ОТЗЫВ

Официального оппонента, доктора технических наук Бреки Александра Джалюльевича 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. В современное время наблюдается интенсивное развитие микросистемных устройств, робототехники, мехатроники, МЭМС, а также прочих устройств, способных выполнять задачи в условиях самоопределения автономно от центрального управления. Некоторые из этих устройств работают в условиях жёсткой экономии энергии для максимальной длительности работы, другие предназначены для замены труда человека или автоматизации ряда технологических процессов производства, но в основном эти механизмы состоят из пар трения, работающих при малых нагрузках.

В этих условиях трение сопряжённых поверхностей происходит на уровне преобразования исходной микрогеометрии в течении длительного времени, а иногда и в процессе всего срока службы механизма. Поведение трибосистем на этом уровне отличается от поведения трибосистем в макро-масштабе, что затрудняет их проектирование, а конечная реализация узла трения формируется после проведения натурных испытаний, что зачастую кардинально меняет его конструкцию.

Современные модели и методы расчёта узлов трения либо предназначены для нормальных или тяжёлых режимов работы, либо разработаны для конкретных случаев, и их применение для механизмов, работающих при малых нагрузках, дают значительные погрешности.

Разработка универсальной теории, основанной на трёхмерном

моделировании контактного взаимодействия, трения и изнашивания микровыступов реальных инженерных поверхностей или их адекватных моделей позволила бы преодолеть многие допущения и обосновать выбор тех или иных коэффициентов при оценке триботехнических параметров трибоузлов, в данном случае работающих при малых нагрузках. В данной работе диссертант разработал основы методологии моделирования контактного взаимодействия инженерных поверхностей на микроуровне, а также трения и изнашивания микронеровностей с учётом некоторых внешних факторов и свойств материалов, которые оказывают решающее значение на поведение трибосистем.

На основании вышеизложенного 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.

Научная новизна исследований и полученных результатов.

1. Предложена методика оценки распределения пятен фактического контакта. Установлено, что распределения пятен фактического контакта подчиняется степенному закону, а показатель степени функции распределения коррелирует с эквивалентной фрактальной размерностью поверхностей.

2. Установлено, что идентификацию состояния пятен контакта шероховатых поверхностей при малых нагрузках нужно начинать с пластического состояния контакта относительно острых субмикровыступов, которые при дальнейшем сближении поверхностей расплющиваются, и контакт переходит в упругую деформацию остова микровыступа, что объясняет нелинейность зависимости сближения от нагрузки в этих условиях.

3. Установлен критерий перехода пятен контакта из пластического состояния в упругое в виде критического пятна контакта a_c при совместном

решении контактной задачи для фрактальной модели и модели Герца. Если площадь пятна контакта меньше a_c, то нужно использовать фрактальную модель, иначе - модель Герца.

4. Найдена оптимальная эквивалентная фрактальная размерность сопряжённых поверхностей $Ds = 2.5$, соответствующая минимальному коэффициенту трения. До этого значения зависимость коэффициента трения от нагрузки имеет ниспадающую характеристику из-за большего влияния адгезионной составляющей, а после - возрастающую из-за роста фрактальной размерности и деформационной составляющей коэффициента трения.

5. Предложен оригинальный способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения с помощью атомно-силового микроскопа путём измерения величины отклонения иглы кантилевера при сканировании гладкого участка поверхности.

6. Разработана модель изнашивания фрактальных поверхностей при малых нагрузках, которая учитывает и объясняет режим приработки. Первоначальный контакт происходит при преимущественно пластическом состоянии пятен контакта субмикровыступов и имеет высокую интенсивность изнашивания, которая постепенно снижается из-за износа и уменьшения фрактальной размерности. При переходе большинства пятен контакта в упругое состояние фрактальная размерность меняется мало, что соответствует установившемуся режиму работы.

