



«Утверждаю»

Директор ИМАШ РАН

д.т.н., профессор

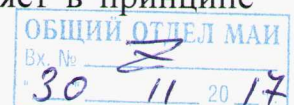
Глазунов В.А.

« ____ » _____ 2017 г.

Отзыв ведущей организации

ФГБУН Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН
на диссертационную работу Харченко Кирилла Дмитриевича на тему
«Исследование функционально-градиентных свойств сред с полями
дефектов», представленную на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук по специальности
01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Наличие микро и нановключений, а также особенности микроструктуры, связанные с большой концентрацией границ раздела фаз, оказывают влияние на физические свойства материала. Необходимость развития неклассических и градиентных моделей сред с полями дефектов, по сравнению с подходами классической теории упругости, обусловлена возможностью определения эффективных свойств неоднородных материалов с учетом их внутренней структуры. Однако при применении усложненных неклассических моделей сред с полями дефектов и градиентных моделей возникают сложности, связанные с определением напряженного состояния, оценкой прочности, накопления повреждений, разрушения, которые к настоящему времени недостаточно изучены. Поэтому решение проблемы определения соответствия между обобщенными средами (средами с полями дефектов, градиентными средами) и моделями классических изотропных сред, но с переменными свойствами, является весьма **актуальной**, так как позволяет в принципе



распространить методы, известные для классических сред на неклассические обобщенные среды.

Основные **цели** диссертационной работы:

- Получить соотношения эквивалентности, предполагающие трактовку сред с полями дефектов как изотропных сред с переменными характеристиками (межфазных слоев с переменными свойствами)
- Получить явные соотношения для оценки эффективных характеристик эквивалентной изотропной среды с функционально-градиентными свойствами по решению, найденному для пористых сред.
- Исследовать функционально-градиентные свойства неоднородных материалов, реализующиеся по границам фаз в слоистой структуре и провести оценку эффектов усиления или деградации этих свойств.

Для достижения сформулированных целей диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- Установка энергетической эквивалентности между обобщенными моделями сред с полями дефектов и изотропной классической средой с переменными по координатам характеристиками.
- Определение тензора эффективных модулей упругости изотропной среды который определяется явно по решению краевой задачи для обобщенной среды с полями дефектов через тензор поврежденности второго ранга, т.е. фактически предложена математическая модель поврежденности с тензорным параметром.
- Получение соотношений, позволяющих моделировать среду с полями дефектов общего вида как изотропную среду с функционально-градиентными свойствами.
- Получение аналитических соотношений, позволяющих по решению, полученному для пористой среды определить эффективные

характеристики эквивалентной изотропной среды с функционально-градиентными свойствами.

- Выявление, свойств пористой среды, связанных с фильтрацией определенных длин волн.
- Установление, эффекта «выталкивания» межфазного слоя при механическом воздействии из более жесткой фазы в более мягкую.
- Проведение анализа эффективных характеристик вискеризованных волокон и обнаружение эффекта усиления/деградации на границе межфазного слоя и матрицы.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением апробированного математического аппарата: методов механики сплошных сред, математической физики, теории упругости, а также непротиворечивостью полученных результатов физическому смыслу явлений, связанных с деформированием сред.

Научная новизна диссертационной работы заключается в доказательстве альтернативной трактовки, позволяющей описывать свойства материала с дефектами, как эквивалентного функционально-градиентного с переменными по координатам свойствами, моделируемого в рамках классической теории упругости. Так же установлено, что тензор эффективных модулей упругости изотропной среды, моделируемой с использованием энергетической эквивалентности, определяется явно по решению краевой задачи для обобщенной среды с полями дефектов через тензор поврежденности второго ранга.

Научная и практическая значимость результатов диссертации состоит в том, что полученные результаты можно использовать для создания корректных моделей существенно неоднородных сред, а также более полно и достоверно прогнозировать поведение, неоднородных структур. Полученные результаты можно использовать в качестве

расширения функционала современных САПР для расчетов аналогичных структурных моделей.

Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Установленная в работе энергетическая эквивалентность позволяет использовать методы оценки прочности и методики оценки накопления повреждений, применяемых в рамках классической теории упругости для градиентных моделей сред.

Постановка и решение описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Рецензируемая диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и приложений. Во введении обосновываются актуальность и научная новизна диссертационного исследования, приводятся возможные сферы применения результатов работы, формулируются цель и задачи работы.

Первая глава носит обзорный характер. В ней рассматриваются работы по проблеме моделирования неоднородных структур. Анализируется развитие градиентной теории упругости, ее применение к прикладным задачам различных областей механики деформируемых тел и смежным областям. Отдельно акцентируется внимание на моделировании пористых сред, а также материалов с усами, которые используются для повышения межфазной адгезии.

Во **второй главе** рассмотрены основные градиентные модели и неклассические модели сред с полями дефектов. Произведен их сравнительный анализ. Показано, что существует общая форма известных градиентных теорий второго порядка и в рамках полученной общей модели доказана теорема о сводимости любой градиентной модели дефектной среды к неоднородной градиентной модели неповрежденной среды.

