

В диссертационный совет Д212.125.05
Московского авиационного института
(государственного технического университета)
125993, г. Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д.4.

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Белова Петра Анатольевича

«Математическая теория дефектных сред»,

представленной на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук по специальности

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Повышенный интерес механиков к таким объектам как фуллерены, нанотрубки, керамики, коллоидные системы вызван уникальными возможностями создавать искусственные материалы с экстремальными механическими свойствами. Перечисленные объекты характерны тем, что их механические свойства существенным образом проявляют масштабные эффекты. Как известно, классическая механика сплошной среды не может в принципе описать масштабные эффекты, что обусловило цель диссертации Белова П.А. – формулировка спектра линейно упругих градиентных теорий упругости, способных описать масштабные эффекты. С этой точки зрения актуально развитие модели деформирования сред с учетом масштабных эффектов, в основе которых заложен факт существования дефектов сплошности, таких как дислокации, дисклинации и дефекты более высокого ранга. В работе описание изолированных дефектов типа дислокаций заменено полевым представлением. Реализация такого подхода позволила соискателю развить механику дефектных сред как некоторое обобщение классической механики деформируемых сред.

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, восьми приложений и списка литературы.

Во введении обосновывается актуальность научных исследований, изложенных в диссертации. Сформулированы: цель исследования; научная новизна; теоретическая и практическая ценность работы. Во введении также изложено краткое содержание работы.

В первой главе приведены постановки и математические модели известных градиентных теорий. Проведен их сравнительный анализ. Постулирована модель, которая является их обобщением.

Во второй главе сформулирована полевая теория дефектов произвольного ранга. Как её частный случай рассмотрены кинематические модели дефектных и бездефектных сред. Введено понятие поля дефектов N -го ранга. Введены новые понятия в полевой теории дефектов, такие как ранг, сорт, тип, глубина дефектности. Дано определение «нового» объема и «новой» поверхности на основе понятия «разрыхления». Введено понятие и дано определение «поверхности Бюргерса».

В третьей главе изложены алгоритмы построения моделей дефектных и бездефектных сред с помощью «кинематического» вариационного принципа. «Кинематический» вариационный принцип требует дополнительной формулировки структуры потенциальной энергии, что с необходимостью приводит к появлению тензоров упругих модулей разной размерности, отражающих механические и физические свойства среды.

В четвертой главе дана вариационная формулировка модели градиентных дефектных сред. Показано, что известные градиентные теории являются частными случаями полученного обобщения. Причем частные случаи получены путем упрощения структуры тензоров модулей. Это позволило предложить формальное пространство моделей, каждому измерению которого соответствует некоторый модуль упругости, а координате в этом направлении соответствует величина этого модуля. С учетом того, что среди модулей упругости имеются модули разной размерности, показано, что Лагран-

жиан градиентных теорий можно представить как конечное степенное разложение по малому параметру – характерной длине масштабных эффектов.

В пятой главе даны вариационные формулировки градиентных моделей различной сложности. Исследована структура систем дифференциальных уравнений равновесия, построены фундаментальные решения, пояснен физический смысл модулей упругости, фигурирующих в уравнениях равновесия. Дано определение когезионных взаимодействий, когезионных перемещений. Даны трактовки и толкование физического смысла когезионных модулей упругости, являющихся компонентами изотропных тензоров модулей четвертого и шестого ранга.

В шестой главе исследованы адгезионные взаимодействия на поверхности тела. Дано определение адгезионных взаимодействий. Даны трактовки и толкование физического смысла модулей упругости, являющихся компонентами трансверсально-изотропных тензоров адгезионных модулей четвертого, пятого и шестого рангов. Дополнительные поверхностные (адгезионные) взаимодействия приводят к усложнению картины силовых взаимодействий на поверхности тела.

В седьмой главе даны объяснения некоторым известным неклассическим эффектам.

1. Объяснен эффект Мивы – аномальное с точки зрения классической механики сплошной среды усиление эффективного модуля композита с уменьшением размера армирующих частиц при фиксированной их объемной доле.
2. Дано математическое обоснование гипотез осреднения в теории мелкодисперсных композитов. Все они представлены как различные формы одного и того же неклассического решения.
3. Сформулирована прикладная теория межфазного слоя и предложены алгоритмы определения механических свойств межфазных слоёв. Показана эволюция идеи межфазного слоя от «гипотезы третьей фазы» до градиентной теории межфазного слоя. Доказано, что межфазный слой не имеет определенной геометрической границы и не обладает фиксированными механиче-

скими свойствами. Наоборот, доказано, что он является областью локализации краевых и разномасштабных эффектов, возникающих в окрестностях поверхностей, линий и точек возмущения. Сформулирована теория переменности механических свойств межфазных слоев и объяснены их обратимые физически нелинейные свойства. На её основе открывается возможность прогнозировать не только жесткостные, но и прочностные свойства композиционных материалов.

4. Объяснен эффект Одегарда на длинных волокнах – аномальное увеличение эффективного модуля нанокомпозита с увеличением длины армирующих нанотрубок при их фиксированной объемной доле. Эффект определяется адгезионными взаимодействиями на поверхностях контакта нанотрубок и матрицы.

