таким образом, несмотря на существующий много лет рынок смазочных композиций с РВС и повышенный интерес к данным технологиям со стороны промышленных субъектов, реальное внедрение рассматриваемого способа повышения качества узлов трения ограничено. Решение этой проблемы может быть достигнуто за счет разработки методов мониторинга процессов модификации рабочих поверхностей узлов трения. Данные методы мониторинга должны иметь научное обоснование, позволять корректировать технологии применения РВС с целью повышения их эффективности и исключения отрицательных результатов.

Для исследования модифицирования рабочих поверхностей узлов трения в настоящее время используются различные способы, которые в целом характеризуются как трудоемкие и непригодные для широкого внедрения в промышленность, особенно в отношении средних и мелких субъектов хозяйственной деятельности.

Решение проблемы отсутствия диагностического обеспечения технологий восстановления пар трения предлагается достичь за счет разработки электрического метода трибомониторинга процессов модификации трущихся поверхностей. Предпосылкой этого является то, что электрические диагностические параметры чувствительны к изменению состояния поверхностей трения, изменению несущей способности смазочного материала, появлению износа, а процессы ремонтного восстановления, в свою очередь, способствуют улучшению микрогеометрии трущихся поверхностей, улучшению смазочного действия в зонах трения.

Теоретические основы электрических методов изложены в трудах Дж. Кеннела, Д. Снидекера, Т. Тэллиана, С.Ф. Корндорфа, К.В. Подмастерьева, Е.В. Пахолкина, В.Я. Варгашкина, В.В. Мишина, В.В. Маркова, А.Ф. Блинова, Ю.М. Санько, А.А. Бобченко, В.В. Нестеренко, В.П. Чечуевского, А.И. Свириденка, О.В. Холодилова, Н.К. Мышкина и др. Электрические методы трибомониторинга характеризуются

высокой чувствительностью, безинерционностью, использованием сравнительно недорогих технических средств, пригодностью к применению в качестве методов функциональной диагностики. Многие задачи контроля и диагностирования узлов трения эффективно решаются с применением диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения», который, в свою очередь, инструментально оценивается при измерении диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» (НИВ). Однако, реализация методов во многих случаях сопряжена со сложностью интерпретации диагностической информации, а решение новых задач связано с разработкой самостоятельных методов, базирующихся на теоретически обоснованных физических принципах диагностирования и принципах получения и обработки измерительной информации.

Объект исследования – трибомониторинг процессов модифицирования рабочих поверхностей при ремонтном восстановлении деталей узлов трения.

Предмет исследования – электрорезистивный контроль трибосопряжений и диагностическая модель процессов электрического микроконтактирования в зоне трения, учитывающая наличие модифицированных слоев на рабочих поверхностях.

Цель работы – расширение функциональных возможностей электрорезистивного контроля узлов трения за счет обеспечения мониторинга процессов модифицирования пар трения при реализации технологий их ремонтного восстановления.

В работе решаются следующие задачи:

- анализ существующих методов исследования модифицирования поверхностей пар трения при их ремонтном восстановлении геомодификаторами трения;
- обоснование физического принципа трибомониторинга, диагностического параметра;
- разработка математической модели диагностического признака – вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения, описывающей связь процессов модифицирования трущихся поверхностей с диагностическим признаком;
- проведение теоретических исследований связи диагностического признака с параметрами модифицированного слоя на поверхностях трения;
- разработка метода и методики проведения трибомониторинга;
- экспериментальное подтверждение достоверности теоретических положений и эффективности предложенного метода.

Методы исследования. Теоретические исследования проведены на базе положений теорий: вероятности, электрорезистивной трибодиагностики, контактно-гидродинамической, контактирования шероховатых тел. Используются методы статистического и регрессионного анализа, математического моделирования.

Экспериментальные исследования проведены на специализированных установках с использованием серийно выпускаемых и оригинальных технических средств.

Научная новизна:

- предложен и обоснован оригинальный физический принцип трибомониторинга модифицирования поверхностей трения при наличии в смазочном материале геомодификатора трения и усовершенствована математическая модель диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения», базирующаяся на теориях контактирования шероховатых поверхностей, электрическо-

го сопротивления контакта поверхностей, теории смазки и отличающаяся учетом изменения смазочной способности при формировании модифицированных слоев;

- получены теоретические зависимости, описывающие связь диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с параметрами качества трущихся поверхностей, учитывающие не только характеристики микрогеометрии поверхностей, но и наличие в зоне трения граничных смазочных слоев с повышенной адсорбционной (смазочной) способностью;

- получены экспериментальные результаты трибомониторинга процессов модифицирования поверхностей трения с использованием диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его статистической характеристики (коэффициента вариации), обеспечивающей качественную и количественную интерпретацию результатов трибомониторинга, позволяющей оценивать эффективность восстановления трущихся поверхностей.

Практическая ценность:

- разработанный метод мониторинга процессов ремонтного восстановления отличается от существующих меньшими трудоемкостью и затратами на технические средства, пригоден в качестве метода функционального диагностирования объектов (не требует демонтажа и остановки эксплуатации объектов);

- разработанная методика трибомониторинга позволяет оценивать эффективность процессов ремонтного восстановления.