7. Разработана методика оценки фактических параметров протекания уплотняемой среды через стык металл-металлического уплотнительного устройства (коэффициента извилистости, пористости, среднего радиуса каналов и т.д.) путём моделирования стыка в виде фрактальной пористой среды.

Научная и практическая значимость работы.

1. Разработана трёхмерная многоуровневая модель инженерных поверхностей и компьютерные программы для ЭВМ, которые позволяют

создавать адекватные им модели с заданными видами отклонений от идеальной формы с учётом случайных смещений.

2. Создана база данных трёхмерных поверхностей и их моделей, которая позволит упростить задачу подбора шероховатости поверхностей трибоузла на этапе проектирования.

3. Предложена новая механика контактного взаимодействия сопряжённых поверхностей при малых нагрузках, основанная на правильной идентификации упруго-пластического состояния контакта, позволяющая точнее оценить контактную жёсткость стыка при этих условиях.

4. Предложен новый способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения с помощью атомно-силового микроскопа при сканировании гладкого участка образца поверхности, дающий более высокую точность измерения в сравнении с классическим методом.

5. Предложен алгоритм оценки интенсивности изнашивания трибоузлов, работающих при малых нагрузках, работающих в режиме приработки, а также оценки их долговечности на основе моделирования контакта сопряжённых поверхностей на этапе проектирования.

6. Разработана методика расчёта герметичности металл-металлических уплотнительных устройств и программа для ЭВМ, основанная на моделировании контактного взаимодействия волнистых и шероховатых поверхностей с оценкой параметров протекания.

Структура и содержание диссертационной работы. Диссертация выглядит законченным научным трудом, логически структурирована. Работа занимает 333 страницы и состоит из введения, семи глав и заключения. Список литературы содержит 232 источника, в работе имеется 149 рисунков и 29 таблиц. Диссертационная 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»

Введение. Дана актуальность работы, цель, задачи, представлен объект и предмет исследования, сформулирована научная новизна, практическая значимость работы, а также положения, выносимые на защиту.

Глава 1. Выполнен обзор опубликованных работ по теме диссертации, который разбит на 4 направления: «Методы моделирования микрогеометрии инженерных поверхностей», «Механика контактного взаимодействия твердых тел», «Трение и изнашивание», «Герметичность металл-металлических соединений». По каждому рассматриваемому направлению были сделаны выводы о том, что необходимо сделать, чтобы решить поставленные задачи и достигнуть цели работы.

Глава 2. Разработана многоуровневая компьютерная трёхмерная модель инженерных поверхностей, которая адекватна реальным поверхностям и учитывает макро-отклонения, волнистость и шероховатость. Макро-отклонения моделируются искривлением первоначальной карты поверхности в памяти ПК: перекос, вогнутость, искривление и т.д. Волнистость моделируется с помощью сплайнов в декартовой или полярной системах координат. Шероховатость реализуется с помощью фрактальной геометрии с использованием функций Вейерштрасса-Мандельброта. На всех

уровнях моделирования алгоритм включает случайную составляющую отклонений, позволяющую каждый раз создавать новую поверхность по исходным данным. Алгоритм был реализован в виде компьютерной программы, позволяющей создавать трёхмерные карты поверхностей с заданной геометрией. Кроме того, была создана база данных поверхностей, включающая карты моделей и реальных поверхностей, а также предложен оригинальный способ оценки эквивалентных параметров сопряжённых поверхностей при замене их на контакт эквивалентной поверхности с плоской.

Глава 3. Представлено решение задачи контактного взаимодействия волнистых и шероховатых поверхностей с учётом их реальной геометрии.

Контакт волнистых поверхностей решён с помощью имитационной модели для упругой задачи на основе решения Герца. Волнистая поверхность моделируется сферами, расположенными по высоте с β – распределением, которая приводится в контакт с плоскостью. При заданном сближении получим определённые пятна контакта и величины деформации отдельных волн, на которых определяется воспринимаемая ими нагрузка.

