

## ОТЗЫВ

оппонента на диссертационную работу Харченко Кирилла Дмитриевича «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»

### **Актуальность исследований. Объект и предмет исследований.**

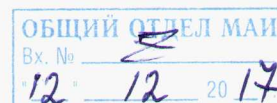
В последние десятилетия появились технологии, позволяющие конструировать перспективные материалы с заранее заданными свойствами. Но для их промышленного производства необходимо уметь теоретически проектировать новые материалы с нано- и микроструктурными включениями и разрабатывать технологии их изготовления, что невозможно без моделей, адекватно описывающих физические и механические свойства таких материалов, в том числе и с учетом масштабных эффектов. Наиболее распространенные в настоящее время математические модели расчета характеристик неоднородных структур в применении к нано- и микросистемам недостаточно точны. Таким образом, возникает необходимость разработки фундаментальных основ учета существенно неклассических эффектов, связанных с влиянием характерных размеров структуры неоднородных сред на эффективные физико-механические свойства микро- и наноструктурированных материалов.

На решение этой задачи и направлены исследования, проводимые в данной диссертационной работе. Исходя из вышеизложенного, **актуальность** таких исследований сомнений не вызывает.

### **Цель и задачи диссертационной работы.**

В настоящее время для неоднородных структурированных материалов имеются хорошо апробированные модели сред с полями дефектов и градиентные модели сред. С другой стороны, существует огромная база знаний по подходам к решению задач механики деформируемых твердых тел, разработанная для классических сред. Цель данной диссертационной работы заключается в установлении связи между этими двумя подходами, которая позволила бы воспользоваться преимуществами обоих подходов. Для выполнения намеченной цели в диссертационной работе были поставлены следующие задачи:

- Получение соотношений эквивалентности, предполагающих трактовку сред с полями дефектов как изотропных сред с переменными характеристиками (межфазных слоев с переменными свойствами).
- Получение явных соотношений для оценки переменных характеристик функционально-градиентных сред по решению, найденному для пористых сред.
- Построение модели эффективных классических функционально-градиентных сред, описывающей эффекты деградации свойств материала ввиду наличия рассеянных повреждений - пор.



- Решение задачи о растяжении составного стержня и задачи одно- и двухосного растяжения пористого стержня, исследование дисперсионных свойств колебаний пористого стержня.
- Определение эффективных свойств композиционных материалов с наноструктурированными волокнами.

Со всеми поставленными задачами диссертант успешно справился.

Все основные результаты диссертации являются **новыми**; они опубликованы в рецензируемых журналах из перечня ВАК, а также апробированы на всероссийских и международных научных конференциях.

**Новизна полученных результатов** заключается в следующем:

1. Доказано, что для сред с локализованными полями дефектов, свойства которых в рамках моделей Миндлина определяются эволюцией полей дефектов, справедлива альтернативная трактовка, позволяющая описывать материал, поврежденный дефектами, как эквивалентный изотропный функционально-градиентный материал с переменными по координатам свойствами, моделируемый в рамках классической теории упругости.
2. 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, т.е. фактически предложена математическая модель поврежденности с тензорным параметром. Установлены явные соотношения, позволяющие по решениям, найденным для сред с полями дефектов и градиентных сред, определить эффективные свойства функционально-градиентной изотропной среды.
3. Получены аналитические соотношения, позволяющие по накопленной поврежденности за счет дефектов определить эффективные характеристики эквивалентного изотропного материала.

**Достоверность полученных результатов и выводов** обосновывается

- использованием хорошо апробированных строгих математических подходов механики сплошных сред, прикладной теории упругости, вариационных методов и методов уравнений математической физики;
- сопоставлением полученных в диссертации теоретических результатов с тестовыми аналитическими решениями частных задач и результатами, полученными другими авторами;
- непротиворечивостью полученных результатов физическому смыслу явлений, связанных с деформированием сред.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в установлении энергетической эквивалентности между обобщенными средами с полями дефектов и



градиентными средами, а также изотропными классическими средами, но с переменными по координатам характеристиками. В результате, к средам с полями дефектов и градиентным средам могут быть применимы методы оценки прочности, поврежденности и разрушения, хорошо апробированные в рамках теории упругости и механики разрушения.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Алгоритм построения соотношений, позволяющих трактовать среды с полями дефектов, как эквивалентные неоднородные изотропные материалы с переменными по координатам свойствами.
2. Аналитические соотношения, позволяющие по решению, полученному для пористой среды, определить эффективные характеристики эквивалентной изотропной среды с функционально-градиентными свойствами.
3. Алгоритм, позволяющий вычислить компоненты переменного по координатам тензора адгезионных модулей четвертого ранга.
4. Решение задачи определения эффективных характеристик эквивалентного изотропного функционально-градиентного материала.