5. Объяснен эффект Одегарда на коротких волокнах – аномальное увеличение эффективного модуля нанокомпозита с увеличением длины армирующих нанотрубок при их фиксированной объемной доле. Эффект определяется когезионными взаимодействиями в межфазном слое матрицы, примыкающем к поверхности контакта нанотрубки и матрицы.

6. Объяснен эффект «супержесткости» тонких пленок при стремлении толщины пленки к нулю. Эффект определяется адгезионными свойствами лицевых поверхностей пленок.

7. Сформулирована теория механических свойств графена и графеноподобных 2D- кристаллических структур.

8. В теории трещин дано математическое обоснование гипотезе Баренблатта о существовании несингулярной трещины. Исследованы свойства несингулярных трещин, установлены параметры, характеризующие их неклассические свойства.

9. В механике хрупкого разрушения предложено обобщение критерия Гриффитса. Помимо энергии образования новой поверхности, установлены иные стоки высвобождающейся упругой энергии: энергия образования нового объема, энергия дислокационной поврежденности поверхности, энергия

дислокационной поврежденности объема. Установлены внутренние структуры этих энергий, определяемые различными свойствами полей дислокаций. Установлены параметры материала (модули), определяющие эти свойства.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях исследованы структуры изотропных тензоров когезионных модулей четвертого и шестого рангов, а также трансверсально-изотропных тензоров адгезионных модулей четвертого, пятого и шестого рангов. Предложены алгоритмы построения таких тензоров. Исследованы различные гипотезы, приводящие к обоснованному сокращению количества модулей, подлежащих экспериментальному определению.

Список литературы состоит из 128 наименований.

Достигнута **цель исследования** - обоснование и формулировка моделей дефектных сред (сред с полями сохраняющихся дислокаций) и идеальных (бездефектных) сред.

Научная новизна:

- построена общая кинематическая теория полей дефектов, дана их классификация и исследованы их свойства и индивидуальные особенности, т.е. *построена кинематическая модель среды;*
- сформулирован и применен к построению моделей дефектных сред «кинематический» вариационный принцип, который позволяет для линейных моделей однозначно определить спектр силовых взаимодействий, вывести формулы Грина, сформулировать уравнения обобщенного закона Гука, т.е. *построена силовая модель среды.*
- развиты модели сред с полями сохраняющихся дислокаций;
- сформулирован спектр моделей «бездефектных» градиентных сред.

Теоретическая ценность работы заключается в том, что дано объяснение известных масштабных эффектов в рамках сформулированной механики дефектных сред.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные в диссертации модели, методы и алгоритмы могут быть рекомендованы

для проектных и научно-исследовательских организаций, занимающихся разработкой новых материалов.

Достоверность и обоснованность приведенных в работе положений, выводов и рекомендаций обусловлена применением классических методов: вариационным методом построения моделей, применением тензорной алгебры и тензорного анализа, прямых вариационных методов и методов уравнений математической физики при решении тестовых задач. Для сравнения предсказаний теории с экспериментом использованы экспериментальные данные из публикаций независимых источников.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации, основные результаты работы опубликованы в более семидесяти публикациях, в том числе в реферируемых иностранных журналах и в отечественных журналах из списка ВАК. По результатам исследований опубликованы 2-е монографии.

Замечания по диссертационной работе:

1. В четвертой главе сформулированы модели «антисимметрично градиентной адгезии», «симметрично градиентной адгезии» и «упрощенной градиентной адгезии», которые в дальнейшем в работе не использовались.
2. В шестой главе не сформулирована модель «идеальной среды Тупина с идеальной и градиентной адгезией поверхностей», использованная в седьмой главе для исследования механических свойств 2D-структур типа графена.
3. Представляется, что первое приложение к диссертации не имеет научной новизны и интересно только как иллюстративный пример техники построения тензоров модулей.
4. В Приложениях мало внимания уделено тем базисным тензорам и модулям, которые отражают диссипативные свойства (не удовлетворяют требованию существования потенциальной энергии).
5. В диссертации, в качестве приложений, отсутствуют акты внедрения результатов, полученных в диссертационной работе, в Учреждении Российской Академии Наук Институте Прикладной механики РАН,

Московском Государственном Техническом Университете им. Баумана, Воронежском Государственном Университете, государственной корпорации «РосТехнологии».

Замечания, в целом, не влияют на положительную оценку работы.

Диссертационная работа Белова П.А. представляет собой исследование, посвященное решению актуальной проблемы, апробирована на уровне международных научных конференций и симпозиумов. Она является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор Белов Петр Анатольевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук, профессор,
заведующий лабораторией «Механика наноструктур»
Федерального государственного бюджетного
Учреждения науки

Институт механики УрО РАН

А.В. Вахрушев

25.08.2014г.

426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34

Телефон: +7(3412)21-45-83

E-mail: vakhrushev-a@yandex.ru

Подпись Вахрушева А.В. удостоверяю

Ученый секретарь ИМ УрО РАН

К.ф.-м.н.



А.В. Северюхин