Контакт шероховатых поверхностей представлен контактом фрактальной поверхности с эквивалентными параметрами с плоскостью. При малых нагрузках на сопряжённые поверхности получим пятна фактического контакта в пластическом и упругом состоянии, соотношение которых будет зависеть от шероховатости, нагрузки, свойств материала и т.д. Совместное решение задачи Герца (упругость) и фрактальной модели (пластика) позволило получить критерий перехода из пластического состояния пятна контакта в упругое, а следовательно, и область применения моделей.

Кроме того, проведённый анализ распределения пятен контакта реальных инженерных поверхностей и их моделей показал, что действительный закон их распределения – степенной, а показатель степени α линейно зависит от фрактальной размерности поверхности.

Глава 4. Рассмотрены вопросы трения фрактальных поверхностей.

Силовой анализ контактного взаимодействия микровыступов позволил получить уравнение для оценки полного коэффициента трения, включающего в себя деформационную и молекулярную составляющую.

Деформационная составляющая коэффициента трения определяется углом наклона микровыступа. Анализ показал, что при *Ds* от 2 до 2,5 наклон микровыступов мало меняется, и для таких поверхностей коэффициент трения будет определяться молекулярной составляющей, которая (для упругого контакта) снижается с ростом нагрузки на контакт поверхностей. Для случая *Ds* от 2,5 до 3 наклон микровыступов резко растёт, а контакт находится преимущественно в пластическом состоянии, из-за чего коэффициент трения определяется его деформационной составляющей и растёт с ростом нагрузки. Эксперименты подтверждают такое поведение коэффициента трения.

Оценку молекулярной составляющей коэффициента трения сопряжённых поверхностей автор определяет с помощью атомно-силового микроскопа AFM, измеряя величину отклонения иглы кантилевера при сканировании гладкого участка поверхности образца при нагрузке 1Н. Данный способ, несомненно, даёт очень точные данные при измерении.

Глава 5. Разработана методика оценки интенсивности изнашивания и прогнозирования поведения трибосистем, работающих при малых нагрузках.

В качестве исходного уравнения автор использует известное выражение И.В. Крагельского для оценки интенсивности изнашивания. Такие переменные, как объём изношенного материала и площадь фактических пятен контакта, автор определяет отдельно для пятен, находящихся в пластическом состоянии и в упругом. При этом первичный контакт поверхностей подразумевает преимущественно пластический контакт, когда получаем высокую интенсивность изнашивания (приработка). Постепенный износ и переход пятен контакта в упругое состояние снижает общую интенсивность изнашивания и переводит трибосистему в установившийся режим.

Кроме того, было установлено, что при эквивалентной фрактальной размерности сопряжённых поверхностей $Ds = 2{,}5$ имеем самую низкую интенсивность изнашивания, соответствующую оптимальному сочетанию исходных поверхностей.

Представленная методика также позволяет при известных предельных состояниях трибоузла оценить его долговечность, а оценка интенсивности изнашивания фрикционной предохранительной муфты стрелочного перевода дало хорошую сходимость результатов расчёта с экспериментом, что подтверждает правильность основных выводов.

Глава 6. Рассмотрены вопросы оценки герметичности стыка металл-металлических уплотнительных устройств. Данные устройства работают при больших контактных давлениях в отличии от рассматриваемых ранее, но поскольку их работоспособность основывается на решении контактной задачи с учётом исходной микрогеометрии, то она является её логическим продолжением.

При наличии волнистости в стыке уплотнительных устройств автор моделирует по заданным параметрам контакт волнистых поверхностей, определяет фактические параметры щели и оценивает объём утечки по известному уравнению Рейнольдса.

На уровне контакта шероховатых поверхностей автор моделирует трёхмерный контакт фрактальных поверхностей с определением параметров протекания через них, а для расчёта утечек использует уравнение Пуазейля. При этом представляется возможным получить статистически значимые результаты, проведя моделирование необходимое количество раз на разных поверхностях с одними исходными данными, учтя случайный фактор. Кроме того, данный способ позволяет добиться полной герметичности на уровне микроконтакта, чего не допускает ни одна теория.