**Общая характеристика работы.** Текст диссертации изложен на 142 страницах и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 123 наименований, 7 приложений; содержит 25 рисунков и 1 таблицу.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, отмечена степень разработанности темы исследования, сформулированы цели и задачи диссертационной работы, показана ее научная новизна, раскрыта ее теоретическая и практическая значимость, описаны методология и методы исследования, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность полученных результатов, а также указана апробация работы.

**Первая глава** диссертации глава представляет собой не разделенный на параграфы обзор работ по моделированию неоднородных структур. В этой главе рассматривается применение градиентной теории упругости к различным прикладным задачам механики деформируемых тел и смежных областей. В частности, рассмотрены работы, посвященные изучению влияния масштабных эффектов на упругие свойства композиционных материалов. В некоторых работах в качестве особой формы дополнительного упрочнения материала рассматривалась вискеризация, т.е. добавление наноусов в композиционный материал путем их непосредственного выращивания на поверхности углеродных волокон, и анализировалось влияние вискреизации на свойства межслоевой адгезии. Кроме того, в обзоре были отмечены работы, в которых получены численные решения статических и динамических задач дилатационной теории упругости, а также работы, в которых была проведена экспериментальная оценка для возможных значений дополнительной материальной постоянной дилатационной теории - параметра связанности.

**Вторая глава** посвящена рассмотрению неклассических моделей сред с полями дефектов и градиентных моделей сред. Предложено разделение существующих градиентных теорий на две группы. В первую входят теории Тупина, Аэро-Кувшинского и Джеремилло. Во вторую – теории Миндлина, Коссера и сред с сохраняющимися дислокациями (ССД).

Первая группа характеризуется тем, что все теории этой группы построены на основе классической кинематической модели – каждой точке среды эти теории приписывают три степени свободы – компоненты вектора перемещений. Соответственно, и уравнений равновесия в этих теориях три.

Теории второй группы построены на основе неклассической кинематической модели. Каждой точке среды эти теории приписывают дополнительные степени свободы: в теории Коссера – это три компоненты псевдовектора свободных поворотов, а в теории Миндлина и в теории ССД – три компоненты псевдовектора свободных поворотов и шесть компонент тензора свободных деформаций. Соответственно, и уравнений равновесия в этих теориях больше: в теории Коссера – шесть, в теориях Миндлина и ССД – двенадцать.

Теория Тупина является наиболее общей теорией первой группы и содержит теории Аэро-Кувшинского и Джеремилло как свои строгие частные случаи. Теория Миндлина является наиболее общей теорией второй группы и содержит теорию Коссера и теорию ССД как свои строгие частные случаи. Таким образом, имеется возможность проводить сравнительный анализ групп, сравнивая теории Тупина и Миндлина, как максимально общих теорий в своих группах.

В рамках полученной общей модели доказана теорема о сводимости любой градиентной модели дефектной среды к неоднородной градиентной модели неповрежденной среды.

На основании последовательно доказанных теорем модели градиентной дефектной среды были сведены к модели бездефектной градиентной среды, а та, в свою очередь, была сведена к модели классической неоднородной среды. В результате появилась возможность численными методами, разработанными для классических сред, исследовать напряженно-деформированное состояние как градиентных бездефектных, так и градиентных дефектных сред.

Важнейшим результатом второй главы является разработка математической модели поврежденности с тензорным параметром, в рамках которой тензор эффективных модулей упругости изотропной среды определяется явно по решению краевой задачи для обобщенной среды с полями дефектов через тензор поврежденности второго ранга.

В **третьей главе** диссертационной работы рассматривается вариационный подход построения корректной модели пористых сред в рамках модели Миндлина. Дефектные градиентные среды сводятся к моделям классической неоднородной среды с переменными по координатам свойствами. Полученные аналитические соотношения позволяют по накопленной поврежденности за счет дефектов определить эффективные характеристики пористого материала. Приведен алгоритм, позволяющий на основе вариационного принципа получать математические формулировки моделей с усложненной кинематикой.



Проведен анализ дисперсионных свойств колебаний пористого стержня, который показал, что пористая среда может стать «непроницаемой» для распространения волн любой длины.

В **четвертой главе** рассмотрены примеры с численными результатами, 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 многопараметрическом нагружении. Решение задачи с вискеризованным слоем позволяет получать оценки для эффективных свойств составных структур при любых однородных состояниях на бесконечности.

В **заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования.

#### **Замечания по диссертации**

1. Содержание первой главы не разбито на параграфы, хотя по сути написанного здесь имело смысл выделить 3-4 раздела.

