

Отзыв

официального оппонента Шоркина Владимира Сергеевича на диссертацию
Маховской Юлии Юрьевны, выполненную на тему
«Моделирование адгезионного взаимодействия деформируемых тел»
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 –механика деформируемого твердого тела

Диссертация Юлии Юрьевны Маховской посвящена теоретическому решению на основании единой математической модели явления адгезионного взаимодействия деформируемых тел в условиях как нормального контакта, так и контактов скольжения и качения, и использованию полученных результатов для решения проблем трибологии на основании единых математических подходов и методов исследования осложненного адгезией контактного взаимодействия твердых тел вдоль шероховатых поверхностей.

Комплекс рассматриваемых в диссертации задач позволяет говорить о том, что автором на основании выполненных им исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы механики деформируемого твердого тела, которое служит основой нового научного направления, посвященное исследованию статического и динамического адгезионного взаимодействия твердых деформируемых тел и решению на ее основе практически важных проблем механики деформируемого твердого тела, трибологии по учету влияния адгезии на характеристики трения элементов контактных пар машин и механизмов.

Актуальность темы диссертации. Явление адгезии (прилипания) широко распространено. Как при относительном качении, так и при скольжении элементов механизмов наличие сил адгезии приводит к увеличению сил трения. С помощью сил адгезии для исключения потерь создается оптический контакт торцов оптоволоконного кабеля. Для различных отраслей промышленности важны проблемы напряженно-деформированного состояния слоистых структур – пластин, оболочек. При их решении необходимо правильно учесть взаимодействия между слоями. Те же силы адгезии при обработке металлов и других твердых материалов резанием препятствуют получению низкой шероховатости обработанной поверхности, увеличению скорости резания. При качении железнодорожного колеса по рельсам силы адгезии способствуют их выкрашиванию и разрушению.

Перечисленные проявления адгезии делают **актуальной проблемой** исследование ее влияния на контактное взаимодействие твердых тел.

Адгезия активно изучается и описывается физикой твердого тела с помощью понятий и представлений, характеризующих и количественно описывающих межатомные взаимодействия. Однако их использование при моделировании адгезии реальных твердых материалов с их сложным химическим составом и структурой невозможно. Поэтому в этом случае используются феноменологические подходы термодинамики и механики сплошных сред. Соответствующие теории в настоящее время существуют. В их рамках допускается, что адгезионные взаимодействия осуществляются за счет нелокального потенциального взаимодействия их участков поверхности или элементов приповерхностных слоев. При этом, как в физике, так и в механике часто допускается, что границы взаимодействующих тел лишены каких-либо случайных неровностей, а контакт вдоль них является сплошным. Не учитывается также, что радиус действия адгезионных сил намного меньше получающейся в результате обработки шероховатости поверхности деталей и элементов конструкций машин и приборов. Поэтому **актуальной является разработка математических моделей адгезионного взаимодействия**, как в статическом состоянии, так и при относительном движении твердых деформируемых тел, граничные поверхности которых обладают определенной шероховатостью.

Эксплуатация многих приборов и устройств, а значит и неподвижный или подвижный контакт их элементов происходит во вполне определенных атмосферных условиях (даже при создании определенной степени вакуума), следовательно, при наличии на контактирующих поверхностях смачивающего их влажного конденсата. Взаимодействуя одновременно с обеими контактирующими поверхностями, конденсат действует аналогично силам межмолекулярной адгезии, при этом вызывает эффект, соизмеримый с «сухой» адгезией. Поэтому **актуальным является комплексное рассмотрение вопросов адгезии**, как при сухом контакте твердых тел, так и при их контакте в присутствии жидкости.

Наряду с перечисленными механическими проблемами при рассмотрении адгезионного взаимодействия реальных элементов конструкций приборов и устройств **актуальной является и проблема создания единых математических методов** решения перечисленных проблем, аналитического и численного решения соответствующих систем уравнений относительно характеристик напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, вызванного их адгезионным взаимодействием.

