

ОТЗЫВ

официального оппонента Шоркина Владимира Сергеевича
о диссертации Харченко Кирилла Дмитриевича, выполненной на тему
“Исследование функционально-градиентных свойств сред с полями дефектов”
на соискание ученой степени кандидата физико – математических наук по специальности
01.02.04 – “Механика деформируемого твердого тела”.

Диссертация Кирилла Дмитриевича Харченко посвящена исследованию влияния микро и нано включений, а также особенностей микроструктуры композиционного материала, связанных с малым размером включений и большой плотностью границ раздела фаз, на осредненные характеристики его упругих свойств, поврежденности, прочности. Внимание акцентируется на случаях, когда габариты вводимых в основной объем включений, соразмерны характеристикам микроструктуры рассматриваемых объектов, когда, необходим учет масштабных эффектов, с помощью которых устанавливается связь физических свойств материала с характерными размерами его микроструктуры. Специальное внимание уделяется определению эффективных свойств пористых материалов и композитов с нано структурированными (вискеризированными) волокнами.

Актуальность темы диссертации.

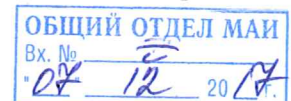
В настоящее время в различных отраслях промышленности получили широкое применение функционально-градиентные материалы. Это композиционные материалы, состоящие из матрицы и включений, материалы которых подобраны таким образом, что сочетание свойств материалов включений, матрицы, а также переменных, непрерывно меняющихся с ростом расстояния от частицы включения, свойств слоя матрицы, прилежащего к включению, создает необходимые осредненные свойства композита в целом.

Проблема создания таких материалов с заданными функциональными свойствами может быть успешно решена при условии адекватного математического моделирования адгезионного взаимодействия матрицы и наполнителя, возникновения и функционирования переходного градиентного слоя, его поврежденности, влияния этих явлений на осредненные характеристики композита. Очевидно, что математическая модель должна обладать определенной степенью универсальности и инвариантности к структуре композита и свойствам его элементов.

Работы по созданию таких моделей, построению и применению гладких законов неоднородности для различных конкретных условий эксплуатации функционально-градиентных материалов ведутся. Однако их результаты не обладают той универсальностью, которая позволила бы применять их для моделирования широкого круга процессов, происходящих в этих материалах в различных производственных условиях, проектировать эти материалы для соответствующих условий эксплуатации. Поэтому **тема диссертации Харченко Кирилла Дмитриевича является актуальной** как с практической, так и теоретической точек зрения.

Общей целью диссертационной работы ее автор ставит исследование функционально-градиентных свойств сред с полями дефектов.

Для достижения поставленной цели автор диссертации решает задачи в двух направлениях. С одной стороны, он пытается доказать эквивалентность использования моделей обобщенных сред с полями дефектов, моделей градиентных сред и классических моделей с переменными по координатам характеристиками для описания механических свойств градиентных материалов, получить для этого соответствующие соотношения. С другой стороны, автор диссертации использует полученные результаты и соотношения для исследования функционально-градиентных свойств неоднородных материалов в конкретных условиях.



В диссертации использованы теоретические методы исследования.

В работе применялись методы механики деформируемого твердого тела, в частности, теории упругости сред с внутренними степенями свободы, которые обусловлены их дефектностью. Осуществляется проверка корреляции теоретических результатов с известными экспериментальными данными

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа изложена на 142 страницах. Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы и семи приложений. Иллюстрирована 25 рисунками и содержит 1 таблицу. **Содержит список использованных литературных источников из 123 наименований.**

Краткий анализ содержания.

Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, приводятся цели и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимости, методы и методология исследования, положения, выносимые на защиту. А также, перечень основных выступлений, на которых были апробированы результаты работы. При этом отмечено, что наличие микро и нано-включений в функционально-градиентных материалах, за счет которых и формируются их специфические свойства, а также особенности микроструктуры, связанные с малым размером включений и большой плотностью границ раздела фаз, требует, как правило, учета масштабных эффектов и развития моделей деформирования. Вместе с тем, характерной особенностью моделей сред с внутренними степенями свободы как раз и является возможность учета и описания подобных эффектов.

