

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу **Беляк Ольги Александровны**
«Закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенных
сред с внутренней структурой с учетом фрикционного взаимодействия»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела

В последнее время существенно увеличился интерес к новым функциональным многофазным материалам, которые обеспечивают требуемые эксплуатационные свойства. Актуальными являются исследования, связанные с разработкой перспективных антифрикционных самосмазывающихся материалов, где необходимо управление трибологическими свойствами, принимая во внимание повышение их несущей способности, а также условий нагружения при эксплуатации.

Основной целью диссертационного исследования О.А. Беляк является разработка комплекса теоретико-экспериментальных методов исследования напряженно-деформированного состояния при динамическом и квазистатическом фрикционном взаимодействии жестких тел со слоистыми гетерогенными основаниями, в том числе, содержащих внутренние дефекты типа полостей. **Актуальность проблемы не представляет сомнений**, поскольку конструирование новых антифрикционных материалов влечет необходимость развития методов решения контактных задач, принимая во внимание усложненные свойства многофазных сред, при наличии подповерхностных дефектов. Также **актуальность диссертационного исследования** подтверждает и тот факт, что основные результаты диссертации получены в рамках ряда грантов РФФИ, РНФ, Министерства науки и высшего образования РФ и др.

В диссертационной работе изучены контактные задачи в динамической и квазистатической постановках при учете трения в области контакта и внутренней микроструктуры слоистых сред. Микроструктура сред описана в рамках модели Био-Френкеля и подходов гомогенизации. В рамках динамической и квазистатической контактных задач для среды Био построение контактных давлений при учете трения является нетривиальной задачей, которая была решена

в диссертационном исследовании на основе полуаналитического метода решения интегрального уравнения первого рода с разностным ядром. Показана зависимость напряженно-деформируемого состояния гетерогенной среды от ее внутренней структуры, выявлены параметры, оказывающие наиболее существенное влияние. Обнаружена приповерхностная локализация экстремума напряжений в проекции области контакта, в связи с чем рассмотрены обратные геометрические задачи идентификации дефектов в виде приповерхностных и заглубленных полостей. Представленные теоретические исследования реализованы для новых многофазных материалов, в том числе, маслонасыщенных.

Все полученные в ходе диссертационной работы результаты и выводы являются оригинальными и **обоснованными**. **Достоверность результатов диссертации** обеспечивается строгой математической постановкой задач, применением математически обоснованных методов решения, сравнением результатов, полученных на основе численных расчетов с аналитическими решениями, экспериментальными данными, предельными переходами к известным случаям и сравнением с результатами других авторов.

Диссертация О.А. Беляк состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения, списка используемых источников.

Во **введении** представлен обзор современного состояния исследований, результатов и подходов к решению смешанных, и в частном случае, контактных задач, сформулированы цели диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна, актуальность проведенных исследований, представлена практическая значимость полученных результатов.

В первой главе кратко изложена технология изготовления гетерогенных антифрикционных композитов с матрицей из конструкционного материала фенилона С-2 с наноразмерными добавками и масляными наполнителями. Механические свойства композитов были определены на основе лабораторных экспериментов. Полученные экспериментальные данные использовались в дальнейшем как входные параметры при построении математических моделей в контактных задачах при учете трения для слоистых гетерогенных оснований.

Во второй главе, на основании экспериментальных результатов предыдущей главы, описаны методы гомогенизации, позволяющие определять

эффективные механические характеристики гетерогенных сред с дискретными и непрерывными фазами. Рассмотрены композиционные материалы с добавками и наполнителями различной природы. Второй подход к учету микроструктуры многокомпонентных континуумов, а именно, пористых, насыщенных флюидом сред состоит в использовании математических моделей на основе систем дифференциальных уравнений. При описании гетерогенных сред, состоящих из двух фаз с несовершенными связями – деформируемый скелет и сжимаемый флюид, использована модель континуальной механики Био-Френкеля в перемещениях, позволяющая учитывать силовое, физическое, инерционное взаимодействие фаз и вязкость флюида. Макрокоэффициенты, входящие в уравнения Био-Френкеля определялись через микропараметры «осушенной» пористой среды, которые находились на основе данных наноиндентирования, аналитических выражений и конечно-элементного моделирования.

