ОТЗЫВ

официального оппонента д.т.н., профессора Малышева Владимира Николаевича на диссертационную работу **ИЗМЕРОВА Михаила Александровича на** тему «Обеспечение триботехнических показателей слабонагруженных пар трения и герметичности на этапе проектирования применением имитационного моделирования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3.Трение и износ в машинах

1. Актуальность темы диссертации

Для относительно большого количества узлов трения, работающих при не высоких нагрузках, а также в режиме приработки, в особенности это касается прецизионных механизмов механотронных устройств и робототехники, оптических приборов и др., в которых величина допустимого износа сопоставима с величиной шероховатости поверхности, современные методы расчета узлов трения дают довольно значительные ошибки.

Как показывает практика до 80% проектируемых узлов трения требуют доработки, вследствие больших погрешностей при оценке фактической площади контакта, вида деформационного состояния пятен контакта и их нагрузочной способности. Учёт микрогеометрии и деформационного состояния фактических пятен контакта является определяющим фактором при проектировании таких пар трения.

В этой связи, с целью улучшения характеристик кинематических пар механотронных систем и решения проблемы обеспечения износостойкости слабонагруженных трибосистем и узлов, работающих в режиме приработки, требуется выявить закономерности трения и изнашивания путем разработки соответствующих имитационных моделей.

Экспериментальные исследования контактного взаимодействия и изнашивания слабонагруженных (кинематических) пар трения показали, что процессы на микроуровне кардинально отличаются от принятых и широко используемых закономерностей в макро-масштабе.

В этом смысле рассматриваемая работа Измерова М.А., посвященная изучению особенностей контактирования, трения, износа и герметичности в слабонагруженных парах трения в определенной степени восполняет существующий пробел в исследованиях изнашивания подвижных сопряжений и имеет большое научное и практическое значение.

При стандартном методе профилографирования, субмикрошероховатость, вносит свой вклад в картину напряжённого состояния и распределения пятен фактического контакта, который становится тем больше, чем меньше контактное давление. Вследствие этого, меняется фактический коэффициент трения, а также интенсивность изнашивания, которые в этих условиях являются нелинейными и подчиняются другим законам трения, в зависимости от состояния контакта.

Уже более 45 лет трибологи в своих расчетах используют формулы для оценки коэффициента трения, интенсивности изнашивания и других триботехнических показателей, предложенные корифеями науки трибологии – Крагельским И.В., Михиным Н.М., Чичинадзе А.В. и др., которые удовлетворительно работают при средних и тяжелых нагрузках. Что же касается малых нагрузок, то на контактное взаимодействие оказывают влияние не только микронеровности на уровне шероховатости, но и субмикрошероховатость, что практически ранее не исследовалось.

Таким образом, на текущий момент не существует общей теории, которая бы адекватно описывала особенности процесса трения и изнашивания при малых нагрузках или в режиме приработки с учетом контактного взаимодействия микровыступов исходных поверхностей, поэтому рецензируемая диссертационная работа Измерова М.А., направленная на обеспечения износостойкости кинематических пар с помощью имитационного моделирования многомасштабной структуры поверхности и контактного взаимодействия на всех уровнях: макро-отклонений, волнистости, шероховатости и субмикрошероховатости, является актуальной и востребованной.

2. Новизна исследований и полученных результатов

Автором установлено, что распределение пятен фактического контакта подчиняется степенному закону с показателем степени, пропорционально коррелирующим с фрактальной размерностью поверхностей, при этом переменные составляющие зависят от микрогеометрии и вида обработки сопряжённых поверхностей, а функция распределения пятен контакта может быть найдена посредством имитационного моделирования.

Предложена модель деформации вершин микровыступов, отличающаяся тем, что на вершинах микровыступов первичный контакт возникает в пластическом состоянии, а при дальнейшем сближении и увеличении размеров пятен контакта, деформационное состояние меняется на упругое, что объясняет нелинейность сближения от нагрузки при этих условиях.