Реализация работы. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении следующих научных проектов и грантов: «Исследования в области электрических методов мониторинга нанотехнологий восстановления трущихся поверхностей» (грант РФФИ 09-08-99076 – 2009 г.); «Разработка метода мониторинга процессов формирования модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения» (ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы, шифр проекта П289); «Исследование направлений комплексирования физических принципов и параметров при создании технологий контроля и диагностирования триботехнических систем» (№ г.р. 01.2.007 05082, ЕЗН Минобрнауки РФ – 2007-2011 г.).

Разработанная методика мониторинга ремонтного восстановления получила внедрение в МУП «Спецавтобаза» (г. Орел). Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВПО «Государственный университет – УНПК».

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на 8-й Международной конференции «Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности» (Москва, 2009), Девятой сессии международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов» (С.-Петербург, 2009), Международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин» (Кемерово, 2009), V-й научно-технической интернет-конференции с международным участием «Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении» (Тюмень, 2010), Международной научно-технической интернет-конференции «Информационные системы и технологии» (Орел, 2011, 2013), Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2011), конференциях ФГБОУ ВПО «Государственный университет-УНПК» (Орел,

2009-2013 гг.), Международной конференции «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» (Орел, 2014 г.).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Электрический метод трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования», включающий оригинальный физический принцип, математический аппарат и последовательность действий при реализации метода.

2. Математическая модель диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения», учитывающая не только характеристики микрогеометрии поверхностей, но и наличие в зоне трения граничных смазочных слоев с повышенной адсорбционной (смазочной) способностью.

3. Теоретические зависимости, описывающие связь диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с состоянием трущихся поверхностей.

4. Экспериментальные результаты трибомониторинга процессов модифицирования поверхностей трения с использованием диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его статистической характеристики (коэффициента вариации) в качестве критерия качественной и количественной интерпретации результатов трибомониторинга.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 75 наименований, 6 приложений. Основная часть работы изложена на 143 страницах машинописного текста. Работа содержит 47 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи исследования, практическая значимость, приведены основные научные положения, выносимые на защиту, и сведения об апробации и реализации результатов работы.

В первой главе обосновывается необходимость мониторинга восстановительных процессов в зоне трения; анализируются гипотезы о механизмах действия РВС и методы трибомониторинга, пригодные для исследования процессов модифицирования поверхностей трения; делается вывод о необходимости разработки нового метода; предлагается физический принцип трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения, основанный на связи вероятности микроконтактирования в зоне трения с изменениями условий фрикционного взаимодействия, обусловленного модифицированием поверхностей трения.

Анализ существующих в трибологии гипотез о действии РВС на основе серпентинов позволил сделать выводы, что механизм действия связан не только с изменением микрогеометрии, но и с изменением условий формирования граничных слоев смазочного материала. Образующийся модифицированный слой обладает большей адсорбционной способностью, чем исходная поверхность трения, что приводит к появлению более устойчивых к разрушению граничных слоев, которые при граничном трении являются основным фактором, предотвращающим изнашивание.

Существующие методы исследования поверхностей трения (методы нанотрибологии, методы испытаний на машинах трения, стендовые испытания) мало пригодны для широкого внедрения в промышленность. Они требуют применения сложного оборудования, высококвалифицированного персонала, являются трудоемкими.

Указанных недостатков лишены электрорезистивные методы трибодиагностики, в частности методы, использующие в качестве диагностического признака вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения, которую оценивают по параметру НИВ. Параметр НИВ является статистической оценкой вероятности микроконтактирования и численно равен отношению суммарной длительности микроконтактирования в зоне трения за время измерения к значению этого времени. Согласно классической модели значение вероятности микроконтактирования зависит от параметров микрогеометрии и толщины смазочного слоя. При граничном трении вероятность микроконтактирования должна равняться единице.

Проведенные предварительные эксперименты показали, что известная математическая модель, описывающая диагностический признак, не учитывает действие полимолекулярных граничных слоев. В экспериментах в качестве объекта было использовано трибосопряжение, конструкция которого и режимы работы исключали возможность обеспечения гидродинамического режима трения (жидкостной смазки). При этом значение диагностического параметра НИВ было равно единице только при использовании смазочных материалов с малой смазывающей способностью. Применение смазочных композиций, обеспечивающих высокую смазывающую способность, позволило фиксировать значения НИВ, отличные от единицы, а с повышением смазывающей способности, как показано на рисунке 1, значение диагностического параметра монотонно уменьшалось. Смазывающая способность оценивалась стандартизованным методом краевого угла смачивания.

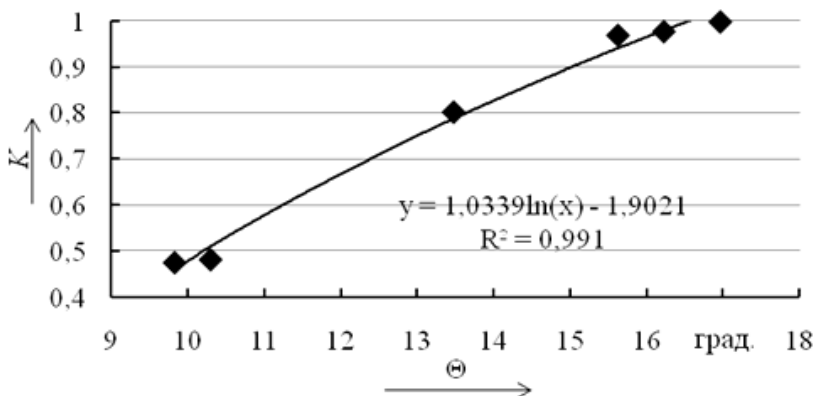


Рисунок 1 – Зависимость между краевым углом капли (Θ) и значением параметра НИВ (K)

На основании изложенных предпосылок был предложен физический принцип трибомониторинга: при фрикционном взаимодействии трущихся поверхностей в результате функционирования геомодификатора происходит модифицирование поверхностей с изменением параметров микрогеометрии и повышением прочности граничного слоя компонентов смазочной композиции, что приводит к уменьшению вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения.

