

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

Поверхности с покрытиями – широко распространенный класс современных материалов. Проблема изучения износостойкости материалов с покрытиями является особенно актуальной. Работа Торской Е. В. «Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями» посвящена изучению контактного взаимодействия упругих тел с покрытиями при наличии сил трения. При разработке механико-математических моделей учтены возможное неполное сцепление покрытия с подложкой и шероховатость поверхностей взаимодействующих тел, приводящая к дискретности контакта. Объектом исследования также является один из важных механизмов изнашивания тел с покрытиями, а именно усталостное изнашивание, обусловленное циклическим нагружением при скольжении шероховатых тел.

Актуальность темы диссертационного исследования.

Нанесение покрытий является одним из основных способов модификации поверхности, обеспечивающих увеличение долговечности сопряжений, работающих в условиях фрикционного контакта.

Задачи, решаемые в диссертационной работе Торской Е. В., относятся к классу задач контактного взаимодействия упругих тел с покрытиями при наличии сил трения. Эти задачи актуальны как с точки зрения теории механики деформируемого тела, так и с точки зрения инженерных приложений.

Развитые ранее математические модели классических однородных материалов не позволяют достаточно точно моделировать поведение тел с покрытиями. Наблюдаются не только количественные, но и качественные различия поведения материалов, при наличии покрытий, особенно в сопряжениях деталей машин: при удачном подборе упругих свойств покрытия и подложки возможно значительно увеличить долговечность сопряжений, работающих в условиях фрикционного контакта. Но появляются и эффекты расслаивания, выкрашивания и т.д. Численные методы, преимущественно используемые для моделирования фрикционного взаимодействия тел с покрытиями, для целого спектра задач не позволяют проследить качественные зависимости изнашивания тел с покрытиями, и становится актуальным развитие численно-аналитических методов.

Исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, по изучению фрикционного взаимодействия тел с покрытиями позволяют определить влияние упругих свойств покрытия и подложки на характеристики контактного взаимодействия и обосновывают эффективность использования покрытий в со-

пряжениях, работающих в условиях фрикционного контакта, что и определяет актуальность темы диссертации.

Структурно работа Е. В. Торской состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Введение посвящено обоснованию актуальности темы диссертации, здесь сформулированы основные цели, задачи и научная новизна работы, приводится обзор основных работ по тематике данного исследования.

Первая глава работы содержит постановку контактной задачи для тел с упругими покрытиями и численно-аналитический метод ее решения с помощью методов интегральных преобразований Ханкеля и Фурье. Исследованы задачи о контакте гладкого осесимметричного индентора сферической формы и гладкого осесимметричного индентора с плоским основанием и скругленными краями. Анализируется зависимость контактных характеристик и внутренних напряжений для различных соотношений механических свойств покрытия и подложки, относительной толщины покрытия, а также наличия пригрузки вне области контакта. Показывается, что при относительно жестких покрытиях для индентора с плоским основанием и скругленными краями возможны как круговые, так и кольцевые площадки контакта.

Установлено, что степень сцепления покрытия с подложкой влияет на распределение контактного давления и на внутренние напряжения, в особенности вблизи границы раздела покрытия с подложкой.

Приведены примеры расчета напряженного состояния в трехслойных и пятислойных упругих полупространствах. Показано, что в ряде случаев мягкий промежуточный слой может быть заменен слоем Винклера, и это приводит к упрощению постановки задачи за счет уменьшения числа слоев и изменения граничных условий.

Предложен метод идентификации упругих свойств покрытий по результатам упругого индентирования.

Проведен анализ влияния трения на напряженное состояние в покрытии и подложке для различных типов покрытий. Расчет напряженного состояния для реальных покрытий в сочетании с результатами экспериментов позволил установить механизм их разрушения при трении.

Вторая глава посвящена рассмотрению периодической контактной задачи для системы инденторов на двухслойном упругом полупространстве и разработке алгоритма решения данной задачи. Исследовано влияния геометрических и механических параметров задачи, в частности плотности расположения инденторов, на решение контактной задачи и распределение напряжений в слое и полупространстве. Показано, что наличие системы инденторов и множественный характер нагружения существенно влияет на распределении напряжений в относительно жестких тонких покрытиях.

Предложена постановка и метод решения двухуровневой контактной задачи, моделирующей контакт тела с покрытием и шероховатого контртела. Метод

основан на использовании функции дополнительного смещения, полученной при решении периодической контактной задачи, при формулировке контактной задачи на макроуровне. Показано, что микрогеометрия влияет на распределение номинального контактного давления на макроуровне. Проведен анализ влияния плотности контакта на микроуровне на контактные характеристики для относительно жестких и мягких покрытий.

Для контакта шероховатого покрытия и гладкого индентора предложен приближенный метод решения контактной задачи. Развитый приближенный метод может быть использован для решения задачи идентификации упругих свойств относительно жесткого шероховатого покрытия по результатам упругого индентирования.

