

621.81:621.891:62-192

ХОЛОДИЛОВ Олег Викторович

**РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ
И АКУСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
И СРЕДСТВ ТРИБОДИАГНОСТИКИ**

05.02.04. — Трение и износ в машинах

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Работа выполнена в Институте механики металлополимерных систем Академии наук Беларуси.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Мышкин Н. К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Дмитриченко Н. Ф.,

доктор технических наук, профессор
Карасик И. И.,

доктор технических наук, профессор
Сысоев П. В.

Ведущая организация: Белорусское научно-производственное объединение порошковой металлургии.

Защита состоится «*15*» *июня* . 1993 г. в *10* часов
на заседании специализированного совета Д 006.28.01 при Институте механики металлополимерных систем АН Беларуси по адресу: 246652, г. Гомель, ул. Кирова 32а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института.

Автореферат разослан «*30*» *апреля* . 1993 г.

Заверенные отзывы на автореферат в двух экземплярах просим направлять по адресу специализированного совета.

Ученый секретарь
специализированного совета,
кандидат физико-математических
наук

Н. Б. Ростанина

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы. В связи с возрастающими требованиями к надежности и долговечности современных машин и механизмов, расширением номенклатуры используемых в них материалов важное значение приобретает разработка высокоинформативных методов и средств контроля состояния материалов и узлов трения как в лабораторных условиях, так и в условиях эксплуатации.

Поскольку трибосопряжение представляет собой сложную физическую и техническую систему, в которой одновременно протекает целый комплекс взаимосвязанных процессов, это обуславливает и существование большого числа методов для их исследования.

Существующая практика применения физических методов для оценки состояния трибосопряжений показывает, что традиционно ограничиваются регистрацией таких триботехнических характеристик как коэффициенты трения и износа, температура в зоне трения, измерением шероховатости поверхности и некоторых других физико-механических свойств, по которым судят о состоянии того или иного элемента пары трения, либо о процессах, протекающих в контакте. Однако эти методы дают, как правило, интегральную оценку характера функционирования трибосистемы (ТС). Увеличение объема получаемой информации при использовании дополнительных методов исследования и повышение ее достоверности требует создания банков диагностических данных и применения многомерных статистических методов анализа.

Среди физических методов, позволяющих проводить комплексное изучение состояния элементов трибосопряжения, как в статике, так и в процессе их функционирования, следует отметить электронно-зондовые, акустико-эмиссионные и оптико-магнитные. Характерной их особенностью является высокая чувствительность и информативность, возможность изучения объектов из разных материалов и организация неразрушающего экспресс-контроля. В ряде случаев эти методы являются единственными, позволяющими получить уникальную информацию о процессах, происходящих при трении и изнашивании твердых тел.

Реализация потенциальных возможностей перечисленных методов непосредственно связана с развитием их теоретических основ, систематическими исследованиями информативного содержания регистрируемых параметров, повышением достоверности контроля состояния трибосопряжений. Работы в этом направлении являются актуальными и

перспективными как с точки зрения фундаментальных исследований, так и для решения задач прикладного характера. Успешное их проведение позволит освоить новые области применения этих методов, расширить их функциональные возможности и создать методическую базу для разработки современных контрольно-измерительных систем в различных областях промышленности, там, где требуются высокоинформативные методы исследования и неразрушающего контроля материалов и качества продукции

Работа выполнялась в соответствии с планом НИР по повышению качества машин вследствие снижения потерь на 1981-1985 г.г. (Постановление ГКНТ СССР от 15.06.82 г. № 302, п. 01) и Всесоюзной программой стандартизации по надежности прочности и износостойкости на 1981-1985 г.г. и на период до 1990 г. (раздел 3), планом НИР АН СССР по фундаментальным проблемам машиностроения (Постановление АН СССР от 28.05.86 г., № 642, п.п. 2.4, 2.5) и Всесоюзной научно-технической программой на 1986 - 1990 г. и на период до 1995 г. по повышению технического уровня, качества и надежности машиностроительной продукции, имеющей важное народно-хозяйственное значение (п. 11.02.Н6).

Цель работы - развитие методологии диагностики ТС с использованием электронно-зондовых, акустико-эмиссионных и оптико-магнитных методов исследования процессов трения и изнашивания твердых тел, свойств материалов и создании на их основе комплекса новых взаимодополняющих методик контроля состояния ТС и стандартизации трибоиспытаний.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- разработать модели, связывающие параметры магнитного поля, вторично-электронной и акустической эмиссии, регистрируемые в процессе исследования трибосопряжения, с его триботехническими характеристиками;
- предложить новые методические приемы, обеспечивающие повышение информативности электронно-зондовых, акустико-эмиссионных и оптико-магнитных методов;
- на основе предложенных методических приемов и теоретических моделей разработать новые методики и средства исследования состояния трибосопряжений;
- обосновать принципы стандартизации триботехнических испытаний и

формирования базы данных по свойствам полимерных материалов;
- предложить пути повышения достоверности результатов многопараметрической оценки состояния узлов трения.

Научная новизна. На основе комплексного теоретического и экспериментального исследований развиты научные основы физических методов контроля состояния трибосопряжений, позволяющих проводить комплексную оценку параметров микрогеометрии поверхности, перенесенных и граничных слоев, продуктов износа, а также получать стандартные справочные данные о триботехнических свойствах материалов.

Предложена модель формирования информационного сигнала при взаимодействии электронного пучка с шероховатой поверхностью твердого тела, и установлена аналитическая зависимость между параметрами низкоэнергетичной компоненты вторичных электронов и микрогеометрии поверхности. Показано, что такие характеристики поверхности, как ее удельная площадь и углы наклона микронеровностей могут использоваться при оптимизации технологических режимов изготовления элементов пары трения.

С применением методов морфологического анализа, установлено, что наиболее информативными критериями оценки механизма изнашивания являются статистики распределения частиц изнашивания по размерам и коэффициент формы частиц.

Изучен процесс взаимодействия частиц износа в смазке при наложении внешних полей различной природы (неоднородного магнитного поля теплового лучистого потока) и установлена корреляция между загрязненностью смазочной среды и ее оптическими свойствами.

Обоснована возможность оценки состояния пар трения в процессе их эксплуатации путем дифференциального анализа загрязненных смазочных масел механическими примесями.

Предложены феноменологические модели акустической эмиссии при внешнем трении твердых тел и установлена взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния материала и его триботехническими характеристиками. Разработан комплекс методов и средств контроля переходных процессов трения, изнашивания.

Установлены особенности трения и изнашивания полимеров и композитов на их основе, связанные с образованием слоев фрикционного пареноса. Обоснованы критерии оценки их триботехнических свойств и принципы формирования автоматизированной базы данных.

Предложена методология многомерного статистического анализа

результатов триботехнических испытаний, позволяющая достоверно оценивать состояние трибосопряжения в процессе его эксплуатации.

Новизна результатов подтверждена 19 авторскими свидетельствами на изобретение.

Практическое значение и реализация результатов работы. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования явились основой для создания высокоинформативных методов оценки состояния трибосопряжений. Полученные результаты позволяют решать следующие практические задачи как при проектировании и эксплуатации трибосопряжений машин и механизмов, так и при совершенствовании технологических процессов нанесения покрытий и механической обработки материалов триботехнического назначения:

- осуществлять контроль параметров микрогеометрии шероховатых поверхностей в различных размерных диапазонах с точностью локализации микронеровностей до 10-20 нм;
- проводить морфологический анализ текстуры поверхностей трения;
- осуществлять непрерывный контроль изнашивания трибосопряжений путем анализа продуктов разрушения материалов пары трения как в условиях смазки, так без нее;
- оценивать динамику переходных режимов по параметрам акустической эмиссии;
- осуществлять рациональный выбор материалов триботехнического назначения в зависимости от условий эксплуатации узлов трения машин и механизмов.

Результаты диссертации использованы на ПО "Коралл" (г. Гомель) при создании новой техники, Рыбинском моторостроительном ПО, в учебном процессе Минского радиотехнического и Московского инженерно-физического институтов, научно-исследовательской практике Физико-технического института и Института механики металлополимерных систем АН Беларуси. Разработанные методики исследования, а также контрольно-измерительные системы эксплуатируются в трибологическом центре г. Суонси (Великобритания) и Институте науки и техники г. Сеула (Д. Корея).

С участием автора были созданы методические рекомендации "Метод оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров", "Классификатор триботехнических свойств материалов" и проект международного стандарта "Plain bearings-Evaluation of the tribological properties of polymer-based materials".

Результаты аттестации полимерных материалов триботехнического назначения, проведенной по разработанной методике, решением Госстандарта СССР получили статус рекомендуемых справочных данных.

