

ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора технических наук Харламова Павла Викторовича на диссертационную работу Измерова Михаила Александровича на тему «Обеспечение триботехнических показателей слабонагруженных пар трения и герметичности на этапе проектирования применением имитационного моделирования», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 - «Трение и износ в машинах»

Актуальность работы. Большинство кинематических устройств работают при малых нагрузках. К таким устройствам можно отнести устройства МЭМС, микросистемные устройства, различные узлы мехатроники и робототехники, а также оптические механизмы и некоторые фрикционные устройства. Фрикционная предохранительная муфта стрелочного перевода, на примере которой проведён расчёт интенсивности изнашивания, выполняет очень важную функцию – обеспечивает передачу крутящего момента к механизму стрелочного перевода для регулировки движения подвижного состава и обеспечивает безопасность движения на железнодорожном транспорте. Стрелочные переводы работают в разных климатических условиях, но везде требуется обеспечить стабильный коэффициент трения вне зависимости от окружающих условий, а также высокую долговечность трибосопряжения. Поэтому постоянно ведутся работы по улучшению схемы механизма и подбору долговечных фрикционных материалов. Применение надёжной методики оценки триботехнических параметров при использовании новых материалов позволило бы ускорить процесс модернизации важных и ответственных узлов механизмов, работающих при малых нагрузках, так как существующие методы расчёта не дают надёжных результатов оценки триботехнических характеристик из-за ошибок идентификации состояния контакта.

Моделирование контакта реальных поверхностей в 3D даёт значительно больше информации о его состоянии, а если при этом правильно оценить контактную жёсткость при заданной нагрузке, то задача оценки нагрузочной способности трибосистемы будет решена. Кроме того, моделирование

изнашивания поверхностей в этих условиях поможет оценить его триботехнические характеристики и долговечность, что значительно ускорит процесс оптимизации конструкции ещё на этапе проектирования.

В связи с вышеизложенным считаю, что тема диссертационной работы Измерова М.А. на тему «Обеспечение триботехнических показателей слабонагруженных пар трения и герметичности на этапе проектирования применением имитационного моделирования» является актуальной. Поставленная автором цель работы и задачи позволяют отнести рассматриваемую работу к специальностям 2.5.3 – «Трение и износ в машинах».

Научная новизна исследований и полученных результатов.

1. Автор разработал методику оценки распределения пятен фактического контакта, которое подчиняется степенному закону, где показатель степени функции распределения коррелирует с эквивалентной фрактальной размерностью поверхностей.

2. В работе было установлено, что на микроуровне при малых нагрузках следует учитывать субмикровыступы шероховатости, которые первыми воспринимают нагрузку и находятся преимущественно в пластическом состоянии. При дальнейшем сближении поверхностей в контакт постепенно вступают микровыступы, которые находятся уже в упругом состоянии, что объясняет нелинейность зависимости сближения от нагрузки.

3. Совместное решение контактной задачи для фрактальной модели и модели Герца позволило в виде критической площади пятна контакта установить критерий перехода из пластического состояния в упругое, что ограничило области применения фрактальной модели и модели Герца.

4. Автор обосновал разное поведение коэффициента трения для поверхностей с разной шероховатостью: для D_s от 2 до 2,5 коэффициент трения падает из-за определяющего влияния адгезионной составляющей, а для D_s от 2,5 до 3 растёт из-за роста фрактальной размерности и деформационной

составляющей коэффициента трения. Оптимальная эквивалентная фрактальная размерность поверхностей $D_s = 2,5$.

5. Автор предложил оригинальный и точный способ оценки адгезионной составляющей коэффициента с помощью атомно-силового микроскопа путём измерения величины отклонения иглы кантилевера при небольших нагрузках на него.

6. Разработанная автором модель изнашивания инженерных поверхностей при малых нагрузках полностью объясняет режим приработки: при трении из-за снижения фрактальной размерности поверхности и уменьшении числа пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, снижается интенсивность изнашивания, а при переходе большинства пятен контакта в упругое состояние фрактальная размерность меняется мало, и наступает установившийся режим работы.

7. Разработанная автором фрактальная модель контакта шероховатых поверхностей позволяет оценить фактический коэффициент извилистости, пористости и средний радиус каналов протекания для заданных параметров шероховатости, что даёт возможность оценить герметичность уплотнительных металл-металлических устройств на этапе проектирования.

Научная и практическая значимость работы.