Перечисленные аргументы свидетельствуют об **актуальности темы диссертации Ю.Ю. Маховской**.

Целью диссертационной работы ее автор выбирает решение крупной научной проблемы направления механики деформируемых твердых тел, служащего основой развития нового научного направления - механики контактного взаимодействия деформируемых тел с учетом их адгезионного взаимодействия.

Для достижения поставленной цели автор диссертации:

- развивает общий подход к решению задач об адгезионном взаимодействии осесимметричных упругих тел;
- делает постановку и решает задачи о капиллярной и «сухой» адгезии упругих тел, об адгезии упругих тел в дискретном контакте;
- строит метод расчета потери энергии при циклическом подводе-отводе упругих тел и исследует на его основе влияние на эту величину их свойств;
- разрабатывает математические модели для расчета адгезионной составляющей силы трения на основе анализа потери энергии при образовании и разрыве контактов между поверхностными неровностями;
- осуществлены постановка и решение контактных задач о скольжении отдельной неровности и регулярной волнистой поверхности по поверхности вязкоупругого тела при наличии адгезии;
- сделан анализ влияния параметров адгезии, геометрии поверхностей, механических свойств взаимодействующих тел и условий контактирования на контактные характеристики и деформационную составляющую силы трения.

Автор диссертации **сформулировал суть направления, комплекс проблем задач**, формирующих его, представил обзор достижений мировой и отечественной наук по отдельным участкам разрабатываемого направления, представил такой вариант своего решения поставленных задач, который позволяет использовать его в практических расчетах.

В диссертации использованы теоретические методы исследования.

В работе применялись методы механики деформируемого твердого тела, в частности, теории упругости и вязко-упругости, механики контактного взаимодействия, общепризнанные результаты, полученные в этих разделах механики. Математическое решение поставленных задач осуществлялось с помощью точных аналитических методов, проверенных и обоснованных методов, сочетающих численные и аналитические решения. Теоретические результаты постоянно качественно сравнивались с известными экспериментальными данными. Результаты моделирования сопоставляются с результатами экспериментов, проведенных в лаборатории трибологии ИПМех РАН.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация изложена на 286 страницах машинописного текста. Она состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы, который содержит ссылки на 193 работы отечественных и зарубежных авторов. Проводимые рассуждения и полученные результаты иллюстрируются 91 рисунком и данными одной таблицы.

Краткий анализ содержания.

Во **введении** сначала автор диссертации сосредотачивается на постановке проблемы, отмечая, что в основе механики контактного взаимодействия лежит решение задачи Г. Герца о контакте двух упругих тел с искривленными граничными поверхностями. Отмечается, что существуют еще и адгезионные взаимодействия твердых и жидких тел, которыми во многих задачах механики можно пренебречь, но в ряде случаев, например, при рассмотрении вопросов трения, ими пренебрегать нельзя.

Говорится о том, что в настоящее время существует несколько моделей адгезионных взаимодействий – ДКР, ДМТ, Д. Можи. Во введении Ю.Ю. Маховская обосновывает необходимость комплексного рассмотрения в тесной связи с проявлениями сухой и капиллярной адгезии и вызванных ими силовых и энергетических потерь на трение скольжения и качения, влияния шероховатости контактирующих поверхностей. При этом обращается внимание на учет взаимного влияния деформационной и адгезионной составляющих силы трения.

Во введении указано, как апробированы результаты, где и когда обсуждались: 40 печатных работ, из них 17 опубликованы в международных рецензируемых изданиях, журналах из перечня ВАК. Результаты диссертации докладывались и обсуждались на более чем 20 авторитетных российских и международных научных конференциях и научных семинарах.