С одной стороны, в настоящее время имеются достаточно проработанные модели сред с полями дефектов, градиентные модели сред, позволяющие адекватно моделировать неоднородные структурированные материалы. С другой стороны, существует огромная база знаний по подходам к решению задач МДДТ, разработанная для классических сред, в том числе и по описанию свойств функционально-градиентных материалов, переходных слоев в них, в которых из-за несоответствия структур материалов матрицы и включений содержится большое число ее повреждений. Связь между ними позволяет воспользоваться преимуществами обоих способов.

Первую главу автор диссертации посвящает обзору работ по моделированию неоднородных структур. При этом автор диссертации обращает внимание на степень адекватности той или иной модели, оценку возможности ее практического применения. Специальное внимание уделяется моделированию пористых сред, а также материалов с субмикронными и нано размерными внутренними структурами, в которых для повышения прочности применяются нано вискерсы.

Учитывая большое разнообразие моделей, описывающих композиционные, структурно неоднородные материалы, автор диссертации делает заключение, определяющее дальнейшую структуру диссертации, представленные в ней рассуждения, их результаты. В общем случае, наличие в материале дефектности и различных включений приводит к тому, что для корректного решения конкретной задачи и учетов концентраторов напряжений вводятся неклассические модели материала. Однако может возникнуть проблема: перейти к квазиклассическим средам или использовать преимущества неклассических моделей и решать задачу более высокого порядка. Первый способ приводит к необходимости установки корректных подходов для осуществления такого перехода, т.е. вывод энергетически эквивалентных соотношений. Применение второго подхода, т.е. неклассических моделей связано с наличием масштабного параметра.

Вторая глава посвящена обзору и анализу неклассических модели сред с полями дефектов и градиентных моделей сред.

Отмечается особенности, которые способны описать эти модели - локализация свойств в окрестности границы раздела фаз, местах смены граничных условий, иных точках и линий возмущений, трактовка пограничных слоев в окрестностях границы раздела фаз как зон повреждений, вызванных локализацией полей дефектов или градиентных масштабных эффектов. В общем случае свойства таких функциональных межфазных слоев с

переменными свойствами зависят от координат, а также от условий нагружения и краевых условий. При этом подчеркнута, что классическая механика сплошной среды не может в принципе описать масштабные эффекты. Предлагается говорить о возможности эквивалентной трактовки однородных сред, локализованное деформированное состояние которых описывается в рамках обобщенных моделей деформирования и сред с переменными свойствами - функциональных сред, описываемых в рамках классической теории упругости.

Отмечено, что обобщенные теории упругости даже для изотропных материалов включают много дополнительных физических постоянных, экспериментальное определение которых затруднено или вовсе невозможно. В связи с этим значительный интерес представляют прикладные теории с малым числом дополнительных физических параметров.

Во второй главе представлены рассуждения, позволяющие выбрать или построить тот или иной вид модели сред с полями дефектов и градиентные модели сред на основании анализа кинематики моделируемой среды с помощью кинематического вариационного принципа.

В этой же главе представлены теоремы об энергетической эквивалентности моделей градиентных сред и неоднородных сред, описываемых классической теорией упругости, рассуждения по определению эффективных модулей упругости, соотношений эквивалентности. При их проведении используется представление о тензоре поврежденности, компоненты которого используются в качестве промежуточных переменных вместо компонентов тензора свободной дилатации.

