

Отзыв

официального оппонента доктора физико-математических наук,
Белова Петра Анатольевича
на диссертацию Масловой Екатерины Игоревны
«Масштабозависимые модели стержней и пластин»
по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»,
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация посвящена исследованию проблемы корректности градиентных теорий, влияния учета адгезионных взаимодействий при формулировке и решении задач механики деформируемого твердого тела, а также оценке вклада когезионных и адгезионных взаимодействий в масштабные эффекты.

Актуальность. Хорошо известно, что классическая механика сплошной среды не в состоянии объяснить и описать масштабные эффекты механического поведения микро- и нано- структур. Миниатюризация элементов вычислительной техники, управления и радиоэлектроники приводит к необходимости учитывать масштабные эффекты при эксплуатации таких устройств и прогнозированию времени их безотказной работы. Такие оценки возможно дать только с использованием градиентных теорий. Как известно, градиентные теории (теории когезионных взаимодействий) дают квадратичные по характерной длине масштабных эффектов поправки. В то же время учет адгезионных взаимодействий дает поправки, линейные по характерной длине масштабных эффектов. Поэтому теоретический анализ допустимости пренебрежения в тех или иных случаях когезионными или адгезионными эффектами является весьма актуальной и нетривиальной задачей.

Целью работы является формулировка корректной градиентной теории с учетом адгезионной активности поверхности сплошного тела и построении на её основе с помощью вариационного формализма корректной градиентной теории стержней и пластин, в рамках которой возможно изучение масштабных эффектов.

Задачи работы.

Обосновать выбор наиболее приемлемой для расчетов стержней и пластин градиентной теории.

Сформулировать исчерпывающий перечень необходимых и достаточных критериев корректности этой модели.

Разработать собственный математический аппарат расчета характеристик нано- и микросистем.

Доказать несостоятельность общепринятого подхода к проведению исследований с консольным закреплением стержня для рассматриваемого масштаба систем по причине сложности измерения жесткости заделки, которая может сильно повлиять на вклад масштабных параметров в результаты эксперимента.

Предложить альтернативный подход к экспериментальному

определению жесткостей нано- и микросистем.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка используемой литературы. Она содержит 143 страницы, из них 10 занимает список использованных источников. Список используемой литературы включает 118 наименований. Из них 85 на иностранном языке. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что в работе над диссертацией учтен не узко российский, но и мировой опыт в направлении проводимых исследований.

Во введении обосновывается актуальность и научная новизна диссертационного исследования, приводятся возможные сферы применения результатов работы; формулируются цель и задачи работы

В главе 1. Осуществлена формулировка и анализ градиентных теорий. В частности, приведена вариационная формулировка модели бездефектной среды Миндлина-Тупина.

Проведен анализ корректности этой теории, сформулирован дополнительный критерий корректности градиентных теорий, показано, что структура тензора модулей Тупина шестого ранга допускает структуру, удовлетворяющую всем известным и сформулированному в диссертации критериям корректности. Этим критерием является симметрия по первому-второму и четвертому-пятому индексам тензора Тупина. При этом тензор Тупина определяется в диссертации всего двумя неклассическими модулями, в то время как «классический» тензор Тупина – пятью. Это достижение серьезно сокращает объем дорогостоящих тонких экспериментальных работ по определению численных значений неклассических констант.

В первой главе также приведены примеры корректных и некорректных моделей.

В главе 2. результаты, полученные в первой главе, используются для построения уточненной градиентной теории масштабозависимых сверхтонких стержней.

Построены уточненные уравнения равновесия прикладной теории масштабозависимых стержней Тимошенко, построенные на корректном варианте теории Тупина. Показано, что общее решение теории масштабозависимых стержней Тимошенко имеет структуру суммы классического решения и когезионной поправки к нему. Тем самым напрямую доказана ошибочность достаточно распространенного мнения, что существуют когезионные поправки в классические жесткости стержней и пластин.