Третья глава диссертации посвящена развитию модели пористых сред с микроструктурой, описывающей эффекты деградации свойств материала при наличии рассеянных повреждений. В ходе построения решения устанавливается система определяющих соотношений и формулируется согласованная постановка краевой задачи. Получены аналитические соотношения, позволяющие по решению, полученному для пористой среды определить эффективные характеристики эквивалентной изотропной среды с функционально-градиентными свойствами. Установлены соотношения, показывающие, что дефектность, связанная с пористостью и ее эволюцией, приводит к изменению механических характеристик функционально-градиентного материала при оценке его эффективных свойств. Также в данной главе проведено исследование распространения волн в пористой среде, выяснено, что пористая среда может быть фильтром для распространения определенных длин волн.

В **четвертой главе** приведены рассмотренные в диссертации примеры и проведен анализ полученных результатов. Для составного стержня показано, что жесткая фаза «выталкивает» межфазный слой в мягкую фазу. Пример с растяжением пористого стержня позволяет сделать вывод, что свойства зависят от объемного содержания пор, а также имеется корреляция с экспериментальными данными, указывающая на необходимость учета параметров нагружения при его многопараметрической реализации. Разбор задачи с вискеризованным слоем позволяет получать оценки для эффективных свойств составных структур при любых однородных состояниях на бесконечности. Развивается обобщенный самосогласованный метод Эшелби, позволяющий получать аналитические оценки для эффективных механических характеристик волокнистых композиционных материалов. Слои волокон могут быть изотропными классическими, или структурами, описываемыми в рамках градиентных теорий упругости. Предлагаемый вариант метода Эшелби позволяет получать аналитические оценки для

эффективных свойств составных структур при любых однородных состояниях на бесконечности, задаваемых тензором однородных деформаций.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Замечания по тексту диссертации.

1. В работе выполнено обобщение ряда неклассических моделей градиентной теории упругости, однако не приводится конкретное описание способов определения параметров (констант) градиентной модели. Не ясно, какие эксперименты требуется провести и какие вычислительные процедуры осуществить для нахождения комплекса этих параметров. Не установлено количество констант модели в общем случае и что необходимо считать характерным размером среды.
2. Значительная часть диссертации посвящена адгезионным моделям. Предлагаемый в работе алгоритм формально распространяется на адгезионные модели, однако эту часть работы можно считать излишней, так как полученным результатам трудно дать физическую трактовку.
3. В тексте диссертации написано «В выражении для полной энергии появится дополнительное слагаемое, связанное с кинетической энергией, которое является суммой классической и градиентной частей ...» (с), стр. 85 диссертации. Однако выражение (3.35) записанное в диссертации для кинетической энергии не соответствует выражению кинетической энергии в лагранжиане (3.36) динамической постановки теории пористых сред. Неклассическая поправка в (3.35) действительно соответствует выражению кинетической энергии в градиентных теориях типа теории Тупина. В то же время в (3.36) неклассическая поправка в

- кинетической энергии, пропорциональная плотности и соответствует теории пористых сред.
4. Отметим, что вторая поправка в кинетической энергии в лагранжиане (3.36), пропорциональная мере инертности производных свободного изменения объема, не вполне корректна. Она не проявляется в одномерной постановке, рассмотренной в диссертации. Эта поправка не имеет физического смысла, так как представляет собой не инвариантную свертку единственной компоненты вектора скорости со скоростью пористости (скаляром).
 5. В диссертации имеется утверждение по рассматриваемым теоремам, что любая теорема, доказанная в рамках общей теории, будет справедлива и для любой известной градиентной теории, имеющей ту же, или более простую, структуру. Складывается впечатление, что формулировка общей теории принадлежит соискателю, но это не так.

Заключение

Резюмируя сказанное выше, можно утверждать, что рассматриваемая диссертация является законченной научно-квалификационной работой, посвященной актуальной научно-технической проблеме, содержащей элементы научной новизны. Структура диссертации, язык изложения материала и терминология соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно, являются новыми, обладают как теоретической, так и практической значимостью, опубликованы в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, обсуждены на международных и российских научных конференциях с участием ведущих специалистов в области исследования.

Сформулированные замечания не изменяют общего положительного отношения к работе. Таким образом, рецензируемая диссертация удовлетворяет всем критериям, установленным Положением О порядке присуждения ученых степеней, а ее автор, Харченко Кирилл Дмитриевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Отзыв обсужден и одобрен на НТС отдела конструкционного материаловедения 7 ноября 2017 г., протокол № 5.

Заведующий лабораторией
механики композиционных материалов
д.ф.-м.н., профессор

Думанский А.М.

Старший научный сотрудник лаборатории
механики композиционных материалов
к.т.н.

Алимов М.А.

Контактные данные организации: ФГБУН Институт машиноведения им.
А.А. Благонравова Российской академии наук
Адрес: 101990, Россия, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4
Телефон: 8 (495) 628-87-30
Факс: 8 (495) 624-98-63
E-mail: info@imash.ru
Официальный сайт: www.imash.ru

13.12.2017г. Т.А.А. -