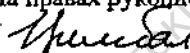


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

"САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ"

На правах рукописи



ЦИМБАЛ Игорь Романович

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ
ПАР ТРЕНИЯ ПРИБОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В
ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Специальность 05.11.14 – Технология приборостроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2009

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики и ЦКБ Машиностроения

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

Медунецкий Виктор Михайлович

Официальные оппоненты:
доктор технических наук,
профессор

Войнов Кирилл Николаевич

кандидат технических наук,
ст. научный сотрудник

Сологубов Дмитрий Николаевич

Ведущая организация :

ОАО «Техприбор» (Санкт-Петербург)

Защита состоится 19 мая 2009 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.227.04 при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверский пр., д.49, аудитория 230

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ ИТМО.

Автореферат разослан _____ 2009г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук,
доцент



Киселёв С.С.

2009A

9010

3

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Интенсивное развитие приборостроения в космонавтике, ракетной технике, в ядерной энергетике, в рентгеновской технике и в ряде других областях выдвигают задачу обеспечения надёжной работы подвижных узлов исполнительных механизмов приборов в экстремальных условиях (вакуум, высокая температура, интенсивное излучение, высокие контактные нагрузки и т.д.).

Проблема повышения надёжности исполнительных механизмов приборов в таких условиях тесно связана с вопросами триботехники, с исследованиями контактного взаимодействия взаимно перемещающихся твёрдых тел, в результате которого в зоне контакта возникают силы трения.

Современная трибология располагает рядом фундаментальных теоретических и экспериментальных закономерностей, которые, безусловно, могут позволить в ближайшие годы успешно решать задачи в области сухого трения, которые реализуются в различных узлах приборов при скольжении, качении или качении со скольжением.

На сегодняшний день особое внимание уделяется таким разделам и направлениям трибологии и триботехники как:

- разработка научных основ и практических рекомендаций, необходимых для создания износостойких антифрикционных материалов, новых технологий упрочнения и нанесения покрытий;
- создание и оптимальное использование универсальных и целевых установок машин трения при исследованиях по трибологии и в практических задачах триботехники для оценки и выбора оптимальных материалов в конкретных служебных условиях.

В связи с указанными выше направлениями на передний план выдвигаются следующие проблемы:

- повышение работоспособности материалов и узлов трения в широком диапазоне температур;
- обеспечение минимального сопротивления движению деталей подшипников скольжения;
- обеспечение экономически целесообразной долговечности узлов трения или, по возможности, равной износостойкости по сравнению с другими частями приборов при работе в различных средах;
- обеспечение минимальной разницы коэффициентов трения покоя и движения, уменьшение их величины до минимума в конкретных парах трения.

Для преодоления этих проблем необходимо решить весьма важную задачу триботехники – повысить, в частности, несущую способность и долговечность подшипников скольжения (как одного из ответственных элементов исполнительных механизмов приборов)



технологий и материалов, а также обеспечить оптимизацию формы и качества поверхностей трения.

При решении такой актуальной задачи необходимо проведение следующих исследований:

- тонких поверхностных слоёв при трении скольжении;
- новых самосмазывающихся твёрдых и порошковых смазочных материалов;
- оптимального использования новых технологических способов упрочнения поверхностей трения;
- нанесения антифрикционных покрытий, в том числе с использованием способа вибронакатывания.

Цель и задачи исследования.

Целью работы является экспериментальное исследование пары трения, работающей в вакууме при высокой температуре, с заданными улучшенными эксплуатационными свойствами за счет регулярности микрорельефа и применения специального смазочного покрытия.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи: 1) провести анализ достигнутого уровня науки и техники в трибологическом плане в рамках выдвинутой цели исследования; 2) оценить влияние качества поверхностей трения на работоспособность сопряжений типа "вал - втулка"; 3) разработать методику физических экспериментов с материалами при создании на их поверхностях регулярного микрорельефа; 4) для проведения комплексных модельных экспериментов и исследований разработать установку и оснастку; 5) провести сравнительный анализ полученных результатов по отношению к типовым способам упрочнения поверхностных слоёв материалов.

Научная новизна.

1) Исследовано влияние микрорельефа на адгезию твёрдосмазочного покрытия к подложке. 2) Выявлено, что регулярный микрорельеф увеличивает адгезию покрытия с подложкой в несколько раз. 3) Исследовано влияние регулярного микрорельефа поверхностей трения на эксплуатационные свойства при работе пар трения в вакууме при высокой температуре, в частности, в период приработки. 4) Обоснованы и рассчитаны параметры регулярного микрорельефа оптимальной по износостойкости пары трения с низким коэффициентом трения для работы в экстремальных условиях, а именно, в вакууме при высокой температуре. 5) Предложена методика, на основе которой разработана специальная технология получения требуемого микрорельефа на поверхностях трения.

Обоснованность и достоверность полученных результатов.

Основные результаты и выводы настоящей работы являются обоснованными и достоверными, так как с одной стороны опираются на методы расчётов с обработкой статистических данных, а с другой - обеспечены физическими экспериментами на базе разработок

реализованных на практике и защищённых авторскими свидетельствами.

Методы исследования. Применялись экспериментальные методы с использованием научно обоснованных статистических методов обработки данных, а также измерители момента трения, силоизмерительные устройства, вакуумная камера и соответствующая вакуумная система, кварцевые нагреватели и датчики приборов ПСР-02, ВМБ-8, ПММ-32, М-201 и др.