1. Разработанная автором трёхмерная многоуровневая модель и компьютерные программы для ЭВМ позволяют создавать адекватные модели инженерных поверхностей с разными уровнями отклонений от идеальной формы по заданным параметрам, не прибегая к процедуре трёхмерного профилографирования.

2. Созданная автором база данных трёхмерных поверхностей позволяет упростить задачу подбора оптимальной шероховатости элементов трибосистемы на этапе проектирования.

3. Предложенная автором механика контактного взаимодействия и разработанная программа позволяет на новом уровне оценить контактную

жёсткость стыка сопряжённых поверхностей при малых нагрузках за счёт правильной идентификации упруго-пластического состояния контакта.

4. На основе использования атомно-силового микроскопа автором предложен новый способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения, который имеет более высокую точность в сравнении с классическим методом.

5. Автором предложен алгоритм расчёта величины износа трибосопряжения во времени для механизмов, работающих при малых нагрузках, в том числе работающих в режиме приработки, на основе моделирования контакта сопряжённых поверхностей.

6. Разработанная автором методика оценки герметичности металл-металлических уплотнительных устройств позволяет на уровне проектирования подобрать оптимальную шероховатость сопряжённых поверхностей. Применение данной методики к оценке герметичности элементов гидравлической системы автобусной техники на МУП «Брянское городское предприятие» позволило за счёт предупреждающего ремонта сэкономить 1 192 201 руб. за 2020 год.

Структура и содержание диссертационной работы. Работа представляется законченным научным трудом и имеет логическую структуру. Диссертация изложена на 333 страницах и состоит из введения, семи глав и заключения. Список литературы содержит 232 источника, в диссертации имеется 149 рисунков и 29 таблиц. Работа соответствует следующим пунктам Паспорта научных специальностей Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по специальности 2.5.3 – «Трение и износ в машинах»: - п.2: «Механика и физика контактного взаимодействия при трении покоя, трении скольжения, трении качения и качения с проскальзыванием с учетом строения, качества и свойств поверхностных слоев»; - п.3: «Закономерности различных видов изнашивания и поверхностного разрушения при трении»; - п.5: «Трение без смазки, в

различных средах и в условиях вакуума»; - п.10: «Физическое и математическое моделирование процессов трения и изнашивания. Расчет и оптимизация узлов трения и сложных трибосистем»; - п.15: «Трибологические испытания: методы и устройства»; - п.17: «Экологические проблемы узлов трения и материалов, участвующих в трении»

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель, задачи, обозначены объект и предмет исследования, а также представлена научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В **главе 1** автор приводит объект исследования и делает обзор опубликованных работ по тематике диссертации. Им были рассмотрены современные методы моделирования микрогеометрии инженерных поверхностей, модели расчёта контактного взаимодействия твердых тел, трения и изнашивания, а также методы оценки герметичности металл-металлических соединений. Рассмотренные методы и модели имеют ряд ограничений, критических для пар трения, работающих при малых нагрузках, которые необходимо устранить.

В **главе 2** автор предлагает многоуровневую компьютерную 3D модель инженерных поверхностей, которая на соответствующем уровне воспроизводит особенности геометрии реальных поверхностей: макро-отклонения, волнистость и шероховатость. Макро-отклонения реализуются искажением исходной формы карты поверхности с помощью перекоса, вогнутости, выпуклости и т.д. Волнистость реализуется для полярной или декартовой систем координат с помощью сплайнов, а для моделирования шероховатости автор использует довольно оригинальный способ - фрактальную геометрию.

Автором, с использованием языка программирования языке C++, разработаны программы, позволяющие создавать трёхмерные карты поверхностей с макро-отклонением и волнистостью по заданным параметрам при наличии случайной составляющей отклонений. Кроме того, разработанная

автором программа позволяет создавать фрактальные поверхности, имеющие очень близкие геометрические параметры с шероховатостью реальных поверхностей, а также была создана база данных 3D поверхностей и разработана методика оценки эквивалентных параметров двух сопряжённых поверхностей.

В главе 3 автор решает задачу контактного взаимодействия микровыступов инженерных поверхностей на соответствующем уровне.

Для моделирования 3D контакта волнистых поверхностей используется имитационная модель, позволяющая на основе решения Герца определить зависимость нагрузки от упругой деформации волн, имеющих β – распределение по высоте, а моделирование разных сочетаний поверхностей с одинаковыми исходными данными даст статистически значимый результат.

