

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
о диссертации 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

Объект диссертационного исследования – линейные градиентные теории упругости, способные описать масштабные эффекты. Имеется достаточно большой ряд экспериментальных фактов, фиксирующих существование масштабных эффектов в сплошных средах. Как известно, классическая механика сплошной среды не может в принципе описать масштабные эффекты. С этой точки зрения **актуально** развитие модели деформирования сред с учетом масштабных эффектов, связанных с существованием в сплошной среде неоднородностей масштаба 10^{-9} м. В основание таких моделей 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 развить механику дефектных сред как некоторое естественное 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 - обоснование и формулировка спектра моделей дефектных сред (сред с полями сохраняющихся дислокаций) и идеальных (бездефектных) сред;

научная новизна:

- построена общая кинематическая теория полей дефектов, дана их классификация, исследованы их общие свойства и индивидуальные особенности, т.е. *построена кинематическая модель среды;*

- сформулирован и применен к построению моделей дефектных сред «кинематический» вариационный принцип; выбранная кинематическая модель дефектной среды, позволяет для линейных моделей однозначно определить спектр силовых взаимодействий, вывести формулы Грина, сформулировать уравнения обобщенного закона Гука, т.е. *построена силовая модель среды*.

- сформулирован спектр моделей сред с полями сохраняющихся дислокаций, часть из них сопоставлена с уже известными моделями;

- сформулирован спектр моделей «бездефектных» градиентных сред, часть из них сопоставлена с уже известными моделями.

теоретическая ценность заключается в том, что дано теоретическое объяснение достаточно большого круга известных масштабных эффектов в рамках сформулированной механики дефектных сред

практическая ценность работы заключается в том, разработанные в диссертации модели, методы и алгоритмы могут быть рекомендованы для проектных и научно-исследовательских организаций. Результаты, полученные в диссертационной работе, используются в Институте прикладной механики РАН, Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана, Воронежском государственном университете, Государственной корпорации «Ростехнологии».

В первой главе приведены постановки и математические модели известных градиентных теорий. Все модели сформулированы с помощью вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, в единых обозначениях, и проведен их сравнительный анализ, позволивший постулировать обобщение этих моделей.

Во второй главе сформулирована полевая теория дефектов произвольного ранга. Так широко понимаемая кинематическая сторона механики позволила:

1. Ввести более широкий спектр полей кинематических переменных.
2. Наряду с непрерывными полями кинематических переменных ввести поля, описываемые разрывными функциями, что позволило не только дать трактовки известным полям дефектов, но и предсказать существование новых. Предложить формальную математическую и наглядную физическую классификацию полей дефектов.
3. Ввести новые понятия в полевой теории дефектов, такие как ранг, сорт, тип, глубина дефектности.
4. Ввести новые определения образования нового объема и новой поверхности на основе понятия «разрыхления».

5. Ввести понятие поверхности Бюргерса и дать алгоритм вычисления координат, ориентации и моды обратимой микротрещины,

В третьей главе изложены алгоритмы построения моделей дефектных и бездефектных сред с помощью «кинематического» вариационного принципа. Представляется, что эта глава имеет формально-математический, вспомогательный характер.

В четвертой главе дана вариационная формулировка постулированного в первой главе обобщения модели градиентных дефектных сред. Показано, что все известные градиентные теории являются частными случаями полученного обобщения. Причем все частные случаи получены путем упрощения структуры тензоров модулей. Это позволило предложить формальное пространство моделей, каждому измерению которого соответствует некоторое механическое свойство (модуль упругости), а координате в этом направлении – величина этого модуля. С учетом того, что среди модулей упругости имеются модули разной размерности, модули одинаковой размерности естественным образом формируют соответствующие подпространства во введенном пространстве моделей. Показано, что потенциальную энергию и лагранжиан градиентных теорий можно представить как конечное степенное разложение по малому параметру – характерной длине масштабных эффектов.

Нулевое приближение соответствует классической механике и «алгебраической» теории дефектных сред. В рамках подпространства этих моделей масштабные эффекты естественным образом отсутствуют.

Первое приближение соответствует учету адгезионных взаимодействий на поверхности тела. В рамках подпространства этих моделей масштабные эффекты являются наиболее существенными.

Второе приближение соответствует учету когезионных взаимодействий. В рамках подпространства этих моделей в научной литературе масштабные эффекты изучены наиболее полно. Однако ценность этих исследований должна быть подвергнута ревизии с точки зрения игнорирования адгезионных взаимодействий, которые могут вносить в энергию более весомый вклад.

Третье приближение соответствует моделям градиентных адгезионных взаимодействий. В рамках подпространства этих моделей соискателю удалось дать объяснение масштабным эффектам в таких 2D-структурах как графен и одностенные нанотрубки (SWNT).

В пятой главе даны вариационные формулировки моделей когезионных взаимодействий в предположении, что адгезионные свойства поверхности тела отсутствуют. Такое предположение дало соискателю возможность сосредоточиться на исследовании структуры систем дифференциальных уравнений равновесия, построению фундаменталь-

ных решений и выяснению физического смысла модулей упругости, фигурирующих в уравнениях равновесия.

В шестой главе, наоборот, основное внимание уделено адгезионным взаимодействиям на поверхности тела. Существование на поверхности тела дополнительных взаимодействий приводит к расширению спектра краевых задач и усложнению картины силовых взаимодействий на поверхности тела.

В седьмой главе даны объяснения некоторым известным неклассическим эффектам и продемонстрирована предсказательная сила сформулированной теории дефектных сред.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В приложениях последовательно исследованы структуры тензоров модулей четвертого, пятого и шестого рангов, как изотропные, так и трансверсально-изотропные. Предложены алгоритмы формального построения таких тензоров. Исследованы различные предположения, приводящие к рациональному и обоснованному сокращению количества существенных модулей, подлежащих экспериментальному определению.

Список литературы состоит из 128 наименований.

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

Автореферат отражает содержание диссертации, основные результаты работы опубликованы, в том числе в реферируемых иностранных журналах и в журналах из списка ВАК.

Замечания по диссертационной работе:

1. В шестой главе сформулированы не все основные модели адгезии, вытекающие из общей теории. В частности, модель градиентной адгезии, использованная в седьмой главе при формулировке теории 2D-структур, типа графена и одностенных нанотрубок.
2. В пятой и шестой главе не достаточно внятно сформулированы ограничения на спектры краевых задач для тех или иных моделей когезионных взаимодействий при учете адгезионных взаимодействий.
3. В третьем Приложении, в разделе «Определение «существенных» и «несущественных» модулей» не исследован случай, когда дивергентное слагаемое приводится к

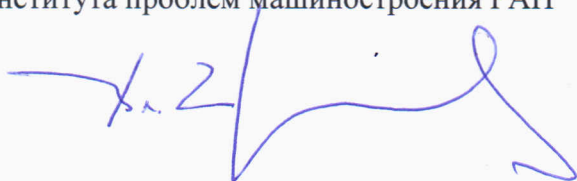
канонической квадратичной *неположительно* определенной форме на поверхности тела.

Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертационная работа Белова П.А. в целом представляет собой завершённое исследование, посвящённое решению актуальной проблемы, апробирована на научных конференциях и симпозиумах различного уровня, включая международные.

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,
заместитель директора по научной работе
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки
Института проблем машиностроения РАН



Ерофеев Владимир Иванович

20.08.2014г.

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

Телефон: +7(910)-384-35-28

E-mail: erof.vi@yandex.ru

Подпись Ерофеева В.И. заверяю:

Ученый секретарь ИИМ РАН,
доктор физико-математических наук,
доцент



И.С. Павлов