

ОТЗЫВ

официального оппонента Немировича-Данченко Михаила Михайловича на диссертационную работу ЕРЕМИНОЙ Галины Максимовны «Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жёстким индентором на основе трёхмерного численного моделирования», представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Актуальность избранной темы.

Износостойкость является важнейшим эксплуатационным параметром любых изделий, особенно в критических технологиях. Наибольший интерес при измерении и оценке износостойкости представляют поверхности изделий.

Способы и системы лабораторного изучения прочностных свойств поверхностей не всегда позволяют, в силу технических ограничений, проследить за локальными нано-пространственными изменениями. С другой стороны, лабораторные измерения физических свойств имеют ограниченное применение. Именно этим и обусловлена *актуальность диссертационной работы* Ереминой Г.М., поскольку проведение компьютерных экспериментов представляется наиболее гибким подходом в данном случае.

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

На защиту выносятся трехмерная модель упругопластического деформирования и разрушения неоднородных материалов и результаты численного моделирования процессов, сопутствующих индентированию, склерометрии и трибоспектроскопии. Кроме того, к защищаемым положениям относятся особенности процессов нуклеации и эволюции вихрей в условиях неоднородной приповерхностной структуры материала, выявленные в ходе численного моделирования.

Рассмотрим каждое положение отдельно.

Первое положение – собственно трёхмерная численная модель, позволяющая описывать механическое поведение, включая разрушение, упруго-пластичных материалов, а также многослойных систем при контактном взаимодействии с жёстким индентором. Для обоснования этой модели были выполнены стандартные виртуальные испытания образцов модельных композитов и проведено сравнение полученных результатов с известными данными других авторов.

Второе положение – «Результаты трёхмерного численного моделирования, показывающие степень влияния свойств материала подложки на определяемые по методу Оливера-Фарра механические характеристики системы «покрытие-подложка» при глубинах индентирования менее $1/10$ толщины покрытия». Эти результаты сопоставлялись с данными натуральных экспериментов. Расхождение находилось в пределах 15%, что является хорошим соответствием для данного класса задач.

Третье положение – выявление таких особенностей разрушения покрытий, как отслоение его на одних подложках и растрескивание на других. Результаты качественно соответствуют эффектам, проявляющимся в экспериментах по склерометрии.

Четвертое положение (об особенности образования и эволюции вихревых эффектов в полях смещений поверхностных слоёв материала) носит описательный характер и, в целом, не противоречит как численным результатам других авторов, в том числе и автора данного отзыва, так и интуитивным представлениям о деформировании сильно неоднородных сред.

И, наконец, пятое положение, касающееся методологических аспектов применения метода трибоспектроскопии для идентификации параметров дефектов в поверхностных слоях, обосновывается сопоставлением как с теоретическими результатами нескольких авторов, так и с расчетными данными.

Таким образом, все положения, выносимые на защиту, являются в **достаточной степени обоснованными.**

Достоверность полученных результатов

обусловлена подробно изложенным и обоснованным выбором представительного объема и подтверждена верификацией на известных, модельных для данного класса проблем, задачах. В тех случаях, где это необходимо, результаты расчетов сравнивались с лабораторными экспериментами. Такое сравнение было возможным благодаря скрупулезному подбору материальных и геометрических параметров.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

Предложенная трехмерная модель и методика проведения расчетов с использованием метода подвижных клеточных автоматов, в особенности для систем «покрытие-подложка» являются новыми.

Несомненно новыми являются результаты по влиянию материала подложки на конечное деформирование и разрушение приповерхностных слоев, а также особенности влияния объемных наноразмерных дефектов на характеристики силы трения применительно к задачам трибоспектроскопии.

Результаты по выявлению вихревых структур и обсуждение этих явлений являются в значительной степени оригинальными.

Значимость результатов диссертации соискателя

можно оценить как с теоретической, так и с практической стороны. *Теоретическая значимость* состоит в дальнейшем развитии численных методов и метода клеточных автоматов в частности. А *практическая сторона применимости* результатов работы заключается в нацеленности работы на сугубо лабораторные методы, широко используемые в современном материаловедении – склерометрию, индентирование и трибоспектроскопию. Эти результаты могут применяться при проведении натурных исследований, как предшествуя им, для априорного построения качественной картины эксперимента, так и впоследствии, при анализе количественных результатов измерений.