Личный вклад автора. 1) Детализация разработки и проведения исследований, включая выполнение новых физических экспериментов. 2) Создание комплексной методики испытаний. 3) Анализ и обработка данных наблюдений о влиянии регулярного микрорельефа на эксплуатационные свойства подшипников скольжения при работе в вакууме и высокой температуре. 4) Разработка и изготовление специального стенда и оснастки. 5) Разработка рекомендаций для промышленной реализации научных достижений в приборостроении.

Апробация работы. Основные результаты исследований, вошедших в диссертацию, были представлены на: 1) Всесоюзном семинаре "Методы упрочнения поверхностей пар трения" (Москва, 1981 г.), 2) Всесоюзном семинаре "Обеспечение роста производительности труда и качества деталей на основе применения прогрессивной технологии, оснастки и инструмента" (Ленинград, 1982 г.), 3) Всесоюзном семинаре "Технологическое обеспечение, контроль и нормирование микрорельефа в машиностроении" (Ленинград, 1984 г.), 4) Всесоюзном научно-техническом семинаре "Современное состояние вибронакатанных поверхностей" (Ленинград, 1985 г.), 5) Всесоюзном семинаре "Повышение качества и надёжности машин и приборов регуляризацией микрогеометрии поверхностей деталей" (Ленинград, 1989 г.), 6) 9-ой международной конференции "Физико-химические процессы в неорганических материалах" (Кемерово, 2004 г.), 7) 6-ой международной практической конференции-выставки "Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций" (Санкт-Петербург, 2004 г.), 8) 8-ой международной научной школы "Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов" (Санкт-Петербург, октябрь 2007 г.), 9) 8-ой международной конференции «Трибология и надёжность» (Санкт-Петербург, ПГУПС, 2008 г.),

Практическая ценность. Выявлена зависимость и сделан расчёт параметров микрорельефа пар трения при конструировании исполнительных механизмов приборов, работающих в вакууме при высокой температуре; предложена и успешно апробирована технология обеспечения регулярного микрорельефа на поверхностях трения; разработана оснастка для получения требуемых триботехнических характеристик на исходном этапе приработки параметров при изготовлении пары трения подвижных узлов исполнительных

механизмов приборов, работающих в экстремальных условиях; получены графические зависимости, позволяющие точнее понимать характер развития износа ответственных пар трения в специфических условиях эксплуатации; разработан стенд, позволяющий исследовать и оценивать работоспособность пары трения подвижных узлов исполнительных механизмов приборов, работающих при температуре до 700 °С и в вакууме до $1 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Внедрение результатов работы. Результаты экспериментальных исследований – увеличение адгезии твёрдоплёночного покрытия к подложке подшипника скольжения, снижение коэффициента трения, увеличение износостойкости покрытия за счёт регулярности микрорельефа поверхности трения были использованы при конструировании изделий в организациях ЦКБ Машиностроения и в ВИАМе.

Практические результаты исследований влияния регулярного микрорельефа на адгезию твёрдоплёночных покрытий и на эксплуатационные свойства пар трения, работающих в вакууме при высокой температуре, были защищены авторскими свидетельствами (авторские свидетельства - “Устройство для нанесения регулярного микрорельефа”, “Способ получения износостойкого покрытия”, “Способ контроля качества покрытия” и “Машина трения”), а для практического использования разработаны технологические инструкции: “Выглаживание поверхностей трения тел вращения”, “Вибронакатывание поверхностей трения с покрытием ВНИИМП-229”.

Публикации. По материалам диссертации получены 4 авторских свидетельства, опубликовано 18 работ, из них 9 работ в центральных журналах и сборниках научных трудов международных и всесоюзных конференций.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, выводов, списка литературы и приложений. Работа содержит 110 страниц текста, 13 таблиц, 29 рисунков и 18 страниц приложений. Список литературы включает 99 наименований.

Новые положения, выносимые на защиту. Методика формообразования микрорельефа ответственных поверхностей трения подвижных деталей исполнительных механизмов приборов из сплавов ЭИ-828 и ВЖЛ-16.

Создание регулярного микрорельефа на поверхностях трения с твёрдоплёночным покрытием путём вибронакатывания в несколько раз увеличивает адгезию покрытия к подложке и обеспечивает в период приработки их высокую работоспособность в вакууме при температуре до 700 °С.

Регулярность микрорельефа поверхностей трения деталей с твёрдосмазочным покрытием ВНИИМП-229 при работе в вакууме при высокой температуре снижает коэффициент пары трения и увеличивает износостойкость смазочного покрытия.

Определены количественные триботехнические характеристики, получены зависимости и построены графики для исследованных материалов пар трения в специфических условиях эксплуатации.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность выбранного направления - обеспечение эксплуатационных свойств пар трения, работающих в экстремальных условиях (вакуум, высокая температура, интенсивное излучение, высокие контактные нагрузки и т.д.), обусловленная необходимостью повышения надёжности подвижных узлов исполнительных механизмов приборов, машин и механизмов. Сформулированы основные задачи по исследованию влияния микрорельефа на эксплуатационные свойства пар трения, на адгезию твёрдосмазочного покрытия к подложке в подшипниках скольжения.