В третьей главе рассмотрен вариационный подход построения корректной модели пористых сред в рамках модели Миндлина. Дефектные градиентные среды были сведены к моделям классической неоднородной среды с переменными по координатам свойствами. В ходе построения решения устанавливается система определяющих соотношений и формулируется согласованная постановка краевой задачи. В общем случае предложенный метод позволяет определить зависимость свойств от вида напряженного состояния, т.е. учесть эффекты накопления повреждений. Решение поставленной задачи осуществляется на основе градиентной модели сред с сохраняющимися дефектами. В ходе построения решения определяются эффективные упругие характеристики, которые по своим значениям меньше, в силу наличия поврежденности. Для этого исследуется проблема эквивалентности предлагаемой модели среды и классической теорией упругости путем приведения вариационной постановки среды с поврежденностью к вариационной постановке классической теории упругости. Построены и исследованы дисперсионные соотношения колебаний пористого стержня, представлены примеры расчета дисперсионных законов для различных значений объемного содержания пор.

В четвертой главе приведены примеры диссертации и анализ полученных результатов, иллюстрирующие влияние масштабного параметра на эффективные свойства для широкого спектра неоднородностей. 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 композитов с цилиндрическими и, в общем случае, многослойными волокнами. 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 автор диссертации отмечает, что проведение его исследовательской работы обусловлено непрерывно возрастающей потребностью в разработке и уточнении моделей сред с нано- и микроструктурными элементами для применения их в механике, материаловедении и др. научных областях. В связи с недостаточной точностью наиболее распространенных математических моделей расчета характеристик неоднородных структур в применении к нано- и микросистемам в данной работе предлагается использовать градиентные модели. В диссертации проведен обзор наиболее распространенных на текущий момент моделей сред: теории Тупина и ее частных случаев, теории Миндлина и ее частных случаев. Выявлен ряд достоинств и недостатков каждой модели в применении к расчетам характеристик нано- и микросистем. Здесь же представлены наиболее существенные конкретные результаты и выводы, полученные на основании проделанной работы.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается тем, что они основаны на точных аналитических решениях, не противоречат физическому смыслу и находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами, а также тем, что при их получении использованы хорошо апробированные строгие математические подходы и методы вариационного и тензорного исчисления, механики деформируемого твердого тела.

Научная новизна результатов диссертации. Предложенное К.Д. Харченко применение моделей сред с внутренними степенями свободы для описания свойств функционально-градиентных сред, обоснование этого предложения, являются новыми и оригинальными, имеют важное научное значение для механики деформируемого твердого тела, в частности при построении математических моделей переходных слоев в функционально-градиентных материалах.

Практическая значимость результатов диссертации состоит в найденной и теоретически обоснованной возможности исследовать и проектировать функционально-градиентные материалы на основании обобщенных неклассических моделей сплошных сред с использованием классических представлений, моделей и экспериментов для градиентных поврежденных сред.

Научная новизна результатов, их практическая значимость подтверждены их **апробацией** при обсуждении на представительных конференциях и семинарах.

Основные результаты диссертационной работы апробированы на:

- 2-й Всероссийской научной конференции «Механика наноструктурированных материалов и систем». Москва, 17 - 19 декабря 2013г.;
- Международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». Москва, 10 - 13 ноября 2014 г.;
- Второй международной конференции «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций». Москва. 18 - 20 октября 2016г.

Все результаты, составляющие научную новизну и выносимые на защиту, **получены автором диссертации лично.**

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Язык изложения материала в диссертации грамотный, понятный. Изложение логически стройно и последовательно.

Замечания.

1. Автор не стал формулировать общую цель своей диссертационной работы, достижению которой подчинены рассуждения и математические построения, представленные в диссертации.
2. Сказав «”кинематический” вариационный принцип...» надо сделать ссылку на работы его автора, в которых он введен.
3. Прежде, чем делать обзор работ по проблеме моделирования неоднородных структур, необходимо было дать определения функционально-градиентного материала, исследованию которого посвящена работа, и градиентной модели упругой среды, отметить, что, не смотря на использование в обоих случаях термина «градиент», речь

идет о разных вещах. В связи с этим, наряду с обзором градиентных моделей упругой среды, необходимо было сделать обзор моделей функционально-градиентных материалов и обосновать выбор градиентной модели упругой среды для описания свойств функционально-градиентных материалов в данной работе.