Установлен критерий перехода от пластического состояния к упругому в виде критической площади пятна контакта a_c, разграничивающего области применения моделей: для пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, адекватные результаты даёт фрактальная модель, для упругого контакта - модель Герца.

Определена оптимальная фрактальная размерность поверхности (D_s=2,5), соответствующая минимуму коэффициента трения, и разграничивающая деформационные и адгезионные свойства материала: до этого значения деформационная составляющая практически не влияет на коэффициент трения, который определяется в основном адгезионными свойствами материала и растёт с уменьшением фрактальной размерности, а при больших значениях коэффициент трения в основном определяется деформационной составляющей при почти неизменной адгезионной, из-за малой фактической площади пятен контакта, и растёт с ростом фрактальной размерности.

Автором разработан способ оценки адгезионной составляющей коэффициента трения по величине отклонения иглы кантилевера атомно-силового микроскопа при нагрузках до 1 нН и сканировании в прямом и обратном направлениях гладких образцов поверхности с R_a до 0,4.

Разработана модель изнашивания инженерных поверхностей при малых нагрузках: снижение интенсивности изнашивания в режиме приработки происходит за счёт износа фактических пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, и снижения фрактальной размерности поверхности; при установившемся режиме работы интенсивность изнашивания постоянна, так как большинство пятен контакта вследствие износа переходят в упругое состояние и фрактальная размерность практически не меняется.

Автором разработана методика оценки герметичности уплотнительных металл-металлических устройств путём моделирования фрактальной пористой среды и расчёта параметров протекания - фактического коэффициента извилистости, пористости и среднего радиуса каналов протекания, которые соответствуют исходной микрогеометрии сопряжённых поверхностей.

3. Значимость результатов для практики

Значимость результатов для практики заключается:

- в разработке компьютерных программ для ЭВМ, позволяющих создавать адекватные 3D модели инженерных поверхностей с высокой детализацией;
- в разработке базы данных поверхностей на основе СУБД MySQL, которая включает карты реальных поверхностей и их модели с разными параметрами, что позволяет автоматизировать исследования для выбора оптимального сочетания образцов при проектировании трибосистем;
- в разработке компьютерной программы, адекватно оценивающей контактную жесткость стыка при малых нагрузках и исключения ошибок на стадии проектирования;
- в разработке нового способа оценки адгезионной составляющей коэффициента трения на нано-уровне методом анализа величины отклонения иглы кантилевера атомно-силового микроскопа при прямом и обратном сканировании гладких образцов инженерных поверхностей, который даёт более точные результаты из-за малого влияния деформационной составляющей при измерениях;
- в разработке алгоритма прогнозирования поведения узлов трения на этапе проектирования на основе разработанных программ компьютерного моделирования и базы данных 3D карт контактного взаимодействия шероховатых поверхностей, позволяющего рассчитать время изнашивания микронеровностей под действием заданной нагрузки и величину износа, а также подбирать сочетание карт поверхностей с минимальной интенсивностью изнашивания;
- в практическом решении задачи МУП «Брянское городское пассажирское автотранспортное предприятие» герметичности уплотнительных устройств гидросистемы автобусной техники, уменьшении времени простоя автопарка, экономии материалов и запчастей, выразившейся в снижении издержек за 2020 год на сумму 1 192 201 руб.

По результатам исследований автором, в том числе в соавторстве, зарегистрированы 5 свидетельств компьютерных программ для ЭВМ.

Отдельные теоретические результаты работы используются в образовательном процессе в дисциплинах кафедры «Трубопроводные транспортные системы» и «Подвижной состав железных дорог» ФБГОУ ВО «БГТУ».

4. Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций

Научные положения, выводы и рекомендации, приведенные в рассматриваемой работе, полностью обоснованы проведенным комплексом необходимых исследований: от идеи и создания теоретических предпосылок и аналитических выкладок, основанных на известных положениях фундаментальных наук, и сходимостью полученных теоретических результатов с большим объемом экспериментальных данных, до проведения лабораторных и стендовых экспериментов и испытаний узлов трения в условиях, приближенных к эксплуатационным.

Достоверность и обоснованность полученных результатов работы не вызывает сомнений, так как базируется на большом количестве экспериментального материала, подтверждена проведенными стендовыми и натурными испытаниями в условиях их эксплуатации. Кроме того, достоверность подтверждается использованием стандартизированных и принятых в научной практике методов статистической обработки экспериментальных данных, планирования экспериментов, применением апробированных методик расчета интенсивности изнашивания поверхностей узлов трибосопряжений.

5. Общая оценка содержания диссертации

Диссертация по своему оформлению и структуре оставляет общее положительное впечатление. Материал диссертации структурирован и логично представлен, включает введение, семь глав, основные выводы и результаты, список использованных источников литературы (234 наименования), общим объемом в 333 страницы машинописного текста, содержит 149 рисунков, 29 таблиц и 6 приложений.

Во введении приводится актуальность работы для слабонагруженных узлов трения и уплотнительных устройств, указывается общая характеристика представленной работы, сформулированы цель, задачи, научная новизна и значимость проведенной работы для науки и практики.

Первая глава посвящена обзору и анализу опубликованных работ, подчеркивается важность влияния качества микрогеометрии поверхностей на интенсивность изнашивания. Анализ микрорельефа инженерных поверхностей, при рассмотрении его на разных уровнях и масштабах, наглядно указывает на его самоподобие и проявление фрактальных свойств, что позволяет использовать достижения фрактальной геометрии в моделировании реальных инженерных поверхностей. Из анализа известных моделей контактного взаимодействия поверхностей, таких как сферическая модель

Гринвуда-Вильямсона, модель Демкина Н.Б., моделей Буша, Гибсона Томаса и Арчарда, автор делает вывод о применимости модели Гринвуда-Вильямсона при высоких контактных давлениях, а многоуровневая модель Арчарда не соответствует реальным инженерным поверхностям, приводя к значительным ошибкам при оценке параметров контактного взаимодействия.

Для характеристики герметичности автором были рассмотрены модели протекания (просачивания), предложенные Дарси, Пуазейлем, Козени, Божко Г.В., Гуревичем Д.Ф., Сусловым А.Г. и др., критический анализ которых показал о существовании двух направлений анализа режимов течения рабочей среды между поверхностями, однако единой научно-обоснованной методики для определения герметичности пока нет.

Далее диссертантом проведен критический анализ моделей контактного взаимодействия поверхностей с фрактальной топографией, сгенерированной с помощью функции Вейерштрасса-Мандельброта, на основании которого была сформулирована цель работы и поставлены задача разработки новой методологии расчета малонагруженных узлов трения (или в режиме приработки) за счет создания адекватной 3-х мерной модели инженерных поверхностей, учитывающей все виды микронеровностей (от волнистости до субмикрошероховатости).

Во второй главе автором представлена многоуровневая модель строения инженерной поверхности – от макро-отклонений до субмикрошероховатости.

На уровне макро-отклонений происходит искажение исходной формы поверхности (перекос, вогнутость, выпуклость и т.п.).

На уровне волнистости автором разработан алгоритм сшивания участков поверхностей с помощью сплайнов, которые строятся по косинусоидальному закону по заданным параметрам.

Моделирование шероховатости поверхности автор предлагает выполнять с использованием фрактальных моделей, которые имеют максимальное сходство с реальной инженерной поверхностью и минимальную погрешность при оценке эксплуатационных свойств. Использовалась двухпараметрическая функция Вейерштрасса-Мандельброта, которая позволяет создавать как изотропные, так и анизотропные поверхности. Оценка адекватности предложенных моделей проводилась по трем критериям: сравнением спектральной плотности реальной поверхности и модели, применением безразмерного критерия π на основе анализа размерностей и сравнением опорных кривых. Кроме того, автором была создана база данных реальных поверхностей, полученных щуповым методом при трехмерном профилографировании, и их моделей.