Моделирование контакта фрактальных поверхностей, близких к исходным шероховатым, позволяет получить реальную картину контактного взаимодействия для каждого конкретного случая. Решая совместно контактную задачу для фрактального микровыступа и контакта по Герцу, автор получил критерий перехода из пластического состояния в упругое в виде критической площади пятна контакта.

Проведя анализ распределения пятен контакта реальных инженерных поверхностей и их моделей, автор подтвердил действительность степенного закона их распределения, а также разработал алгоритм определения показателя степени α , который оказался в линейной зависимости от эквивалентной фрактальной размерности. С учётом найденной функции распределения пятен контакта и их упруго-пластического состояния была разработана программа, позволяющая найти величину сближения поверхностей в зависимости от нагрузки, которая показала высокую сходимость результатов моделирования с экспериментом.

В главе 4 автором рассмотрено трение фрактальных поверхностей. Анализ силового взаимодействия микровыступов позволил получить уравнение для оценки коэффициента трения, включающее в себя

молекулярную и деформационную составляющую.

Для оценки молекулярной составляющей коэффициента трения, которая определяется силой межмолекулярного взаимодействия молекул материала, автором был предложен оригинальный способ применения атомно-силового микроскопа AFM при измерении величины отклонения иглы кантилевера при сканировании гладкого участка поверхности образца при малой нагрузке.

Для оценки деформационной составляющей коэффициента трения был проанализирован средний угол наклона вершин микровыступов, от которого он зависит. Для гладких поверхностей с $Ds < 2,5$ угол наклона микронеровностей мал и поведение полного коэффициента трения определяется его молекулярной составляющей, из-за чего он падает с ростом нагрузки. Для $Ds > 2,5$ площадь пятен контакта под нагрузкой меняется незначительно, а угол наклона, наоборот, начинает оказывать влияние на коэффициент трения, из-за чего он в основном определяется его деформационной составляющей и растёт с ростом нагрузки. Такое поведение трибосистем при малых нагрузках полностью подтверждается экспериментами и говорит о правильности предложенной модели.

В главе 5 автором представлена методика оценки интенсивности изнашивания пар трения при малых нагрузках на основе решённой контактной задачи при наличии пятен, находящихся в пластическом и упругом состоянии.

Для пятен контакта, находящихся в пластическом и упругом состоянии, автор использует известное выражение И.В. Крагельского для оценки интенсивности изнашивания, в котором объём изношенного материала и площадь фактических пятен контакта определяет исходя из фрактальных представлений о микрогеометрии поверхности и их действительной функции распределения. При этом для модели была получена кривая изнашивания, содержащая участок приработки, соответствующий преимущественно пластическому состоянию пятен контакта, и переход к установившемуся режиму трения, когда большинство пятен контакта после изнашивания перешли в упругое состояние, что соответствует реальному режиму работы

трибосистем в этих условиях.

Также было установлено, что для сопряжения поверхностей с эквивалентной фрактальной размерностью $D_s = 2,5$ получается самая низкая интенсивность изнашивания, а при известных предельных состояниях трибоузла предложенная методика позволяет оценить его долговечность. Расчёт интенсивности изнашивания фрикционной предохранительной муфты стрелочного перевода показал довольно близкие результаты с экспериментом и значительное повышение точности расчёта в сравнении с традиционными методами.

В главе 6 автором на основе задачи контактного взаимодействия инженерных поверхностей рассмотрены вопросы обеспечения герметичности металл-металлических уплотнительных устройств. Моделирование контакта на основе предложенной многоуровневой модели даёт возможность оценить фактические значения основных параметров протекания уплотняемой среды, что значительно повышает точность расчётов.

Для оценки герметичности стыка волнистых поверхностей автор использует известное выражение Рейнольдса, а на уровне шероховатости пористый слой моделируется стыком фрактальных поверхностей, для которого в уравнении Пуазейля используются реальные значения пористости, коэффициента извилистости и т.д., полученные при моделировании.

Данная методика позволяет оценить влияние на герметичность таких параметров, как число волн, их средний радиус, пористость шероховатого слоя и распределение пятен контакта. Кроме того, она позволяет расчётным путём добиться полной герметичности, что отличает её от других методов расчёта.

В главе 7 автором дана оценка экономической эффективности работы, которая заключается в снижении затрат на проектирование новых трибоузлов за счёт моделирования их поведения на ЭВМ, которое является адекватным реальным механизмам, работающих в этих условиях.

