

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента на диссертационную работу

Беляк Ольги Александровны:

### **«ЗАКОНОМЕРНОСТИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД С ВНУТРЕННЕЙ СТРУКТУРОЙ С УЧЕТОМ ФРИКЦИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ»**,

представленную на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

по специальности

1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела.

Математическим моделям процесса трения посвящено множество публикаций, что является следствием обширных приложений результатов исследований, например, для создания эффективных узлов трения, применяемых в машиностроении. Развитие современных технологий создания новых композитных материалов трибологического назначения вызывают острую необходимость в изучении напряженно-деформированного состояния (НДС) гетерогенных сред при динамических и квазистатических режимах нагружения при учете трения в области контакта, локальных неоднородностей. Экспериментальные исследования (НДС) многофазных сред в зависимости от их физико-механических свойств и типов нагружения весьма затратны и трудоемки, в связи с этим, многопараметрические исследования на основе математических моделей, описывающих механическое поведение на микро- и макроуровнях, весьма *актуальны* и позволяют прогнозировать и управлять НДС таких сред за счет подбора оптимальных параметров, которые будут обеспечивать требуемые эксплуатационные свойства композитов.

Таким образом, тема диссертационной работы Беляк Ольги Александровны «Закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенных сред с внутренней структурой с учетом фрикционного

взаимодействия» является, безусловно, **актуальной**. В процессе выполнения диссертации актуальная тематика была поддержана грантами РФФИ № 21-19-00288, РФФИ № 18-08-00260-а, 20-08-00614-а, 21-11-00004 -д, Министерства науки и высшего образования РФ, ОАО РЖД. Разработанный в данной диссертации теоретико-экспериментальный комплекс методов исследования НДС при различных видах взаимодействий жестких тел со слоистыми гетерогенными основаниями, в том числе, содержащих внутренние дефекты типа полостей, является весьма актуальным, как в области фундаментальных исследований – решение новых контактных задач в усложненной постановке, так и в практическом использовании результатов исследования – создание новых перспективных самосмазывающихся композитов.

**Объем диссертации** – 287 страниц, состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, библиографического списка из 310 источников.

**Во введении** представлены новизна и актуальность исследования, цели исследования, положения, выносимые на защиту, теоретическая и практическая ценность результатов диссертационной работы и обоснована их достоверность, представлена информация об апробации работы, публикациях и личном вкладе соискателя. Обзор современного состояния проблемы, анализ полученных ранее результатов и подходов к исследованию схожих задач изложены также во введении, что дало возможность соискателю четко сформулировать ряд нерешенных проблем и обозначить подходы и методы их решения.

**В первой главе** обсуждаются результаты представленных экспериментальных методов исследования механических характеристик новых самосмазывающихся композитов на основе фенилона С-2 с наноразмерными добавками, флюидными наполнителями. Результаты наноиндентирования представлены для отобранных перспективных 23 композиционных материалов с различным типом наполнителей и их объемной концентрации в материале, приведены исследования влияния наполнителей на величину внутреннего трения в исследуемых материалах.

На полученных экспериментальных данных базируется построение математических моделей, описывающих процессы трения в квазистатическом и динамическом режимах для гетерогенных слоистых оснований. **Вторая глава** посвящена определению эффективных механических модулей многофазных сред с дискретными включениями различной формы и ориентации. Для композиционных материалов с наноразмерными добавками и наполнителями различной природы показано соответствие теоретических и экспериментальных данных, с относительной погрешностью в диапазоне 4-8%. Рассмотрен и другой подход для описания микроструктуры флюидонасыщенных гетерогенных сред системой дифференциальных уравнений в частных производных – модель Био-Френкеля. Модули этой модели определялись на основе комплекса экспериментальных данных, известных аналитических выражений для части параметров, построения конечно-элементных моделей для представительного объема гетерогенной осушенной пористой среды со случайно расположенными порами.