В первой главе на основе технической литературы анализируются модели пар трения, работающие в вакууме при высокой температуре, показано влияние вакуума на трение металлов при отсутствии смазки. Отмечено, что отработка технологий покрытий и материалов применительно к условиям вакуума и высокой температуре ведётся с использованием различных методик, оборудования, с отработкой различного ресурса и степенью имитации как самих пар трения, так и эксплуатационных условий, что не позволяет сделать однозначных выводов о работоспособности пары в конкретно заданных условиях их работы. На основании обзора можно сделать следующие выводы:

- сухое трение следует рассматривать как взаимодействие трущихся поверхностей с твёрдыми и газообразными смазывающими веществами, образующими на поверхностях трения плёнки (третье тело);
- основное сопротивление при сухом трении обусловлено адгезионным взаимодействием между вторичными структурами, образовавшимися на контактируемых поверхностях в результате их механохимического взаимодействия между собой и с окружающей средой;
- адгезия при трении имеет гетерогенный характер и чаще всего в том или ином соотношении образуются молекулярные (Ван-дер Ваальсовы), промежуточные (водородные), химические (металлические, ионные, ковалентные) и электрические связи;
- основное влияние вакуума на поведение пар трения проявляется в том, что поверхности трения твёрдых тел освобождаются от покрывающих их обычно плёнок, вступают в непосредственный контакт друг с другом, образуя недопустимо прочные связи;
- низкое трение слоистых твёрдых тел обусловлено переносом материала смазки на поверхность сопряжённого тела и образование структур на обеих поверхностях, отличающихся заметной ориентацией

кристаллов плоскостями наименьшей стойкости вдоль направления скольжения;

- низкое трение тугоплавких неорганических соединений объясняется малым количеством образующихся адгезионных связей;

- коэффициент трения металлических пар уменьшается пропорционально увеличению твёрдости хотя бы одного из металлов пары.

В главе на основе анализа литературных данных показано, что все контактные явления в той или иной степени определяются состоянием их поверхностного слоя. При этом под поверхностным слоем понимается объём материала, лежащего непосредственно под границей раздела двух сред и обладающего совокупностью геометрических и физико-химических характеристик, отличающихся от основного материала.

В условиях эксплуатации детали начинают функционировать с реальной поверхностью, то есть именно поверхность деталей подвергается внешним воздействиям как при контакте с другими деталями, так и при контакте с внешней средой. Причём, именно на поверхности и в поверхностном слое материала протекают процессы износа деталей трущихся пар, зарождаются трещины усталости. В этой связи эксплуатационные свойства деталей, как и качество машин и оборудования, то есть обеспечение оптимального уровня их надёжности и точности, в значительной степени зависят от качества рабочих поверхностей.

В этой же главе также раскрывается понятие качества поверхности как совокупность геометрических (волнистость, шероховатость, форма и взаиморасположение поверхностей) и физико-химических (микротвёрдость, остаточные напряжения, структура, присутствие кислорода, окислов, нитридов и т.д.) характеристик и влияние их на эксплуатационные свойства деталей машин.

Показано, что предельная неоднородность значений всех параметров качества шероховатых поверхностей как органическое негативное свойство, формирующееся в результате применения традиционных, наиболее широко используемых в промышленности способов обработки и, в первую очередь, основанных на резании металлов, затрудняет решение круга задач, определяющих проблему качества поверхностей. Успешное же решение этих задач возможно на основании использования поверхностей с принципиально новым свойством микрогеометрии – регулярностью.

Во второй главе дана методика исследования микрорельефа, определяющего работу пар трения с твёрдоплёночным покрытием подвижных узлов исполнительных механизмов приборов, работающих в вакууме при высокой температуре, включающая:

- определение влияния микрорельефа на адгезию твёрдоплёночного покрытия;

- исследование влияния регулярного микрорельефа на эксплуатационные свойства пары трения, работающей в вакууме при высокой температуре;

- определение расчётных зависимостей параметров регулярного микрорельефа для проектирования пары трения.

Для определения влияния регулярного микрорельефа на адгезию твёрдоплёночного покрытия на поверхность образца, подготовленную по существующей технологии – шлифование и последующая пескоструйная обработка, наносят покрытие. Затем рабочую поверхность образца подвергают вибронакатыванию деформирующим элементом с помощью специально разработанной вибрационной головки. Образец закрепляют в патроне токарного станка и ему придаётся вращательное движение; деформирующий элемент закрепляется в резцедержателе станка и совершает осцилляционное движение и движение подачи.

Усилие прижатия Q деформирующего элемента к поверхности образца определяется формулой:

$$Q \geq K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot P, \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент, характеризующий сопротивление материала образца проникновению в него деформирующего элемента (определяется экспериментально); K_2 – коэффициент, характеризующий сцепляемость покрытия с поверхностью (определяется экспериментально); K_3 – коэффициент, характеризующий траекторию движения деформирующего элемента (определяется экспериментально); P – усилие вибронакатывания – определяется эмпирически полученной формулой:

$$P = c_1 \sqrt{\frac{h \cdot d_m^{c_2} \cdot d_1^{c_3}}{C_1}}, \quad (2)$$

где h – глубина впадин микрорельефа поверхности; d_m – диаметр деформирующего элемента; d_1 – диаметр образца; C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные коэффициенты (находятся для каждого материала экспериментально).

Сложная кинематика деформирующего элемента,двигающегося по закону синусоиды, заставляет частицы антифрикционного материала ориентироваться плоскостями скольжения параллельно поверхности трения, вступать в зону молекулярных связей. В зависимости от типа рельефа через каждую точку поверхности деформирующий элемент может проходить неоднократно и чем сложнее кинематика движения, тем сильнее последствие обработки – молекулярное сцепление (адгезия).

Для проверки адгезии покрытия к подложке испытания проводились на вибростенде, а по взвешиванию образца до и после испытаний определялась величина сыпавести покрытия. Величина сыпавести сравнивалась с величиной у образцов, изготовленных по существующей технологии. Испытания показали, что величина сыпавести твёрдосмазочного покрытия у вибронакатанных образцов с образованием регулярного микрорельефа уменьшилась в 25 раз.

