

**"УТВЕРЖДАЮ"**

Директор ФГБУН Институт физики  
прочности и материаловедения СО РАН  
член-корреспондент РАН



Псахье С.Г.

« 10 »

марта

2015 г.

## **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию

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

Нанесение покрытий является одним из наиболее распространенных способов модификации поверхностей трения в трибосопряжениях различного типа, которое позволяет получить оптимальные значения коэффициента трения, а также увеличить ресурс работы узлов трения. В связи с этим задача моделирования контактного взаимодействия тел с покрытиями, безусловно, **является актуальной**.

В последнее время развитие новых технологий формирования покрытий обуславливает тенденцию к уменьшению их толщины; разрабатываются новые материалы для покрытий и тонких пленок толщиной несколько микронов либо сотен нанометров. Для оценки их свойств при моделировании фрикционного контакта особую актуальность приобретает учет шероховатости взаимодействующих тел и свойств границы раздела покрытия с подложкой. Подобная задача требует развития новых подходов, разработки новых методов расчета, либо обоснованной модификации имеющихся способов, для определения параметров контактного взаимодействия и расчета напряжений в покрытии и подложке. Эти проблемы, а также моделирование изнашивания покрытий по контактно-усталостному механизму, являются предметом исследования, представленного в данной диссертационной работе.

**Научная новизна** работы состоит в том, что автором разработан численно-аналитический метод решения задач механики контактного

взаимодействия для тел с покрытиями, позволивший выполнить ряд новых исследований:

- изучено влияние степени сцепления покрытия с подложкой на решение контактной задачи и на напряженное состояние при единичном и множественном нагружении;

- напряженное состояние, возникающее в телах с покрытиями, соотнесено с известными механизмами разрушения – отслаиванием покрытий, хрупким разрушением при превышении значения предельной нагрузки;

- разработан подход для учета параметра шероховатости при исследовании контактного взаимодействия тел с покрытиями;

- построена модель контактно-усталостного изнашивания покрытий, что позволило описать в рамках единой модели разные процессы – отделение слоев конечной толщины, поверхностное изнашивание, отслаивание покрытий.

**Практическая значимость** полученных результатов связана с тем, что в рамках разработанных моделей фрикционного взаимодействия тел с покрытиями учтены наличие шероховатости, усталостный характер изнашивания, изменяющий геометрию сопряжения, а также усложненные условия на границе раздела покрытия с подложкой. Результаты диссертационной работы могут быть использованы для:

- расчета напряженного состояния в покрытии и подложке при фрикционном взаимодействии с гладким индентором; как показано в работе, для некоторых материалов покрытий напряжения могут быть связаны с критерием разрушения покрытий;

- определения упругих свойств новых материалов покрытий, что особенно актуально для материалов, которые существуют только в качестве тонких пленок или поверхностных слоев;

- определения напряжений, возникающих в покрытиях при взаимодействии с шероховатым контртелом; локальные максимумы напряжений в этом случае могут быть значительно больше, чем максимумы, полученные без учета фактора шероховатости;

- расчета ресурса трибосопряжений с покрытием, основным механизмом разрушения которых является усталостное изнашивание.

**Обоснованность и достоверность** результатов работы обеспечена корректностью математических моделей, использованием и обоснованной модификацией известных в механике методов, сопоставимостью ряда

результатов с известными теоретическими решениями, а также с экспериментальными данными.

**Структура диссертации.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка. Во введении представлен обзор представленных в литературе исследований, который условно можно разделить на три направления – моделирование слоистых сред, контактное взаимодействие шероховатых тел (в основном, для однородных упругих тел), моделирование контактно-усталостного изнашивания однородных тел.

В первой главе предложена постановка осесимметричной контактной задачи для упругого тела с покрытием, где учитывается неполная степень сцепления покрытия с подложкой. Далее, в предположении, что силы трения не влияют на решение контактной задачи, полученное распределение давления используется для формулировки пространственной задачи о фрикционном нагружении слоистых тел. Численно-аналитический метод решения основан на использовании интегральных преобразований Ханкеля для осесимметричной и преобразований Фурье для пространственной задач. Модификация метода, связанная с введением коэффициента, характеризующего степень сцепления покрытия с подложкой, является обоснованной и не усложняет численную реализацию метода. Разработанные методы использованы для определения напряженного состояния при фрикционном взаимодействии сферического контртела и материала с покрытиями, подобный тип взаимодействия широко используется в различных машинах трения. В этой главе также рассматривается задача об идентификации упругих свойств покрытий по результатам индентирования.