Суммарный экономический эффект от использования разработанных автором методик за период с 1982 по 1991 г.г. составил около 500 тыс.руб.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на: международных V конгрессе Евротриб-89 (Хельсинки, Финляндия, 1989), IV симпозиуме "Интертрибо-90" (Высокие Татры, Чехословакия, 1990), конференциях "Трение, износ и смазочные материалы" (Ташкент, 1985), "Износ материалов" (Хьюстон, 1987, Денвер, 1989, Орlando, 1991 США), ТРИБ-89,91 (Крагуевац, СФРЮ), "Рубежи трибологии" (Статфорд, Великобритания, 1991), "Новые материалы и технологии в трибологии" (Минск, 1992), всесоюзных конференциях "Трение и изнашивание композиционных материалов" (Гомель, 1982), "Трение и смазка в машинах" (Челябинск, 1983), "Эксплуатационные свойства конструкционных полимерных материалов" (Нальчик, 1984), "Микрокриогенная техника" (Москва, 1984), "Состояние и перспективы развития микронэлектронной техники" (Минск, 1985), "Технологическое управление триботехническими характеристиками износа машин", (Кишинев, 1985), "Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем" (Москва, 1986), "Акустическая эмиссия" (Кишинев, 1987), "Триботехнические испытания в проблеме контроля качества материалов и конструкций" (Андропов, 1989), "Структурная самоорганизация и оптимизация триботехнических характеристик конструкционных и инструментальных материалов" (Киев, 1990), "Износостойкость машин", (Брянск, 1991), 10-ом симпозиуме по механохимии и механоэмиссии твердых тел (Москва, 1986), республиканских и региональных конференциях "Композиционные материалы на основе полимеров" (Минск, 1984), "Триботехнология - производству" (Таганрог, 1991), "Качество и надежность узлов трения" (Хмельницкий, 1992), выездном заседании координационного Совета по трению правления СНИО СССР "Проблемы работы узлов трения в субтропическом климате с повышенной влажностью и в условиях высокогорья" (Кабулети, 1988), научном семинаре "Физические основы трибологии и надежности материалов и конструкций" Института проблем материаловедения АН Украины (Киев, 1991).

Результаты исследований автора по восстановлению реальной то-

пографии поверхностей трения твердых тел были доложены в виде лекции в Орегонском центре подготовки специалистов (США, 1989).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 72 работы, в том числе одна монография, получено 19 авторских свидетельств СССР на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, основных результатов работы, списка литературы, приложения и содержит 240 страниц основного текста, включая список литературы из 369 наименований, 62 рисунка, 24 таблицы, и 40 страниц приложений.

Содержание работы

Во Введении дается характеристика трибологической диагностики и ее основных особенностей. Показана сложность обеспечения надежного контроля функционирования трибосопряжений.

В Первой главе приводится классификация физических методов контроля состояния трибосопряжений. Проанализированы информативные возможности и области применения наиболее распространенных из них. Отмечены проблемы, связанные с трудностями диагностики смазанных узлов трения. На основании проведенного анализа, обоснована актуальность решаемой научно-технической проблемы, сформулированы цель и задачи исследования. Приводятся научные положения, составляющие новизну работы и ее практическую значимость.

Вторая глава посвящена созданию методики оценки параметров микрогеометрии поверхностей трения.

Микрогеометрия поверхностей деталей машин и механизмов является одним из важнейших эксплуатационных факторов, определяющих надежность и долговечность трибосопряжений. При исследовании топографии поверхностей трения одна из основных проблем, которую необходимо решить - это создание методов и средств оценки информативных параметров. Последнее имеет особое значение, т. к. на получаемых количественных оценках основаны наши теоретические представления и, соответственно, понимание механизмов фрикционного взаимодействия твердых тел.

Проведенное нами комплексное исследование поверхностей, обладающих различной пространственной структурой, показало, что, несмотря на имеющееся значительное различие морфологии поверхности, практически все полученные количественные характеристики (гистограммные, спектральные, корреляционные) совпадают в пределах ошиб-

ки измерения. Шероховатая поверхность, являясь трехмерным объектом, обладает вследствие этого пространственной организацией, так называемой "текстурой", количественная оценка которой связана с использованием различных спектральных преобразований, применением автокорреляционных функций, матриц совместной встречаемости и т.д.

Получаемые при этом характеристики определяют взаимосвязь различных элементов поверхностей. Можно полагать, что существуют два уровня отображения структуры шероховатых поверхностей и соответствующих им характеристик: метрические - совокупность точечных параметров, описывающих средние высоты, шаги, радиусы кривизны, углы наклона неровностей, и топологические (текстурные) - определяются параметрами взаимного расположения элементов поверхности. Причем, каждая категория требует своего способа представления исходной информации. Так, например, для количественной оценки метрических отношений необходимо знание значений только высот неровностей безотносительно их координат на плоскости. Топологические характеристики требуют для своей количественной оценки представления информации в виде изображений, определяемых посредством некоторого функционального преобразования геометрических свойств поверхности в значение яркостей ряда точек.

Таким образом, совместно с изображением необходимо иметь массив данных, организованный таким образом, что каждой точке изображения ставится в соответствие величина, характеризующая ее положение по высоте. При этом изображение требуется для выделения и идентификации различных структур, а матрица ординат - для их количественной оценки.

Анализ существующих методов измерения шероховатости поверхности показал, что ни один из них полностью не удовлетворяет сформулированным выше требованиям. Наиболее приемлемым с точки зрения получения комплекса метрологических параметров является метод растровой электронной микроскопии (РЕМ). Для установления корреляционной связи между эмиссионными и топографическими характеристиками поверхности, нами был изучен механизм взаимодействия электронного зонда с шероховатой поверхностью и показано, что между низкоэнергетической компонентой излучения вторичных электронов (ВЭ) и ординатами профиля Y существует взаимно однозначное соответствие, выражаемое следующим соотношением:

$$Y = \frac{1}{\Delta\psi} \int_0^l t g\psi \, dx = \frac{1}{\Delta\psi} \int_0^l (1 - S_2/S_1) \, dx, \quad (1)$$

где S_1, S_2 - значения сигнала вторичных электронов до и после поворота образца, $\Delta\psi$ - угол поворота образца.

Используя аппарат случайных полей по сигналу ВЭ можно определить моменты спектральной плотности

$$m_2 = 2t g\alpha / \pi; \quad m_4 = 6\pi D_e m_2 \sqrt{3};$$

$$m_0 = (\pi m_2)^2 / [21 \sqrt{(D_e / 1,2) - 1}], \quad (2)$$

где l - длина строки, $t g\alpha$ - средний тангенс угла наклона микронеровностей, D_e - плотность экстремумов поверхности; и провести расчет основных параметров профиля

$$R_a = \sqrt{2m_0 / \pi}; \quad S_m = 2\pi / \sqrt{m_2 / m_0}; \quad S = 2\pi / \sqrt{m_4 / m_0}, \quad (3)$$

где R_a - среднее арифметическое отклонение профиля; S_m - средний шаг неровностей; S - средний шаг местных выступов.

При реконструкции профиля по разработанному нами методу необходимо использовать два массива данных, полученных до и после поворота образца на некоторый угол, связанный с характеристиками измерительной системы соотношением

$$\Delta\psi = \text{arcsec}(1 + \varepsilon \sigma S_0^{-1} n^{-1/2}), \quad (4)$$

где S_0 - значение сигнала ВЭ при нормальном падении пучка, ε - доверительная вероятность, σ - дисперсия сигнала, n - число измерений.

С учетом физических аспектов образования ВЭ и возможностей используемой аппаратуры получена формула для оценки вертикального разрешения метода

$$R_v = 2N(\pi d_i)^{-1} (2ek/\beta t)^{1/2} \text{tg} \left\{ \arccos \left[N^{-1} \lg(q/p) + 1/2 \right] \right\}, \quad (5)$$

где N - отношение сигнал/шум; d_i - апертура электронного зонда; e - заряд электрона; k - число пробных точек за время развертки зонда t в строку; q, p - вероятность отсутствия и появления сигнала.

При исследовании модельных образцов шероховатости была достигнута разрешающая способность по вертикали 10 нм и показано, что адекватная реконструкция топографической структуры поверхности возможна для шероховатых поверхностей с углами наклона неровностей не превышающих 70°

При решении ряда контактных задач триботехники в качестве одного из расчетных параметров используют удельную площадь поверхности (УПП), которую можно определить как отношение реальной площади поверхности к номинальной. Существующие в настоящее время методы нахождения УПП дают результаты, расхождение которых достигает трех порядков. На наш взгляд это является следствием существования на поверхности неровностей различного размерного диапазона. Поэтому для корректной интерпретации результатов измерений УПП необходимо контролировать масштаб неровностей.

Исходя из допущения, что анализируемая поверхность является гауссовской, было получено выражение для сигнала ВЭ

$$S = S_0 (1 + q^2)^{1/2}, \quad (6)$$

где $q = \text{tg} \alpha = \left[(\partial y / \partial x)^2 + (\partial y / \partial z)^2 \right]^{1/2}$ - модуль градиента поверхности.

Плотность вероятности градиента имеет вид

$$P(q) = \Delta_1^{-1/2} q \exp(-M_2 q^2 / 4\Delta_1) I_0 \left[q^2 (M_2^2 - 4\Delta_1)^{1/2} / 4\Delta_1 \right], \quad (7)$$

где Δ_1, M_2 - инварианты поверхности; I_0 - нулевая функция Бесселя с мнимым аргументом.

Поскольку можно легко найти среднее значение сигнала ВЭ \bar{S} по всей анализируемой площади, то, преобразуя выражение (6) к виду S/S_0 , имеем

$$\bar{S}/S_0 = \int_0^{\infty} (1 + q^2)^{1/2} P(q) dq. \quad (8)$$

Правая часть полученного выражения есть не что иное как удельная площадь гауссовской поверхности U .

Селективная оценка УПП в размерном диапазоне неровностей $d_1 \dots d_2$ ($d_1 < d_2$) осуществляется согласно соотношению

$$U(d_1 \dots d_2) = U(d_1) / U(d_2), \quad (9)$$

где $U(d_i)$ - УПП, измеренная при диаметре пучка электронов d_i .

При отработке методики были решены задачи: выбора оптимальных режимов регистрации сигнала ВЭ, его нормализации и фильтрации с целью снижения уровня паразитных флуктуаций.

Для обработки изображения использовали персональный компьютер IBM PC AT и специально разработанную программу topSEM, написанную на языке PASCAL, реализующую описанный ранее алгоритм восстано-

ния реального профиля поверхности и ряд сервисных операций.

Для связи компьютера и РЭМ был разработан интерфейс ввода изображений, выполненный в виде печатной платы.