В настоящей работе подробные исследования выполнены с использованием второго и четвертого вида регулярного микрорельефа (по классификации Ю.Г. Шнейдера Образование регулярных рассчитываемый и достаточно просто технологически воспроизводимый. микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972). При обработке по второму виду микрорельефа канавки касаются и между ними остаются участки исходной шероховатости с нерегулярным микрорельефом. При этом площадь канавок была достигнута 25%, размер канавок составил 0,6...1,0 мкм. При обработке по четвертому виду микрорельефа поверхность образца полностью перекрыта канавками и образуется сетчатый микрельеф, так называемый полностью регулярный микрорельеф (ПРМР), каждый элемент которого имеет форму, близкую к четырёхугольной или шестиугольной. В отличие от нерегулярного микрорельефа, создаваемого способом резания и поверхностно-пластического деформирования (ППД), полностью новый регулярный микрорельеф обладает рядом отличительных особенностей и качеств. В частности, такие стандартизованные параметры, как S , так и нестандартизованные параметры: N_v - число выступов, N_w - число впадин, r_v - радиус выступов, r_w - радиус впадин, определяющие многие эксплуатационные свойства поверхностей, аналитически рассчитываемы и технологически обеспечиваемы с заданной точностью. Для исследования выбран регулярный микрорельеф сетчатого типа (рис.1), как наиболее легко рассчитываемый и достаточно просто технологически воспроизводимый

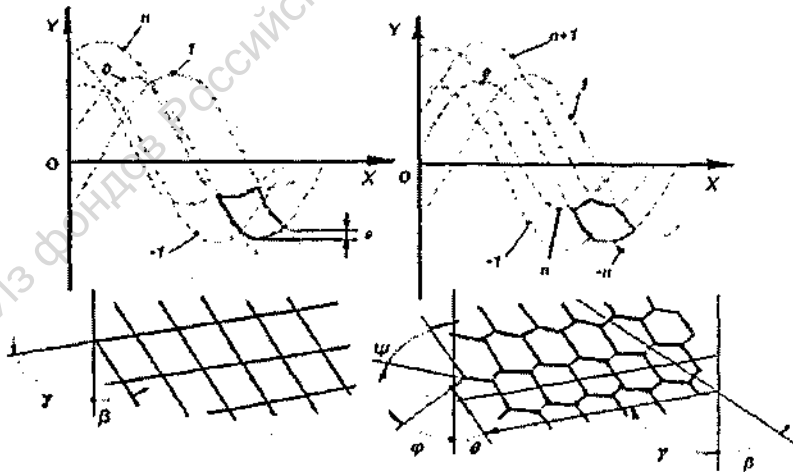


Рисунок 1 - Схемы формирования сетчатого регулярного микрорельефа

При расчёте режимов образования ПРМР использовалась следующая методика:

- выбирается регулярный микрорельеф - четырёхугольный или шестиугольный;

- выбирается угол расположения неровностей и соответственно ближайшее целое значение индекса n (n - индекс канавки) по одной из следующих формул: $n = \text{igr}$ - для четырёхугольного типа микрорельефа и

$$n = \frac{\sqrt{3} \cdot \text{igr} \cdot (\gamma - 1)}{2} \quad \text{- для шестиугольного типа;}$$

- определяется дробная часть отношения числа двойных ходов к числу оборотов обрабатываемой заготовки - $\{i\}$ по формулам:

$$\{i\} = \frac{n}{n^2 + 1} \quad \text{- для четырёхугольного типа микрорельефа и}$$

$$\{i\} = \frac{2n + 1}{2(n^2 + n + 1)} \quad \text{- для шестиугольного типа;}$$

- подсчитывается величина подачи инструмента:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N(n^2 + 1)}} \quad \text{- для четырёхугольного типа и}$$

$$S = \sqrt{\frac{\sqrt{3}}{2(n^2 + n + 1)}} \quad \text{- для шестиугольного типа;}$$

- рассчитывается величина i - отношение числа двойных ходов осциллирующего инструмента к числу оборотов заготовки: $i = N \cdot \pi \cdot d \cdot S$;

- определяется размах осцилляции - ρ из формулы: $S \leq 2\rho(1 - \{i\})$;

- подсчитывается радиус сферы деформирующего инструмента - r , задаваясь приближённым значением высоты выступов ПРМР - R_{\max} , по

формуле: $r \approx \frac{S^2}{8 \cdot R_{\max}}$, где S - наибольшая величина регулярного элемента

$S_{\max} = \sqrt{S_r}$ - для четырёхугольного типа, $S_{\max} = \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot S_r$ - для шестиугольного типа, где S_r - шаг в направлении угла γ , определяемый

по формуле: $S_r = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot d \cdot \{i\}}{i}\right)^2 + \rho^2}$, (при выборе радиуса сферы

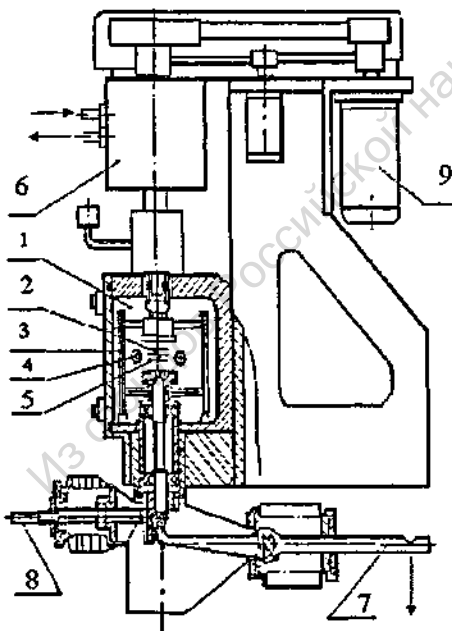
инструмента необходимо учитывать как величину усилия вдавливания, так и жёсткость заготовки, ограничивающую возможную область применения усилий);

- определяется величина усилия вдавливания методом пробных проходов.