Обоснованность научных положений и выводов заключается в использовании автором современных теорий о строении инженерных

поверхностей, их упруго-пластического контактного взаимодействия, использованию хорошо себя зарекомендовавших моделей трения, изнашивания и герметичности, где часть переменных определяется исходя из фрактальных представлений о геометрии сопряжённых поверхностей при моделировании фактического контактного взаимодействия участка поверхности, что дало возможность выявить особое поведение трибосистем при малых нагрузках на разных уровнях рассмотрения контакта.

При этом полученные зависимости не противоречат известным законам трения, изнашивания и герметичности, а дополняют их в условиях малых нагрузок.

Достоверность результатов работы подтверждается применения современных средств расчёта и анализа данных, хорошего согласования результатов экспериментов с моделями, анализом большого количества литературных источников по теме исследований, а также широкого освещения результатов работы на конференциях Российского и международного уровня, достаточного количества публикаций в рецензируемых журналах РИНЦ, ВАК и WOS/SCOPUS.

Замечания и рекомендации по диссертации. К настоящей работе имеется ряд замечаний.

1. Учитывает ли данная методология наличие различных покрытий на поверхностях трения или окислых плёнок? Наличие микротрещин, концентраторов напряжений у основании микровыступа?
2. Каким образом можно смоделировать субмикрошероховатость на микровыступах сопряжённых поверхностей? В работе о них говорится, но в многоуровневой модели их нет.
3. Существует ли какая-то чёткая связь стандартных параметров шероховатости с параметрами фрактальной размерности?
4. Возможно ли с помощью предлагаемой в работе методологии оценить остаточный ресурс уже работающего изделия с учётом имеющихся повреждений поверхности?

5. Учитывается ли в работе изменение физико-механических свойств поверхностных слоёв в процессе изнашивания?
6. Автор часто использует сложные многословные предложения, усложняющие понимание текста работы.

Однако сделанные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы и носят рекомендательный характер.

Основные публикации работы. Результаты работы опубликованы в 65 изданиях, из которых 4 учебных пособия, 5 монографий, 27 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в индексируемых международных базах Scopus/WoS. Отдельные результаты диссертации докладывались на 29 международных и всероссийских конференциях, а также автором были получены 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ.

В работах соискателя выполнены все требования к публикациям основных научных результатов диссертации, предусмотренные Положением о присуждении ученых степеней (п.п.11;13;14).

Рекомендации по использованию результатов работы. Разработанные автором программы могут быть применены в различных конструкторских бюро при проектировании и оптимизации трибоузлов кинематических механизмов, МЭМС, фрикционных пар трения и многих других, чьи условия работы соответствуют указанным параметрам. Основные результаты настоящей работы касаются сути механизма контактного взаимодействия микровыступов, их трения и изнашивания, что будет полезно для современных инженеров – исследователей и обучающихся ВУЗов.

Заключение

Анализ содержания диссертации и публикаций по ее теме позволяет сделать вывод, что диссертационная работа Измерова Михаила Александровича на тему «Обеспечение триботехнических показателей слабонагруженных пар трения и герметичности на этапе проектирования

применением имитационного моделирования», является завершенной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно и на высоком научном уровне. В работе решена важная научная проблема обеспечения заданных триботехнических параметров кинематических пар трения на этапе проектирования, которая имеет важное хозяйственное значение, заключающееся в снижении затрат на проектирование кинематических узлов путём моделирования их поведения при трении, а также в оптимизации процесса приработки подбором оптимального сочетания исходной микрогеометрии поверхностей и в научном обосновании интервалов техобслуживания, внедрение результатов которой вносит значительный вклад в развитие страны. Диссертационная работа Измерова Михаила Александровича соответствует требованиям пункта 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842), предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор Измеров Михаил Александрович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3 - «Трение и износ в машинах».

Официальный оппонент

Доктор технических наук (спец. 2.5.3, 2.9.3),
доцент, заведующий кафедрой "Транспортные
машины и триботехника" ФГБОУ ВО
«Ростовский государственный
университет путей сообщения»

Харламов Павел Викторович
«02» мая 2024 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования "Ростовский государственный университет путей
сообщения". Адрес: 344038, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2
Тел. +7 (863) 272-62-86, E-mail: info@rgups.ru

Подпись

Харламова П.В.

УДОСТОВЕРЯЮ

Начальник управления делами
ФГБОУ ВО РГУПС

«02»

05

2024



Э.Н. Кирсанова