Третья глава работы посвящена методологии оценки контактного взаимодействия волнистых и шероховатых поверхностей на основе многоуровневой модели, рассмотренной во второй главе. При этом, предполагалось, что макро-отклонения и волнистость при моделировании позволяют определить контурные пятна контакта, на которых в дальнейшем моделировался контакт фрактальных поверхностей для получения фактических пятен контакта.

Моделирование контакта волнистых поверхностей проводилось автором

на имитационной (сферической) модели, состоящей из выступов круглой формы одинакового или разного радиуса, которые расположены случайным образом по высоте относительно средней линии по β – распределению. Для трёхмерной задачи сближение происходило на трёхмерных моделях, основанных на сплайнах. При этом определялся реальный размер каждого контурного пятна контакта и его нагрузка.

Контактное взаимодействие шероховатых поверхностей моделировалось фрактальными поверхностями, которые были представлены в главе 2. С использованием предложенной Маджумдаром аналитической связи параметров фрактального выступа со сферическим, и приравнивая решение фрактальной модели и модели Герца, автору удалось получить критерий перехода из пластического состояния вершин микровыступа в упругое деформирование микровыступа в виде площади критического пятна контакта a_c. Проанализировав распределения пятен контакта при взаимодействии реальных трёхмерных карт шероховатых поверхностей, автор подтвердил степенной закон распределения с показателем степени α, который линейно зависит от параметра эквивалентной фрактальной размерности. С учётом закона распределения пятен контакта, полученного критерия перехода от пластического состояния к упругому и моделирования трёхмерного контактного взаимодействия, автор смог оценить площадь пятен контакта, находящихся в пластическом состоянии, площадь пятен контакта, находящихся в упругом состоянии и найти их нагрузочную способность при заданной величине сближения. Эксперименты по оценке сближения от давления показали высокую сходимость при заданных условиях.

В четвертой главе приведена методика определения полного коэффициента трения сопряженных поверхностей при малых нагрузках.

Для оценки молекулярной составляющей коэффициента трения автором был предложен оригинальный способ его определения по отклонению иглы кантилевера атомно-силового микроскопа при сканировании гладкого участка образца при очень малой нагрузке при прямом и обратном ходах, когда деформационная составляющая практически не оказывает влияние на процесс измерения.

По анализу угла наклона микровыступов в зависимости от фрактальной размерности поверхности удалось установить, что для поверхностей с фрактальной размерностью до $D < 1{,}5$ угол наклона практически не меняется, и полный коэффициент трения в основном определяется адгезионной составляющей и падает с ростом нагрузки, а при $D > 1{,}5$ угол наклона резко растёт при слабо меняющейся адгезионной составляющей коэффициента трения из-за малой площади контакта, и в этих условиях коэффициент трения в основном определяется деформационной составляющей и уже растёт с ростом нагрузки. Экспериментальные исследования подтвердили правильность предложенных моделей, включая сравнение данных модели с данными литературных источников натурных испытаний других исследователей.

Пятая глава посвящена решению задачи оценки интенсивности изнашивания шероховатого слоя и прогнозирования ресурса трибосопряжения при малых нагрузках.

Для оценки интенсивности изнашивания использовались известные формулы Крагельского И.В., Михина Н.М., при этом деформированный объём изношенного материала и площадь фактического контакта пятен, находящихся в пластическом и упругом состояниях, определялись с учётом фрактальных представлений о форме сопряжённых микронеровностей и их распределении. Была найдена оптимальная эквивалентная фрактальная размерность сопряжённых поверхностей D_s=2,5, соответствующая минимуму интенсивности изнашивания. Автор показал возможность оценить длительность приработки и момент выхода в нормальный режим установившегося трения, когда на исходных поверхностях первоначально высокий темп изнашивания вершин микровыступов, находящихся в пластическом состоянии, постепенно снижался вследствие снижения фрактальной размерности и большинство пятен фактического контакта переходило в упругое состояние, которое соответствовало нормальному режиму изнашивания.