Особое место уделено методике подготовки образцов для анализа. В процессе исследований создано устройство для нанесения электропроводящих покрытий на поверхность трения полимерных материалов.

На созданном измерительном комплексе были проведены исследования особенностей морфологии поверхностей металлов после их механической обработки: резание, шлифование, точение, фрезерование.

В частности, изучались УПП и углы наклона микронеровностей. Было установлено, что даже для достаточно малых значений диаметров зонда, реальная площадь исследованных шероховатых поверхностей не превышает номинальную более, чем на 10%. При этом средние углы наклона неровностей не зависят от вида обработки и величины шероховатости. Однако с уменьшением шага дискретизации, что соответствует регистрации неровностей меньших размеров, их угол наклона растет. Единственным разумным объяснением этому может служить существование субшероховатости, что подтвердилось при селективной оценке углов наклона в заданных диапазонах неровностей. Оказалось, что во всех размерных диапазонах величина углов составляет $4.5-7.5^\circ$.

Разработанная методика нашла применение при оптимизации процессов нанесения TiN и (Ti,Al)N- покрытий на режущий инструмент. Анализ морфологических характеристик поверхности получаемых TiN-покрытий позволил определить оптимальный ток дуги и подобрать состав реакционной газовой смеси.

Электронно-микроскопические исследования (Ti,Al)N- покрытий показали наличие большого количества металлических микровключений в поверхностную структуру. При этом по сравнению с TiN все параметры шероховатости (Ti,Al)N- покрытий значительно возрастают. Это сопровождается ростом износостойкости инструмента в широком диапазоне скоростей резания.

В третьей главе рассмотрены методические аспекты исследования поверхностных слоев трения взаимодействующих твердых тел.

Для осуществления внешнего трения необходимо реализовать правило градиента сдвигового сопротивления, требующего формирования ослабленного поверхностного слоя основного материала или появления на поверхности трения пленок, имеющих малое сдвиговое сопротивление (слой фрикционного переноса при трении полимеров-СФП). В этой

связи важное значение приобретает разработка комплекса новых и усовершенствование известных методик определения физико-механических характеристик этого слоя, как в статике, так и в процессе работы трибосопряжения.

Микротвердость входит во многие аналитические выражения, связывающие физико-механические и фрикционные свойства материалов, поэтому представляет интерес задача повышения точности ее определения, особенно для полимерных материалов.

При испытании последних значения микротвердости получаются значительно завышенными. Это связано с эффектом вязкоупругого последействия, которое приводит к уменьшению действительного отпечатка после снятия нагрузки на индентор. Устранить этот эффект можно путем нанесения на поверхность индикаторного слоя (ИС), тормозящего вязкоупругие деформации.

В качестве индикаторного слоя можно использовать различные металлы. Проведенные нами исследования показали, что при отношении модулей упругости материала ИС (E_m) и полимера (E_n) $> 10^2$ размер отпечатка не меняется. Подбирая в каждом конкретном случае материал ИС можно повысить достоверность результатов определения микротвердости полимеров.

Одним из наиболее эффективных технологических приемов по борьбе с задиром при трении является упрочнение поверхностного слоя. Возможность выбора в качестве параметра упрочнения различных деформационных характеристик является причиной существования большого количества методов оценки степени упрочнения, в частности, и по изменению микротвердости. Однако в случае, когда толщина поверхностных слоев мала (несколько мкм), микротвердость является грубой характеристикой, т.к. объем втянутого в деформацию материала соизмерим, а иногда и превышает, толщину слоя.

Для определения степени фрикционного упрочнения поверхностного слоя нами предложена следующая методика: в процессе трения собирают частицы износа, находят их средний объем. После окончания работы пары трения, определяют средние размеры пятен фактического касания, в фрикционное упрочнение Φ рассчитывают по формуле

$$\Phi = \left\{ \cos^2 \left[2,7 \arctg(0,75Va^{-2}b^{-1}) \right] \right\}^{-1}, \quad (10)$$

где V - средний объем частицы износа; a, b - средний продольный и поперечный размеры пятна контакта.

В основе этого соотношения лежит связь между параметрами очагов пластического деформирования и объемом частиц износа при малоцикловом разрушении поверхностного слоя.

Оценить степень фрикционного упрочнения можно и непосредственно в процессе эксплуатации трибосопряжения путем регистрации упругих волн напряжений-акустической эмиссии (АЭ), возникающих вследствие перестройки структуры материала как на пятнах касания, так и в приповерхностных слоях.

О влиянии напряженного состояния поверхностных слоев на параметры АЭ свидетельствует обнаруженный нами гистерезис зависимости скорости счета АЭ от давления в контакте при трении скольжения в режиме "нагрузка-разгрузка" ("Н-Р"). Появление гистерезиса объясняется тем, что на стадии формирования пятен касания часть микровыступов сближаемых поверхностей деформируется пластически и при уменьшении удельной нагрузки не восстанавливается, поэтому скорость счета АЭ в режиме разгрузки меньше, чем при нагружении. С увеличением числа циклов "Н-Р" наблюдается уменьшение площади петли гистерезиса, связанное с сокращением числа активизируемых источников АЭ и уровня излучаемой энергии.

Таким образом, регистрируя относительное изменение числа импульсов АЭ в цикле "Н-Р", можно оценить степень поверхностного упрочнения материала непосредственно в процессе фрикционного взаимодействия.

Выполненные исследования показали, что на работоспособность металлополимерных пар трения существенное влияние оказывает образование СФП, которые можно характеризовать такими параметрами, как толщина, площадь, время жизни.

Для оценки геометрических параметров пересеченных слоев нами был изучен процесс взаимодействия пучка первичных электронов в растровом электронном микроскопе с системой типа металл-полимер. Было установлено, что при определенной энергии электроны первичного пучка проходят через слой полимерного материала, находящийся на металлической подложке. При этом происходит изменение числа отраженных от нее электронов. Изменяя энергию пучка и регистрируя ее значение в момент, когда коэффициент вторичной электронной эмиссии принимает экстремальное значение, толщину слоя можно найти из соотношения

$$n = k E^{1,67} A Z^{-0,89} \rho^{-1}, \quad (11)$$

где $k=0,00276...0,00138$; E — энергия первичного пучка электронов; ρ , z , A — плотность, атомный номер и масса полимерного материала.

Одновременно с толщиной СФП в процессе электронно-микроскопического исследования можно измерить их площадь. К сожалению определение параметров СФП таким методом возможно лишь при остановке и разборке узла трения. Поэтому большой интерес представляет создание методик оценки состояния СФП непосредственно в процессе эксплуатации трибосопрежения.

Нами было показано, что существование СФП распадается на несколько этапов: образование, устойчивая работа, разрушение.

Важной характеристикой СФП является их "время жизни" (τ), которое может характеризовать износостойкость как самих слоев, так и полимера в целом. Исследования закономерностей акустического излучения при трении полимеров и композитов на их основе показало наличие периодов повышенной активности, связанных с возникновением и разрушением СФП. Регистрируя скорость счета АЭ в процессе изнашивания полимерных композитов, можно оценить площадь СФП

$$S_i^* = S_0 (N_0 - N_i^*) / (N_0 - N^*), \quad (12)$$

где S_0 — номинальная площадь контакта; N_0 — скорость счета при трении полимера по чистой поверхности металла; N_i^* — текущее значение скорости счета при образовании и разрушении СФП; N^* — скорость счета при трении по СФП.

Выражение для скорости изнашивания СФП I_v имеет вид

$$I_v = h S_i^* / \tau, \quad (13)$$

где h , S_i^* — толщина и площадь СФП; τ — время жизни СФП.

Четвертая глава посвящена разработке методов оценки состояния ТС путем количественного анализа продуктов изнашивания.

Одним из перспективных направлений в развитии средств и алгоритмов диагностирования является анализ частиц изнашивания, образующихся в процессе эксплуатации трибологической системы. Это связано с тем, что знание морфологических особенностей строения частиц изнашивания позволяет оценить текущее состояние ТС и прогнозировать ресурс ее работы.

Поскольку процесс трения и изнашивания носит стохастический характер, то диапазон размеров частиц изнашивания очень велик. Очевидно, что делать какие-либо выводы о характере процессов, происходящих во фрикционном контакте можно лишь на основании стати-

стической обработки больших массивов экспериментальных данных.

Морфологический анализ проводился на комплексе РЭМ-ЭВМ с использованием программы, позволяющей определять в режиме вторичных электронов такие параметры, как средняя площадь (S), периметр (L), диаметр (d), коэффициент формы частиц (γ). Строились также распределения частиц износа по размерам. Методические трудности, связанные с широким диапазоном изменения размеров частиц износа, были устранены путем нахождения суммарного распределения $P(z)$ как свертки распределений частиц $P_1(x)$, $P_2(x)$, рассматриваемых при различных увеличениях

$$P(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} P_1(x)P_2(z-x)dx. \quad (14)$$

Проведенные нами исследования показали, что статистические параметры распределения частиц износа по размерам и коэффициент формы являются чувствительными к характеру изнашивания трибосопряжения. В таблице 1 приведены значения статистик для различных видов изнашивания.

Таблица 1. Области изменения статистик распределения частиц износа по размерам.

| Статистики распределения | Вид изнашивания | | |
|-----------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| | абразивный | усталостный | адгезионный |
| Ассиметрия, d | $d > 0$ | $d = 0$ | $d < 0$ |
| Эксцесс, l | $l \neq 0$ | $l = 0$ | $l \neq 0$ |
| Коэффициент формы, γ | $\gamma \leq 0,5$ | $0,5 \leq \gamma \leq 1,0$ | $0,5 \leq \gamma \leq 1,0$ |

Алгоритм оценки состояния трибосопряжения состоит в: сборе частиц износа; анализе дисперсного состава и нахождении статистик; идентификации вида изнашивания по имеющимся априорным данным.