Третья глава посвящена подбору, разработке оборудования для экспериментальных испытаний, выбору образцов для исследований.

Испытания были разбиты на три этапа – исследования и ускоренные испытания на образцах, испытания на штатных деталях на стендах и испытания в изделии.

Для ускоренных испытаний образцов, работающих в вакууме при высокой температуре, был спроектирован стенд (рис. 2), который представляет собой вакуумную камеру, внутри которой расположены два установленных соосно держателя образцов. Один держатель размещён в корпусе с возможностью вращения и кинематически связан с приводом вращения. Другой держатель установлен в корпусе с возможностью поворота; он кинематически связан с механизмом осевого нагружения. Внутри вакуумной камеры размещены ламповый нагреватель и защитные экраны. Кроме того, для предотвращения передачи тепла через держатель, он выполнен полым и снабжён системой охлаждения. Стенд содержит также измеритель момента трения, выполненный в виде коромысла, которое установлено на оси диска, закреплённого на коромысле и соединённого с помощью силфона с вакуумной камерой.



- 1 – вакуумная камера
- 2 – вращающийся образец
- 3 – экраны
- 4 – нагреватель
- 5 – неподвижный образец
- 6 – система охлаждения
- 7 – рычаг механизма нагружения
- 8 – коромысло измерителя момента трения
- 9 – привод

Технические характеристики:

- максимальная степень вакуума – $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст.
- температура в камере – $+20$ °С ... $+800$ °С
- скорость шпинделя – до 1000 об/мин
- удельная нагрузка – до 2 Н/см²
- время испытания – 1, 10, 20 час
- емкость камеры – 1 л

Рисунок 2 - Стенд для ускоренных испытаний образцов

При работе стенда с помощью специальной регулирующей аппаратуры постоянными поддерживаются на протяжении всего цикла испытаний температура $+650\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давление $1 \cdot 10^{-6}$ мм рт.ст. Колебания этих величин записываются приборами, которые также выдают сигнал на отключение установки при достижении температуры и давления критических величин. Критическими величинами являются: для температурного предела - $+630\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +670\text{ }^{\circ}\text{C}$, для давления - $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.

После отбора и проверки материалов на стенде для ускоренных испытаний технология и режимы используются при конструировании изделия. Окончательную проверку детали проходят на специальной установке, имитирующей условия работы изделия.

В качестве образцов были выбраны втулки (рис. 3) с коэффициентом перекрытия 1,0. Контакт втулок по торцам создаёт условия наиболее приближенные к условиям работы пары трения в изделии и позволяет наиболее быстро её оценить.

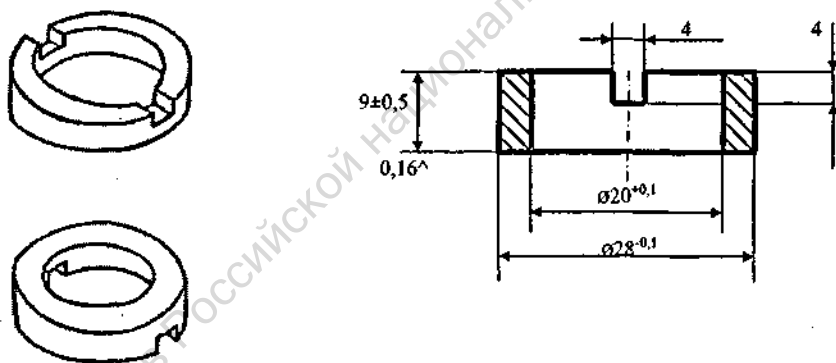


Рисунок 3 - Образец для испытаний

Образцы помещаются в вакуумную камеру стенда, где их нагружают определённым осевым усилием, а одному образцу придают вращательное движение. Испытания проводятся в течение часа, десяти и двадцати часов. Испытания в течение часа – сравнительные базовые и служат для быстрой предварительной оценки работоспособности пары. Десятичасовым испытаниям подвергаются образцы, прошедшие часовые испытания и показавшие удовлетворительные результаты – низкий и стабильный коэффициент трения (не выше 0,3), малый износ. Двадцатичасовым испытаниям подвергаются образцы, прошедшие десятичасовые испытания и показавшие удовлетворительные результаты – низкий и стабильный коэффициент трения (не выше 0,2), малый износ.

С помощью тензодатчиков и точных регистрирующих приборов производится запись момента трения, возникающего при вращении подвижного образца относительно неподвижного. После обработки записанной диаграммы момента трения получаем зависимость коэффициента трения от времени.

Для определения износа образцов они взвешиваются непосредственно перед установкой в камеру и сразу же после остановки стенда и вскрытия камеры.

Для сопоставления результатов опытов по износостойкости материала, полученных при других схемах испытаний, определялась важная характеристика – путь трения: $S = \pi \cdot D_{cp} \cdot n \cdot T$, где S – путь трения в метрах, D_{cp} – средний диаметр образцов в метрах, n – скорость вращения «подвижного» образца в об/мин, T – время испытаний в минутах. Для данной установки: $D_{cp} = 0,024$ м, $n = 1000$ об/мин; путь трения: при часовых испытаниях – $S = \pi \cdot 0,024 \cdot 1000 \cdot 60 = 4524$ м, при десятичасовых испытаниях – $S = 45238$ м, при двадцатичасовых испытаниях – $S = 90475$ м.