**В третьей главе** строятся решения новых контактных задач для многофазных сред при учете сил трения. Рассматриваются задачи для установившегося режима колебаний в плоской постановке для различной геометрии полубесконечных оснований (полупространства, слоя, слоистой среды). Применением преобразования Фурье краевые задачи сводятся к решению интегральных уравнений (ИУ) первого рода с разностными ядрами. Для решения последних предложен численно-аналитический метод. При этом, на основе асимптотик ядер соответствующих интегральных операторов выделяется слагаемое, несущее особенность, затем применяется метод граничных элементов. Проведен тщательный анализ сходимости численного алгоритма. Уделено особое внимание проверке, как выведенных аналитических выражений компонент матриц-функций Грина на основе предельных переходов к различной геометрии оснований, так и переходу к однородной среде. Для двухслойного гетерогенного полупространства

аналитически доказано, что возмущения поверхности в двуслойном гетерогенном полупространстве формируют симметричные колебания гетерогенного слоя, кососимметричные колебания гетерогенного слоя, колебания всей среды с покрытием. Построены зависимости контактных напряжений, тангенциальных перемещений от частоты колебаний штампа, пористости, насыщенности флюидом, газонасыщенности, коэффициента трения, геометрии основания. Особенно ценно сравнение двух подходов к учету микроструктуры среды, на основании концепции эффективной гомогенности, и на основании модели Био-Френкеля, определены границы их применимости. **В четвертой главе** дана постановка контактных задач для движущегося плоского и параболического в плане штампов при учете трения в области контакта. Применением интегрального преобразования Фурье краевые задачи сведены к ИУ первого рода с разностным ядром. Решение ИУ строилось как на основе итерационного процесса, так и применением метода граничных элементов после выделения в явном виде логарифмической особенности. Проведен численный анализ как контактных, так и внутренних напряжений. Показано, что изменение коэффициента трения, внутренняя структура среды имеет значительно большее влияние на напряженно-деформированное состояние гетерогенной среды при вибрации штампа, по сравнению с квазистатической задачей о движущемся штампе. Теоретические выводы сопоставлены и согласуются качественно с результатами трибологических экспериментальных исследований маслонаполненных композитов с наномодифицированной матрицей фенилона С-2, которые даны в приложении. Продемонстрирован подповерхностный максимум напряжений в проекции штампа, на локализацию которого в большей степени влияет коэффициент трения, и в меньшей-механические свойства среды. Учет этого факта, совместно с возможными дефектами среды, открывает большие перспективы к продлению срока эксплуатации элементов трибосопряжений. **Пятая глава**, посвященная исследованию влияния дефектов в многофазных средах на

деформированное состояние под действием осциллирующего источника колебаний при установившемся режиме и их идентификацию, что особенно важно в случае приповерхностных дефектов. С этой целью построены решения задач о колебаниях полосового волновода с полостями произвольной формы. Гетерогенная среда рассмотрена как эквивалентно однородная ортотропная среда. Решение рассматриваемых задач реализовано как на основании сведения задач к системам интегральных уравнений с сингулярными ядрами и их последующему численному решению на основе метода граничных элементов, так и на основании асимптотического подхода для круговых полостей малого радиуса, сопоставлено с численным решением, полученным конечно-элементным комплексом Comsol. Обратные задачи идентификации полости реализованы на основе рассмотрения дефекта в волноводе и определении его характеристик по амплитудам и фазам распространяющихся волн. Задачи сведены к системе нелинейных операторных уравнений с гладкими ядрами с дальнейшей численной реализацией методом регуляризации на конечномерных множествах. В рамках асимптотического подхода получены аналитические соотношения для определения неизвестных параметров полости.

**В заключении** сформулированы основные выводы диссертационной работы. **В приложении** приведен ряд экспериментов по нахождению трибологических характеристик самосмазывающихся наномодифицированных композитов.

В целом, диссертация написана хорошим языком, хорошо структурирована, в конце каждой главы сделаны выводы с пояснением к дальнейшим этапам исследований, реализуемых в последующих главах.