Исследование изнашивания полимерных композитов показало, что некоторые статистические параметры частиц износа (γ , d) коррелируют с износными характеристиками материалов. Это позволяет проводить их сравнительную оценку при оптимизации содержания наполнителя или модификатора.

Как показывает практика, одним из основных факторов, учитыва-

емых при проведении профилактических мероприятий по техническому обслуживанию механизмов является загрязненность масел. Превышение содержания органических и неорганических примесей в масле сверх допустимых норм приводит к ускоренному выходу из строя механизма.

Поскольку для существующих методов оценки загрязненности масел имеют место малая информативность и сложность проведения анализа нами были проведены исследования взаимодействия оптического излучения и загрязняющих примесей, содержащихся в пробе масла, с целью установления надежных критериев диагностирования смазанных трибосопряжений.

Оказалось, что оптическое излучение ИК-диапазона вызывает локальное повышение температуры масла, сопровождающееся искривлением межфазной поверхности. В основе этого эффекта лежит конвективное движение жидкости (масла), описываемое системой уравнений в приближении Буссинеска. Если вертикальные градиенты температуры и концентрации примесей достаточно малы, то жидкость находится в стационарном состоянии, описываемом соотношениями:

$$p^c = p_0 - \rho_0 g(z-h) - \rho_0 g(\alpha \Delta T - \beta \Delta C_1)(z-h)^2 (2h)^{-1}, \quad (15)$$

$$T^c = T_0 - (\Delta T/h)z, \quad C_1^c = C_1^0 - (\Delta C_1/h)z,$$

$$v^c = 0, \quad \Delta T = T^0 - T_0, \quad \Delta C_1 = -(D'/D)C_{10} \Delta T,$$

где v - поле скорости, ρ - плотность, p - давление, T - температура, C - концентрация, α , β - коэффициенты теплового и концентрационного объемного расширения, g - ускорение свободного падения, D - коэффициент диффузии, D' - соотношение Онзагера, z - вертикальная координата, нижний индекс "0" обозначает некоторую постоянную исходную величину, верхний индекс "0" относится к значениям при $z = 0$.

С увеличением температурного градиента стационарное состояние нарушается, и форма поверхности раздела воздух-жидкость будет изменяться. Причем уравнение состояния на межфазной границе имеет вид:

$$\sigma = \sigma_0 + (\partial \sigma / \partial T) [\delta T - \xi (\Delta T/h)] + (\partial \sigma / \partial C_1) [\delta C_1 - \xi (\Delta C_1/h)]. \quad (16)$$

Через определенное время искривление поверхности достигает своего максимального значения, для которого уравнение (16) принимает вид:

$$\rho_0 g [\xi + (d\Delta T - \beta \Delta C) \xi^2 / 2h] = k \left[\sigma'_0 - \xi \left(\frac{\partial \sigma}{\partial T} \right) \left(\frac{\Delta T}{h} \right) - \xi \left(\frac{\partial \sigma}{\partial C} \right) \left(\frac{\Delta C}{h} \right) \right]. \quad (17)$$

Анализ полученного выражения показывает, что параметры искривленности межфазной поверхности жидкости в стационарном состоянии определяются концентрацией содержащихся в ней вещества (С). Экспериментальные исследования этого явления на модельных пробах масел, содержащих примеси в виде карбонильного железа дисперсностью 0.5-12 мкм, показали, что между максимальным значением фототока и концентрацией нерастворимых примесей существует линейная зависимость. Установление этого факта послужило основой разработки методики оценки как общей загрязненности смазочных масел, так и загрязненности их нерастворимыми примесями.

Поскольку загрязненность масел имеет различную природу, то естественным является стремление осуществить ее дифференцированную оценку: обеспечить возможность отделения металлических частиц износа от частиц другой природы. Для этой цели целесообразно использовать магнитные методы.

Так как отработанное масло содержит частицы изнашивания широкого размерного диапазона (10^{-9} - 10^{-3} м), то проба масла проявляет свойства как коллоидных систем (для некоторых частиц дисперсной фазы характерно броуновское движение), так и суспензий (существуют частицы, способные противостоять броуновскому движению). Нами исследовано поведение частиц износа в пробе масла при наложении магнитного поля.

В общем случае поведение частиц износа и характер структурирования определяется соотношением энергий магнитного диполь-дипольного взаимодействия, броуновского движения, молекулярного взаимодействия и адсорбционных слоев. При малой концентрации частиц (<1 мас.%) происходит образование цепочек, ориентированных вдоль поля. Были получены соотношения, позволяющие оценить число частиц ($N_{ц}$) в цепочке:

$$Hn^{1/3} (\text{grad}H_r)^{-1} \cdot \sum_{m=1}^N m^{-3} = N_{ц}^{4/3} + 8kT\pi N_{ц} n^{1/3} (aH \text{grad}H_r)^{-1} \quad (18)$$

и расстояние L между цепочками

$$L = \left(\frac{a^3 H_z N_{ц}}{\text{grad}H_r} \right)^{1/4} \quad (19)$$

где H , H_r , H_z - напряженность магнитного поля и ее радиальная и осевая составляющие, k - постоянная Больцмана, T - абсолютная температура, n - число частиц в единице объема, $N_{ад}$ - поверхностная концентрация адсорбированных молекул, a - радиус частицы.

Экспериментальная проверка полученных соотношений при исследовании проб смазки, содержащих ферромагнитные частицы, показала, что для частиц размером $(0.5-12)10^{-6}$ м характерно образование цепочек длиной $(0.3-0.7)10^{-3}$ м, содержащих 100-300 частиц.

В ходе исследований, был установлен ряд зависимостей между оптическими характеристиками смазочной среды и поведением частиц износа, что привело к созданию оптико-магнитного детектора (ОМД) для экспресс-диагностики загрязненности смазочных масел. Он позволяет оценить: общую загрязненность масла; концентрацию ферромагнитных частиц износа; процентное содержание мелких (< 50 мкм) частиц износа.

Были проведены: проверка работоспособности ОМД в лабораторных условиях при исследовании изнашивания пары трения вал (сталь 45, 45-50 HRC) - вкладыш (сталь 45, незакаленная) при смазке маслом И-20 А, а также сравнительная оценка возможностей ОМД и разработанных в Великобритании вращательной системы осаждения (ВСО) и счетчика частиц. Результаты лабораторных испытаний свидетельствуют о том, что ОМД дает достоверные данные о концентрации частиц износа в пробе масла. Сравнительные испытания показали эффективность использования ОМД в тех случаях, когда не требуется полная информация о частицах, а достаточно следить за скоростью их образования.

В пятой главе рассмотрены вопросы оценки состояния трибосопряжений на основании анализа излучательных процессов (акустико-эмиссионная диагностика).

Вследствие дискретности фрикционного контакта процесс трения, в общем случае, не является стационарным, что приводит к сложной динамической картине распределения деформаций и напряжений в поверхностных слоях контактирующих тел. Все это сопровождается возникновением акустических колебаний, в том числе и акустической эмиссии (АЭ).

Поскольку АЭ является непосредственной реакцией поверхности трения на контактное взаимодействие, то перспективным является ее использование для непрерывного контроля процесса трения и изнашивания подвижных сопряжений.

Отличительная особенность акустических колебаний во фрикционном контакте — это наличие множества одновременно возбуждаемых акустических источников различной энергоемкости, случайно распределенных в области номинального контакта. Исчерпывающее описание соотношений между параметрами АЭ и характеристиками фрикционного взаимодействия может быть проведено только при учете всех источников. Однако имеющихся в настоящее время данных недостаточно, чтобы установить общие закономерности, количественно описывающие феноменологию этого процесса. В ряде случаев это возможно сделать лишь путем последовательных приближений и методов идеализации.

Нами была предпринята попытка установить корреляцию между параметрами АЭ и количеством пятен касания, разрушающихся с отделением частиц износа.

Если принять, что форма акустического сигнала, возникающего при разрушении пятна касания описывается с помощью функции $A_i F_i(t-t_i)$, то излучение контактной области, содержащей n разрушаемых пятен касания может быть представлена в виде случайного процесса.

$$z(t) = \sum_{i=1}^n A_i F_i(t-t_i), \quad (20)$$

либо в виде суперпозиции случайных гармонических колебаний:

$$z(t) = \sum_{j=1}^n B_j \cos(\omega_j t - \varphi_j) = \sum_{j=1}^n (x_j \cos \omega_j t + y_j \sin \omega_j t), \quad (21)$$

$$B_j^2 = x_j^2 + y_j^2, \quad \varphi_j = \arctg(y_j/x_j).$$

Если коэффициенты Фурье функции (21) при достаточно длинных реализациях эмиссионного процесса имеют нормальную плотность распределения $p_1(x)$ и $p_2(y)$, то для огибающей B имеем

$$P(B) = \int_0^{2\pi} p_1(B \cos d) p_2(B \sin d) dd = \\ = B(\pi \sigma^2)^{-1} \exp\left[-(B^2 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2)/2\sigma^2\right] J_0(\bar{x}\bar{y}B/\sigma^2), \quad (22)$$

где J_0 — функция Бесселя нулевого порядка.

Поскольку мы исходим из того, что акустические колебания возбуждаются при отделении частиц изнашивания, то, согласно стохастической модели трения, энергетический спектр АЭ отображает процесс

разрушения поверхности трения. Полагая, что энергия, необходимая для отделения частицы изнашивания пропорциональна энергии возникающего на пятне контакта элементарного источника акустического излучения: $\Delta E_i = \beta \gamma a_i^2 = k B_i^2$ (β - коэффициент формы, γ - коэффициент, характеризующий эмиссионную способность материала; a_i - линейный размер частицы износа), имеем $B_i = (\beta \gamma / k)^{1/2} a_i$.