На основании литературных данных, опыта конструирования изделий, работающих в аналогичных условиях, в России и рекомендаций Всесоюзного института авиационных материалов (ВИАМ), в частности, занимающегося разработкой специальных материалов, для исследований были выбраны следующие конструкционные жаропрочные сплавы – ЭИ-828 и ВЖЛ-16. На поверхности образцов наносилось твёрдосмазочное покрытие на основе дисульфида молибдена – смазка ВНИИМП-229. Актуальной также является задача оценки качества покрытия, которая здесь также решалась. Создание регулярного микрорельефа на поверхности трения деталей с твёрдоплёночным покрытием позволяет осуществлять 100% неразрушающий контроль его качества.

Для воспроизведения способа образования ПРМР на наружных и внутренних цилиндрических, сферических и торцовых поверхностях разработано устройство – виброголовка.

Четвёртая глава посвящена исследованиям влияния регулярного микрорельефа на эксплуатационные свойства пары трения, работающей в вакууме при высокой температуре. Исследования проводились в два этапа.

На первом этапе определялось влияние регулярного микрорельефа на коэффициент трения. Для создания регулярного микрорельефа на поверхностях трения посредством операции вибронакатывания была разработана специальная виброголовка, позволяющая варьировать усилием вдавливания деформирующего элемента, рисунком и размерами выдавливаемых канавок – регулярным микрорельефом. В результате экспериментальных исследований выявлено, что для работы с жидкой

смазкой оптимальным является частичный регулярный микрорельеф (ЧРМР) – рельеф первого вида – с не касающимися канавками. Для работы же в вакууме при температуре требуется поверхность, где бóльшая площадь подверглась бы обработке с образованием регулярного микрорельефа.

Образцы испытывались в различном сочетании по нанесению покрытия и обработки вибронакатыванием в две серии. Состояние поверхности испытываемых образцов приведено в таблице 1.

Таблица 1 – Состояние поверхности испытываемых образцов

Номер пары трения	Вид обработки поверхности образца	
	Вращающегося	Неподвижного
1	ВII	О
2	ВIV	О
3	О	П
4	ВIII	О
5	ВIVII	О
6	ПВII	О
7	ПВIV	О
8	ВII	П
9	ВIV	П
10	П	П
11	ПВII	П
12	ПВIV	П

Обозначения к таблице 1: О – образцы после механической обработки – шлифованием – без покрытия и вибронакатывания, П – образцы после механической обработки и последующего нанесения твёрдоплёночной смазки ВНИИНП-229, ВII, ВIV – образцы вибронакатанные по II и IV типам рельефа соответственно, ПВII, ПВIV – образцы с нанесённой твёрдоплёночной смазкой ВНИИНП-229 и последующего вибронакатывания по II и IV типам рельефа соответственно, ВIVП – образцы вибронакатанные по IV типу рельефа и последующего нанесения твёрдоплёночной смазки ВНИИНП-229.

В первой серии испытаний контролем служил образец без покрытия с поверхностью после шлифовки – с нерегулярной микрошероховатостью. Анализ результатов часовых испытаний позволил установить следующее:

- образцы с нерегулярным микрорельефом – шлифованные – схватываются на первых же минутах работы;

- образцы, упрочнённые регулярным микрорельефом, способны работать в вакууме при температуре, но с высоким коэффициентом трения 0,7...0,8 (рис. 4, графики 1 и 2);

- создание регулярного микрорельефа на поверхности перед нанесением смазки ВНИИНП-229 обеспечивает оптимальную шероховатость для удержания твёрдосмазочного покрытия; коэффициент трения остаётся высоким 0,58-0,38 (рис.4, графики 3, 4);

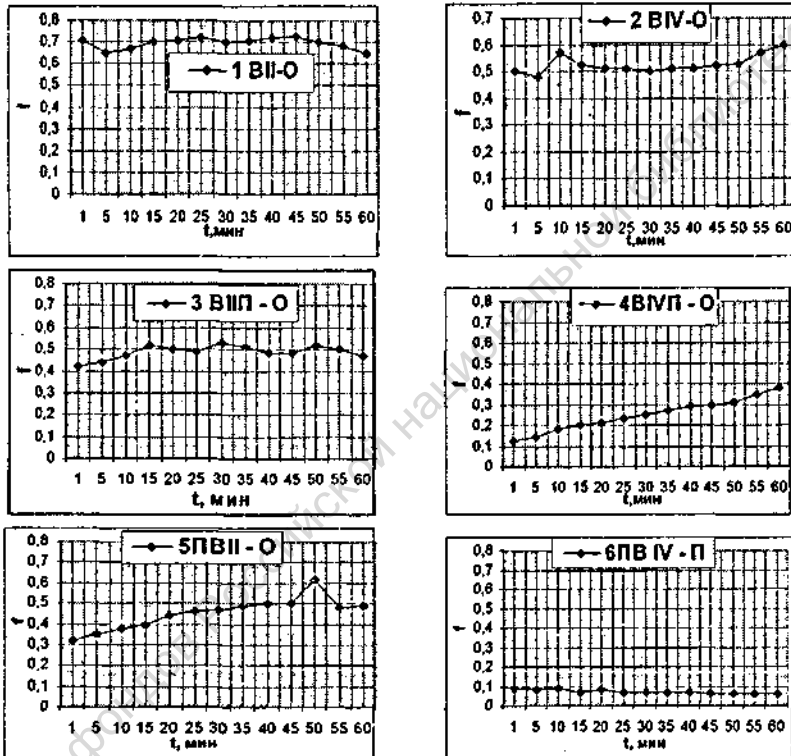


Рисунок 4 - Зависимость коэффициента трения от регулярности микрорельефа поверхности трения

- вибронакатывание только одной поверхности трения после нанесения твёрдосмазочного покрытия недостаточно эффективно, вероятно, из-за малой толщины оставшегося смазочного покрытия (рис. 4, графики 4, 5).