Рассмотрен пример, в котором представлено прямое доказательство ошибочности решений, которые указывают на эффект увеличения жесткости при $h \rightarrow 0$ для масштабозависимых стержней, если их рассматривать с использованием нелокальных градиентных теорий упругости.

В главе 3 приводится вариационная постановка классической теории упругости тел с адгезионно активной поверхностью. Получены формулы, аналогичные формулам Грина в объёме, которые определяют силовую модель адгезионных взаимодействий. Дана трактовка адгезионных модулей. Сформулирован аналог уравнения Софи Жермен для пластин с адгезионно активными лицевыми поверхностями.

Показано, что учет адгезионных свойств поверхностей вносит в энергию деформирования поправки линейные по характерной длине масштабных эффектов, в то время как учет когезионных взаимодействий (градиентные эффекты) вносит поправки, квадратичные по характерной длине масштабных эффектов. Учитывая, что характерная длина масштабных эффектов – величина малая по сравнению с габаритами тела, наиболее существенный вклад имеют адгезионные эффекты, если они есть.

Этот результат даёт основание усомниться во многих результатах ряда ранее опубликованных исследований других авторов.

В главе 4 приведены решения некоторых, имеющих большое прикладное значение, тестовых задач. Рассмотрены экспериментальные данные других авторов и проведено сравнение этих данных с решениями тестовых задач.

В случае шарнирно опертого стержня представлены графики зависимости прогиба и частоты собственных колебаний от масштабных параметров. Рассмотрена задача определения частотных характеристик в задаче Лэмба. Установлено, что градиентные поправки в кинетическую энергию определяют различные градиентные свойства в продольных и поперечных акустических волнах.

Решенные тестовые задачи дают возможность планировать проведение соответствующих экспериментов по идентификации неклассических параметров для различных материалов.

В выводах сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Основными результатами являются:

- формулировка вариационной градиентной теории упругости, учитывающей масштабные эффекты и анализ условий симметрии градиентных модулей упругости шестого ранга, вывод условий корректности, как дополнительных необходимых условий симметрии.
- формулировка вариантов прикладных градиентных теорий, удовлетворяющих условию корректности, критический анализ известных прикладных градиентных теорий.
- вариационная формулировка корректной градиентной теории масштабозависимых стержней, метод редукции функционала Лагранжа при построении уточненной теории масштабозависимых стержней, ревизия соотношений для эффективной изгибной жесткости масштабозависимых стержней, полученных ранее Yang, Reddy, Ma и др.
- анализ континуальной теории адгезии (поверхностных взаимодействий), обобщающей теорию Гуртина-Мурдоха, и вариационная формулировка теории пластин с адгезионно активными лицевыми поверхностями, вывод

теории масштабозависимых стержней, учитывающих градиентные эффекты и масштабные эффекты поверхностных взаимодействий.

- анализ решений тестовых статических задач уточненной теории тонких стержней и качественные выводы о поправках, вносимых за счет использования корректных градиентных теорий по сравнению с некорректными, а также принципиальный вывод о незначительной степени влияния градиентных эффектов на эффективную жесткость по сравнению с масштабными эффектами поверхностных взаимодействий.

- формулировка корректной градиентной теории колебаний стержней с модифицированной кинетической энергией. Анализ зависимостей динамических жесткостей и собственных частот масштабозависимых стержней от градиентных эффектов и от масштабных поверхностных эффектов, прикладные задачи масштабозависимых пластин (задача Лэмба) и оценка степени влияния поверхностных эффектов на результаты решения.

- анализ соответствия решений уточненной теории стержней экспериментальным данным и идентификация параметров моделей, ответственных за масштабные эффекты.

Достоверность диссертации обеспечена применением классических математических методов: методов механики сплошных сред, прикладной теории упругости: вариационного метода построения моделей, прямых вариационных методов и методов математической физики. Кроме того, полученные в диссертации результаты удовлетворительно соответствуют тестовым аналитическим решениям частных задач, известным экспериментальным данным. Они не противоречат физическому смыслу явлений, связанных с деформированием сред.