Во второй главе дано обоснование возможности применения параметра НИВ с учетом изложенного принципа диагностирования; предложена математическая модель диагностического признака (вероятности электрического микроконтактирования в зоне трения), проведены теоретические исследования связи диагностического признака с условиями фрикционного взаимодействия при наличии в зоне трения модифицированного слоя.

При моделировании использованы базовые положения теорий контактирования шероховатых тел и контактной гидродинамики (Tallian Т.Е., Крагельский И.В., Демкин Н.Б., Рыжов Э.В., Кеннел Дж.), а также классическая модель диагностического признака (С.Ф. Корндорф, К.В. Подмастерьев и др.).

Известная математическая модель вероятности электрического микроконтактирования предполагает, что оно может наступить при отсутствии несущего слоя. В соответствии с классической моделью значение вероятности контактирования микронеровности с другой поверхностью определяется интегральной функцией $\Phi(\lambda)$ нормированного нормального распределения λ -параметра – параметра режима смазки, который определяется соотношением толщины смазочного слоя и параметров микрогеометрии:

$$P_{\text{гид}} = 1 - \Phi(\lambda), \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{h_{\text{ср}}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{ср}}$ – толщина смазочного слоя; R_{q1} , R_{q2} – средние квадратические отклонения профилей двух поверхностей.

Для учета влияния граничных слоев смазочного материала на вероятность электрического микроконтактирования в работе предложено использовать выражение:

$$P_{\text{гран}} = 1 - k_{\text{отн.защ}}, \quad (3)$$

$k_{\text{отн. защ}}$ – относительный коэффициент защитного покрытия, показывающий, какая часть от потенциальной площади контакта защищена граничным слоем, диапазон значений коэффициента $k_{\text{отн. защ}}$ – от нуля до единицы.

Поскольку электрическое микроконтактирование возможно при одновременном отсутствии несущего слоя и защитного граничного слоя, вероятность микроконтактирования представляется как произведение рассмотренных выше вероятностей:

$$P_1 = P_{\text{гид}} \cdot P_{\text{гран}} = (1 - \Phi(\lambda)) \cdot (1 - k_{\text{отн.защ}}). \quad (4)$$

Вероятность электрического микроконтактирования двух поверхностей, на которых находятся n микронеровностей, определяется выражением:

$$P = 1 - (1 - P_1)^n, \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5), получаем:

$$P = 1 - \left(\Phi(\lambda) + k_{\text{отн.защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн.защ}} \right)^n. \quad (6)$$

Если рассматривать пример вероятности электрического микроконтактирования в подшипнике качения, вероятность микроконтактирования i -го тела качения с наружным (Н) или внутренним (В) кольцом будет определяться выражением:

$$P_{\text{Н(В)}i} = 1 - \left(1 - P_{\text{Н(В)}i} \right)^{n_{\text{Н(В)}i}}. \quad (7)$$

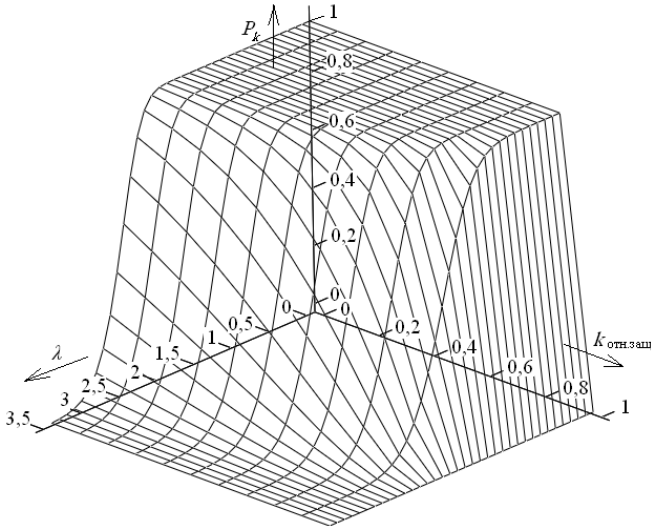
Так как нагрузку могут воспринимать несколько тел качения, то вероятность электрического микроконтактирования в подшипнике определяется выражением:

$$P_k = 1 - \prod_i^Z (1 - P_{\text{Н}i} P_{\text{В}i}). \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (6) и (7), получаем завершённую математическую модель, учитывающую наличие модифицированных слоёв на рабочих поверхностях пар трения:

$$P_k = 1 - \prod_i^Z \left(1 - (1 - (\Phi(\lambda) + k_{\text{отн.защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн.защ}})^{n_{Bi}}) \times (1 - (\Phi(\lambda) + k_{\text{отн.защ}} - \Phi(\lambda) \cdot k_{\text{отн.защ}})^{n_{Hi}}) \right) \quad (9)$$

Проведены теоретические исследования полученной модели (на примере подшипника № 208) и получены зависимости диагностического признака от изменений λ -параметра и относительного коэффициента защитного покрытия (показаны на рисунке 2). Число микронеровностей n определено на основании справочных данных.