Вторая серия испытаний проводилась с образцами в различном сочетании вибронакатывания и покрытия. Анализ результатов часовых испытаний позволил установить следующее:

- регулярный микрорельеф имеет такое количество микровпадин, заполняемых смазкой ВНИИНП-229, при котором эффективность смазки наиболее высокая;

- низкие значения коэффициента трения наблюдаются при нанесении твёрдоплёночного покрытия ВНИИНП-229 на обе рабочие поверхности и вибронакатывание одной из них с созданием полностью регулярного микрорельефа (ПРМР) – микрорельефа четвёртого типа; коэффициент трения в этом случае снижается до 0,08...0,11 (рис.4, график б).

На втором этапе исследовалось также влияние регулярности микрорельефа поверхностей трения деталей приборов на износостойкость. За основу была взята пара, показавшая наименьший и стабильный коэффициент трения при часовых испытаниях (рис.4, график 12) - (покрытие – покрытие с последующим вибронакатыванием).

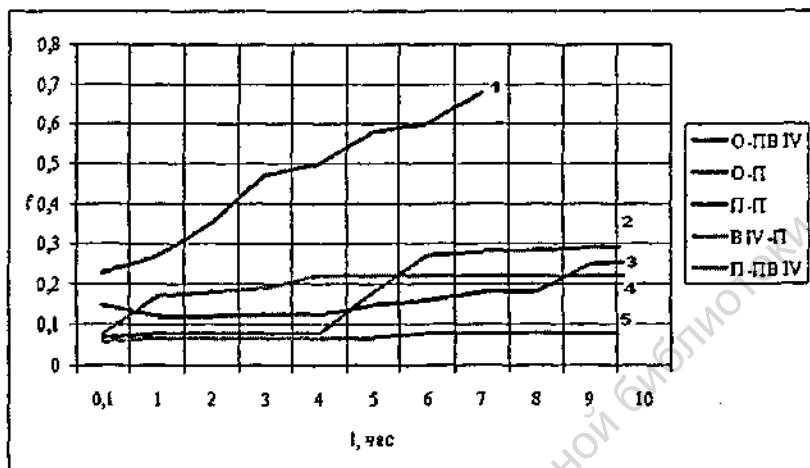
Для сравнения испытывались также пары с образцами, где покрытие наносилось на одну или обе трущиеся поверхности образцов после шлифования. Испытания продолжались 10 часов. При этом было установлено (рис.5), что:

- при нанесении твёрдосмазочного покрытия только на одну из трущихся поверхностей трения с последующим вибронакатыванием коэффициент трения непрерывно растёт и через 7 часов достигает величины 0,7 (график 1);

- плёнки твёрдых смазок на основе дисульфида молибдена обладают хорошими противозносными и антифрикционными свойствами в течение 4 часов работы (графики 2, 3, 4).

Однако, по мере увеличения продолжительности испытания, вследствие полного истирания покрытия и вступления в контакт поверхностей с нерегулярным микрорельефом, коэффициент трения увеличивается до значения 0,28 для одностороннего покрытия (график 2) и 0,22 для двустороннего покрытия (график 3). Причём просматривается тенденция к его дальнейшему увеличению. Создание регулярного микрорельефа хотя бы на одной из трущихся поверхностей с твёрдосмазочным покрытием (график 5) обеспечивает низкий 0,06...0,08 коэффициент трения.

Для подтверждения факта увеличения износостойкости твёрдосмазочного покрытия при наличии регулярного микрорельефа на поверхности трения были проведены натурные испытания. Для этого были взяты подшипниковые цилиндрические и сферические втулки, изготовленные из материала ЭИ-828 и покрытые твёрдоплёночной смазкой ВНИИНП-229. Одну из контактируемых поверхностей пары трения подвергали вибронакатыванию для создания на поверхности регулярного микрорельефа рельефа IV типа – ПРМР. Испытания подтвердили факт увеличения износостойкости и запланированный ресурс в эксперименте был превышен в шесть раз.



1 – пара трения О – ПВІV, 2 – пара трения О – П, 3 – пара трения П – П, 4 – пара трения ВІV – П, 5 – пара трения П – ПВІV

О - образец после шлифовки, П – образец с покрытием, ВІV – образец после вибронакатывания с образованием регулярного микрорельефа ІV типа, ПВІV – образец с покрытием и вибронакатанный с образованием регулярного микрорельефа ІV типа

Рисунок 5 - Влияние регулярности микрорельефа на износостойкость

Основные результаты и выводы

1. Экспериментально исследованы параметры регулярного микрорельефа, оптимальные по износостойкости и с достаточно низким коэффициентом трения подвижных деталей исполнительных механизмов приборов для работы в экстремальных условиях - в вакууме и высокой температуре; разработана технология получения рационального микрорельефа поверхности трения.

2. Исследовано влияние регуляризации микрорельефа на адгезию покрытия с подложкой. Выявлено, что вибронакатывание поверхности с твёрдоплёночным покрытием с образованием регулярного микрорельефа увеличивает адгезию покрытия к подложке в несколько раз. Предложен и апробирован способ нанесения твёрдоплёночного покрытия на основе дисульфида молибдена с образованием на поверхности регулярного микрорельефа.

3. Установлено, что для пар трения с твёрдосмазочным покрытием, работающих в вакууме $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст. при температуре $650 \text{ }^\circ\text{C}$,

регулярный микрорельеф обеспечивает снижение коэффициента трения до 0,08 и увеличение износостойкости покрытия в 2,5 раза.

