

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Ереминой Галины Максимовны

**«Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жестким индентором на основе трехмерного численного моделирования», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела**

Диссертация Ереминой Галины Максимовны представляет собой теоретическое исследование, посвященное установлению закономерностей деформирования и разрушения систем «покрытия-подложка» при измерительном индентировании, царапании и трибоспектроскопии методом численного моделирования.

Современные тенденции развития в области авиадвигателестроения, авиационной и космической техники, нефтедобычи, медицинской техники и имплантологии предъявляют повышенные требования к механическим и прочностным свойствам используемых конструкционных материалов, а также высокие требования относительно устойчивости таких материалов к воздействию химически агрессивным сред, высоких температур, жестких излучений. Отдельным требованием является повышение биосовместимости используемых в имплантологии материалов. Одним из активно развивающихся направлений материаловедения, направленных на повышение эксплуатационных свойств конструкционных материалов, является создание защитных покрытий различного состава и структуры. При этом результаты исследований последних нескольких десятилетий показали, что наиболее эффективные результаты можно получить при создании наноструктурных покрытий на поверхности различных материалов. Оптимизация состава, размеров и структуры таких покрытий при решении конкретных технологических задач сталкивается с рядом проблем, требующих решения: определение механических и прочностных свойств покрытий, определение степени дефектности покрытия после его нанесения (создания) на материал-подложку и др. Современные аппаратные разрушающие и неразрушающие методы контроля и диагностики, позволяющие решать подобные задачи, в случае наноразмерных (наноструктурных) покрытий либо не обеспечивают требуемую точность либо неприменимы совсем. В связи с этим, тема диссертационного исследования Ереминой Г.М., посвященная компьютерному моделированию механического поведения систем «подложка-покрытия» с субмикронными размерами и структурой покрытий при измерительном индентировании, царапании и трибоспектроскопии является, безусловно, **актуальной**.

**Структура и объем диссертационной работы:**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, состоящего из 216 наименований. Текст диссертации изложен на 129 страницах, в том числе 68 рисунков.

**Во введении** обоснована актуальность исследования, сформулирована цель работы и решаемые задачи, отмечены основные характеристики, которые определяют ее научную новизну, научно-практическую ценность; сформулированы положения, выносимые на защиту; обоснована достоверность результатов и выводов, приведены данные об апробации работы. Кратко изложено содержание диссертации по главам.

**Первая глава** носит обзорный характер. В ней приводится литературный обзор существующих методов исследования механического поведения упрочняющих покрытий при контактном взаимодействии с жестким индентором. Приведено описание методов измерительного индентирования, царапания (склерометрии) и трибоспектроскопии. Значительное внимание уделено обзору результатов исследований данными методами систем, состоящих из материалов с различными упругими свойствами. Представленный обзор российских и зарубежных научных работ по теме диссертации имеет аналитический характер и написан достаточно квалифицированно.

**Вторая глава** посвящена описанию метода подвижных клеточных автоматов, используемого для численного решения поставленных в диссертации задач. В главе приведены основные положения метода подвижных клеточных автоматов и соотношения, описывающие закономерности взаимодействия автоматов между собой; приведены геометрия и схема нагружения для моделирования процесса измерительного индентирования, трения скольжения и измерительного царапания; приведены результаты верификации построенной трехмерной модели для случая одноосного растяжения металлокерамического композиционного материала на основе пластичной металлической матрицы NiCr, армированной дисперсными керамическими включениями TiC.