Третья глава посвящена исследованию контактных задач в динамической постановке со связанностью нормальных и тангенциальных контактных напряжений по закону Кулона-Амонтона. В качестве гетерогенных изотропных флюидонасыщенных оснований рассматривались полупространство, слой и двухслойная среда. Решение краевых задач сводилось к построению решения интегральных уравнений первого рода с разностным ядром. Развита численно-аналитический подход к решению интегральных уравнений первого рода пористоупругой флюидонасыщенной среды при учете асимптотик и особенностей символов ядер интегральных уравнений. Выполнены предельные переходы (слой-полупространство) для проверки полученных аналитических выражений передаточных функций, а также предельные переходы к однородной среде. Численный метод построения решения интегрального уравнения и анализ результатов решения контактных задач позволил идентифицировать зависимость напряженно-деформируемого состояния гетерогенной среды при контактном воздействии от типа основания, характера нагружения, механических свойств фаз, степени их взаимодействия, частотного диапазона колебаний штампа и коэффициента трения. Проведено сравнение подходов к учету микроструктуры среды на основании концепции эффективной гомогенности и модели Био-Френкеля. Для случая установившихся колебаний штампа показано наличие энергоемких частот, зависящих от всех параметров задачи.

Четвертая глава посвящена рассмотрению контактных задач в квазистатической постановке о движении с трением штампа с плоской или параболической подошвой по гетерогенному основанию. Здесь, решение интегрального уравнения первого рода строилось с применением итерационного процесса с учетом особенности в символе ядра интегрального уравнения и дальнейшим применением метода граничных элементов. Результаты проведенных численных расчетов качественно согласуются с результатами лабораторных трибологических экспериментов для маслonaполненных композитов с наномодифицированной матрицей. Проведен многопараметрический численный анализ контактных и внутренних напряжений, установлены закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенной среды, выявлены параметры, оказывающие существенное влияние. Показано наличие приповерхностного максимума внутренних напряжений при фрикционном взаимодействии гетерогенной среды со штампом, локализация которого зависит от всех параметров задачи, и в большей степени, от коэффициента трения. Учет дефектов основания в области локализации экстремума внутренних напряжений и их идентификация представляется достаточно значимым исследованием.

Пятая глава посвящена исследованию влияния дефектов в виде полостей произвольной формы в гетерогенных средах на возмущения лицевой поверхности, а также возможности установления наличия дефекта в многофазной среде по таким перемещениям. Гетерогенная среда здесь рассматривалась как эквивалентная ортотропная однородная среда. Построены решения прямых и обратных динамических задач теории упругости о колебаниях полосового волновода с полостями произвольной формы. На основании асимптотического подхода при решении задач о колебаниях слоя с малой круговой полостью получены аналитические зависимости, на основе которых определяются искомые параметры дефекта. В случае произвольной конфигурации полости решение обратных задач идентификации дефекта по измеренным волновым полям на части верхней границы слоя осуществлялось путем сведения исходных задач к системе нелинейных операторных уравнений, которая содержит операторы с гладкими ядрами. Решение обратных задач определялось на основе процедуры минимизации функционала невязки, численная реализация которой проводилась в Matlab с использованием генетического алгоритма и метода Нелдера-Мида.

В заключении сформулированы основные результаты, выводы, обоснована возможность теоретического и практического применения полученных результатов. **В приложении** приведено описание методов исследования трибологических характеристик наномодифицированных композиционных материалов с флюидными наполнителями и наноразмерными добавками.