Во второй главе работы предложена модель дискретного контакта тел с покрытиями, связанного с наличием шероховатости. Шероховатость моделируется периодической системой гладких инденторов. Решение задачи основано на применении метода локализации, разработанного академиком И.Г. Горячевой, и использованного в данном случае для упрощения решения задачи о множественном контакте двухслойного упругого полупространства. Далее рассмотрена задача о контакте шероховатого индентора и тела с покрытием, а также о контакте гладкого индентора и тела с шероховатым покрытием. Для обеих задач очерчены границы применимости моделей, связанные с соотношением масштаба шероховатости, размера площадки контакта, а во втором случае также и с толщиной покрытия. Полученные решения представляют практический интерес, так как позволяют рассчитать максимальные значения напряжений в покрытии с учетом их локальной концентрации, обусловленной шероховатостью.

Третья глава работы посвящена моделированию контактно-усталостного разрушения покрытий при многоцикловом нагружении, обусловленном скольжением периодической системы инденторов при наличии сил трения. Учет предположения о том, что поврежденность материала зависит от амплитуды максимальных касательных напряжений, приводит к тому, что функция поврежденности зависит только от одной координаты, характеризующей расстояние от поверхности покрытия. Проведен анализ кинетики изнашивания как для постоянной, так и для стохастически меняющейся нагрузки. Также для случая относительно податливых покрытий исследовано влияние изнашивания, обусловленного другими механизмами, на процесс накопления контактно-усталостных повреждений.

**В качестве замечаний** по диссертационной работе можно отметить следующее.

- При описании практической значимости работы говорится о «возможности оптимизации механических свойств покрытий и их толщины в пределах, допускаемых технологией». Подобная формулировка является слишком общей и должна быть конкретизирована для исследованных в работе методов формирования покрытий.

- В первой главе диссертации для характеристики степени сцепления покрытия с подложкой введен формальный параметр, который невозможно оценить экспериментально по данным определения прочности связи (адгезии) покрытия с подложкой.

- В третьей главе диссертации предложена модель изнашивания, предусматривающая, что размер структурных элементов материала покрытия сопоставимы с его толщиной. Следовало бы описать границы применимости данной модели изнашивания, особенно в приложении к известным типам покрытий и их структуры.

- При подведении итогов по работе говорится о том, что ее результаты будут использоваться в дальнейшей для решения практических задач трибологии. Данная фраза является избыточной, особенно в свете того, что полученных результатов более чем достаточно для формулировки четко сформулированных и обоснованных выводов. Кроме того, традиционно для систематизации полученных в работе результатов формулируются положения, выносимые на защиту. Ни в тексте автореферата, ни в тексте диссертации такой раздел найти не удалось.

Указанные замечания носят частный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертации.

В целом, можно констатировать, что в диссертации получено завершённое решение важной научно-технической проблемы разработки подходов и создания численно-аналитических методов решения широкого класса задач, возникающих при исследовании фрикционного взаимодействия тел с покрытиями. В диссертации рассмотрен ряд задач, для которых данные методы являются единственно возможными либо имеют преимущества перед иными способами решения.

Работа выполнена на высоком научном уровне, ее результаты имеют важное прикладное значение и могут быть использованы для исследования новых материалов покрытий в разного вида трибосопряжений, а также для оптимизации относительной жесткости и толщины покрытий, допустимой в рамках технологии их нанесения, для использования в узлах с фиксированной нагрузкой и геометрией контакта.

Результаты выполненных исследований, составившие диссертацию, полностью опубликованы в авторитетных российских и международных научных журналах. Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Диссертация «Моделирование фрикционного взаимодействия тел с покрытиями» является законченным исследованием, отвечает требованиям «Положения о присвоении ученых степеней» П. 9, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор Е.В. Торская, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Отзыв обсужден и одобрен на семинаре лаборатории механики полимерных композиционных материалов (протокол № 2 от 20.03.15).

Председатель семинара  
зав. лаб. МПКМ, д.т.н., профессор

С.В. Панин

Секретарь семинара  
н.с. лаб. МПКМ, к.ф.-м.н.

Н.Ю. Матолыгина