Первая глава диссертации посвящена обзору и анализу работ по решению отдельных задач и проблем создаваемого автором диссертации направления, выполненных как отечественными, так и зарубежными авторами, их достоинств и недостатков, выявлению их пригодности для практического применения в инженерных расчетах. Необходимо отметить, что по каждой из проблем, объединенных в развиваемое в работе направление, в мировой научной литературе опубликовано немало работ. Продолжают они активно публиковаться и в настоящее время. Ю.Ю. Маховская обратила внимание лишь на основополагающие работы, указала собственные работы, выполненные как в соавторстве, так и индивидуально. Отмечены также работы, результаты которых использованы при проведении математических рассуждений и сопоставлении полученных результатов с представленными в них экспериментальными данными.

Глава 2 посвящена решению проблемы адгезионного взаимодействия упругих тел в той мере, которая необходима для достижения цели диссертации. В этой главе представлены модели адгезионного взаимодействия индентора и упругого полупространства, нагруженных нормальной внешней силой. Получены аналитические выражения для контактного давления, упругого перемещения границы полупространства вне области контакта, нагрузки, действующей на штамп, и внедрения штампа в упругое полупространство. Рассмотрены случаи капиллярной адгезии, вызванной наличием в зазоре мениска жидкости, и адгезии сухих поверхностей, связанной с межмолекулярным притяжением. Проведено сравнение полученных результатов с результатами известных упрощенных моделей адгезионного взаимодействия.

В **Главе 3** исследуется роль поверхностной шероховатости при взаимодействии упругих тел с учетом адгезии различной природы – капиллярной и молекулярной. При этом выявляется влияние адгезии на характеристики дискретного контакта, который моделируется адгезионным взаимодействием системы периодически расположенных штампов и упругого полупространства, прижатых друг к другу внешней нагрузкой, направленной по нормали к полупространству. Рассмотрены ситуации, когда состояния материалов около штампов независимы друг от друга, а также когда штампы близки друг

к другу так, что взаимным влиянием пренебречь нельзя. Полученное решение используется для анализа влияния параметров шероховатости (формы выступов и плотности их расположения) на напряжения и перемещения поверхности контакта, другие контактные характеристики. Результаты использованы для исследования влияния микрогеометрических параметров шероховатости одновременно с макрогеометрическими номинальными параметрами тел на характеристики их контактного взаимодействия.

В **Главе 4** рассматривается процесс нормального сближения и разведения поверхностей при наличии адгезии. Проводится расчет потери энергии при циклическом подводе и отводе тел друг от друга. Результаты, полученные в аналитической форме в безразмерном виде, использованы для моделирования силы трения при тангенциальном перемещении друг относительно друга шероховатых упругих тел (при скольжении и качении). Предложена модель адгезионной составляющей силы трения при скольжении шероховатых поверхностей на основе расчета суммарной потери энергии при образовании и разрыве элементарных контактов между выступами. Проведен расчет силы трения при различных параметрах шероховатости и величин удельной работы адгезии. Построена модель качения шероховатого цилиндра по упругому полупространству при наличии адгезионного притяжения между поверхностями.

Глава 5 посвящена моделированию и изучению на основании построенной модели подвижного контакта твердых деформируемых тел – скольжения единичного жесткого выступа и регулярной волнистой поверхности по вязкоупругому основанию при наличии молекулярной и капиллярной адгезии. Исследуется влияние адгезионного притяжения, действующего в зазоре между поверхностями, на контактные характеристики и деформационную составляющую силы трения. В этой главе даны постановка и решение контактной задачи о скольжении жесткого цилиндра по поверхности вязкоупругого полупространства при наличии адгезионного притяжения. Разработанные в этой главе модели позволяют оценить влияние сил адгезии на распределение контактного давления, размер области фактического контакта и силу трения при скольжении по поверхности вязкоупругого материала инденторов, имеющих разные формы поверхностного рельефа. Учет адгезии приводит к увеличению деформационной составляющей силы трения. Вязкие свойства материала приводят к несимметрии пятен контакта относительно оси выступа, при этом области контакта, как и области адгезионного взаимодействия смещаются в направлении скольжения индентора. Кроме того, вследствие вязкости основания области контакта и адгезионного взаимодействия вытягиваются в направлении, перпендикулярном направлению скольжения. В пятой главе представлено сопоставление полученных теоретических результатов с данными экспериментов.