Из рисунка 2 следует, что как улучшение микрогеометрии (что ведет к возрастанию λ), так и увеличение площади, покрытой модифицированным слоем (что ведет к возрастанию $k_{\text{отн.защ}}$), однозначно приводят к монотонному убыванию диагностического признака. Следовательно, его использование можно признать эффективным для решения поставленной задачи.

Рисунок 2 – Теоретические зависимости, описывающие связь диагностического признака с состоянием трущихся поверхностей

Третья глава посвящена разработке метода трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения с использованием диагностического параметра НИВ, которым оценивается рассмотренный диагностический признак.

Основной задачей при разработке метода был поиск подходов к обработке результатов измерения диагностического параметра и интерпретации результатов. Сложность этой задачи определяется следующим.

Параметр НИВ имеет широкий диапазон (в зависимости от времени измерения – до 8 порядков), и результаты измерения даже для однотипных объектов, работающих в одинаковых условиях, могут отличаться на несколько порядков. При этом дифференцировать, например, новые подшипники из одной партии по прочим (в т.ч. стандартизованным) критериям, практически невозможно. С одной стороны, это является достоинством параметра НИВ (высокая чувствительность), с другой стороны, существенно усложняет интерпретацию результатов измерений.

Таким образом, для выявления процессов ремонтного восстановления возникла необходимость в качественном анализе временных диаграмм приработки подшипников с различным качеством поверхностей трения (от новых – со сравнительно хорошим качеством поверхностей, до частично отработавших свой ресурс – со сравнительно невысоким качеством поверхностей) с целью изучения различий в характере изменения значений диагностического параметра.

В результате проведенных исследований были выявлены две типовые картины

изменения значений диагностического параметра в процессе приработки в зависимости от эффективности приработки. При этом установлено, что изменения значений НИВ при эффективной приработке характеризуются особенностями:

- наличие более продолжительного временного тренда в сторону снижения средних значений параметра;
- появление и увеличение со временем числа аномальных (нулевых) отсчетов;
- увеличение вариабельности параметра НИВ в процессе приработки.

С учетом сказанного было предложено анализировать не сам параметр НИВ, а его статистическую характеристику – коэффициент вариации, который чувствителен к таким проявлениям в массиве данных, как вариабельность среднего, наличие временных трендов и наличие, так называемых, аномальных отсчетов. Именно данные признаки характерны для массивов данных, представляющих собой результаты измерения НИВ в случае эффективной приработки подшипника.

Для получения не только качественной, но и количественной оценки эффективности действия РВС для каждого объекта (типа подшипника) необходимо проведение предварительных исследований с целью сбора априорной информации об уровне коэффициента вариации параметра НИВ и типом времени приработки объекта, под которым понимается время наступления квазистационарного режима.

Пример реализации электрорезистивного метода трибомониторинга ремонтного восстановления узлов трения выполнен для подшипников типа 1000900, для которых характерно малое время приработки (от 5 ... 10 мин.).

В соответствии с разработанной методикой последовательность операций трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения предусматривает следующие действия:

- получение априорной информации;
- приработка подшипника с непрерывной регистрацией значений диагностического параметра НИВ. Приработка осуществляется до наступления квазистационарного режима с учетом априорной информации о времени приработки для конкретного объекта;
- обработка результатов измерения параметра НИВ для определения статистических оценок – среднего арифметического, среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации;
- принятие решения об эффективности ремонтного восстановления по результатам анализа значения коэффициента вариации с использованием априорной статистической информации, полученной для конкретного объекта диагностирования.

Пример реализации метода иллюстрируется рисунками 3 и 4.

На рисунке 3, *а* представлен график изменения диагностического параметра, регистрируемого во время предварительной обкатки. На рисунках 3, *б* и *в* приведены полученные в процессе обработки данных изменения средних значений диагностического параметра (K_{1cp}), его СКО (S_1) и изменения за время обкатки коэффициента вариации (v_1). На рисунке 4 представлена та же информация при обкатке с восстановительным составом.

Как видно из рисунка 3, *а*, в течение первых 250-ти минут происходит приработка, затем наступает квазистационарный режим, значения диагностического параметра колеблются в интервале от 10^{-5} до 10^{-4} . Коэффициент вариации на момент окон-

чения приработки устанавливается в интервале 40-50 % (установленное экспериментально типовое значение для подшипников данного типа с невысоким качеством рабочих поверхностей).