4. В обзоре говорится о том, что «Начало развития градиентных теорий упругости следует связывать с работами Тупина и Миндлина [1-3]». А как же работы Леру, Джеремилло (теорию последнего автор анализирует).
5. Автор диссертации при обзоре неклассических моделей сред с полями дефектов (глава 2) допускает использовать цитаты из других работ без соответствующего оформления.
6. Достоверность полученных результатов желательно подтвердить еще и совпадением полученных автором диссертации с результатами, полученных другими авторами в схожих ситуациях теоретически – на основании других математических моделей явления, или экспериментально.
7. Говоря о том, что при наличии в среде дефектов деформационное состояние среды наряду с тензором стесненных дисторсий определяется еще тензором свободных дисторсий, было бы уместно показать, каким образом тензор свободных дисторсий связан с другими характеристиками дефектности упругой среды, используемыми при ее описании, например, вектором Бюргерса, скалярными и тензорными характеристиками поврежденности. Было бы уместно также обосновать введение тензора относительной поврежденности, который автор использует при доказательстве теорем об энергетической эквивалентности, совпадает ли авторское представление об этом тензоре с имеющимися в литературе представлениями, например, с представлениями Ю.Н. Радаева, используемыми им в теории пластичности.
8. При постановке задач и обсуждении их решений целесообразно было бы шире использовать иллюстрационный графический материал. Это способствовало бы их лучшему пониманию.
9. Автор диссертации допускает грамматические неточности типа «...обобщенная задачи Эшелби...» (страница 106), «Из уравнение (4.25) определяем классические перемещения U_m » (страница 109), «В случае сдвига под модулями Юнга понимаются модули сдвига», «Плотная плотность».
10. В разделе 4.1 при постановке задачи для лучшего понимания уместно было описание структуры стержня сопроводить рисунком.
11. Из примеров расчетов в разделе 4.1 не ясно, какому реальному материалу они соответствуют. Необходимо было указать цель примера.
12. Получив определенный результат, автор диссертации не всегда подчеркивает его соответствие известным представлениям.

Перечисленные замечания не снижают ценности полученных автором диссертации результатов, их строгости, достоверности, научной и практической значимости. Их подчеркивание необходимо для повышения уровня понимания рецензируемой работы и ее результатов, носит рекомендательный характер.

Проведенный анализ диссертационной работы Кирилла Дмитриевича Харченко с учетом обнаруженных недостатков позволяет сделать следующее заключение.

Заключение

Диссертация Харченко Кирилла Дмитриевича является соответствующей п. 9 Положения ВАК законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как решение научной задачи, имеющей важное хозяйственное значение, посвященной исследованию на основании линейной теории упругости сплошных сред, обладающих внутренними степенями свободы, влияния микро и нановключений, а также особенностей микроструктуры композиционного материала,

связанных с малым размером включений и большой плотностью границ раздела фаз, на осредненные характеристики его упругих свойств, поврежденности, прочности, и решению на ее основе практически важных задач механики деформируемого твердого тела, механики композиционных материалов по учету масштабных эффектов и развития моделей деформирования, с помощью которых устанавливается связь механических свойств материала с характерными размерами его микроструктуры.

Автореферат оформлен в соответствии с установленными требованиями и полностью отражает суть диссертационной работы. Основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

Выше изложенное позволяет сделать вывод о том, что диссертационная работа на тему "Исследование функционально-градиентных свойств сред с полями дефектов" удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор Харченко Кирилл Дмитриевич заслуживает присуждения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Доктор физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела, профессор по кафедре «Физика», ведущий научный сотрудник, профессор кафедры «Техническая физика» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева», ул. Комсомольская д. 95, Орловская область, г. Орел, 302026 Российская Федерация, каф. «Техническая физика». Контактный телефон: 8 (486) 2 41 98 44 Email: VShorkin@yandex.ru

Шоркин
Владимир
Сергеевич

«Подпись Владимира Сергеевича Шоркина заверяю» проректор по научно-технологической деятельности аттестации научных кадров Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева».



Радченко
Сергей
Юрьевич

13.12.2017 *Turkin*