С учетом этого соотношения, зная функцию огибающей акустического излучения $P(B)$ (22) можно оценить функцию распределения частиц изнашивания по размерам:

$$P(a) = (\beta \gamma / k)^{1/2} \int_0^{2\pi} p_1(B \cos d) p_2(B \sin d) dd \quad (23)$$

Поскольку по физическому смыслу $P(a)$ определяет количество разрушающихся пятен касания, то по изменению параметров амплитудного распределения импульсов АЭ можно судить о состоянии зоны контакта, оценивать вклад того или иного вида изнашивания.

Теоретическое обоснование соотношений между параметрами АЭ и характеристиками процесса фрикционного контактирования требует учета многообразия источников АЭ, кооперативного характера их действия, а также законов распределения источников АЭ по номинальной площади контакта. Решение этой задачи может быть достигнуто при использовании статистических моделей генерирования АЭ при трении.

Если отождествить размер фрикционной связи (пятна контакта) с длительностью единичного импульса акустического излучения, то на основе модельных представлений о контактировании шероховатых поверхностей может быть проведена оценка распределения импульсов акустического излучения по длительности. Причем некоторые вероятностные закономерности могут быть получены при использовании метода случайных полей.

Полагая, что шероховатая поверхность описывается нормальным, однородным, эргодическим случайным полем $h(x, y)$, и профиль поверхности $h(x)$ - случайный процесс с нормированной корреляционной функцией $\rho(\tau) = \exp(-d\tau^2)$, где τ - расстояние по оси абсцисс между точками профиля и воспользовавшись математическим решением задачи о выбросах, задача нахождения распределения пятен касания по размеру может быть сведена к нахождению закона распределения выбросов нормальных флуктуаций по длительности. В результате для функции плотности распределения события, заключающегося в том, что значение

случайного профиля $h(x)$ будет превышать некоторый фиксированный уровень A в течении времени τ , получено следующее соотношение :

$$\rho(\tau) = M(a, \tau) \left[b_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2 \mu^n \cdot (n!)^{-1} \right], \quad (24)$$

где $M(a, \tau) = (2d)^{1/2} (1-\rho^2)^{-3/2} D_{33} \exp \left[a^{-2} (D-D_1)/2D \right]$,

$$b_0 = \int_0^{\infty} u \cdot \exp(-\gamma u) \Phi^1(u) du; \quad b_n = \int_0^{\infty} u \cdot \exp(-\gamma u) \Phi^{(n+1)}(u) du,$$

$$\gamma = a D_2 (D_{33}^2 - D_{34}^2)^{-1} \left[(1-\rho^2) D_{33} \right]^{1/2}, \quad a = A/\sigma; \quad \mu = D_{34}/D_{33}.$$

$\Phi^{n+1}(u) = (-1)^n H_n(u) / 2\pi^{1/2} \exp(-u^2/2)$; $H_n(u)$ - полиномы Чебышева-Эрмита, σ - дисперсия профиля, D, D_{ij} - определитель и его дополнения.

Проведенная количественная оценка коэффициентов b_0, \dots, b_n свидетельствует о том, что для приближенных вычислений в формуле (24) можно ограничиться первыми тремя членами ряда. В этом случае суммарный счет АЭ(N) для данной модели контакта можно оценить из соотношения

$$N \approx \int_0^t M(a, \tau) \left[b_0 + b_1^2 \mu + b_2^2 \frac{\mu^2}{2!} + b_3^2 \frac{\mu^3}{3!} \right] d\tau \quad (25)$$

Экспериментальная проверка полученного соотношения (табл.2) показала достаточно хорошее соответствие предложенной модели АЭ, в том случае, когда нагрузка в контакте не приводит к возникновению напряжений, превышающих предел текучести материала.

Таблица 2. Сравнение расчетных (N_p) и экспериментальных (N_s) значений суммарного счета АЭ

| Регистрируемый параметр | Давление в контакте, МПа | | | |
|-------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|
| | 0,1 | 0,3 | 0,7 | 2,6 |
| $(N_p - N_s) / N_p, \%$ | 22 | 25 | 29 | 42 |

Некоторые соотношения, связывающие параметры АЭ и напряженно-деформированного состояния трякционно взаимодействующих материалов, можно получить, исходя из физико-статистической модели кон-

такта, в основе которой лежит существование в зоне трения ячеистой излучающей структуры. Характерный размер ячейки определяется масштабом фрикционной связи. Количество ячеек, разрушаемое в единицу времени, определяет активность АЭ.

Нами предложена феноменологическая модель АЭ при трении твердых тел, основанная на положениях кинетической концепции прочности материалов, согласно которой количество ячеек прочности σ , разрушающееся термофлуктуационно при возрастании нагрузки от p до $p+dp$ за время жизни фрикционной связи, определяется выражением

$$N_L(\sigma, P) = N_1(\sigma, P) - N_2(\sigma, P) = N_1(\sigma, P) \left[1 - \exp \int_0^{d/v} W(\sigma, P) dt \right], \quad (26)$$

где $N_1(\sigma, P)$, $N_2(\sigma, P)$ - количество σ -ячеек, разрушаемое при скорости скольжения v , нагрузке p и $p+dp$ соответственно за время фрикционной связи; $W(\sigma, p)$ - вероятность разрыва σ -ячейки в единицу времени; d - размер ячейки.

Дифференцируя полученное выражение по времени, получаем количество σ -ячеек разрушающихся термофлуктуационно или активность АЭ.

Исследования излучательных процессов при трении и изнашивании твердых тел, проводили на испытательном комплексе, включающем в себя трибометры и регистрирующую аппаратуру. В трибометрах были реализованы две схемы контакта: "сфера-плоскость" и "вал-конформный вкладыш".

Специфические особенности сигналов АЭ, возникающие при трении и изнашивании твердых тел (низкий энергетический уровень, широкий диапазон частот, большой динамический диапазон изменения параметров) предъявляют определенные требования к разработке регистрирующей аппаратуры. Это минимальные искажения формы исследуемых сигналов, высокая чувствительность, большой коэффициент усиления, малый уровень собственных шумов. Проведенный нами анализ показал, что при исследовании процессов трения и изнашивания следует отдавать предпочтение широкополосным системам. Нами были разработаны устройства приемно-усилительного тракта, выполненные в виде отдельного блока с выносным предварительным усилителем, удовлетворяющие указанным требованиям.

С использованием данных устройств были изучены особенности генерирования АЭ при трении металлополимерных пар и подтверждена корреляционная зависимость между параметрами трибологической сис-

темы и АЭ, что явилось основой для создания комплекса методов контроля состояния трибосопряжений в процессе их эксплуатации (табл.3).

Таблица 3.Связь триботехнических и акустических параметров.

| Триботехническая характеристика | Параметр АЭ | Авторское свидетельство |
|----------------------------------|--|--|
| Время приработки, τ | скорость счета - N, мощность - W, дисперсия амплитуд - m_2 . | 599192, 688862, 862048, 1158903 |
| Скорость изнашивания, I_m | скорость счета - N, мощность - W. | - - |
| Потеря массы, ΔG | энергия - E. | - |
| Скорость образования частиц, n | амплитуда - A. | 979958 |
| Фракционный состав частиц износа | спектр мощности - $S(\omega)$. | 853525 |
| Вид изнашивания | статистики α, β | пол. реш. по заявке № 4848776 |

Приработка. С точки зрения физики и механики процесса приработки акустическое излучение зоны контакта несет больше объективной информации, чем такие параметры, как температура, коэффициент трения. Момент окончания приработки определяют по стабилизации акустических параметров: N, W, m_2 . Учитывая, что диапазон их изменения на порядок шире, чем T и τ , возрастает достоверность и точность испытаний.

Изнашивание. Одной из задач диагностики является предупреждение чрезмерного износа трибосопряжения. Поскольку параметры АЭ непосредственно связаны с размером и числом разрушаемых фрикционных связей, существует количественное соответствие между потерей массы материала в результате изнашивания и энергией АЭ, описываемое выражением

$$\Delta G = c_1 + c_2 E, \quad (27)$$

где c_1 и c_2 - постоянные, учитывающие физико-механические свойства

материалов и условия контактирования.

Проводя измерения амплитуды сигнала АЭ за фиксированный промежуток времени, можно оценить скорость образования частиц износа по формуле:

$$n = K_T \lg(A/U_A), \quad (28)$$

где A - амплитуда сигнала АЭ; K_T - коэффициент пропорциональности; U_A - уровень деформационных шумов.

Спектр мощности сигнала АЭ несет информацию о фракционном составе продуктов износа, причем наиболее вероятный размер частиц износа L определяют из соотношения $L = c/2\omega$, где ω - частота сигнала АЭ, на которую приходится максимум спектра мощности, c - скорость распространения сигнала в материале.

Проведенные нами исследования показали, что, используя выше рассмотренные параметры АЭ, трудно идентифицировать вид изнашивания, вследствие перекрывания их диапазонов. Возможным выходом из этой ситуации является использование статистических методов анализа. Оказалось, что статистики сигнала АЭ, описывающие поведение его корреляционной функции и оцениваемые из соотношений

$$\alpha = (nT \ln n)^{-1} \sum_0^{nT} |\varepsilon(k/n+1/n) - \varepsilon(k/n)|, \quad (29)$$

$$\beta = (nT)^{-1} \sum_0^{nT} [\varepsilon(k/n+1/n) - \varepsilon(k/n)]^2,$$

где $\varepsilon(t)$ - акустический сигнал; n - шаг квантования; T - время измерения; $k=1, \dots, T/n$, позволяют провести разделение видов изнашивания. Регистрируя в процессе трения АЭ мы получаем массив значений скорости счета АЭ. Определяя α и β , можно идентифицировать вид изнашивания, как вектор γ в пространстве параметров α и β .