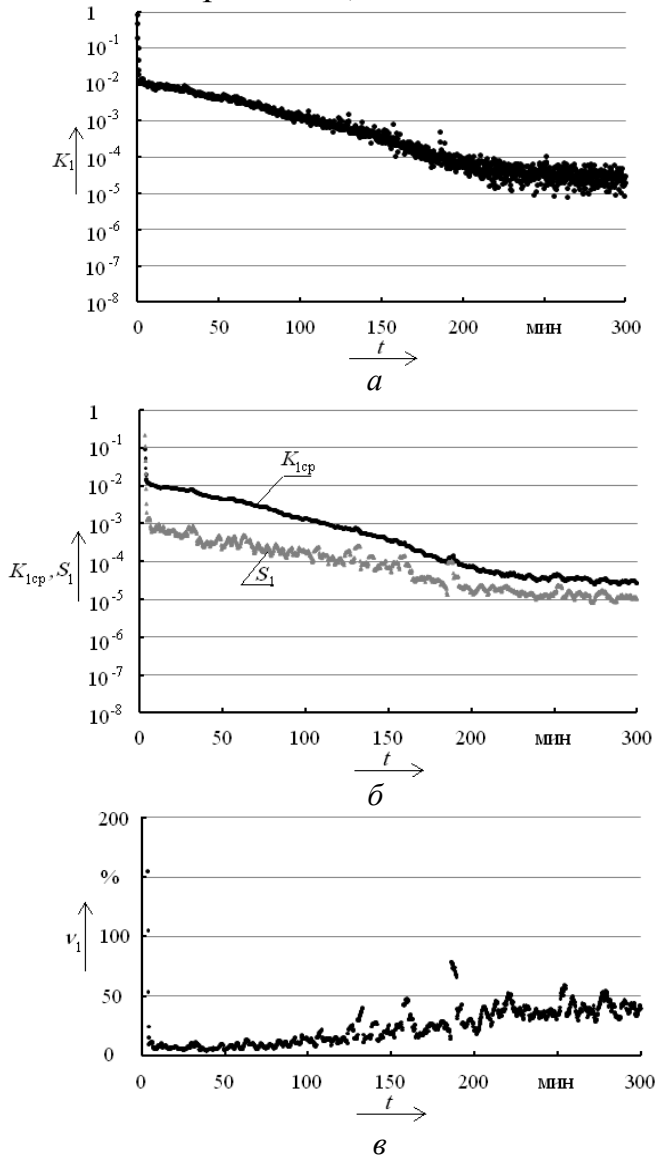


Рисунок 3 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе предварительной обкатки (a – изменение НИВ, b – изменение средних значений и СКО, v – изменение коэффициента вариации)

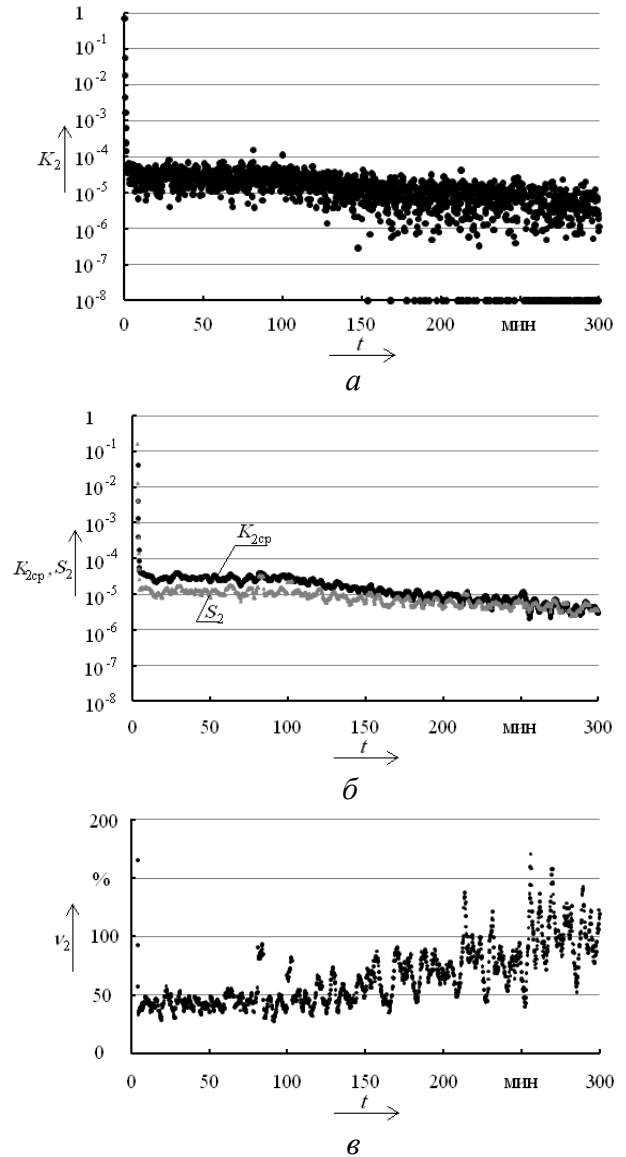


Рисунок 4 – Изменение значений диагностического параметра и его характеристик в процессе обкатки с РВС (a – изменение НИВ, b – изменение средних значений и СКО, v – изменение коэффициента вариации)

Из рисунков 4, b и v видно, что средние значения и СКО уменьшаются, коэффициент вариации в процессе ремонтного восстановления устанавливается в интервале 100-150 % (установленное экспериментально типовое значение для подшипников данного типа с эффективной приработкой рабочих поверхностей).