Апробация результатов осуществлена при их обсуждении на отечественных и зарубежных конференциях. По теме диссертационной работы было выпущено 9 публикаций, 3 из которых выходили в журналах и сборниках, рекомендованных ВАК.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

- построена уточненная корректная градиентная теория,
- установлены критерии корректности градиентных теорий.
- использована модель поверхностных эффектов, являющаяся обобщением модели Гуртина-Мурдоха.
- установлена структура адгезионных модулей, дается их трактовка.
- построена градиентная теория упругости тонких стержней и пластин с учетом поверхностных эффектов.
- проведен анализ влияния дополнительных физических параметров, связанных со свойствами поверхности, на изгибную жесткость и на динамическую изгибную жесткость стержней и пластин.

Практическое значение результатов заключается в следующем:

- Уточненные модели деформирования позволяют более полно и достоверно прогнозировать поведение сверхтонких структур, которыми являются тонкие элементы конструкций, резонаторы,

сенсорные устройства, устройства микроэлектроники и элементы измерительных систем (иглы атомных микроскопов), биологические системы и др.

- Полученные в работе результаты позволяют пересмотреть систему экспериментов и правильнее отнестись к исследованию тонких структур.
- Уточнение динамических свойств сверхтонких систем и тонкостенных структур может представлять интерес, например, для задач тестирования механических свойств (деградации механических свойств) с помощью метода акустической эмиссии.

Замечания.

1. Первая глава называется «Обобщенные модели сред, градиентные теории упругости и модели адгезионных взаимодействий». По названию главы складывается впечатление, что в ней будет изложено обобщение градиентной теории тел с адгезионно активной поверхностью. А уже из этой, обобщенной, теории как частые случаи будут получены различные варианты градиентных теорий без адгезионных свойств поверхности и теории классических сред с различными вариантами моделей адгезии поверхности.
2. В диссертации отсутствует формальный вывод градиентной теории Тупина, удовлетворяющей новым, сформулированным в диссертации, критериям корректности, с адгезионным тензором адгезионных модулей, содержащих максимально возможное количество адгезионных модулей – восемь. Это тот случай, когда все шесть статических граничных условия модифицируются адгезионными силовыми факторами. В диссертации же рассмотрены краевые задачи градиентных теорий только для случая, когда лишь классические статические условия модифицированы адгезионными силовыми факторами, а неклассические граничные условия – нет.
3. В первой главе, раздел 1.2 называется «Градиентные теории упругости с учетом адгезии». Однако в нем изложена классическая теория упругости тел с адгезионно активной поверхностью.

Перечисленные замечания носят скорее методический характер, не подвергают сомнению результаты диссертации и не влияют на ее оценку.

Заключение

Диссертация Масловой Екатерины Игоревны является законченной научно-квалификационной работой, имеющей важное научное и практическое значение для механики деформируемого твердого тела. В ней решена важная для науки и практики задача о корректности моделирования влияния масштабных и адгезионных факторов на механическое поведение сверхтонких линейно упругих пластин и стержней.

Автореферат оформлен в соответствии с установленными требованиями.

Основные результаты диссертационной работы получены лично автором.

Вышеизложенное позволяет сделать вывод, что диссертационная работа «Масштабозависимые модели стержней и пластин» удовлетворяет требованиям ВАК о присуждении ученых степеней, а ее автор Маслова Екатерина Игоревна 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, Начальник отдела фундаментальных исследований научно-инновационного центра «Институт развития исследований, разработок и трансферта технологий», 119049, Россия, г. Москва, Крымский Вал, д.3, стр.2.

Контактный телефон: 8-(495)-337-1075

E-mail: BelovPA@yandex.ru

Белов
Петр
Анатольевич

Подпись Белова Петра Анатольевича заверяю.

Генеральный директор

ООО «Научно-инновационный центр «Институт развития исследований, разработок и трансферта технологий»»

Львов

Николай

Леонидович

