

Утверждаю  
Директор федерального государственного  
бюджетного учреждения науки  
Института проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН  
Д.Ф.М.н. С.Е. Якуш



«    »    2022 г.



**ОТЗЫВ**  
ведущей организации  
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.

### **Актуальность и цель диссертационной работы**

Многофазные композиционные материалы в настоящее время широко используются в современных узлах трения. При этом модифицирование матрицы композита различными наноразмерными добавками и наполнителями приводит к появлению как фрикционных материалов, например, используемых в различных тормозных системах, так и антифрикционных (в том числе демпфирующих) материалов. Разработка перспективных гетерогенных композитов и покрытий на их основе, учитывающих условия их эксплуатации, является перспективной задачей.

Диссертационная работа Беляк О.А. посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния при динамическом и квазистатическом фрикционном взаимодействии жестких тел со слоистыми

гетерогенными основаниями, в том числе содержащими внутренние дефекты типа полостей, на основе разработанного комплекса теоретико-экспериментальных методов исследования. Проведены исследования процессов деформирования гетерогенных сред, в том числе применительно к вновь создаваемым композиционным материалам, проведен анализ напряженного состояния при фрикционном контакте. Для достижения этой цели предложены математические модели, описывающие поведение при механических воздействиях полугораниченных слоистых гетерогенных сред, в том числе, с дефектами. Для решения соответствующих краевых задач были разработаны оригинальные аналитико-численные методы решения систем интегральных уравнений при учете особенностей их ядер; проведены и интерпретированы результаты лабораторных экспериментальных исследований процессов деформирования созданных новых антифрикционных композитов на основе конструкционного материала фенилона с различными наноразмерными добавками и флюидными наполнителями.

В настоящее время динамические и квазистатические задачи механики контактного взаимодействия при учете внутренней микроструктуры сред и трения в области контакта относятся к числу наименее исследованных, так же, как и обратные геометрические задачи для идентификации дефектов с учетом анизотропии среды. Таким образом, тематика данной диссертационной работы *является актуальной* и имеет важное значение для развития современной механики деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Беляк О.А. по своей цели, проведенным фундаментальным и прикладным исследованиям, новизне соответствует научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела и отрасли – физико-математические науки.

#### **Значимость и научная новизна полученных результатов**

Автором получены следующие *новые и наиболее значимые результаты* диссертационной работы: разработан новый теоретико-

экспериментальный подход для определения механических свойств антифрикционных композитных многофазных материалов, которые содержат ультрадисперсные добавки и флюидные наполнители, на основе комплекса лабораторных экспериментальных исследований и математических моделей; построены решения новых контактных задач с трением для пористой упругой флюидонасыщенной слоистой среды для квазистатического и динамического характера нагружения на основании двух подходов описания микроструктуры среды; разработаны новые аналитико-численные методы решения интегральных уравнений первого рода в контактных задачах для слоистых гетерогенных оснований при учете трения в области контакта; решены обратные геометрические задачи идентификации полостей произвольной формы в ортотропном слое на основании информации о перемещениях лицевой поверхности; для круговых полостей малого характерного размера получены явные аналитические формулы определения неизвестных параметров полости.

#### **Достоверность полученных автором результатов диссертации**

*Достоверность результатов* обеспечивается строгой математической постановкой рассматриваемых задач и применением математически обоснованных методов решения. Результаты, полученные на основе численных расчетов, сопоставлялись со строгими аналитическими решениями, в том числе полученными другими авторами, или экспериментальными данными, или предельными переходами к известным случаям.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение, приложение и библиографический список, состоящий из 310 наименований. Общий объем диссертации составляет 287 страниц, включая 95 рисунков, 8 таблиц, 1 приложение.

Во **введении** дается обзор современного состояния исследований, методов решения контактных задач, динамических задач теории упругости,

обосновывается актуальность темы диссертации, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы, их достоверность, сформулированы цели диссертационного исследования и результаты, выносимые на защиту. Приведен список российских и зарубежных научных мероприятий, конференций, симпозиумов, на которых автором представлены результаты научных исследований, составляющих предмет диссертационной работы. Здесь же приводится краткое содержание работы.

**Первая глава** посвящена лабораторным экспериментальным исследованиям созданных новых антифрикционных композиционных материалов на основании матрицы из конструкционного материала фенилона, марки С-2, которая модифицирована наноразмерными добавками с добавлением флюидных наполнителей. Здесь же приведено кратко описание технологии изготовления таких гетерогенных материалов. Для композиционных материалов определены интегральные механические характеристики посредством индентирования образцов сфероконическим индентором. Результаты индентирования представлены для композитов с различным наполнением и модификацией.