Таким образом, в процессе ремонтного восстановления средние значения диагностического параметра снизились на порядок, и коэффициент вариации увеличился почти в 3 раза, при этом параметр НИВ и его коэффициент вариации являются

чувствительными к качеству процесса приработки, и в частности к процессу ремонтного восстановления. По изменениям их числовых значений с учетом априорной информации можно судить об эффективности ремонтного восстановления.

Четвертая глава посвящена экспериментальному подтверждению теоретических положений метода и адекватности математической модели.

В соответствии с предложенным физическим принципом требуют доказательства следующие положения:

- чувствительность метода к изменению микрогеометрии рабочих поверхностей;
- чувствительность метода к изменению условий формирования граничных слоев смазочных композиций (смазывающей способности).

Последний тезис доказан в первой главе, где рассмотрены результаты эксперимента по установлению связи значений диагностического параметра со смазывающей способностью материалов. Для доказательства первого тезиса были реализованы два образцовых метода. Первый основан на теории метода поиска локальных дефектов, второй – на применении стандартных методов трибологии.

В рамках первого метода были проведены экспериментальные исследования, которые включали в себя сканирование поверхности кольца подшипника 208 с естественным износом. Сканирование заключается в последовательном измерении параметра НИВ для различных участков исследуемой поверхности (в эксперименте анализировалось качество наружного кольца подшипника качения). Сканирование проводилось после обкатки со смазочным материалом литол-24, и после обкатки с добавлением восстановительного состава. При сканировании частота вращения внутреннего кольца подшипника составила 2700 мин^{-1} , наружного – 4 мин^{-1} ; радиальная нагрузка – 200 Н ; время измерения параметра НИВ – 1 с .

На рисунке 5, *а* приведены результаты сканирования после обкатки с литол-24. Существенный разброс значений диагностического параметра говорит о неравномерности микрогеометрии поверхности. Значения НИВ изменяются в диапазоне от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1,19 \cdot 10^{-3}$. Участки с хорошим качеством рабочих поверхностей подверглись приработке, и значение диагностического параметра для них достигло минимально возможного значения для данного времени измерения – $1 \cdot 10^{-7}$ (рисунок 5, *а*). Участки с худшим качеством характеризуются значениями диагностического параметра на четыре порядка больше.

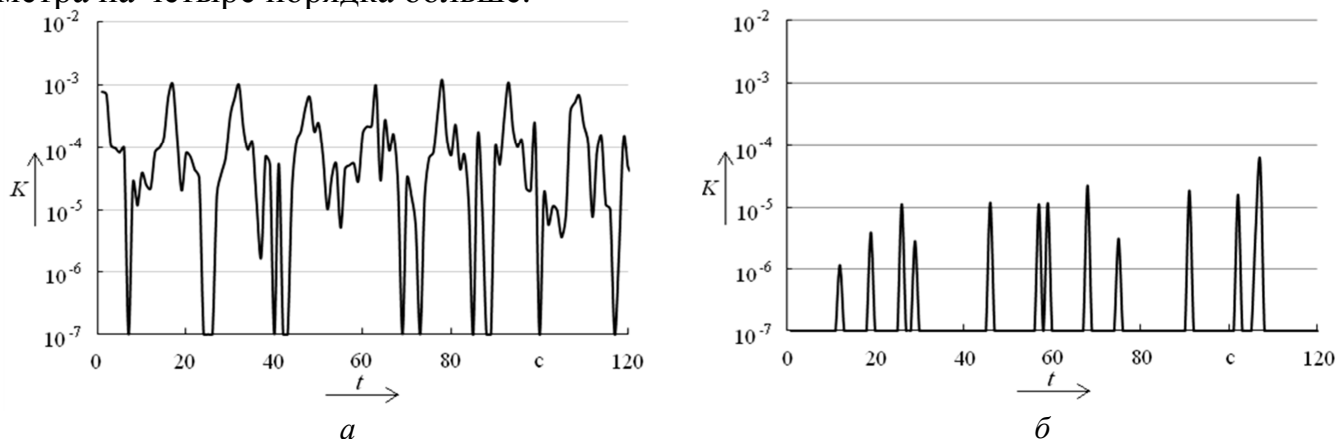


Рисунок 5 – Результаты сканирования наружного кольца подшипника 208: *а* – после обкатки с литол-24; *б* – после обкатки с ПВС

Сканирование поверхности после обкатки с восстановительным составом (рисунок 5, б) показало существенное улучшение микрогеометрии поверхности. Максимальные значения НИВ уменьшились до $5,7 \cdot 10^{-5}$ (на участках с худшим качеством).

В рамках применения второго образцового метода был изготовлен разборный сепаратор, позволивший разбирать и собирать подшипник. Качество поверхности внутреннего кольца (отдельных участков) подшипника предварительно было искусственно ухудшено методом травления, в результате чего на поверхности качения образовались раковины.

При измерении параметров шероховатости после обкатки с литол-24 получены следующие результаты: шероховатость исходной поверхности составила $Ra_1=0,20$ мкм; шероховатость искусственно ухудшенной поверхности составила $Ra_2=0,51$ мкм. Результаты измерения параметров шероховатости после ремонтного восстановления: шероховатость бездефектной поверхности составила $Ra_1=0,18$ мкм; шероховатость искусственно ухудшенной поверхности – $Ra_2=0,21$ мкм, т.е. можно говорить о восстановлении исходной микрогеометрии.