2. Основной материал диссертации, к сожалению, очень неравномерно распределен по главам: вторая глава занимает 51 страницу, в то время как первая и третья вместе – всего лишь 33 страницы. На мой взгляд, первые 2 параграфа 2-й главы, содержащие обзор имеющихся градиентных моделей и неклассических моделей сред с полями дефектов, более логично перенести в 1-ую главу, где представлен обзор работ по моделированию структурно-неоднородных сред.

3. В п. 2.1 на стр. 25 сказано: “Классическая механика сплошной среды не может в принципе описать масштабные эффекты. Эта ситуация, несомненно, **ограничивает возможности моделирования** аномальных свойств новых материалов с внутренними структурами (нанокompозитов, наноустройств, тонких пленок и т.д.)” После главы 1, где были описаны многочисленные обобщения классической теории упругости, фраза про ограниченные возможности моделирования материалов выглядит неуместной.

4. В формулах (1.3) и (1.4) присутствуют параметры  $\delta_1$  и  $\delta_2$ , но не расшифровывается, что это за параметры.

5. На рис. 1.1 (стр. 15) графики для относительного коэффициента концентрации напряжений построены при значениях  $b=1$ ,  $b=5$ ,  $b=10$ , но не дается пояснений, что из себя представляет параметр  $b$ .

6. В п. 3.5. где исследуются дисперсионные свойства колебаний пористого стержня, были построены графики 3.1 и 3.2 для разных частных случаев, но на первом из этих рисунков по оси ординат отложена частота, а на втором – квадрат частоты, что нелогично. Кроме того, на рисунке 3.2 при малых значениях пористости кривые монотонно возрастают с ростом волнового числа, в то время как при больших

значениях пористости кривые имеют точку минимума. Однако в анализе данного рисунка (стр. 90) об этом нет ни слова.

7. На той же стр. 90 сделана попытка исследовать и 3-й частный случай дисперсионных свойств стержня, но эта попытка неожиданно оборвалась на формуле (3.58) - после нее в п. 3.5 нет ни графика, ни какого-либо анализа этого случая.

8. Неудачно сформулирован один из выводов по главе 3: “Проведены **изыскания** дисперсионных **соотношений** для пористого стержня”. Слово “изыскания” следует заменить на “исследования” или “анализ”.

9. Весьма неаккуратно сформулирован следующий результат диссертации на стр. 118: “Установлено, что пористая среда может быть фильтром для **распространения** определенных **длин** волн”. Здесь, очевидно, подразумевается **распространение волн** определенной длины.

10. Основной текст диссертации содержит очень много пунктуационных ошибок – они встречаются практически на каждой из 115 страниц.

Тем не менее, перечисленные замечания не снижают научной ценности диссертации и не ставят под сомнение полученные результаты.

#### **Заключение официального оппонента**

Диссертация Харченко К.Д. представляет собой законченную научно-исследовательскую квалификационную работу. Она написана грамотным научным языком и хорошо оформлена. Работа выполнена на актуальную тему и обладает научной новизной. В ее рамках разработан фундаментальный подход к моделированию структурно-неоднородных сред с учетом существенно неклассических эффектов, обусловленных влиянием характерных размеров структуры среды на ее эффективные физико-механические свойства.

Основные положения и результаты диссертации являются новыми и достоверными, выводы обоснованы. По результатам диссертации сделаны 3 доклада на российских и международных конференциях, а также опубликованы 3 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК.

Результаты диссертации имеют существенное значение для использования хорошо апробированных в рамках теории упругости и механики разрушения методов оценки прочности, поврежденности и разрушения материалов применительно к средам с полями дефектов, моделирование которых в рамках классических теорий невозможно.

Автореферат диссертации отражает основное содержание диссертационной работы и оформлен в соответствии с требованиями ВАК, стиль и порядок изложения способствуют пониманию содержания диссертационной работы.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) для ученой степени кандидата наук, а ее автор К.Д. Харченко достоин присуждения ученой степени кандидата



физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Я, Павлов Игорь Сергеевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент

Заместитель директора по научной работе

Института проблем машиностроения РАН – филиала

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук»,

доктор физико-математических наук, доцент  Павлов Игорь Сергеевич

603024, г. Нижний Новгород, Белинского ул., д. 85

Тел./факс (831) 432-03-00 e-mail: [ispavlov@mail.ru](mailto:ispavlov@mail.ru)

11 декабря 2017 года

Подпись И.С. Павлова заверяю.

Ученый секретарь Института проблем машиностроения РАН – филиала

Федерального государственного бюджетного научного учреждения

«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики

Российской академии наук»,



Мотова Елена Алексеевна

13.11.2017 