**В третьей главе** приводятся результаты численного исследования механического поведения системы «покрытие-подложка» при контактном нагружении жестким индентором. Представлены результаты моделирования процесса измерительного индентирования объемных материалов и систем «покрытие-подложка», указывается на необходимость введения промежуточного слоя между покрытием и материалом подложки для корректного моделирования механического поведения системы «покрытие-подложка» при индентировании. Далее, представлены результаты численного исследования механического поведения системы с покрытием 1.8 мкм и 0.6 мкм для различных соотношений механических свойств подложки и покрытия, выявлены характерные картины трещинообразования и условия появления того или иного типа трещин. В конце главы представлены результаты компьютерного моделирования процесса измерительного

царапания покрытия на подложках из различных материалов. Показано, что материал покрытия, в момент начала разрушения поверхностного слоя, обладает низким коэффициентом трения, который слабо зависит от материала подложки.

В четвертой главе приведены результаты численного исследования особенностей механического поведения поверхностных слоев материала при трении скольжения. Установлены условия зарождения вихревых движений в поверхностных слоях материалов при трении, определены сценарии эволюции вихревых движений в покрытиях содержащих дефекты различного типа: нанотрещины, жесткие включения. На основе проведенной серии численных экспериментов показано, что наличие ослабленных включений протяженной геометрии может приводить к диссипации вихря на границе раздела «матрица-включение». Приведены результаты прямого моделирования силового отклика подложки в процессе трения скольжения, исследована информативность спектра Фурье силового отклика для идентификации ориентации нанотрещин и периода их пространственного расположения.

В заключении представлены основные результаты и выводы по проведенным в диссертационной работе исследованиям.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в ней:

- впервые разработаны модели и методика моделирования механического поведения однородных материалов и систем «покрытие-подложка» в условиях контактного взаимодействия с жестким индентором в трехмерной постановке в рамках метода подвижных клеточных автоматов;
- впервые с помощью дискретного метода компьютерного моделирования исследовано влияние материала подложки на процессы упругопластического деформирования и разрушения поверхностных слоев материала при контактом нагружении;
- впервые в трехмерной постановке разработана методика идентификации вихревых смещений, возникающих в поверхностных слоях в результате контактного взаимодействия с жестким индентором;
- впервые исследованы особенности влияния трехмерных наноразмерных дефектов поверхностного слоя на характеристики силы трения при скольжении по его поверхности жесткого контртела.

**Достоверность** полученных в диссертационной работе **результатов** и **обоснованность** сформулированных **выводов** обеспечивается корректностью постановки решаемых задач, их физической обоснованностью, выбором подходящего метода численного решения и проведением тестовых расчетов; непротиворечивостью полученных результатов и их соответствием в предельных случаях теоретическим результатам, известным из литературы, а также имеющимся экспериментальным фактам.

Высокая **научная значимость** диссертационной работы заключается в разработанных трехмерных моделях позволяющих изучать механическое поведение систем «покрытие-подложка» в условиях контактного взаимодействия с жестким индентором при различных условиях нагружения, материалах подложки и покрытия, размерах и степени дефектности покрытия. Особое значение имеют полученные с помощью компьютерного моделирования закономерности формирования вихревых эффектов в поверхностных слоях материалов, позволяющие приблизиться к пониманию механизмов процессов локализации деформации и разрушения в твердых телах. **Практическая ценность** полученных результатов заключается в том, что разработанная модель механического поведения покрытий при трении скольжения может быть использована для дальнейшего развития метода трибоспектроскопии, определения границ его применимости и выявления новых параметров дефектной подсистемы покрытия, идентифицируемых данным методом.

Работы выполнены на высоком научном уровне, грамотно оформлена. Основные результаты диссертационной работы апробированы на конференциях всероссийского и международного уровней. Основные материалы диссертационной работы опубликованы в 28 печатных работах, из них 9 статей в научных журналах, входящих в список ВАК РФ, 14 в статьях материалов и трудов конференций и 5 публикаций в тезисах конференций.