Шестая глава посвящена разработке методики испытаний антифрикционных полимерных композитов с целью получения стандартных справочных данных.

Имеющиеся в научно-технической литературе сведения свидетельствуют о сложности проведения сопоставительного анализа триботехнических свойств полимерных композитов. Это связано, прежде всего, с отсутствием единых методик испытаний.

На основании изучения применяемых в промышленности узлов трения в качестве базовой была выбрана схема испытаний "вал-конформный вкладыш". Общепринятыми критериями оценки триботехнических

свойств являются коэффициенты трения и износа. Причем необходимо знание закономерностей изменения этих характеристик в зависимости от силовых (давление в контакте) и кинематических (скорость скольжения) параметров трибосистемы.

Косвенной формой оценки износостойкости является произведение давления в контакте на скорость скольжения - pv . Поскольку потеря работоспособности полимерных узлов трения происходит в основном из-за превышения температурой в зоне трения температуры размягчения и износом допустимой величины, то рассматривают предельные $[pv]$ -критерии при ограничении по температуре и допустимому износу, составляющему 25 мкм за 100 часов работы - pv_{25} .

В проведенных нами исследованиях показано, что фрикционное поведение полимерных композитов, в основном, определяется процессом формирования слоев фрикционного переноса, который зависит от программы проведения испытаний, устанавливающей порядок задания нагрузочно-скоростных параметров испытаний и продолжительность их действия. Для определения программы проведения испытаний, отвечающей требованиям достоверности получаемой информации, нами было исследовано влияние нагрузки и скорости скольжения на тепловую напряженность узла трения.

Если главным условием образования СФП считать размягчение поверхностного слоя полимера под воздействием тепла, генерируемого при трении, то оценить толщину этого слоя можно путем нахождения распределения температур в объеме полимера.

Расчет распределения температур для ряда полимеров (фторопласт, капрон и др.) проводился в предположении квазистационарного термического контакта при упругом и пластическом деформировании неровностей, когда нагрузка в контакте не зависит от времени, а величины скоростей перемещения области контакта относительно каждого из трущихся тел постоянны.

Расчеты показывают, что с ростом числа Пекле средняя температура поверхности нелинейно увеличивается, что обусловлено как возрастанием генерируемого при трении тепла так и уменьшением количества тепла, диффундирующего в полупространство. Это приводит к формированию тонкого поверхностного слоя, в котором тепло "накапливается" вплоть до плавления этого слоя. Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что при увеличении числа Пекле толщина слоя уменьшается и становится соизмеримой с толщиной шеро-

ховатого слоя. Увеличение давления при постоянной скорости приводит к росту толщины этого слоя.

Измерение толщины перенесенного слоя на электронном микроскопе показало, что расхождение данных эксперимента и расчетных оценок не превышает 20%, что является достаточно хорошим показателем, учитывая большое число принятых допущений. Очевидно, что учет явления фрикционного переноса в широком диапазоне нагрузок, скоростей и температур, а также его влияния на установление стационарных режимов изнашивания важен для получения достоверной оценки триботехнических характеристик полимерных материалов.

С учетом особенностей фрикционного поведения полимерных материалов в качестве переменных параметров, были выбраны - давление в контакте и скорость скольжения, а критериями работоспособности материалов, предназначенных для эксплуатации в подшипниках скольжения, были приняты зависимости коэффициентов трения и износа от параметров p и v в диапазоне, ограниченном чувствительностью измерительных приборов и совокупностью предельных значений p и v .

Программа определения предельных значений параметров трения заключалась в следующем:

- ряд промежуточных предельных значений нагрузки, определяется от уровня предельного значения нагрузки в статике до минимального значения при ступенчатом увеличении скорости скольжения;
- на каждой ступени скорости скольжения испытания проводятся до достижения постоянства температуры и коэффициента трения в зоне контакта. Длительность работы в стабильном режиме составляет - 15 минут;
- скорость скольжения увеличивается на ступень и испытания повторяются на тех же образцах. Скорость скольжения, выше которой отсутствует стабилизация температуры и коэффициента трения в зоне контакта, считается предельной для заданной нагрузки;
- устанавливается минимальная скорость скольжения и задается нагрузка, обеспечивающая выполнение условия $p v_{\min} = 0,8 \cdot p_{\min} v_{\text{пред}}$. Испытания проводятся до стабилизации τ и T , затем нагрузка увеличивается на ступень и т.д. без замены образцов. Нагрузка, выше которой отсутствует стабилизация τ и T принимается за предельную для данной скорости скольжения.

Результат обработки экспериментальных данных представляет кривую $[p v]$, являющуюся совокупностью предельных значений нагрузок

и скоростей.

Оценка изнашивания в диапазоне, ограниченном предельными значениями параметров трения, состояла в нахождении значений ρ и ν , соответствующих интенсивности изнашивания 10^{-10} . Это значение соответствует принятой в качестве сравнительного эталона допустимой скорости изнашивания, равной 25 мкм/ч. Нахождение допустимых параметров трения осуществлялось на основе имеющихся расчетно-экспериментальных зависимостей.

Как уже отмечалось, при проектировании подвижных сопряжений машин и механизмов приходится решать задачу оптимального выбора материалов триботехнического назначения. Проблемы, возникающие при этом, связаны не только с большим разнообразием материалов, выпускаемых промышленностью, но и с отсутствием стандартных справочных данных об их свойствах и особенностях поведения в различных условиях эксплуатации. Имеющиеся в научно-технической литературе сведения разрознены и зачастую трудно сопоставимы. Большое значение в этой связи приобретает организация автоматизированных баз данных (БД) в области трибологии, позволяющих осуществлять поиск информации по всем ее разделам.

Опыт работы по накоплению экспериментальных данных при стандартных триботехнических испытаниях показал, что наиболее предпочтительным для организации хранения и поиска информации о свойствах того или иного материала является использование автоматизированных информационно-поисковых систем (АИПС) документально-фактографического типа, работающих в реальном масштабе времени. На основе массива экспериментальных данных, накопленных в процессе паспортизации полимерных композитов, был создан банк данных "Полимер", использующий Автоматизированную Систему Поиска Информации по Дескрипторам (АСПИД-7/СМ) и реализованный на ЭВМ СМ 1420, который предоставляет пользователю информацию по триботехническим, механическим, электрическим и другим свойствам материалов.

В последние годы Межведомственным Советом по трению и смазкам была начата работа по созданию единой информационной системы SOVTRIBO, ориентированной на использование систем управления базами данных (СУБД) реляционного типа.

В связи с этим, имеющийся у нас массив данных был перенесен в БД, реализованную на ЭВМ IBM PC AT, и использующую СУБД CLIPPER. Структура этой БД состоит из корневой части в которую заносятся

условия проведения испытаний, конструктивные особенности узлов трения, применяемые материалы и среды, средние значения триботехнических параметров, критические точки, и разработанной нами подбазу данных, в которой содержатся более подробные сведения о поведении материалов при заданных условиях.

Подбаза данных реализована таким образом, что каждая экспериментальная точка, представляющая набор данных, характеризующих трибологическое поведение материала: коэффициент износа (K), коэффициент трения (f), температура (T) при заданных условиях - скорости (v) и давлении (p), описывается вектором из семи элементов. Таким образом, одна экспериментальная точка требует одну запись в базе данных.

Система позволяет реализовать ответы на запросы, которые можно объединить в три основные группы:

- Прямые запросы типа: привести конкретные свойства материалов (или нескольких материалов);
- Инверсные запросы типа: найти материалы, обладающие заданным свойством в определенном диапазоне значений;
- Запрос на выбор материала по комплексу свойств: найти материал, удовлетворяющий нескольким свойствам одновременно.

Поиск материалов организован посредством диалога пользователя с системой.

В седьмой главе рассмотрены основные принципы вероятностного подхода к построению количественных критериев оценки состояния трибосопряжений.

Трудность разработки методов оценки состояния узлов трения обусловлена стохастической природой процессов, протекающих на трещинном контакте. Существующие критерии оценки строятся, как правило, на эвристической комбинации регистрируемых в ходе исследований показателей, а методы идентификации состояния ТС основаны на эмпирическом установлении границ по типу непересекающихся классов, что во многих случаях снижает качество прогнозирования. Поэтому для целей диагностики необходимо использовать методы многомерного статистического анализа, основанного на системном подходе к многообразию процессов трения и изнашивания и представлении об узле трения как о вероятностной динамической системе, преобразующей входные воздействия в выходные.

В качестве входных могут служить параметры, характеризующие

Физико-механическое состояние контактной области, например, нагрузочно-скоростные условия, а в качестве выходных- реакция контактной области на фрикционное взаимодействие: температура, коэффициент трения, параметры АЭ и пр.

Первым этапом статистического исследования ТС является анализ корреляционных связей, выявление скрытых причин, порождающих разные по силе связи, которые отражают основные механизмы фрикционного взаимодействия и построение интегральных критериев (ИК).

Для этого предлагается воспользоваться факторным анализом, в основе которого лежит гипотеза о том, что измеряемые исходные показатели (ИП) состояния ТС являются комбинацией некоторых латентных факторов. С использованием корреляционного анализа получают ИК, число которых определяется количеством значимых связей в пространстве ИП. В результате анализа выявляется корреляционная структура (корреляционный "портрет") трибосопряжения в фиксированный момент времени.

Следующим этапом предлагаемой методики является выделение однородных классов состояний ТС, характеризующихся "близкими" корреляционными структурами регистрируемых первичных показателей.