4. Предложены критерии оценки антифрикционных свойств и износостойкости пар трения, работающих в вакууме при высокой температуре. Разработана технология изготовления пар трения путём нанесения твёрдоплёночного покрытия ВНИИНП-229 на обе трущиеся поверхности и создания на одной из них полного регулярного микрорельефа (ПРМР) – регулярного микрорельефа четвёртого типа.

5. Разработана экспериментальная методика подбора пар трения, работающих в вакууме при высокой температуре, получены уравнения в оболочке Mathcad, описывающие рабочие триботехнические характеристики пар трения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. А.с. № 1085380, МКИ В 24 В 39/04. Способ получения износостойкого покрытия образца материала // И.Р.Цимбал, Ю.Г.Шнейдер, Василенко В.Г. (СССР). - № 3362411/28; заявл. 08.12.81; опубл.03.07.88 – бюл.№19.

2. А.с. № 1220243, МКИ В 24 В 39/04. Устройство для нанесения регулярного микрорельефа // И.Н. Дмитриева, И.Р. Цимбал, Ю.Г.Шнейдер (СССР). - № 3742610/25-27; заявл. 02.04.84; опубл. 29.02.88 – бюл.№8.

3. А.с. № 1019296, МКИ G 01 № 19/04. Способ контроля качества покрытия // В.Г. Василенко, И.Р. Цимбал (СССР). - № 2982392/25-28; заявл. 12.09.80; опубл. 23.05.83 - бюл. №19.

4. А.с. № 1021993, МКИ G 01 № 3/56. Машина трения // И.Р. Цимбал, Л.А. Чатынян, Т.А. Соловьёва. (СССР). - № 3350804/25-28; заявл. 04.11.81; опубл. 06.07.83 - бюл. №21.

5. А.с. № 1106651, МКИ В 25 В 29/02. Устройство для сборки резьбовых соединений // О.В. Вайн, А.С. Кузнецов, И.Р. Цимбал, (СССР). - № 3451009/25-28; заявл. 07.06.82; опубл. 07.08.84 -бюл. №29.

6. Цимбал И.Р. Способ повышения износостойкости твёрдосмазочных покрытий – Л., Ленинградский ЦНТИ, информ. листок, № 89-2770, 1989, 2 с.

7. Цимбал И.Р. Устройство для нанесения регулярного микрорельефа – Л., Ленинградский ЦНТИ, информ. листок, № 89-0894, 1989, 4 с.

8. Цимбал И.Р. Стенд для исследования пар трения. – Л., Ленинградский ЦНТИ, информ. листок, №85-0500, 1984, 4 с.

9. Цимбал И.Р. Способ контроля качества покрытия. – Л., Ленинградский ЦНТИ, информ. листок, № 84-2318, 1984, 4 с.

11. Цимбал И.Р. Технологический процесс нанесения регулярного микрорельефа на поверхности трения подшипников скольжения. – Оpubл. в МРС «ТТЭ», серия «Т», выпуск 01, 1983, 5 с.

12. Цимбал И.Р. Исследование влияния регулярного микрорельефа на работоспособность пары трения с покрытием ВНИИ НП-229. – В кн.: Технологическое обеспечение, контроль и нормирование микрорельефа в машиностроении. – Л.: ЛДНТИ, 1984, с. 57.

13. Беляков А.В., Задябина Т.Б., Цимбал И.Р., Соловьёва Т.А., Чатынян Л.А. Поверхностное упрочнение сплавов типа ВЖЛ с целью повышения их антифрикционных свойств // Авиационные материалы. Научно-тех. сб, ВИАМ, 1981, с. 38-46.

14. Цимбал И.Р., Горяев М.А. Повышение адгезии и прочности твёрдоплёночных покрытий. – В кн.: Физико-химические процессы в неорганических материалах. – Т.1. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2004, с. 659.

15. Цимбал И.Р. Метод и устройство для повышения надёжности, качества и износостойкости поверхностей трения. – В кн.: Технологии ремонта, восстановления, упрочнения и обновления машин, механизмов, оборудования и металлоконструкций. – СПб.: Издательство СПбГТУ, 2004, с. 458-459.

16. Цимбал И.Р., Кузьмин Ю.П. Повышение износостойкости пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях // Металлообработка. – 2007 - №3 (39), с. 35-37.

17. Цимбал И.Р. Исследование влияния регуляризации микрорельефа на адгезию и прочность твёрдоплёночного покрытия // Сб. трудов VII Международной конференции «Трибология и надёжность», СПб, ПГУПС, 4-6 октября 2007, с. 138-143.

18. Цимбал И.Р., Медунецкий В.М. Экспериментальное исследование влияния регуляризации микрорельефа на работоспособность пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях // Труды 8-ой Международной научной школы «Фундаментальные и прикладные проблемы надёжности и диагностики машин и механизмов», СПб, октябрь 2007г.

19. Медунецкий В.М., Цимбал И.Р. Исследование эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях, // Сб. трудов 8-ой Международной научной конференции «Трибология и надёжность», СПб, ПГУПС, 23-25 окт. 2008, с. 296-306.

20. Цимбал И.Р., Медунецкий В.М. Обеспечение эксплуатационных свойств пар трения приборов, работающих в экстремальных условиях, с образованием регулярного микрорельефа // Металлообработка. – 2009 - (принято в печать).

Из фондов Российской национальной библиотеки

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении
«Университетские телекоммуникации»
197101, Санкт-Петербург, Саблинская ул., 14
Тел. (812) 233 4669 объем 1 п.л.
Тираж 100 экз.

Из фондов Российской национальной библиотеки

2009A

9010

09-09010

Из фондов Российской национальной библиотеки