

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 30 сентября 2016 года публичной защиты диссертации Ереминой Галины Максимовны «Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жёстким индентором на основе трёхмерного численного моделирования» по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

На заседании присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 8 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела:

1.	Христенко Юрий Федорович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р техн. наук	01.02.04
2.	Васенин Игорь Михайлович, заместитель председателя диссертационного совета	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
3.	Пикущак Елизавета Владимировна, ученый секретарь диссертационного совета	канд. физ.-мат. наук	01.02.05
4.	Архипов Владимир Афанасьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
5.	Биматов Владимир Исмагилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
6.	Герасимов Александр Владимирович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
7.	Глазунов Анатолий Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
8.	Глазырин Виктор Парфирьевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
9.	Зелепугин Сергей Алексеевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
10.	Крайнов Алексей Юрьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
11.	Люкшин Борис Александрович	д-р техн. наук	01.02.04
12.	Макаров Павел Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
13.	Прокофьев Вадим Геннадьевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
14.	Скрипняк Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
15.	Старченко Александр Васильевич	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
16.	Тимченко Сергей Викторович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
17.	Черепанов Олег Иванович	д-р физ.-мат. наук	01.02.04
18.	Шрагер Геннадий Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05
19.	Шрагер Эрнст Рафаилович	д-р физ.-мат. наук	01.04.14
20.	Якутенок Владимир Альбертович	д-р физ.-мат. наук	01.02.05

**Заседание провёл заместитель председателя диссертационного совета доктор технических наук, старший научный сотрудник Христенко Юрий Федорович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Г.М. Ереминой учёную степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13**  
**на базе федерального государственного автономного образовательного**  
**учреждения высшего образования**  
**«Национальный исследовательский Томский государственный университет»**  
**Министерства образования и науки Российской Федерации**  
**по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук**  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 30.09.2016 г., № 270

О присуждении **Ереминой Галине Максимовне**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Исследование механического поведения систем «покрытие-подложка» при нагружении жёстким индентором на основе трёхмерного численного моделирования»** по специальности **01.02.04** – Механика деформируемого твердого тела принята к защите 04.07.2016 г., протокол № 261, диссертационным советом **Д 212.267.13** на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 203-161 от 08.02.2008 г.).

Соискатель **Еремина Галина Максимовна**, 1990 года рождения.

В 2013 году соискатель окончила федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

В 2016 году соискатель очно окончила аспирантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера лаборатории компьютерного конструирования материалов в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Диссертация выполнена на кафедре прочности и проектирования федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации и в лаборатории компьютерного конструирования материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук Федерального агентства научных организаций.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Смолин Алексей Юрьевич**, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория компьютерного конструирования материалов, главный научный сотрудник; по совместительству – федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра механики деформируемого твердого тела, профессор.

Официальные оппоненты:

**Немирович-Данченко Михаил Михайлович**, доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», кафедра геофизики, профессор

**Пантелеев Иван Алексеевич**, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук, лаборатория физических основ прочности, научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук**, г. Екатеринбург, в своем положительном заключении, подписанном **Швейкиным Владимиром Павловичем** (доктор технических наук, доцент,

лаборатория микромеханики материалов, ведущий научный сотрудник; отдел физических проблем машиностроения, заместитель руководителя научного семинара) и **Мясниковой Мариной Валерьевной** (кандидат технических наук, лаборатория микромеханики материалов, научный сотрудник; отдел физических проблем машиностроения, секретарь семинара), указала, что актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью развития перспективных подходов и методов численного моделирования контактного взаимодействия системы «покрытие-подложка» для более точного исследования механических и трибологических характеристик модифицированного поверхностного слоя. Автором впервые разработаны модели и методика моделирования механического поведения однородных материалов, а также систем «покрытие-подложка», в условиях контактного взаимодействия с жестким индентором в трехмерной постановке в рамках метода подвижных клеточных автоматов; впервые дискретным методом компьютерного моделирования на макроуровне изучено влияние материала подложки на процессы упругопластического деформирования и разрушения поверхностных слоев материала при контактном нагружении; в трехмерной постановке разработана методика индентификации 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 контроля. Разработанные трехмерные модели вносят вклад в изучение особенностей механического поведения, включая пластическую деформацию и разрушение однородных материалов и систем «покрытие-подложка» в условиях контактного нагружения. Установленные закономерности формирования вихревых эффектов в покрытиях при их контактном нагружении могут применяться при исследовании дефектности структуры поверхностных слоев и покрытия различных материалов, а также для дальнейшего развития метода трибоспектроскопии.