**Во второй главе** описаны методы гомогенизации многофазных сред, приведены многочисленные результаты численных экспериментов с использованием экспериментальных результатов главы 1. Здесь же приведен и другой подход к учету микроструктуры гетерогенных флюидонасыщенных сред, основанный на модели континуальной механики Био-Френкеля в терминах перемещений, которая одновременно учитывает силовое, физическое, инерционное взаимодействие фаз, а также собственную вязкость материалов твердой и флюидной фазы. Определение механических констант, входящих в представленную модель, осуществлялось на основании взаимной увязки экспериментальных данных (индентирования), строгих аналитических соотношений, конечно-элементного моделирования.

**В третьей главе** приведены новые контактные задачи при учете сил трения в динамической постановке для гетерогенных флюидонасыщенных оснований – полупространство, слой, двухслойная среда в рамках двух подходов к учету микроструктуры рассматриваемых континуумов. Решение соответствующих краевых задач были построены на основе идей теории потенциалов, при использовании преобразования Фурье. Подробно описаны алгоритмы построения матриц Грина рассматриваемых сред, отмечены основные вычислительные трудности. В итоге задачи сводились к решению интегральных уравнений первого рода с разностным ядром. Изучено поведение и свойства ядер интегрального уравнения при разных подходах к моделированию микроструктуры основания. В качестве проверки полученных соотношений были осуществлены предельные переходы, в частности, для слоя при толщине, стремящейся к бесконечности, компоненты матрицы Грина совпали с таковыми для гетерогенного полупространства. На основе анализа дисперсионных свойств двухслойной гетерогенной среды, проведенного аналитически, было доказано важное утверждение, что возмущения поверхности в двухслойном гетерогенном полупространстве формируют симметричные колебания гетерогенного слоя, кососимметричные колебания гетерогенного слоя, колебания всей среды с покрытием. Приведены результаты различных вычислительных экспериментов, иллюстрирующие поведение символов ядер интегральных уравнений рассматриваемых задач в зависимости от способа описания микроструктуры сред. Установлено, что для динамических задач невозможно корректно учесть все свойства гетерогенных флюидонасыщенных сред при помощи моделирования их однокомпонентной эквивалентной средой. Хотя в статике и квазистатике такой способ может дать приемлемые результаты, которые приведены в главе 4. Развита аналитико-численный подход к решению интегральных уравнений первого рода пористой упругой флюидонасыщенной среды при учете асимптотик и особенностей символов ядер интегральных уравнений. В рамках метода граничных элементов

построен устойчивый вычислительный алгоритм решения получаемых интегральных уравнений. На основании многопараметрического анализа результатов численных экспериментов установлены зависимости напряженно-деформированного состояния гетерогенной среды от структуры основания, характера нагружения, механических свойств фаз и степени их взаимодействия, частотного диапазона вибрации штампа с плоским основанием, коэффициента трения.

**В четвертой главе** приведены новые контактные задачи в квазистатической постановке о движении с трением штампа с плоской или параболической подошвой по гетерогенному основанию. Внутренняя микроструктура основания была рассмотрена в рамках двух подходов. Поставленные задачи были сведены к интегральному уравнению первого рода с разностным ядром, при этом показано, что вид ядра значительно упрощается для небольших скоростей движения штампа (по сравнению со скоростью поверхностных волн типа Релея в пористом упругом полупространстве). Решение интегрального уравнения первого рода строилось как с применением итерационного процесса, так и на основе процедуры регуляризации, путем выделения особенности и с привлечением метода граничных элементов. Представлены результаты многочисленных вычислительных экспериментов, установлены основные функциональные зависимости напряженно-деформированного состояния гетерогенной среды от параметров задачи. Решения, полученные в рамках двух моделей описания структуры гетерогенных сред, сопоставлены между собой; они качественно согласуются с результатами трибологических испытаний (представленных в приложении) для некоторых антифрикционных композиционных материалов, рассмотренных в главе 1. Приведены распределения внутренних напряжений, возникающих в гетерогенной среде под скользящим штампом.

**В пятой главе** рассмотрены динамические задачи для неоднородной полуограниченной среды, содержащей дефекты в виде полостей произвольной конфигурации, в двумерной постановке. Построенное решение

таких задач (на основании метода граничных интегральных уравнений, асимптотического подхода и численно) позволило установить влияние дефектов на возмущения на лицевой поверхности, а также возможность по таким перемещениям определить наличие дефекта, в том числе приповерхностного. Гетерогенная среда, на основании подходов, реализованных в главе 2, рассматривалась, как эквивалентная однородная среда, обладающая ортотропным типом симметрии. При этом реализация решения рассматриваемых задач на основании асимптотического подхода для полости малого кругового поперечного сечения позволила получить явные аналитические соотношения для волновых полей на лицевой поверхности слоя, а также при решении обратных задач – формулы для определения искомым параметров дефекта. Решение обратных задач идентификации полости произвольной конфигурации по измеренным волновым полям (позиционное, частотное зондирование) осуществлялось на основе сведения исходных задач к системе нелинейных операторных уравнений с гладкими ядрами у соответствующих операторов. Представлено устойчивое численное решение обратных задач на основе минимизации неквадратичных функционалов невязки.

