

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертационную работу Торской Елены Владимировны
«Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями»,
представленную на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Диссертационная работа посвящена **актуальной теме** механики фрикционного взаимодействия – моделированию контакта тел с покрытиями при наличии сил трения. В настоящее время создается большое количество материалов покрытий, в том числе и для узлов трения, разрабатываются новые технологии. Моделирование позволяет сокращать объемы экспериментальных исследований и в ряде случаев прогнозировать долговечность используемых покрытий.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. **Во введении** представлен аналитический обзор публикаций, связанных с тематикой исследования.

Основная часть **первой главы** работы посвящена изложению численно-аналитических методов решения осесимметричной контактной задачи и пространственной задачи определения напряженного состояния для тел с упругими покрытиями. В обоих случаях рассматриваются усложненные условия на границах раздела слоев, состоящие во введении линейной зависимости, связывающей касательные напряжения и перемещения. В качестве примера осесимметричных контактных задач исследуется контакт сферы, а также индентора с плоским основанием и скругленными краями с двухслойным упругим полупространством. Показано, что во втором случае при относительно жестких покрытиях имеют место как круговые, так и кольцевые площадки контакта. Проведен анализ влияния степени сцепления покрытия с подложкой на распределение контактного давления и на внутренние напряжения. Приведены также результаты расчета напряженного состояния в покрытиях с большим количеством слоев. Проведен анализ влияния трения на напряжения в покрытиях и подлож-

ках, в том числе при входных параметрах задачи, соответствующих условиям проведенных экспериментов.

Во второй главе рассмотрена периодическая контактная задача для системы инденторов и двухслойного упругого полупространства, предложен способ ее решения путем сведения к упрощенной задаче и проведена оценка возникающей при этом погрешности. Исследовано влияние относительной жесткости покрытия и плотности расположения инденторов на распределение давления под единичным индентором и на напряжения в слое и полупространстве. На основе решения периодической задачи предложен метод решения двухуровневой задачи, моделирующей контакт тела с покрытием и шероховатого контела. Показано, что геометрия периодической системы инденторов, моделирующей шероховатость, влияет на распределение номинального контактного давления. Предложен также приближенный метод решения задачи о контакте шероховатого покрытия и гладкого индентора.

Третья глава посвящена моделированию усталостного изнашивания покрытия при циклическом фрикционном нагружении. Разработан метод расчета кинетики усталостного разрушения двухслойного упругого полупространства периодической системой скользящих по поверхности инденторов, моделирующих микронеровности поверхности. Он основан на решении контактной задачи для периодической системы инденторов и двухслойного упругого полупространства, изложенной в предыдущей главе, определении внутренних напряжений с учетом сил трения и построении функции поврежденности. Проведен расчет кинетики усталостного разрушения поверхностного слоя (покрытия) и выявлены особенности процесса в зависимости от прочностных и механических свойств материалов покрытия и основания, нагрузочных и геометрических характеристик системы, коэффициента трения, а также, в случае относительно податливых покрытий, от наличия дополнительного фактора – изнашивания, имеющего природу, отличную от усталостной.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается физической обоснованностью постановок, использованием методов исследования, базирующихся на известных методах теории упругости, а также сравнением полученных результатов с экспериментальными данными и результатами, полученными с использованием других методов и подходов.

Новыми результатами, полученными соискателем, следует считать:

- предложенный подход к моделированию неполного сцепления покрытия с подложкой;
- решение периодической контактной задачи для двухслойных тел;
- решение контактной задачи с учетом шероховатости покрытия либо взаимодействующего с ним индентора;
- построение и исследование модели, описывающей усталостное изнашивание покрытий при фрикционном нагружении периодической системой инденторов.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что результаты работы могут быть использованы

- при прогнозировании наиболее вероятного механизма разрушения покрытий в зависимости от условий нагружения;
- для определения оптимальной толщины покрытия, обеспечивающей наименьшие значения напряжений на границе раздела покрытия с подложкой, что важно в случае, когда отслаивание является основной причиной разрушения покрытия;
- для определения упругих свойств покрытия на основе результатов индентирования;
- при прогнозировании долговечности покрытий в узлах трения.

Замечания по работе:

1. В первой главе при решении задачи о контакте относительно жесткого покрытия и штампа с плоским основанием и скругленными краями полу-

чены кольцевые области контакта. Однако при постановке задачи условия предусматривают только круговую область контакта.

2. В этой же главе фактически разрешающим является двумерное интегральное уравнение, о котором явно в тексте работы не говорится. При этом его численное решение строится с использованием квадратур (метода прямоугольников), которое именуется «методом колец».

3. Во второй главе работы не использована возможность учета упругости сферических инденторов, которая продемонстрирована в главе 1. Учет этого фактора позволил бы полнее исследовать, как взаимное влияние инденторов сказывается на решении контактной задачи.

4. В третьей главе (раздел 3.3) результаты моделирования приведены для размерных значений параметров шероховатости (приведена даже профилограмма), фиксированных параметров материалов в соотношении, определяющем скорость накопления контактно-усталостных повреждений, это характеризует данную задачу как прикладную, на чем следовало бы акцентировать внимание.

5. Вероятно, к опускам следует отнести использование на стр. 37 - 40 отличающихся от предыдущих обозначений напряжений, а также наличие знака изображения для коэффициентов в формуле (1.24).

Приведенные замечания не влияют на общую положительную оценку диссертации.

Результаты выполненных исследований опубликованы в 39 работах, из них в 14 статьях в авторитетных российских и международных научных журналах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

В целом в диссертации представлено законченное исследование важной научной проблемы фрикционного взаимодействия тел с покрытиями, включающее разработку методики исследования широкого класса задач, возникающих в данном исследовании. Работа выполнена на высоком научном уровне, имеет важное прикладное значение. Она удовлетворяет всем требованиям ВАК

РФ, предъявляемым к диссертациям. Ее автор, Е.В. Торская Елена Владимировна, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Заведующий лабораторией НИИ механики МГУ, д.ф.-м.н., профессор

Будина 10.03.2015

Тарлаковский Дмитрий Валентинович

125480, Россия, Москва, ул. Вилуса Лациса, 21, корп. 4, кв. 310; тел. +7(903)7660347, e-mail tdvhome@mail.ru

Подпись Тарлаковского Дмитрия Валентиновича заверяю

Ученый секретарь НИИ механики МГУ имени М.В. Ломоносова



Рязанцева М.Ю.