Соискатель имеет 28 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 28 работ, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 9

(из них 6 статей в изданиях, индексируемых Web of Science, 1 статья в российском научном журнале, переводная версия которого индексируется Scopus), статья в научном журнале – 1, в сборниках материалов международных и всероссийских научных конференций – 19 (из них 1 зарубежная конференция). Общий объем публикаций – 10,98 п.л., авторский вклад – 3,23 п.л.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Смолин А. Ю. Моделирование измерительного индентирования нанопокровов на титановой подложке / А. Ю. Смолин, Г. М. Аникеева (Еремина), В. В. Сергеев, С. Г. Псахье // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 7/3. – С. 212–214. – 0.25 / 0.04 п.л.

2. Смолин А. Ю. Трехмерное моделирование методом подвижных клеточных автоматов упруго-пластического деформирования и разрушения покрытий при контактном взаимодействии с жестким индентором / А. Ю. Смолин, Г. М. Еремина, В. В. Сергеев, Е. В. Шилько, С. Г. Псахье // Физическая мезомеханика. – 2014. – Т. 17, № 3. – С. 64–76. – 0.32 / 0.2 п.л.

*в переводной версии журнала:* Smolin A. Yu. Three-dimensional MCA simulation of elastoplastic deformation and fracture of coatings in contact interaction with a rigid indenter / A. Yu. Smolin, G. M. Eremina, V. V. Sergeev, E. V. Shilko, S. G. Psakhie // Physical Mesomechanics. – 2014. – Vol. 17, is. 4. – P. 292–303. – DOI: 10.1134/S1029959914040067

3. Psakhie S. G. Modeling nanoindentation of TiCaPON coating on Ti substrate using movable cellular automaton method // S. G. Psakhie, A. Yu. Smolin, E. V. Shilko, G. M. Anikeeva (Eremina), Yu. S. Pogozhev, M. I. Petrzhik, E. A. Levashov // Computational Material Science. – 2013. – Vol. 76. – P. 89–98. – 0.18 / 0.14 п.л. – DOI: 10.1016/j.commatsci.2013.03.006.

В диссертации отсутствуют достоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

На автореферат поступило 5 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **К. А. Купцов**, канд. техн. наук, инженер Научно-учебного центра самораспространяющегося высокотемпературного синтеза Национального исследовательского технологического университета «МИСиС», г. Москва, *с замечаниями*: при описании результатов моделирования измерительного царапания не указаны размеры индентора и, как следствие, не ясны геометрические характеристики царапины; в автореферате не приводятся рассчитанные зависимости от времени таких важных параметров процесса царапания, как сила вдавливания, сила трения, акустическая эмиссия, коэффициент трения, вследствие чего сложно оценить адекватность предложенной модели и ее соответствие реальному процессу.
2. **В. М. Мусалимов**, д-р техн. наук, профессор кафедры мехатроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, *с замечаниями*: настораживающе звучит утверждение: «... в рамках модели влияние коэффициента трения между индентором и покрытием на механическое поведение системы «покрытие-подложка» незначительно»: из автореферата неясно, как оценивается «незначительность», и намечены ли пути учета естественных трибологических процессов при моделировании и проведении экспериментов.
3. **В. В. Поляков**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий кафедрой прикладной физики, электроники и информационной безопасности Алтайского государственного университета, г. Барнаул, *с замечанием*: в автореферате не приведены результаты тестовых расчётов по определению корректности выбранной модели механического поведения покрытия при нагружении.
4. **Н. А. Еникеев**, канд. физ.-мат. наук, руководитель сектора «Моделирование объёмных наноматериалов» Научно-исследовательского института физики перспективных материалов Уфимского государственного авиационного технического университета, *с замечаниями*: автор утверждает, что преимуществом избранного метода численных расчётов является возможность рассматривать процессы деформирования на разных масштабных уровнях, однако, из автореферата неясно, возможно ли на основе сделанных расчётов получить сведения на микроуровне – о плотности и распределении дислокаций, об измельчении микроструктуры подложки, о связи этих