Полученные результаты измерения диагностического параметра K_1 и K_2 обрабатывались следующим образом: вычислялись средние значения K_{1cp} и K_{2cp} , среднеквадратические отклонения S_1 и S_2 , коэффициенты вариации v_1 и v_2 . При этом коэффициент вариации на момент окончания обкатки в первом случае составляет 50-100 % (без РВС), а в случае обкатки с РВС – от 150 % до 250 %, что является типовыми значениями для подшипника данного типа. Таким образом, тезис о чувствительности метода к улучшению микрогеометрии рабочих поверхностей доказан.

В главе 4 также представлен метрологический анализ метода, иллюстрируемый рисунками 6 и 7, который позволил установить, что методическая погрешность измерения диагностического параметра на порядок меньше вариации исследуемых процессов микроконтактирования в подшипнике, оцениваемой средним квадратическим отклонением, т.е. погрешность вносит несущественный вклад в получаемые результаты.

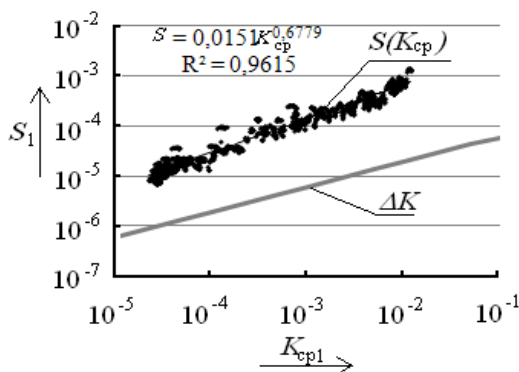


Рисунок 6 – График зависимости методической погрешности (ΔK) оценки вероятности микроконтактирования по НИВ и СКО ($S(K_{cp1})$) экспериментальных точек в процессе обкатки с литол-24

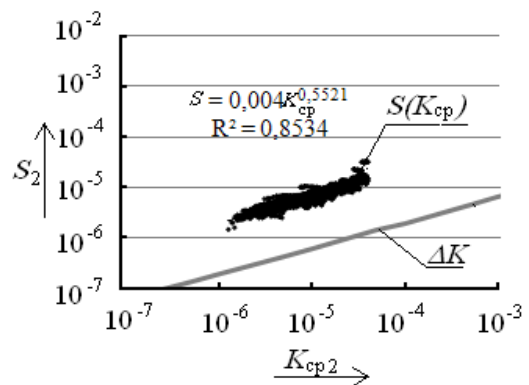


Рисунок 7 – График зависимости методической погрешности (ΔK) оценки вероятности микроконтактирования по НИВ и СКО ($S(K_{cp2})$) экспериментальных точек в процессе обкатки с РВС

Основные результаты и выводы

1. Применяемые в настоящее время методы исследования процессов на поверхностях трения, протекающих при наличии в смазочном материале геомодификаторов трения (в частности, серпентинов), трудоемки, требуют ремонтных простоев оборудования, наличия дорогостоящих технических средств, что не обеспечивает возможности их широкого внедрения в промышленности. Отсутствие эффективных методов трибомониторинга ремонтного безразборного восстановления узлов трения сдерживает внедрение прогрессивных технологий ремонта, что указывает на актуальность разработки таких методов.

2. Предложен физический принцип трибомониторинга процессов ремонтного восстановления, основанный на влиянии модифицированных слоев на вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения трибосопряжения, оцениваемую по диагностическому параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования». Установленная зависимость диагностического признака от смазывающей способности смазочных композиций подтверждает эффективность его использования при трибомониторинге процессов ремонтного восстановления.

3. Усовершенствована математическая модель диагностического признака «вероятность электрического микроконтактирования в зоне трения» с целью учета наличия модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения, изменения шероховатости и смазывающей способности смазочного слоя, что обеспечивает возможность описания характера влияния процессов ремонтного восстановления поверхностей на диагностический признак.

4. Теоретические исследования, проведенные с помощью разработанной модели, подтвердили возможность использования описанного физического принципа, поскольку предложенный для трибомониторинга диагностический признак является чувствительным как к изменению микрогеометрии поверхностей трения, так и к изменению условий смазывания при образовании защитного слоя компонентов смазочного материала на модифицированной поверхности.

5. Разработан электрический метод трибомониторинга процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения по параметру «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования», включающий оригинальный физический принцип, математический аппарат и последовательность действий при реализации метода. Достоинством метода является применение в качестве критерия результатов трибомониторинга простой статистической характеристики – коэффициента вариации нормированного интегрального времени электрического микроконтактирования и простейших методов статистической обработки, не требующих специального программного обеспечения и высококвалифицированного персонала.

6. Экспериментальные исследования с применением образцовых методов подтвердили чувствительность диагностического параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» и его коэффициента вариации к качеству процессов ремонтного восстановления, а также достоверность теоретических положений разработанного метода.

7. С применением разработанной методики трибомониторинга на примере подшипников типа 1000900 установлено числовое значение коэффициента вариации

параметра «нормированное интегральное время электрического микроконтактирования» (более 100 %), характерное для процессов эффективного ремонтного восстановления.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Анцифорова, Е.В. Экспериментальные исследования характера изменения диагностических параметров в процессе формирования модифицированных слоев на рабочих поверхностях пар трения [Текст] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 5(289). – С. 141-148 (Личное участие – 50 %).