Разработанная автором методика расчёта интенсивности изнашивания позволяет оценить также и долговечность трибоузла. Так, полученные выражения для оценки интенсивности изнашивания в применении к фрикционной предохранительной муфте стрелочного перевода показали хорошую сходимость результатов расчета с экспериментом, что подтверждает верность предложенной методики.

В шестой главе представлена методика оценки протекания уплотняемой среды через стык инженерных поверхностей в металл-металлическом уплотнительном устройстве, работа которого происходит при значительных контактных давлениях. Эту главу следует рассматривать как логическое продолжение расширения применения разработанной методики оценки контактного взаимодействия шероховатых поверхностей с учетом исходной микрогеометрии.

При контакте волнистых поверхностей автор использует уравнение Рейнольдса, а для оценки просачивания жидкости через пористый слой в местах фактического контакта – уравнение Пуазейля. Параметры герметичности - коэффициенты (пористости, извилистости и т.д.) получены на основе моделирования контакта трёхмерных фрактальных поверхностей. При этом представилась возможность оценить влияние на герметичность таких параметров, как число волн, их высота, радиус, а также высота неровностей шероховатости, пористости и извилистости. Отличительной особенностью данной методики является то, что она позволила получить условия работы уплотнительного устройства при достижении полной герметичности для рассматриваемых поверхностей. Сравнение полученных данных модели с экспериментом, при использовании трансформаторного масла и керосина в качестве уплотняемой среды на поверхностях с разной шероховатостью, дало удовлетворительные результаты.

В седьмой главе оценивается экономическая эффективность предлагаемой методологии моделирования трибоузлов, работающих при малых нагрузках, отличительной особенностью которой является то, что используются реальные данные, которые определяются в процессе компьютерного моделирования контакта сопряженных поверхностей на разных уровнях взаимодействия.

6. Замечания, выявленные недостатки работы

В качестве замечаний к работе следует указать следующее:

1. В предложенных автором моделях контактного взаимодействия учитываются, в основном, топографические и, частично, физико-механические данные и не учитываются кинематические свойства контактирующих поверхностей, которые могут оказывать существенное влияние как на механизм износа, так и режим контактирования.
2. При оценке герметичности, насколько оправдано использование предложенных Вами моделей сборки кластеров, в отличие от известных моделей DLA (Diffusion Limited Aggregation) или ОДА (ограниченная диффузией агрегация), CCA (Cluster-Cluster Aggregation), RLCA, перколяции, которые во многих случаях дают хорошие результаты?
3. Как смоделированные инженерные поверхности соотносятся с параметрами шероховатости поверхностей (R_a и R_z), отображаемыми конструктором на рабочих чертежах деталей и технологическими режимами обработки?
4. Насколько широкими являются пределы применения предлагаемых моделей инженерных поверхностей при контактировании различных материалов, в том числе металлов, пластмасс, резин, композиционных материалов?
5. Известно, что поверхности трения, как правило, имеют окисные пленки, играющие существенную роль в процессах трения и изнашивания. Учитывалось ли Вами данное обстоятельство при моделировании?
6. Автором в тексте диссертации часто используются термины субмикрошероховатость, маханотроны и др., которые зачастую пишутся как «субшероховатость», «мехатроны» и т.п., что усложняет восприятие текста, так как представляется, что это другие понятия.
7. Имеется также некоторое количество шероховатостей в оформлении: ряд стилистических неточностей, описок, неточных ссылок и т.п. В частности:

- стр.130 – ошибка в записи b_1 вместо b_2.
- стр. 133 – фразеологизм «анализ сравнительного анализа».
- стр. 147 - ошибка в обозначении пределов для формулы Рудзита Я.А. $R_a < 6{,}3$ мкм, вместо $R_a > 6{,}3$.
- стр. 237 – отсутствуют ссылки на цитируемую литературу;
- стр.255 - площадь поверхности накладки записана в мм, а не в мм^2;

Однако, отмеченные недостатки не носят принципиального характера и не снижают общего положительного впечатления от выполненной работы.