характеристик с наблюдаемыми вихревыми эффектами в результате контактного нагружения; в работе исследуются свойства биоактивных наноструктурных покрытий на ряде подложек, однако сведениям об их параметрах (размере зёрен, текстуре и т.д.) и обсуждению их влияния на проявляемые свойства системы «покрытие-подложка» в автореферате не уделяется достаточного внимания.

**5. А. Ф. Ревуженко**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, и **С. В. Клишин**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории механики деформируемого твердого тела и сыпучих сред Института горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, *с замечанием*: на стр. 9 показано существенное отличие модулей упругости, полученных в расчетах, от величин, измеренных в натурном эксперименте, и данное обстоятельство объясняется здесь наличием в приповерхностном слое дополнительных включений гидроксиапатита, однако далее в тексте не указано, каким образом были учтены эти включения при дальнейших расчетах.

В отзывах отмечается, что механические свойства тонких покрытий невозможно определить стандартными методами, для этого применяют измерительное индентирование и царапание. В связи с широким использованием таких покрытий для повышения механических свойств деталей машин и механизмов, а также в электронной промышленности, тема работы является актуальной. Данные численные эксперименты описывают процессы наноиндентирования, царапания и трения скольжения, проводимые в лабораторных условиях. По результатам численного моделирования были получены механические и трибологические характеристики системы «покрытие-подложка». Впервые изучено влияние материала подложки на процессы деформирования и разрушения поверхностных слоев материала при контактом нагружении, показано наличие при этом вихревых смещений в приповерхностных слоях. Установлено, что наличие дефектов в приповерхностном слое оказывает существенное влияние на отклик системы в процессе нагружения трением скольжения. Полученные результаты могут быть использованы при исследовании дефектности структуры различных материалов с покрытиями, а также развития трибоспектроскопии.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что в сферу интересов **М. М. Немировича-Данченко** входит численное исследование деформирования и разрушения твёрдых тел, компьютерное моделирование прямых задач сейсмологии и сейсморазведки, влияние трещиноватости и пористости среды на упругие волны; в сферу интересов **И. А. Пантелева** входит численное исследование фундаментальных закономерностей поведения перспективных материалов при динамических и ударно-волновых нагружениях; **Институт машиноведения Уральского отделения Российской академии наук** является ведущим научным учреждением в области механики деформируемого твёрдого тела, перспективных материалов и технологий, конструкций и сооружений, а также автоматизированных систем измерения, неразрушающего контроля материалов и диагностики ресурса машин, а именно: математического моделирования и экспериментального изучения процессов контактного взаимодействия при измерении нанотвёрдости и в узлах трибосопряжения.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*разработана* вычислительная модель, позволяющая описывать механическое поведение системы «покрытие-подложка» при контактном нагружении жестким индентором;

*предложена* методика определения вихревых структур в приповерхностном слое материала покрытия при контактном нагружении жестким индентором в трехмерной пространственной постановке;

*доказана* применимость метода подвижных клеточных автоматов для получения результата качественно и количественно соответствующего данным натурального эксперимента по индентированию системы состоящей из ультратонкого упрочняющего покрытия расположенного на различных подложках;

*показано*, что при определении упруго-прочностных свойств покрытий с помощью измерительного индентирования стандартная методика Оливера-Фарра даёт ошибочные данные даже для глубин погружения индентора менее 1/10 толщины покрытия, имеющего упругие свойства, существенно отличающиеся от свойств подложки.