В заключении перечислены основные результаты, полученные в ходе выполнения диссертации, относящиеся как постановке и формулировке математических задач, точные аналитические решения которых использовались при решении затрагиваемых задач механики, так и при постановке, формулировке и решении этих задач.

Диссертация Юлии Юрьевны Маховской «Моделирование адгезионного взаимодействия деформируемых тел» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук **соответствует паспорту специальности 01.02.04** – механика деформируемого твердого тела. В ней осуществлены постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации при механических и адгезионных воздействиях, изучаются закономерности процессов деформирования и напряженно-деформированное состояние твердых тел при статических и динамических воздействиях.

Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации достоверны, так как получены путем применения классических математических методов, методов механики сплошных сред, теории упругости и вязкоупругости. Некоторые решения получены аналитически, их достоверность обеспечивается корректной постановкой задач и аккуратным и строгим использованием аналитических методов. Достоверность результатов расчетов

подтверждается сравнением полученных решений с известными аналитическими решениями и численными результатами в предельных случаях. Некоторые из полученных результатов сопоставлены с экспериментальными данными.

Полученные **результаты являются новыми.**

Новизна результатов подтверждена их **апробацией** при обсуждении на представительных конференциях и семинарах.

Научная новизна результатов диссертации состоит в создании направления в механике деформируемого твердого тела, посвященное исследованию статического и динамического адгезионного взаимодействия твердых деформируемых тел и учету его влияния адгезии на характеристики трения элементов контактных пар. Новыми являются постановка и аналитическое решение математических задач, необходимых для решения задач механики контактного взаимодействия, входящих в созданное научное направление, а также их формулировка и решение.

Практическая значимость работы. Результаты диссертации используются при решении фундаментальных вопросов трибологии, таких как определение адгезионной и деформационной составляющих силы трения. Полученные результаты используются также для решения прикладных задач, в частности, при расчете силы трения эластомеров в различных условиях взаимодействия и при обработке результатов измерений свойств поверхности, проведенных методом атомной силовой микроскопии. Результаты диссертации также могут служить основой для расчета контактных характеристик сопряжений, используемых в микроэлектронике и микромашинах, моделирования адгезии в биологических системах.

Апробация работы. Основные результаты диссертации опубликованы в 40 печатных работах, из них 17 – в журналах, рекомендованных ВАК, и международных рецензируемых журналах. Результаты работы были предметом более чем 20 докладов на российских и международных научных конференциях. Результаты диссертационной работы также докладывались и обсуждались на семинаре по механике сплошной среды им. Л.А.Галина ИПМех РАН и семинаре по механике твердого тела НИИ Механики МГУ.

Наиболее существенные научные результаты, полученные лично соискателем.

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, получены автором лично. А именно, лично соискателем получены результаты исследования

- дискретного контакта упругих тел при наличии адгезии;
- скольжения вязкоупругих тел при наличии адгезии;
- моделирования взаимодействия индентора с упругим полупространством при наличии адгезионного притяжения произвольного вида;
- скольжения шероховатых вязкоупругих тел при наличии адгезии.

Язык изложения материала в диссертации грамотный, понятный. Изложение логически стройно, последовательно.

Замечания.

1. После упоминания результатов Ван – дер – Ваальса и Лондона по описанию межмолекулярных взаимодействий было бы уместно упомянуть другие идеи и методы (например, Hamaker Н.С., Лифшиц Е.М., Гинзбург В.Л.), отметить, что наряду с физикой твердого тела вопросами формирования поверхностной энергии, энергии адгезии активно занимается механика твердого тела (Лурье С.А.). Появились работы (Кривцов А.М.), в которых адгезионные взаимодействия рассчитаны методом молекулярной динамики.
2. В работе на стр. 21 говоря: «Величина w_a называется ...». Понятия поверхностной энергии, энергии адгезии или когезии, а также сил адгезии и

когезии являются термодинамическими. Поэтому их введение в рассмотрение необходимо делать в терминах термодинамики.