Глава 7. Представлена экономическая эффективность работы, заключающаяся в снижении затрат на проектирование новых трибоузлов посредством моделирования их поведения на ЭВМ. Высокая сходимость

результатов экспериментов и моделирования даёт основание считать предложенную методологию верной.

Обоснованность научных положений и выводов. Автор широко использует современные теории строения инженерных поверхностей, теорию контактного взаимодействия микронеровностей, механику упруго-пластического деформирования, а также применяет известные и широко используемые модели трения, изнашивания и герметичности. Ему удалось связать адекватную с геометрической точки зрения фрактальную геометрию с механикой контактного взаимодействия реальных инженерных поверхностей, что позволило преодолеть многие ограничения классических теорий, повысить точность расчётов триботехнических параметров узлов трения, работающих при малых нагрузках, и предметно объяснить особенность поведения трибосистем в этих условиях.

Достоверность результатов. Автор использует большое количество российской и зарубежной литературы, результаты его расчётов и экспериментов имеют высокую сходимость, в работе применяется компьютерное моделирование и современные системы обработки данных, а разработанные автором алгоритмы основаны на признанных теориях. Кроме того, результаты работы широко представлены на конференциях российского и международного уровня и имеется большое количество публикаций в рецензируемых журналах РИНЦ, ВАК и WOS/SCOPUS.

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

1. В работе не говорится, каким способом можно реализовать на поверхности детали заданную фрактальную размерность. Есть ли какая-то связь с методами и способами металлообработки?
2. Как учитывается анизотропия микрогеометрии шероховатых поверхностей при моделировании стыка уплотнительного устройства?
3. Учитывается ли как-нибудь в модели трения динамика соударения микровыступов при их относительном скольжении?

4. Какие есть ограничения на применении в предлагаемой модели трения материалов? Например пластмасс, резин, композитов?
5. Какая в итоге будет кривая изменения полного коэффициента трения в процессе изнашивания сопряжённых поверхностей при малых нагрузках от момента первичного контакта до перехода к установившемуся режиму работы? Будут ли какие-то значимые точки качественного изменения поведения коэффициента трения? В работе говорится, что они есть, но полной картины поведения коэффициента трения не представлено.

Замечания не снижают общей научной и практической ценности работы и носят рекомендательный характер.

Основные публикации работы. По теме диссертации автором опубликовано 65 работ, из которых 4 учебных пособия, 5 монографий, 27 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 5 статей в индексируемых международных базах Scopus/WoS, имеется 5 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ. Основные результаты работы были доложены на 29 международных и всероссийских конференциях.

Рекомендации по использованию результатов работы. Разработанные автором компьютерные программы и база данных поверхностей могут быть использованы при разработке кинематических узлов трения на различных машиностроительных предприятиях страны, включая конструкторские бюро, проектные организации и т.д. Кроме того, полученные автором новые научные знания и результаты будут полезны для преподавателей и студентов ВУЗов, инженеров и ученых, работающих в этой сфере.

Заключение

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 на высоком научном уровне, и содержит новые научные результаты. 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 слабонагруженных узлов трения путём моделирования их поведения в заданных условиях, а также в оптимизации участка приработки за счёт подбора оптимального сочетания шероховатости сопряжённых 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 «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. 05.02.04),
профессор международного научно-
образовательного центра «BaltTribo-Polytechnic»
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого» __ _ Бреки Александр Джалюльевич

«12» 04 2024 г.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого". Адрес: 194064, Ленинградская область, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., д.29, лит. Б
Тел. +7 (812) 297-20-95, E-mail: breki_ad@spbstu.ru

Подпись
УДОСТОВЕРЯЮ
Ведущий специалист
по кадрам
«12» 04 2024 г.