Выделение однородных классов должно осуществляться не эмпирическим путем, а формализованными статистическими методами на основе анализа корреляционной структуры трибосистемы (кластерный анализ). Те характеристики, которые наилучшим образом разделяют однородные классы, будут являться критериями оценки фрикционного состояния трибосистемы. Поэтому последним этапом является построение критериев и правил идентификации выделенных типологических состояний трибосистемы. Он осуществляется методом пошагового дискриминантного анализа.

На примере пары трения "вал-частичный вкладыш" была проведена проверка предлагаемой методики и показано, что она может быть положена в основу алгоритмического обеспечения автоматизированной системы экспресс-оценки состояния трибосопряжений, учитывающей вероятностный характер фрикционных процессов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований развиты научные основы контроля состояния трибосопряжений электромагнитными и акустическими методами, и решена актуальная научно-техническая проблема создания комплекса взаимно дополняющих методик, позволяющих достоверно оценивать параметры микрогеометрии поверхности, перенесенных и граничных слоев, продуктов изнашивания, получать стандартные триботехнические характеристики материалов.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена зависимость параметров микрогеометрии поверхностей трибосопряжений и низкоэнергетической компоненты вторично-электронной эмиссии. Показано, что адекватная реконструкция топографической структуры поверхности возможна для шероховатых поверхностей с углами наклона неровностей не превышающих 70° .

2. Разработаны методики, аппаратные и программные средства, позволяющие измерять параметры шероховатости, угловые характеристики, удельную площадь поверхности в различных размерных диапазонах.

3. С помощью разработанного комплекса РЭМ-ЭВМ исследована кинетика изменения параметров микрогеометрии поверхностей трения, граничных и перенесенных слоев, частиц изнашивания. Полученные при этом результаты использованы при оптимизации режимов механической обработки поверхностей трения, нанесения покрытий, идентификации характера изнашивания.

4. Показано, что морфологические особенности продуктов изнашивания определяются состоянием трибосистемы. Установлены критерии оценки состояния трибосопряжений, в качестве которых выступают статистики распределения частиц изнашивания по размерам. Определены характерные области изменения статистик для различных видов изнашивания.

5. Исследование трения и изнашивания трибосопряжений в условиях граничной смазки позволили разработать методы и средства контроля их состояния по загрязненности смазочной среды, основанные на эффектах взаимодействия частиц износа, находящихся в смазочных маслах, с электромагнитными полями различной природы. Показано, что использование неоднородного магнитного поля позволяет проводить

дифференциальный анализ загрязненности.

6. На основе феноменологической модели акустического излучения при внешнем трении твердых тел установлена корреляция между параметрами напряженно-деформированного состояния материала и его триботехническими характеристиками. Разработаны методы и средства контроля переходных процессов трения и изнашивания трибосопряжений.

7. Выявлены особенности изнашивания полимерных материалов и композитов на их основе. Установлено, что определяющим фактором их фрикционного поведения является формирование слоев фрикционного переноса. Изучено влияние на их образование нагрузочно-скоростных параметров. Показано, что соотношение скорости скольжения и нагрузки определяют предельные режимы эксплуатации трибосопряжения.

Предложена методика определения критериев оценки триботехнических свойств полимерных материалов, по которой проведена паспортизация широко используемых в промышленности полимерных композиционных материалов. Полученные данные легли в основу банка данных, реализованного на IBM PC и позволяющего осуществлять подбор материала для трибосопряжений по заданному комплексу свойств.

8. Предложены принципы построения системы оценки состояния трибосопряжений, основанной на использовании методов многомерного статистического анализа.

9. Суммарный экономический эффект от использования разработанных методов и средств контроля трибосопряжений в промышленности, научно-исследовательской практике за период с 1982 по 1991 г.г. составил около 500 тыс. рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Калмыкова Т.Ф., Холодилов О.В. Акустические и электрические методы в триботехнике. Минск, Наука и техника. 1987. (Acoustic and electrical methods in triboengineering. N.Y., Allerton Press Inc. 1988)
2. Холодилов О.В. Диагностика изнашивания // Трибология в СНГ и США: исследования и приложения. М., Машиностроение; N.Y., Allerton Press Inc. 1993.
3. Холодилов О.В. О кинетике образования слоев фрикционного переноса // Трение и износ. 1980. Т.1, № 3. С.510-514.
4. Холодилов О.В. Влияние типа износа полимеров на параметры акус-

- тической эмиссии //Изв. АН БССР. 1980. № 4. С.67-73.
- 5.Холодильов О.В. Морфология продуктов Фрикционного переноса полимеров //Трение и износ. 1981. Т. 2., № 3. С.434-440.
- 6.Мышкин Н.К., Белый А.В., Холодильов О.В. Оценка размеров фрагментов массопереноса //Трение и износ. 1981. Т.2, № 2. С.372-375.
- 7.Белый В.А., Свириденко А.И., Холодильов О.В., Крагельский И.В. О механизме образования слоев фрикционного переноса // 1-й симпозиум "Интертрибо-81", Чехословакия. 1981. Т.1. С.172-179.
- 8.Свириденко А.И., Калмыкова Т.Ф., Холодильов О.В. Исследование фактической площади фрикционного контакта с помощью акустических колебаний. Ч. II //Трение и износ. 1982. Т.3. № 5. С.808-812.
- 9.Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки триботехнических свойств материалов на основе полимеров. Методические рекомендации. МР 74-82. М., ВНИИМаш. 1982.
- 10.Классификатор триботехнических свойств материалов. Методические рекомендации. МР 101-83. М., 1983.
- 11.Холодильов О.В. Влияние скорости скольжения на особенности изнашивания термопластов //Трение и износ. 1984. Т.5, № 3. С. 431-436.
- 12.Холодильов О.В. Роль эксплуатационного режима в механизме изнашивания и фрикционного переноса полимеров //Трение и износ. 1984. Т.5, № 4. С.637-643.
- 13.Холодильов О.В., Титков Н.И., Кирпиченко Ю.Е. Влияние условий формирования на фрикционные свойства полиэтиленовых покрытий // Трение и износ. 1985. Т.6, № 3. С.505-509.
- 14.Холодильов О.В., Григорьев А.Я., Мышкин Н.К. К оценке микротопографии с помощью РЭМ //Трение и износ. 1985. Т.6, № 4. С.740-744.
- 15.Холодильов О.В., Кирпиченко Ю.Е., Кадовба Л.В. и др. Полимеры. Коэффициенты трения, износа, температура фрикционного разогрева. Таблицы рекомендуемых справочных данных. № Р-185. ВНИИ МВ Госстандарта СССР. М., 1986.
- 16.Мышкин Н.К., Холодильов О.В., Маркова Л.В., Семенюк М.С. Диагностика изнашивания смазанных подвижных сопряжений //Трение и износ. 1986. Т.7. № 6.С.1091-1101.
- 17.Холодильов О.В., Тур А.А. Акустико-эмиссионная диагностика подвижных сопряжений //Трение и износ. 1987. Т.8. № 3. С.546-549.
- 18.Маркова Л.В., Холодильов О.В. Экспресс-метод определения загрязненности моторных масел //Трение и износ. 1988.Т.9, № 1.С.155-158.
- 19.Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Семенюк Н.Ф., Холодильов О.В. Оцен-

- ка удельной площади поверхности методом вторично-электронной эмиссии //Трение и износ. 1988. Т. 9, № 5. С.793-798.
- 20.Холодилов О.В. Количественный анализ продуктов изнашивания полимеров //Трение и износ. 1988. Т.9, № 6. С.1124-1127.
- 21.Холодилов О.В., Коклеев В.И., Терехов В.В. Прибор для регистрации акустической эмиссии ПАЭ-625 //Каталог приборов. Минск, Наука и техника. 1988. С.150-151.
- 22.Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Холодилов О.В. Методы оценки шероховатости //Трение и износ. 1989. Т.10, № 1. С.138-155.
- 23.Холодилов О.В. О методике определения микротвердости полимерных материалов //Зав.лаб. 1989. № 2. С.92-94.
- 24.Холодилов О.В.,Калмыкова Т.Ф.,Кенько В.М.Автоматизированная система экспресс-оценки триботехнического состояния металлополимерных узлов трения.//Труды IV международного симпозиума "Интертрибо-90".Высокие Татры.Секция "С".С.145-148.
- 25.Мышкин Н.К.,Холодилов О.В. Диагностика изнашивания трибосопряжений //Трибология и надежность машин. М., Наука.1990. с.31-43.
- 26.Калмыкова Т.Ф.,Холодилов О.В.Вероятностный подход к построению количественных критериев оценки состояний фрикционного контакта // Трение и износ. 1990. Т.11, № 5. С.921-925.
- 27.Великанова А.М., Горбунов В.В., Кирпиченко Ю.Е., Холодилов О.В. Документально-фактографический банк данных по триботехническим свойствам полимерных материалов // Трение и износ. 1990. Т. 11, № 6. С.1078-1083.
- 28.Близнец М.М., Холодилов О.В., Кузменкова Е.И. Влияние органических модификаторов и структурирующихся наполнителей на морфологию продуктов изнашивания эпоксидного полимера //Трение и износ. 1991. Т.12, № 4. С.752-754.
- 29.Холодилов О.В., Григорьев А.Я. О некоторых особенностях взаимодействия пучка электронов с тонкими покрытиями //Материалы Всес. н.т. конф. "Физика и технология тонкопленочных полимерных систем. Ч.II. Гомель., 1991. С.53-55.
- 30.Belyi V.A., Myshkin N.K., Sviridynok A.I., Kholodilov O.V. Wear studies of metalpolymer tribological systems //Proc. of the 4th Int. Tribology Conf. "Patterns of Tribology". Paisley, 1980. V.27. P.286-303.
- 31.Belyi V.A.,Sviridynok A.I. Kholodilov O.V. Acoustic spectrometry as used for the evaluation of tribological systems //Wear.