**По работе можно сделать следующие замечания:**

- 1) Несмотря на высокий, в целом, уровень оформления текста диссертационной работы, ряд рисунков имеет неполное описание. В частности,
  - а. на рис. 3.2а (стр. 64), помимо зависимости твердости и модуля упругости от глубины проникновения индентора, представлена также зависимость коэффициента упругого восстановления от глубины проникновения, на которую нет ссылки ни в подписи к рисунку, ни в тексте. Аналогичная ситуация с рисунками 3.13 (стр. 73);
  - б. на рис. 3.2б (стр. 64) не расшифрована аббревиатура MDT3+ MDT4;
  - с. на рисунке 3.13а (стр. 73) представлены три пронумерованные геометрические фигуры, но их смысловая нагрузка в описании рисунка не отражена;
- 2) Из рисунка 1.2 (стр. 18) следует, что глубина остаточного отпечатка после снятия нагрузки  $h_r$  и упругого прогиба поверхности образца  $h_s$  тождественно равны, хотя в общем случае это не так.
- 3) В разделе 3.1 на основе анализа сходимости упругих и прочностных свойств образцов различных материалов с увеличением их размеров сделан вывод о том, что приемлемым с точки зрения величины отклонения упругого модуля и предела текучести от заданного значения, является размер основания образца, равный 200 нм. При этом, из приведенных зависимостей (рис. 3.4, 3.5) на стр. 66 следует, что

заданная погрешность обеспечивается, начиная с размера основания в 150 нм. В связи с этим выбор размера 200 нм требует дополнительного пояснения.

- 4) Явный учет неоднородной структуры поверхностного слоя покрытия позволил автору диссертационной работы получить характерный «нырок» на зависимостях модуля упругости и твердости от глубины проникновения индентора. Из приведенных зависимостей, не видно удалось ли получить хорошее количественное соответствие имеющимся экспериментальным данным. В тексте работы не указано, из каких соображений выбрана величина объемного содержания включений гидроксипатита в 10%.
- 5) На зависимости коэффициента трения от времени расчета для покрытия TiCCaPON на подложках из различных материалов (рис. 3.26, стр. 84) видно, что после участка слабого изменения коэффициента трения следует стадия постепенного роста (начиная с 6 мкс царапания). В тексте диссертации не обсуждаются возможные физические или иные причины такого роста.
- 6) На стр. 89 диссертационной работы написано «Кроме того, вихревые структуры периодически образуются в непосредственной близости от жесткого индентора впереди по направлению его движения». Из текста этого раздела непонятно о каком появлении вихревых структур идет речь: эпизодическом или периодическом. Если о периодическом, то каков период их появления и как он зависит от скорости движения контртела?
- 7) Во всех решаемых в рамках диссертационной работы задачах, границы подложка-покрытие, подложка-промежуточный слой, покрытие-промежуточный слой являются плоскими. Необходимо пояснить, насколько сильным является данное предположение и каковы предпосылки его введения.

**Автореферат** полностью отражает содержание диссертации, результаты, положения, выносимые на защиту, и выводы.

**Диссертационная работа** по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела (п. 1. Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых; п. 8. Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования).

**Заключение:**

Диссертационная работа Ереминой Галины Максимовны «Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жестким

индентором на основе трехмерного численного моделирования» является законченной научно-исследовательской работой, полностью соответствует требованиям п.П.9 «Положения о присуждении ученых степеней». Ее автор, Еремина Галина Максимовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент:

к.ф.-м. н. (специальность 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела), научный сотрудник лаборатории Физических основ прочности Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (ИМСС УрО РАН)



Пантелеев Иван Алексеевич

Дата подписания отзыва «29» июля 2016 г.

«Подпись Пантелеева Ивана Алексеевича заверяю»

Ученый секретарь ИМСС УрО РАН,  
кандидат физ.-мат. наук



Юрлова Наталья Алексеевна

Почтовый адрес:

614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, д. 1

Тел.: (342)2378312

E-mail: pia@icmm.ru

ИМСС УрО РАН:

614013, Россия, г. Пермь, ул. Академика Королева, 1

Тел.: (342) 237-84-61.

E-mail:.mvp@icmm.ru

Веб-сайт: <https://www.icmm.ru>