**В заключении** приведены основные результаты исследования, выводы, описана возможность теоретического и практического применения полученных в работе результатов. **В приложении** представлены лабораторные эксперименты для определения трибологических характеристик наномодифицированных композиционных материалов с флюидными наполнителями и наноразмерными добавками.

В целом, изложение материала диссертации четкое, все представленные результаты снабжены многочисленными примерами вычислительного эксперимента, с сопоставлением результатов, полученных в рамках разных подходов, экспериментальных исследований.

Текст **автореферата** полностью соответствует содержанию диссертации. Список опубликованных работ по теме диссертационного

исследования, включает в себя 59 публикаций, в том числе, учебник, монография издательства «Физматлит»; 23 статьи опубликованы в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК, из них 12 статей, индексируемых в Scopus, Web of Science. Апробация работы проведена на российских и зарубежных научных мероприятиях, конференциях, симпозиумах, в полном объеме докладывалась на семинаре по механике фрикционного взаимодействия твердых тел имени И.В. Крагельского (ИПМех РАН), на семинарах кафедры теоретической механики, высшей математики Ростовского государственного университета путей сообщения.

**По диссертационной работе и ее автореферату имеется ряд замечаний:**

1. В первой главе показаны результаты наноиндентирования гетерогенного материала. Здесь следовало бы соотнести размеры включений в матрице с размерами пятна контакта при индентировании. Осреднение характеристик при попадании в разные фазы не даст интегральные характеристики материала (в отличие от макро индентирования).
2. Также в первой главе на странице 41 описывается, что гистерезис в цикле нагружение-разгрузка обусловлен реологическими свойствами материала. Тогда следовало бы привести подтверждение – отсутствие пластического отпечатка. Вероятно, материал матрицы без включений пластически не деформируется, но могут деформироваться и даже разрушаться включения и матрица возле них, поскольку граница матрица-включение является концентратором напряжений.
3. В главе 3 рассматривается задача о колебаниях штампа с трением. Необходимо пояснить, как несимметрия распределения контактного давления связана с направлением действия сил трения. Интересно было бы рассмотреть (при вибрации с переменной нормальной



нагрузкой) осесимметричную задачу с зонами сцепления и проскальзывания, когда закон Амонтона-Кулона действует только в зонах проскальзывания.

4. В начале пятой главы было бы полезно привести физическое обоснование целесообразности рассмотрения контактной задачи в плоской постановке для полуплоскости с включениями. При такой постановке требуется сформулировать ограничения на размер включений.
5. В диссертации имеется некоторое количество опечаток и ошибок в пунктуации, например, на страницах 9, 13, 29, 57, 121, 133, 224, 287.

Указанные выше замечания не снижают общую положительную оценку представленной работы.

### **Заключение**

Рассмотренная диссертация Беляк О.А. «Закономерности напряженно-деформированного состояния гетерогенных сред с внутренней структурой с учетом фрикционного взаимодействия» является завершенной научно-исследовательской работой на актуальную тему. В данной работе представлены решения проблем, имеющих большое значение для механики фрикционного взаимодействия деформируемых твердых тел. Научные положения, сформулированные в диссертации, обоснованы и не вызывают сомнений. Таким образом, диссертация отвечает критериям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор, Беляк Ольга Александровна заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании лаборатории трибологии федерального государственного бюджетного учреждения науки Института

проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук  
21.03.2022 г. протокол № 1.

Заведующая лабораторией трибологии  
Института проблем механики  
им А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук  
Академик РАН, д.ф.-м.н., профессор



И.Г. Горячева

Ведущий научный сотрудник  
лаборатории трибологии  
Института проблем механики  
им А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук  
д.ф.-м.н., профессор РАН



Е.В. Горская

Собственноручную подпись Горячевой И.Г., Горской Е.В. заверяю.

Ученый секретарь ИПМех РАН, д.ф.-м.н.



М.А. Котов

Контактные данные организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского  
Российской академии наук.

119526, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 101, корп. 1

Тел.: 7-495-434-00-17, e-mail: ipm@ipmnet.ru, <https://www.ipmnet.ru>