**Теоретическая значимость исследований обоснована тем, что:**

*получены* результаты фундаментального характера, которые вносят вклад в расширение существующих представлений о закономерностях механического поведения систем «покрытие-подложка» при контактном нагружении, а именно:

*численно исследован* процесс деформирования и разрушения системы с явным учетом переходного слоя между материалом подложки и покрытием при измерительном индентировании и царапании;

*изучено* влияние неоднородностей приповерхностного слоя покрытия на распределение скоростей упругих смещений материала при скольжении по его поверхности контртела, и на изменение силы реакции, действующей на такое контртело;

*выявлены* особенности разрушения материала покрытия в зависимости от материала подложки: отслоение покрытия на оксидных подложках и растрескивание на металлической подложке.

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:**

*разработаны и внедрены* модели и методики, которые могут быть использованы для исследования механических и трибологических свойств и оценки дефектности поверхностных слоев модифицированных поверхностных слоев и покрытия;

*обнаружены* закономерности формирования вихревых эффектов, которые вносят существенный вклад в понимание процессов локализации деформации и разрушения твёрдых тел.

Разработанные модели и методики использовались при выполнении фундаментальных исследований в рамках проекта ViNaT конкурса FP7-NPM-2014-EU-Russia, Междисциплинарного интеграционного проекта СО РАН на 2012–2014 гг. № 39, тема 23.2.4, гранта РФФИ 14-17-00718, ФЦП № 14.613.21.0049, соглашения с Минобрнауки России 14.575.21.0040 (RFMEFI57514X0040), соглашения с Минобрнауки России 14.607.21.0069 (RFMEFI60714X0069), госзадания Минобрнауки России (проект №16.2004.2014/К).

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.** Результаты, полученные в диссертации, могут быть рекомендованы для расширенного использования в организациях, осуществляющих научные исследования в создании и изучении свойств материалов с модифицированным поверхностным слоем или покрытий: Институт машиноведения УрО РАН (г. Екатеринбург), Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН (г. Москва), Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (г. Москва), Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Институт механики УрО РАН (г. Ижевск), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск) и других.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*использованы* корректные постановки решаемых задач контактного взаимодействия, физически обоснованные, с выбором подходящего метода численного решения и проведением тестовых расчётов;

*для решения задачи использованы* апробированные методы;

*проведена* серия тестовых расчетов, на основании которых выбраны параметры численной модели, необходимые для корректного описания механического поведения системы «покрытие-подложка» при контактном нагружении;

*проведено* сравнение результатов численного моделирования с известными теоретическими решениями, достоверными экспериментальными данными и опубликованными результатами других исследователей.

**Новизна результатов диссертационного исследования** заключается в разработке моделей и методик моделирования механического поведения однородных материалов, а также систем «покрытие-подложка», в условиях контактного взаимодействия с жёстким индентором в трёхмерной постановке в рамках метода подвижных клеточных автоматов и изучения на их основе влияния материала подложки на процессы упругопластического деформирования и разрушения поверхностных слоёв материала при контактном нагружении.

В трёхмерной постановке разработана методика идентификации вихревых смещений, возникающих в поверхностных слоях в результате контактного взаимодействия с жёстким индентором. Впервые исследованы особенности влияния трёхмерных наноразмерных дефектов поверхностного слоя на характеристики силы трения при скольжении по его поверхности жёсткого контртела.

**Личный вклад автора заключается в** самостоятельном решении всех поставленных в работе задач, в подготовке обзора литературных данных по теме диссертации, проведении компьютерного моделирования и анализа полученных данных. Совместно с научными руководителями были сформулированы цель, задачи и основные положения диссертационной работы, проводилось обсуждение полученных результатов и написание статей на их основе.

Диссертация отвечает критериям Положения о присуждении ученых степеней, установленным для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, согласно пункту 9, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по разработке модели механического поведения систем «покрытие-подложка» в условиях контактного нагружения, имеющей значение для развития механики деформируемого твердого тела.

На заседании 30.09.2016 г. диссертационный совет принял решение присудить **Ереминой Г.М.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 8 докторов наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета  
Ученый секретарь  
диссертационного совета

30 сентября 2016 г.



Христенко Юрий Федорович

Пикушак Елизавета Владимировна