

## ОТЗЫВ

официального оппонента А.Б. Фрейдина  
на диссертацию Ю.Ю. Маховской  
«Моделирование адгезионного взаимодействия деформируемых тел»,  
представленную на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук по специальности  
01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Диссертация посвящена моделированию взаимосвязей адгезии и деформаций. В 20-х годах прошлого века Гриффитс совершил революцию в механике разрушения, «наделив» трещину поверхностной энергией. Но потребовались еще десятилетия для осознания того, что берега трещины не только имеют поверхностную энергию, учет которой необходим при построении термодинамически обоснованных критериев разрушения, но и притягиваются друг к другу, что привело к моделям трещины с концевой зоной. В случае задачи Герца, обсуждаемой с конца XIX века, введение сил адгезии – аналога притяжения берегов трещины – потребовало еще больше времени. Вместе с тем миниатюризация объектов современной механики деформируемых тел и возможность высокоточного создания гладких поверхностей контактирующих тел делают учет таких сил не только академической проблемой, но и инженерной. Традиционные модели контактного взаимодействия, учитывающие только сжимающие напряжения на контактной поверхности при нулевых напряжениях вне области непосредственного контакта, оказываются недостаточно точными. Нужны модели, определяющие адгезионное взаимодействие между поверхностями, и методы решения задач, учитывающие это взаимодействие. В диссертационной работе развиваются общие подходы к постановке и решению контактных задач с адгезионным взаимодействием, предлагаются новые модели для расчета адгезионной составляющей силы трения и решаются новые задачи. Этими обстоятельствами обусловлена ценность фундаментальной и инженерной составляющих диссертации, что в свою очередь определяет **научную актуальность, новизну и практическую значимость** работы.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и изложена на 286 страницах. **Первая глава** содержит обзор литературы, посвященной моделированию адгезионного взаимодействия.

**Во второй главе** развиты модели для описания адгезионного взаимодействия в случае осесимметричного индентора с упругим полупространством. Модели включают в себя математическую постановку исследуемых задач и их решение. Рассмотрены случаи капиллярной адгезии, вызванной наличием в зазоре жидкости, и случаи адгезии сухих поверхностей, связанной с межмолекулярным притяжением.

**В третьей главе** исследуется роль поверхностной шероховатости в случае учета адгезионного взаимодействия. Ставится и для двух видов адгезионного взаимодействия (капиллярная адгезия и адгезия сухих поверхностей) исследуется задача о периодической системе штампов. Граничные условия для каждого штампа аналогичны условиям, рассмотренным во второй главе для уединенного штампа (индентора). В частности, рассчитывается удельная работа адгезии и оценивается влияние введенных параметров адгезии и шероховатости (плотности выступов).

**В четвертой главе** для уже рассмотренных выше двух типов адгезии проводятся расчеты потери энергии при подводе и отводе упругих тел к поверхности контакта. Предлагаются и апробируются модели для расчета адгезионной составляющей силы трения при относительном скольжении шероховатых тел и качении жесткого шероховатого тела (цилиндра) по упругому телу (полупространству).

**В пятой главе** решаются задачи о скольжении цилиндра по вязко-упругому основанию (модель Кельвина – Фойгта).

Уже из краткого изложения содержания работы видно, что она выстроена логично, каждая глава опирается на результаты предыдущей или развивает эти результаты. Рассмотренные два типа адгезии исследованы глубоко и достаточно полно – от постановки задач до сценариев их решения и собственно решений. Автор создает весьма богатую и законченную картину современной механики контактного взаимодействия с учетом адгезии.

**К основным новым результатам** можно отнести следующие.

- На основе предложенного подхода к решению контактных задач с учетом адгезии даны постановки и решения задач механики контактного взаимодействия для упругих и вязкоупругих тел. Подробно, для уединенного штампа (индентора) и системы штампов, исследованы два важных случая адгезионного взаимодействия: капиллярной и молекулярной природы.

- Развита энергетический подход: установлено наличие гистерезиса и проделаны расчет и анализ диссипации энергии вследствие адгезионного взаимодействия при циклическом контакте.
- На основе расчетов потерь энергии на контактах между выступами предложены и реализованы новые модели для расчета адгезионной составляющей трения качения и скольжения.
- Даны постановка и решение контактной задачи с адгезией для скольжения по поверхности вязкоупругого полупространства.

Глубина проработки затронутых вопросов, сравнение полученных решений с известными решениями и предельными случаями, убедительное сочетание известных математических методов механики деформируемого твердого тела с новыми подходами и постановками подтверждают **достоверность** результатов.

#### **По работе имеются замечания**

1. Молекулярное взаимодействие может описываться различными потенциалами взаимодействия. Были бы уместны комментарии относительно конкретного выбора потенциала и чувствительности модели адгезионного взаимодействия и результатов к этому выбору.

2. Во второй главе показано, что использование для упрощения постоянного значения адгезионного давления может приводить к существенной погрешности при оценке гистерезисных потерь при образовании и разрыве адгезионного контакта. Тем не менее в четвертой главе для моделирования потерь на трение, связанных с образованием и разрывом контактов между поверхностными неровностями, используется именно модель с постоянным давлением. Это требует дополнительных комментариев.

3. Для описания шероховатой поверхности в адгезионном контакте в третьей главе используется модель одинаковых периодически расположенных выступов. Но реальные поверхности обладают случайной шероховатостью, в частности, характеризуются разбросом выступов по высоте, что может оказывать влияние на характеристики адгезионного контакта. Было бы целесообразно дать дополнительные разъяснения относительно учета случайности рельефа.

4. В задачах о капиллярной адгезии использовано предположение о равенстве нулю краевого угла смачивания жидкостью поверхностей обоих взаимодействующих

тел, что сужает область применимости этих моделей и требует дополнительных комментариев.

Замечания не снижают положительную оценку диссертационной работы. Работу отличает высокий уровень физико-математической культуры. Результаты апробированы на представительных научных форумах и опубликованы в авторитетных научных журналах (в том числе 17 статей в журналах списка ВАК). Автореферат ясно написан и хорошо представляет основные результаты работы.

Диссертационная работа является законченным научным исследованием, выполнение которого содержит решение научной проблемы, имеющей важное значение как для фундаментальной науки, так и для инженерных приложений. Результаты означают существенное продвижение в механике контактного взаимодействия деформируемых тел с учетом адгезионных сил, действующих между поверхностями. Диссертационная работа отвечает всем требованиям ВАК РФ, «Положения о присуждении научных степеней», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Маховская Юлия Юрьевна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Заведующий лабораторией математических  
методов механики материалов Института  
проблем машиноведения РАН,  
д.ф.-м.н., с.н.с.

Фрейдin А.Б.

25.09.2017

Фрейдin Александр Борисович  
Тел.: (812)321-4780 (раб), +7 921 349-7849 (моб)  
e-mail: alexander.freidin@gmail.com  
Институт проблем машиноведения РАН,  
Большой пр. 61, В.О., 199178 Санкт-Петербург