1981. V.69, N 2. P.309-319.

32.Kholodilov O., Sviridynok A. A study of the morphology of friction-transferred products of polymer //ASLE Trans. 1982.V.25, N 3. P.386-389.

33.Kholodilov O.V., Grigoryev A.Ya., Myshkin N.K. Reconstruction of True Topographies of Solid Surfaces in Scanning Electron Microscopes Using Secondary Electrons //Scanning. 1987. V.9. N 4. P.156-161.

34.Myshkin N.K., Kholodilov O.V., Belyi V.A. Survey of methods for measuring oil contamination in wear //Proc. of the Int. Conf. "Wear of Materials". Houston. 1987. V.2. P.895-898.

35.Kholodilov O.V., Grigorev A.A., Miskin N.K. Novi aspekti istraživanja hrapavosti površina u tribologiji //Tribologija u industriji.1988. Br.47. P.101-113.

36.Myshkin N.K., Kholodilov O.V., Belyi V.A. A study on surface topography and wear particles //Proc. of the Int. Conf. "Wear of Materials". Denver. 1989. V.1. P.261-265.

37.Myshkin N.K., Kholodilov O.V., Grigorjev A.Ya. Quantitative evaluation of roughness by SEM //Proc. of the 5th Int. Cong. on Tribology "Eurotrib'89". Helsinki.1989. V.1. P.357-364.

38.Kholodilov O.V., Struk V.A., Nevzorov V.V. Diagnostics of tribomechanical systems: methodology and equipment //Prva Jugoslovenska konferencija o tribologiji "YUTRIB'89". Kragujevac. 1989. P.299-304.

39.Myshkin N.K., Kholodilov O.V. Tribological diagnostics of mechanisms //Druga Jugoslovenska konferencija o tribologiji "YUTRIB'91". Kragujevac. 1991. P.321-322.

40.Myshkin N.K., Grigorjev A.Ya., Kholodilov O.V. Quantitative analysis of surface topography using SEM //Wear. 1992. V.153,N 2. P.119-133.

41.Byell A.V., Minevich A.A., Stepanenko A.V., Gich L.A., Kholodilov O.V. Wear resistance and structure of (Ti, Al)N coatings //J. Phys. D: Appl. Phys. 1992. V.25.N 1A. P.292-296.

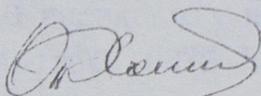
42.Холодиллов О.В., Калмыкова Т.Ф. Применение акустического эмиссионного излучения при исследовании долговечности фрикционного контакта //Повышение долговечности и надежности машин и приборов. Тез. докл. Всес. н.т. конф. Куйбышев, 1981. С.211-212.

43.Холодиллов О.В., Григорьев А.Я., Качанович Д.Г. Применение прос-

- вечивающей растровой электронной микроскопии для оценки параметров шероховатости поверхностей //Тез. докл. III Всес. симпозиума по растровой электронной микроскопии. М., 1981. С.76.
44. Калмыкова Т.Ф., Холодильов О.В., Цветкова А.А. О вероятностном подходе к оценке характеристик контакта //Тез. докл. н.т. конф. Минск, 1984. С.70-71.
45. Холодильов О.В. Использование эмиссии волн напряжений для диагностики узлов трения, работающих в экстремальных условиях // Микроригенная техника. Тез. докл. Всес. н.т. конф. М., 1984. С.110-111.
46. Холодильов О.В., Шавелин В.М., Сарычев Г.А., Калмыкова Т.Ф. Состояние и перспективы развития акустической диагностики трибосистем //Трение износ и смазочные материалы. Труды междунар. н. конф. Ташкент, 1985. Т. IV. С.71-73.
47. Холодильов О.В., Григорьев А.Я. Использование РЭМ для получения количественной информации о трехмерной структуре микрообъектов // Состояние и перспективы развития микроволновой техники. Тез. докл. Всес. н.т. конф. Минск, 1985. Ч.1. С.124.
48. Мышкин Н.К., Свириденко А.И., Холодильов О.В. Актуальные проблемы диагностики триботехнических систем //Теория и практика создания, испытания и эксплуатации триботехнических систем. Тезисы докл. Всес. н.п. конф. М., 1986. С.103-107.
49. Холодильов О.В., Калмыкова Т.Ф. Неразрушающий метод контроля степени поверхностного упрочнения твердых тел. //Тезисы докл. II Всес. конф. по акустической эмиссии. Кишинев, 1987. С.46.
50. Холодильов О.В. Разработка комплекса методов контроля состояния трущихся поверхностей //Триботехнические испытания в проблеме контроля качества материалов и конструкций. Тезисы докл. н. прак. конф. Рыбинск, 1989. ч.1. с.105.-106.
51. Мышкин Н.К., Холодильов О.В. Методы трибодиагностики //Структурная самоорганизация и оптимизация триботехнических характеристик конструкционных и инструментальных материалов. Тезисы докл. н.т. конф. Киев, 1990. С.13-14.
52. Холодильов О.В., Моисеева Т.М., Калмыкова Т.Ф. Автоматизированная система для идентификации состояния поверхностей трения //Износостойкость машин. Тезисы докл. Всес. н.т. конф. Брянск, 1991. С.26.
53. Холодильов О.В., Кирпиченко Д.Е., Горбунов В.В. База данных по триботехническим свойствам материалов //Триботехнология- производству. Тезисы докл. II Региональной конф. Таганрог, 1991. С.145-146.
53. Корочкина Т.В., Холодильов О.В. К вопросу о толщине пленок

- фрикционного переноса полимеров.//Качество и надежность узлов трения. Тезисы докл. н.т.конф. Хмельницкий, 1992. С.60-61.
54. Moiseva T.M., Ostrovski E.I., Kolmykova T.F., Kholodilov O.V. On Statistical Description of Rough Surfaces//New materials and technologies in tribology. The joint soviet-american cout. Minsk. 1992. P.201-202.
55. А.с. 599192 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ контроля времени приработки пары трения скольжения / Холодиллов О.В., Свириденко А. И., Калмыкова Т.Ф. Б.И. № 11, 1978.
56. А.с. 688862 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ контроля времени приработки пары трения скольжения / Холодиллов О.В., Свириденко А.И., Калмыкова Т.Ф., Коклеев В.В. Б.И. № 36, 1979.
57. А.с. 853525 СССР, МКИ G 01 N 29/04. Способ анализа фракционного состава продуктов износа / Свириденко А.И., Холодиллов О.В. Б.И. № 29, 1981.
58. А.с. 862048 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ определения момента окончания приработки пары трения /Холодиллов О.В. Б.И. № 33, 1981.
59. А.с. 954857 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Устройство для определения окончания приработки / Власов С.А., Холодиллов О.В., Семеник О.В. Б.И. № 32, 1982.
60. А.с. 979958 СССР, МКИ G 01 N 3/56. Способ исследования износостойкости твердых тел / Свириденко А.Т., Калмыкова Т.Ф., Холодиллов О.В., Смуругов В.А. Б.И. № 45, 1982.
61. А.с. 1055990 МКИ G 01 N 3/56. Способ определения степени фрикционного упрочнения материала / Белый А.В., Макушок Е.М., Мышкин Н.К., Холодиллов О.В. Б.И. № 43, 1983.
62. А.с. 1158903 СССР, МКИ G 01 N 19/02. Способ определения момента окончания приработки пары трения / Шавелин В.М., Сарычев Г.А., Холодиллов О.В. и др. Б.И. № 20, 1985.
63. А.с. 1257455 СССР, МКИ G 01N 3/42. Способ определения микротвердости полимерных материалов / Холодиллов О.В., Красовский А.М., Тишков Н.И. Б.И. № 34, 1986.
64. А.с. 1328743 МКИ G 01 N 3/56. Способ определения степени поверхностного упрочнения твердых тел / Холодиллов О.В., Чижик С.А., Калмыкова Т.Ф. и др. Б.И. № 29, 1987.
65. Патент 1392360 СССР, МКИ G 01 B 15/00. Способ измерения шероховатости поверхности твердых тел / Холодиллов О.В., Григорьев А.Я., Мышкин Н.К. Б.И. № 16, 1988.

- 66.А.с. 1396012 СССР МКИ G 01 N 21/59. Способ оценки загрязненности моторных масел механическими примесями / Маркова Л.В., Мышкин Н.К., Холодилов О.В. Б.И. № 18, 1988.
- 67.А.с. 1478783 СССР МКИ G 01 B 15/02. Способ определения толщины тонких пленок на поверхности твердых тел / Холодилов О.В., Григорьев А.Я. 1989.
- 68.А.с. 1679268 СССР МКИ G 01 N 3/56. Способ оценки вида изнашивания / Холодилов О.В. Б.И. № 35, 1991.
- 68.А.с.1747891 СССР, МКИ G 01 B 15/02 Способ определения удельной площади поверхности твердых тел / Григорьев А.Я., Мышкин Н.К., Семенов Н.Ф., Холодилов О.В. Б.И. № 26, 1992.
- 69.Положительное решение по заявке № 4848776. Способ оценки состояния пары трения / Холодилов О.В., Калмыкова Т.Ф., Островский Е.И. 1992



Подписано в печать 2.04.93г. Формат бумаги 60x84 I/I6.

Бумага тип. № I. Объем п. л. 2. Зак. I7I6. Тираж 100.

Ротапринт типографии БелНИИШТа, 246022, г. Гомель, ул. Кирова, 34.