Среди результатов, полученных соискателем и определяющих **научную новизну** диссертационной работы можно отметить комплекс теоретических методов и экспериментальных исследований для анализа напряженно-деформированного состояния слоистой многофазной среды при квазистатическом и динамическом контактном взаимодействии с учетом трения и наличия дефектов. Новыми являются разработанные численно-аналитические методы решения класса контактных задач для пористоупругих флюидонасыщенных гетерогенных сред при учете трения в области контакта; а также методы решения прямых и обратных задач распространения волн в гетерогенной среде, содержащей внутренние дефекты в виде полостей произвольной формы.

Практическая и теоретическая значимость диссертации состоит в разработке оригинальных методов решения контактных задач при учете трения в области контакта, задач о распространении волне в средах с дефектами для оснований, обладающих микроструктурой, имеющих не только важное теоретическое значение, но и практические приложения. Результаты диссертации могут быть использованы при конструировании и управлении фрикционными свойствами гетерогенных композиционных материалов, прогнозировании поведения новых композитных материалов до их создания, позволяют оценить поведение поверхности среды при учете локальных неоднородностей в виде полостей и осуществить их идентификацию.

По диссертационной работе и ее автореферату имеется ряд замечаний:

1. Термин «гетерогенный» в ряде случаев употребляется без конкретизации вида неоднородности, а иногда он употребляется и для гомогенной эффективной среды, что несколько запутывает читателя.
2. В механике композитов имеется достаточно большое число методов гомогенизации и было бы полезным привести их некоторый обзор применительно с рассматриваемым композитам.
3. В случае наноразмерных включений может проявляться масштабный эффект, для учета которого существует ряд теорий и моделей наномеханики. Эти

модели можно было бы использовать и в методах гомогенизации, чему посвящено достаточно большое число работ.

4. Модель конечно-элементной гомогенизации в ANSYS описано очень сжато, как в плане механической постановки, так и в плане численной реализации. Поэтому не ясно, почему нельзя применять конечно-элементную гомогенизацию при большой пористости.
5. Заявленная задача «установления границ правомерности описания гетерогенной среды моделью Био-Френкеля и эквивалентной гомогенной средой» представляется слишком общей и могла бы быть сформулирована более конкретно.
6. В главе, посвященной решению задач с движущимся штампом, было бы полезным привести более обширный обзор работ других авторов, в частности, дать ссылки на работы А.В. Белокопя др.
7. Имеются некоторые погрешности изложения (гетерогенный композит, конечная СЛАУ, наклонный шрифт для стандартных математических символов). В ряде таблиц диссертации приведены данные с излишнем числом цифр, которые вряд ли все являются информативными. Все это, впрочем, совершенно не существенно.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов диссертационной работы и не влияют на ее общую положительную оценку.

Автореферат диссертации адекватно и полно отражает основное содержание работы.

Результаты диссертационной работы апробированы на многих международных и российских конференциях и докладывались на различных профильных научных семинарах. По теме диссертации представлены 59 публикаций, в том числе, учебник, монография издательства «Физматлит», 23 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, в том числе, 12 статей, индексируемых в Scopus и Web of Science.

Вышесказанное определяет, что диссертационная работа Беляк Ольги Александровны на тему «Закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенных сред с внутренней структурой с учетом фрикционного взаимодействия» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблем, имеющих важное значение для развития механики

контактного взаимодействия гетерогенных сред. Считаю, что данная диссертационная работа отвечает всем требованиям, установленным постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г. «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук. Совокупность теоретических положений и полученных прикладных результатов можно квалифицировать как научное достижение в области фрикционного взаимодействия механики деформируемых твердых тел, достойное присуждения ее автору, Беляк Ольге Александровне, степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – Механика деформируемого твердого тела.

«28» марта 2022 г.

Даю согласие на обработку своих персональных данных

Официальный оппонент



Наседкин Андрей Викторович

доктор физико-математических наук
(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),
профессор, зав. кафедрой «Математическое моделирование»
Института математики механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»,
телефон: 8(863) 2975 111,
e-mail: avnasedkin@sfedu.ru,
адрес 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова, 8а, а. 219.