7. Публикации, отражающие основное содержание диссертации

Основное содержание диссертации опубликовано в научной печати. По теме диссертации автором опубликовано 65 научных работ, из них – 5 монографий, 4 учебных пособия, 27 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Минобразования и науки РФ, 5 работ в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, в которых полностью отражена суть рассматриваемого исследования в целом, зарегистрированы 5 компьютерных программ. Диссертант принимал участие и докладывал основные моменты своей работы на более чем 29 научных форумах различного уровня.

8. Автореферат написан четко, с приведением основных положений диссертации и достаточно полно отражает суть ее содержания.

9. Соответствие диссертационной работы паспорту специальности

Диссертационная работа Измерова М.А. соответствует паспорту специальности 2.5.3 Трение и износ в машинах по пунктам:

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.

10. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результатами работы могут воспользоваться как научно-исследовательские организации, занимающиеся вопросами повышения износостойкости узлов трения (ЦНИИТМАШ, ИПМех РАН, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, вузы машиностроительного, и приборостроительного профилей), а также вузы железнодорожного направления – РГУПС, БГТУ и др., так и организации, занятые эксплуатацией и ремонтом слабонагруженных узлов трения и робототехники.

11. Заключение

На основании экспертизы рассмотренной работы можно сделать вывод, что диссертационная работа Измерова М.А. «Обеспечение триботехнических показателей слабонагруженных пар трения и герметичности на этапе проектирования применением имитационного моделирования» является законченной научно-исследовательской работой, выполненной автором самостоятельно на высоком научном уровне на актуальную тему, и содержит новые научные результаты. Проведенные автором исследования, посвященные

изучению механизмов и закономерностей изнашивания слабонагруженных узлов трения и герметичности уплотнительных устройств с применением методов имитационного моделирования, можно квалифицировать как успешное решение важной научной проблемы повышения износостойкости, внедрение которой вносит значительный вклад в развитие страны.

Выводы и рекомендации автора, сформулированные в диссертации, теоретически обоснованы, экспериментально проверены, прошли апробацию в научных изданиях, научно-технических конференциях, симпозиумах и семинарах.

Диссертационная работа Измерова М.А. по содержанию, научной новизне, достоверности и обоснованности полученных результатов, объему выполненных исследований, а также научной и практической значимости полностью отвечает требованиям ВАК РФ (п. 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» от 24.09.2013 № 842), предъявляемым к докторским диссертациям.

Сам соискатель - Измеров Михаил Александрович, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.3. Трение и износ в машинах.

Официальный оппонент,
Профессор кафедры трибологии и технологий ремонта
нефтегазового оборудования ФГАОУ ВО
«РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина»,
доктор технических наук, профессор

Владимир Николаевич Малышев

«02» мая 2024 г.

Подпись Малышева В.Н. заверяю.
Начальник ОК РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М.Губкина _____ *Ю.Е. Ширяев*

Малышев Владимир Николаевич, доктор технических наук, диссертация защищена по специальностям 05.02.04 – Трение и износ в машинах и 05.02.01 – Материаловедение в машиностроении, профессор, профессор кафедры трибологии и технологий ремонта нефтегазового оборудования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина», РФ, 119991, г. Москва, Ленинский проспект, 65, корп.1
Тел.: +7 499 507 8788
e-mail: vmal@inbox.ru
Согласен на обработку своих персональных данных

РГУ нефти и газа (НИУ)
имени И.М. Губкина
Рег. № Ф/539
от «03» 05 2024 г.