3. В работе не говорится о влиянии температуры.
4. Несмотря на литературные ссылки, хотелось бы видеть вывод формулы (1.6) или план этого вывода. Непонятно, между какими двумя плоскостями определяется потенциальное взаимодействие. Допущения Б.В. Дерягина, использованные им для построения расчетных формул необходимо было изложить, тем более они отличают его модель от других не только в качественном, но и в «расчетном» отношении. Допущения важны и для обоснования, использованного в работе, метода вычислений, когда криволинейная поверхность заменяется ступенчатой.
5. При определении сил и энергии взаимодействия твердых тел в соответствии с моделью ДМТ допускается, что адгезионные силы и перемещения, вызванные ими, направлены вдоль оси Oz. Поскольку реальные силовые линии поля адгезионных сил вблизи криволинейной поверхности не параллельно оси Oz, использование перемещений только вдоль этой оси (гипотезы Б.В. Дерягина) необходимо хотя бы качественно обосновать. Тем более что в литературе встречаются расчетные схемы, которые используют расстояния, откладываемые по нормали к искривленной поверхности.
6. Изложение постановки задач об адгезионном взаимодействии осесимметричных упругих тел (п. 2.1) выглядит «поспешной». Ее надо было сделать более подробной, сделав переход от общего описания ситуации к ее модели.
7. Ничего не говорится о возможности суперпозиции молекулярной и капиллярной адгезий. В диссертации, при рассмотрении капиллярной адгезии по умолчанию подразумевается, что при ее наличии молекулярная адгезия не действует.
8. Судя по виду выражения (3.1) и (3.3), форма искривленной свободной поверхности смачивающей жидкости, сконцентрировавшейся около отдельного штампа, не учитывается в расчетах ее объема.
9. Существуют справочные материалы о поверхностной энергии твердых материалов, а также достоверные полуэмпирические формулы, связывающие энергию адгезии с поверхностными энергиями контактирующих тел. Используя эти данные можно было бы провести расчеты сил трения, его характеристик для широкого спектра пар материалов и сопоставить результаты с данными опытов.

Приведенные замечания не снижают строгости, научной обоснованности и достоверности полученных результатов, их научной и практической значимости. Их подчеркивание необходимо для повышения уровня понимания рецензируемой работы и ее результатов, носит рекомендательный характер.

Заключение

Диссертация Маховской Юлии Юрьевны является соответствующей п. 9 Положения ВАК законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, новое научное направление, посвященное исследованию статического и динамического адгезионного взаимодействия твердых деформируемых тел и решению на ее основе практически важных проблем механики деформируемого твердого тела, трибологии по учету влияния адгезии на характеристики трения элементов контактных пар машин и механизмов.

Автореферат оформлен в соответствии с установленными требованиями. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

Выше изложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа на тему «Моделирование адгезионного взаимодействия деформируемых тел» удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Юлия Юрьевна Маховская заслуживает присуждения степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук по специальности
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела,
профессор по кафедре «Физика»,
ведущий научный сотрудник, профессор кафедры
«Техническая физика»
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева»
ул. Комсомольская д. 95.
Орловская область, г. Орел, 302026 Российская Федерация,
каф. «Техническая физика»
Контактный телефон: 8 (4862) 41 98 44
Email: VShorkin@yandex.ru

Шоркин
Владимир
Сергеевич

«Подпись Владимира Сергеевича Шоркина заверяю»
проректор по научно-технологической деятельности и
аттестации научных кадров
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Орловский государственный университет
имени И.С. Тургенева»



Радченко
Сергей
Юрьевич