Третья глава содержит постановку и решение задачи об определении распределения напряжений в покрытии и подложке при контакте с периодической системой инденторов в условиях трения скольжения. Исследована кинетика накопления контактно-усталостных повреждений в покрытии и подложке за счет циклического нагружения периодической системой неровностей. Скорость накопления поврежденности зависит от амплитуды максимальных касательных напряжений. Моделируется изменение толщины покрытия за счет усталостного изнашивания, причем рассматриваемый механизм лежит в основе трех процессов: процесса отделения слоев конечной толщины, изнашивания покрытий и отделения покрытия от подложки. Установлено, что кинетика изнашивания существенно зависит от значений параметров в законе накопления поврежденности, а также от характера приложенной нагрузки – исследуются случаи постоянного и переменного распределения номинального давления для рассматриваемой периодической системы инденторов.

В заключительной части работы приводятся основные выводы и результаты.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Научные положения, выводы и рекомендации, приведенные в диссертации Торской Е. В., строго обоснованы и аргументированы, полученные результаты сравнивались с теоретическими и экспериментальными данными других отечественных и зарубежных исследователей.

Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций диссертационной работы определяется использованием и обоснованной модификацией известных методов механики деформируемого твердого тела, строгими вычислительными алгоритмами. Для ряда предельных случаев (либо близких к предельным) проведено сопоставление с известными аналитическими решениями. В некоторых случаях результаты расчетов сопоставляются с экспериментальными данными.

Практическая значимость работы состоит в возможности использовать полученные результаты для оптимизации механических свойств покрытий и их толщины в пределах, допускаемых технологией, по критерию минимизации

напряжений, ответственных за разрушение покрытий. Также показано, что разработанные методы решения контактных задач могут быть использованы для идентификации упругих свойств относительно жестких однородных покрытий по результатам индентирования, что особенно важно для новых материалов.

Наиболее существенные научные результаты, полученные соискателем.

В работе предложен численно-аналитический метод решения контактных задач и исследования напряженного состояния, возникающего при фрикционном взаимодействии тел с упругими покрытиями. Разработанный метод был использован для решения ряда задач механики контактного взаимодействия тел с покрытиями с учетом трения и без трения. Разработан подход для решения периодической контактной задачи и определения напряжений в покрытии при множественном характере нагружения, проведен анализ результатов решения для относительно жестких и податливых покрытий. Решена задача о контакте шероховатого индентора с учетом параметров макро-и микрогеометрии. На основе решения задачи о фрикционном контакте периодической системы гладких инденторов и двухслойного упругого полупространства, а также некоторых подходов механики разрушения, проведено моделирование процесса накопления контактно-усталостных повреждений при циклическом нагружении, возникающем в процессе скольжения системы инденторов. Показано, что данный механизм позволяет описать три разных способа разрушения системы покрытие–подложка: отделение слоев конечной толщины, поверхностное изнашивание, отслоение покрытия от подложки. В экспериментально-теоретических исследованиях удалось связать напряженное состояние, возникающее в покрытиях при трении, с механизмом их разрушения, а также определить упругие свойства новых материалов покрытий по результатам упругого индентирования.

Соответствие автореферата диссертации.

Автореферат диссертации удовлетворяет требованиям ВАК России, полно и точно отражает основные научные положения, результаты и выводы, приведенные в диссертационной работе.

Апробация результатов исследования.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях. Приведенные в работе результаты достаточно освещены в публикациях и представляют собой теоретический и практический интерес.

По работе могут быть сделаны следующие замечания:

1. Из работы не ясно, в чем принципиальные отличия и преимущества методов, предлагаемых в диссертации для исследования задач фрикционного взаимодействия тел с покрытиями, от метода конечных элементов применительно к задачам этого класса.

2. Насколько обоснован переход в п. 1.3 от граничного элемента кольца к элементу квадрату при переходе от осесимметричного распределения давления внутри элементов-колец к пространственному описанию.
3. Ссылка на работу [88] на странице 108 сделана не верно.
4. В публикации [7] отсутствует год выпуска журнала.

Перечисленные замечания не затрагивают существо работы, не подвергают сомнению новизну и достоверность полученных результатов. В целом представленные в работе результаты носят завершённый характер, материал диссертации изложен ясно, грамотно, качество оформления хорошее.

Диссертационная работа Торской Елены Владимировны «Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями», является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Считаю, что диссертационная работа Торской Е. В. удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, а её автор Торская Елена Владимировна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры «Теоретическая и прикладная механика»
ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет»
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
Тел.: 8(863)2381558, 8-904-449-71-72
E-mail: saizikovich@gmail.com

Айзикович Сергей Михайлович

Подпись Айзиковича С.М. удостоверяю
Ученый секретарь Ученого совета
ФГБОУ ВПО «Донской государственный
технический университет»

Анисимов Владимир Николаевич