Основное содержание работы раскрыто во многих работах, по меньшей мере 5 из которых опубликованы в журналах из перечня ВАК РФ. Работа является **завершённой и оформленной** на должном уровне.

В работе Ереминой Г.М. имеются следующие **соответствия**:
соответствие между целями и задачами диссертации;
соответствие содержания диссертации и содержания опубликованных работ;
соответствие темы диссертации и научной специальности;
соответствие автореферата диссертации и основных выводов и результатов, приведенных в самой диссертации.

По работе имеется несколько **замечаний**.

1. Зачастую ожидаемые для такой работы количественные оценки заменяются качественными.

Так, фраза «поскольку для задания такого слоя требуется достаточно большое количество автоматов, а также в силу ограничения в вычислительных мощностях...» требует разъяснений. Что такое «достаточно большое» и что такое «ограничения...» с учетом возможностей виртуальной памяти и распараллеливания?

2. Возможен ли учет анизотропии, или возможна ли грубая оценка (верхняя оценка), каким может оказаться влияние анизотропии, или влияние неучета анизотропии на результаты моделирования?

3. Есть некое разночтение при упоминании о шероховатости в модели. На странице 74 написано «...имеется некоторое несоответствие данным натурного эксперимента в силу того, что численная модель *не учитывает шероховатость* рельефа и структуру приповерхностного слоя исследуемого образца». Но в главе 4 читаем: «При дискретном представлении моделируемых тел в методе подвижных клеточных автоматов имеет место эффект *искусственной шероховатости поверхности*. Вследствие этой шероховатости движение контртела вдоль поверхности покрытия вызывает распространение в нём упругих волн». Поэтому непонятно, есть шероховатость или нет? Или скажем так – в каких случаях она не описывается моделью, и в каких от неё невозможно избавиться.

4. Утверждение, что распространение упругих волн вызвано шероховатостью поверхности, неверно. Массовое контртело (как штамп на полупространстве в классической теории упругости) вдавливаясь в среду, и при горизонтальном движении принимает на себя сопротивление полученной кромки. При этом даже при полном отсутствии трения (без шероховатости) излучаются упругие волны.

5. При движении контртела происходит постоянное излучение упругих волн (известная задача о движущемся источнике), в том числе так называемых эванесцентных волн, некоторые из которых (волны Рэлея, Стоунли) хорошо известны. Но в неоднородной среде эванесцентных волн много больше. И этот конгломерат волн, вместе с не успевшими отделиться поперечными волнами и вместе с конической волной образуют ту самую сложную картину, которая и приведена автором на, кстати сказать, очень качественно выполненных трехмерных образах. Без учета того факта, что эта картина составлена несколькими волнами различной природы и поляризации, анализ вихревых структур остается неполным и трудно выполнимым.

Указанные замечания и имеющиеся в работе небольшие неточности не изменяют общей **высокой оценки** работы. Работа написана хорошим литературным языком и читается с удовольствием. Особенно интересными лично для автора настоящего отзыва показались дальнейшие возможности комплексирования метода подвижных автоматов с методом Уилкинса.

Таким образом, можно сделать следующее **Заключение**.

Считаю, что в диссертационной работе ЕРЕМИНОЙ Галины Максимовны «Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жёстким индентором на основе трёхмерного численного моделирования» содержится решение задачи развития трехмерного моделирования методом подвижных клеточных автоматов для исследования на наноуровне деформационно-прочностных свойств приповерхностных слоев,

имеющей существенное значение для обоснования и развития теоретических и экспериментальных методов механики деформирования твердого тела. Работа полностью удовлетворяет п. II.9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Еремина Галина Максимовна, несомненно, достойна присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,

доктор физико-математических наук (специальности 25.00.10 — Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых, 01.02.04 — Механика деформируемого твёрдого тела),

профессор кафедры геофизики

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ)

Михаил Михайлович Немирович-Данченко

Почтовый адрес:

634050, г. Томск, проспект Ленина, дом 30.

Телефон: +7 (3822) 60-63-33

E-mail: nemdan2011@gmail.com

<http://www.tpu.ru>

Дата подписания отзыва «09» сентября 2016 г.

Подпись М.М. Немировича-Данченко заверяю

Ученый секретарь ФГАОУ ВО НИ ТПУ



О.А. Ананьева