По диссертационной работе Беляк Ольги Александровны имеются следующие **замечания и рекомендации**:

1. На рис. 2.2.1 некоторые эффективные константы принимают отрицательные значения, насколько можно доверять этим значениям

там, где они положительны.

2. Следует пояснить, как физически может быть осуществлен контакт с трением при переменных по знаку напряжениях.
3. В связи с чем выбрано граничное условие - свободная граница среды непроницаема.
4. Практически не описаны в диссертации возможности и алгоритмы созданных для численного и аналитического анализа программ.
5. В динамических контактных задачах было бы полезно так же провести анализ внутренних напряжений в проекции штампа по глубине основания, как это было сделано в главе 4 для квазистатических контактных задач.
6. В главе 5 приводится верификация решения, полученного методом граничных интегральных уравнений, на основе конечно-элементной модели, однако отсутствует информация о параметрах сеток и сходимости результатов расчета.

Сделанные замечания не умаляют ценности диссертации и не влияют на положительную оценку представленных в работе исследований.

**Достоверность исследований** основывается на строгой постановке задач, корректного применения математических методов, тщательном анализе сходимости разработанных численных алгоритмов, сравнением частных случаев с известными результатами других авторов и экспериментальными данными.

**Обоснованность научных положений, выводов, рекомендаций диссертации** не вызывает сомнений.

**Научные результаты**, полученные соискателем, являются **новыми**. Обладает новизной сочетание математических и экспериментальных методов, позволяющих определять НДС при фрикционном квазистатическом и динамическом воздействии. При этом учитывается не только внутренняя структура среды, но и наличие дефектов в виде полостей произвольной конфигурации.

Результаты диссертационной работы получили широкую **апробацию** на международных и российских конференциях, на семинаре по механике фрикционного взаимодействия твердых тел имени И.В. Крагельского (ИПМех РАН). По теме диссертации представлены 59 публикаций, из них монография издательства «Физматлит», учебник, 23 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, из них 12 статей, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science. По качеству и количеству публикаций диссертация Беляк О.А. полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям.

**Практическая значимость** диссертации состоит в возможности использования разработанных методов при создании новых антифрикционных материалов до их создания. Оценки поведения поверхности среды, идентификации локальных неоднородностей имеет приложение в разработке методах неразрушающего контроля. Проведенный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволяет выбрать оптимальный состав композита, ультрадисперсных добавок, вязких и жидких наполнителей.

Автореферат диссертации полностью отражает основное содержание работы и отвечает всем предъявляемым требованиям.

### **Заключение.**

Диссертационная работа Беляк Ольги Александровны «Закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенных сред с внутренней структурой с учетом фрикционного взаимодействия» выполнена на высоком научном уровне и является законченной научно-исследовательской работой, в которой содержатся решения задач, имеющих важное значение для развития механики фрикционного взаимодействия многофазных сред. Результаты диссертации актуальны и востребованы для теории и практики. Диссертационная работа отвечает всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Совокупность теоретических выводов и практических рекомендаций диссертации можно квалифицировать как научное достижение в области фрикционного взаимодействия механики деформируемых твердых тел. Ее автор, Беляк Ольга Александровна, достойна присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

«22» марта 2022 г.

*Согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета и их дальнейшую обработку*

**Официальный оппонент**



Соловьев Аркадий Николаевич

доктор физико-математических наук

(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),

доцент, зав. кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»,

телефон: 8(863)2-738-525, <https://donstu.ru>,

тел. 8-863-2381509 (раб.), 8-904-5041638 (моб.),


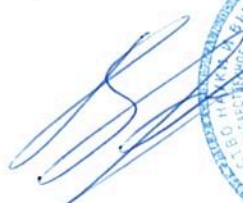
e-mail: [solovievarc@gmail.com](mailto:solovievarc@gmail.com)

адрес 344003, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

Подпись А.Н. Соловьева удостоверяю:

Ученый секретарь

Ученого совета ДГТУ



В.Н. Анисимов