2. Анцифорова, Е.В. Трибомониторинг процессов модифицирования рабочих поверхностей узлов трения ремонтно-восстановительными составами: аналитический обзор [Текст] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. Известия ОрелГТУ. – 2010. – № 5-2(283). – С. 95-101 (Личное участие – 70 %).

3. Пахолкин, Е.В. Оценка достоверности результатов исследования смазочной способности материалов электрическими методами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 6(290). – С. 134-137 (Личное участие – 30 %).

4. Пахолкин, Е.В. Экспериментальные исследования смазочной способности моторных масел электрическим методом [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 6-2 (Личное участие – 50 %).

5. Пахолкин, Е.В. Моделирование процессов контактирования в трибосопряжениях с учетом наличия на поверхностях деталей неметаллических модифицированных слоев [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // *Известия ОрелГТУ*. – Сер. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2009. – № 5. – С. 93-99 (Личное участие – 50 %).

6. Пахолкин, Е.В. Мониторинг восстановительных свойств смазочных материалов с ремонтно-восстановительными составами [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // *Известия ОрелГТУ*. – Сер. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2008. – № 4. – С. 69-74 (Личное участие – 50 %).

Прочие публикации

7. Анцифорова, Е.В. Метод обработки диагностической информации при трибомониторинге восстановительных технологий узлов трения [Электронный ресурс] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // VI Международная научно-техническая конференция «Информационные технологии в науке, образовании и производстве» - 2014; материалы конференции. – Текстовое (символьное) электрон. изд. Номер свидетельства ЭЛ № ФС 77 – 51946. – г. Орел, ФГБОУ «Госуниверситет – УНПК» (Личное участие – 75 %).

8. Анцифорова, Е.В. Моделирование процессов микроконтактирования в трибосопряжениях с учетом наличия граничных и модифицированных слоев [Электронный ресурс] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин, С.И. Исаев // *Информационные системы и технологии* – 2013: II международная научно-техническая интернет-конференция, 01.04.2013-31.05.2013; материалы конференции. – Текстовое (символьное) электрон.

изд. Номер свидетельства Эл № ФС 77 - 51946 – г. Орел, ФГБОУ «Госуниверситет – УНПК» (Личное участие – 33 %).

9. Анцифорова, Е.В. Исследование влияния ремонтно-восстановительных составов на процесс приработки узла трения скольжения с использованием электрических методов трибодиагностики [Текст] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // Современные материалы, техника и технология: материалы Международной научно-практической конференции (22 декабря 2011 года) / редкол.: Горохов А.А. (отв. Ред.). – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т., 2011. – С. 41-44 (Личное участие – 50 %).

10. Анцифорова, Е.В. Аппаратные и программные средства получения и обработки измерительной информации при исследовании процессов ремонтного восстановления деталей узлов трения [Текст] / Е.В. Анцифорова // Информационные системы и технологии: материалы Международной научно-технической интернет-конференции: г. Орел, апрель-май 2011. В 3 т. Т. 3 / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. И.С. Константинова. – Орел: ФГОУ ВПО «Госуниверситет-УНПК», 2011. – С. 139-145.

11. Анцифорова, Е.В. Использование электрических методов для мониторинга процессов формирования защитного слоя на поверхностях деталей узлов трения [Текст] / Е.В. Анцифорова, Е.В. Пахолкин // Новые материалы, неразрушающий контроль и наукоемкие технологии в машиностроении: материалы V научно-технической интернет-конференции с международным участием / под ред. А.А. Силича. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2010. – С. 169-173 (Личное участие – 50 %).

12. Пахолкин, Е.В. Исследование процесса приработки подшипников с использованием электрических методов трибодиагностики при добавлении в смазочный материал ремонтно-восстановительного состава [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: сборник трудов Международной научно-практической конференции / под ред. В.Ю. Блюменштейна и Ф.И. Пантелеенко. - Кемерово: ГУ КузГТУ, 2009. – С. 319-327 (Личное участие – 70 %).

13. Пахолкин, Е.В. Применение электропараметрических методов трибомониторинга при исследовании процессов изнашивания и ремонтного восстановления рабочих поверхностей подшипников [Электронный ресурс] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Фундаментальные и прикладные проблемы надежности и диагностики машин и механизмов: девятая сессия международной научной школы, 26 – 30 октября 2009 года; материалы школы. – Текстовое (символьное) электрон. изд. – СПб. : ИПМаш РАН, 2009. – CD-R (1 ед.). – № гос. регистрации 0320902657 (Личное участие – 25 %).

14. Пахолкин, Е.В. Применение методов электрического контроля для мониторинга процессов ремонтного восстановления узлов трения [Текст] / Е.В. Пахолкин, Е.В. Анцифорова // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности. 8-я Международная конференция: Программа конференции. Тезисы докладов. Москва, 18-20 марта 2009 г. - М.: ИД "Спектр", 2009. - С. 78-80 (Личное участие – 30 %).

ЛР ИД № 00670 от 05.01.2000 г.

Подписано к печати « 3 » февраля 2015 г.

Усл. печ. л.1 Тираж 100 экз.

Заказ №189.

Полиграфический отдел «Госуниверситет-УНПК»
302030, г. Орел, ул. Московская, 65