

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИПИМ РАН

Д.Ф.М.Н., проф.

В.И. Ерофеев

2016 г.



ОТЗЫВ

ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу

МАСЛОВОЙ Екатерины Игоревны

«Масштабозависимые модели стержней и пластин»,

представленную на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Общие сведения о диссертационной работе

На рассмотрение ведущей организации представлены диссертационная работа Масловой Екатерины Игоревны объемом 143 страницы, включающая 19 рисунков, структурно подразделенная на введение, четыре главы, выводы, список литературы из 118 наименований, а также автореферат вышеозначенной диссертации.

Изучение диссертационной работы, автореферата и публикаций соискателя позволило сформулировать представленные ниже заключения.

1. Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время исследования тонких структур интенсивно ведутся многими учеными как в России, так и за рубежом. Возрастающий интерес к особенностям деформирования тонких структур связан, главным образом, с развитием микроэлектроники и разработкой высокочувствительной

аппаратуры. Толщина элементов, исследуемых в этих средах, сравнима с характерными размерами микроструктуры материала, оказывающей влияние на физические свойства материала. Кроме того, поверхностные процессы в тонких структурах не являются пренебрежимо малыми по сравнению с объёмными процессами. В связи с этим возникает проблема учёта масштабных эффектов, для описания которых применяются неклассические градиентные теории, содержащие дополнительные параметры размерности длины.

В рассматриваемой диссертационной работе предлагаются уточненные модели деформирования тонких структур, и вносятся существенные поправки в результаты исследований, полученных другими учеными.

1. Оценка содержания диссертационной работы, ее завершенность.

Основными целями диссертационной работы являлись:

- построение уточненной корректной градиентной теории масштабозависимых стержней и пластин, позволяющей учесть аномальное изменение механических свойств при уменьшении толщины системы;
- разработка вариационного метода построения теории масштабозависимых стержней и пластин для нелокальной градиентной теории упругости.

Для достижения сформулированных целей диссертационной работы соискателем были поставлены и решены следующие **задачи**:

- разработка 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, разработка метода редукции функционала Лагранжа при построении уточненной теории масштабозависимых стержней, проведение ревизии соотношений для эффективной изгибной жесткости масштабозависимых стержней, полученных ранее Янгом, Редди, Ма и др.;

- анализ континуальной теории адгезии (поверхностных взаимодействий), обобщающей теорию Гуртина-Мурдоха, вариационная формулировка теории пластин с адгезионно активными лицевыми поверхностями, разработка теории масштабозависимых стержней, учитывающей 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, оценка степени влияния поверхностных эффектов на результаты решения прикладных задачи масштабозависимых пластин (задача Лэмба);

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

Постановка и решение описанных задач, анализ результатов сведены в работу следующей **структуры и содержания**.

Во **введении** обосновываются актуальность и научная новизна диссертационного исследования, приводятся возможные сферы применения результатов работы, формулируются цель и задачи работы.

В **первой главе** дан обзор современного состояния исследований. Приведен алгоритм построения математических моделей сред на основе «кинематического» вариационного принципа. Показано, что для описания модели среды достаточно записать выражение для потенциальной энергии. Приведены примеры построения моделей сред с полями дефектов и градиентных моделей теории упругости. Приведены условия корректности моделей и продемонстрированы некорректные модели.

Сформулирована теория адгезионных взаимодействий сплошных бездефектных тел для изотропной упругости. Такую теорию адгезии принято называть теорией «идеальной адгезии», где понятие «идеальной» относится к бездефектной среде. Эта теория адгезии обобщает известную теорию Гуртина-Мурдоха, и переходит в теорию Гуртина-Мурдоха (Янга-Лапаса) в случае, если новый адгезионный параметр равен нулю. Показано, что учет адгезионно активных свойств поверхности изменяет краевые условия, поэтому следует ожидать, что дополнительные механические параметры, определяющие свойства адгезионно активной поверхности, будут влиять на поведение решения особенно для тонких структур.

Во **второй главе** приведен прямой способ получения уравнений равновесия в градиентной теории тонких стержней на основе известного вариационного формализма на примере стержней с кинематикой Бернулли. На основе анализа определяющих соотношений и структуры потенциальной энергии градиентных теорий упругости установлено новое условие корректности, связанное со специфическими свойствами симметрии тензора градиентных модулей упругости шестого ранга. Показано, что среди градиентных теорий деформаций существует единственная двухпараметрическая градиентная теория, удовлетворяющая условиям корректности. Исследование уравнений равновесия прикладной теории

стержней, полученных с использованием кинематики теории стержней Тимошенко и вариационного формализма, позволило установить, что корректная градиентная теория деформаций удовлетворяет условиям энергетической согласованности прикладной теории стержней. В результате построены уточненные уравнения равновесия прикладной теории масштабозависимых стержней Тимошенко, не противоречащие общим положениям о структуре решений градиентных теорий упругости. Рассмотрен пример, в котором представлено прямое доказательство ошибочности решений, которые указывают на эффект увеличения жесткости при стремлении к нулю толщины стержня в случае масштабозависимых стержней, если их рассматривать с использованием нелокальных градиентных теорий упругости.

В **третьей главе** приводится вариационная постановка градиентной теории адгезионного взаимодействия. Дается трактовка адгезионных модулей. Представлен вывод уравнений изгиба пластин с учетом эффектов адгезии. Рассматривается цилиндрический изгиб пластин с учетом адгезионных взаимодействий. Проведен качественный анализ уравнения равновесия пластин (стержней). Показано, что адгезионные свойства поверхностей смогут оказывать значительное влияние на деформирование тонких пластин (стержней) при уменьшении толщины, в то время как влияние градиентных эффектов даёт гораздо меньший вклад, чем это было указано ранее в ряде опубликованных исследований других авторов.

В **четвертой главе** на основе решений тестовых задач, полученных по уточненной теории, дается анализ влияния масштабных градиентных параметров и параметров поверхностных взаимодействий на эффективную жесткость и особенность деформирования тонких стержней и пластин, приводится качественный сравнительный анализ полученных решений с результатами решений других авторов. Дается сравнение полученных решений с известными в научной литературе экспериментальными данными по измерению эффективной жесткости тонких стержней.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

2. Степень достоверности результатов и выводов.

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается применением апробированного математического аппарата: методов механики сплошных сред, теории упругости, математической физики; сопоставлением полученных в диссертации теоретических результатов с тестовыми аналитическими решениями частных задач; известными экспериментальными данными; непротиворечивостью полученных результатов физическому смыслу явлений, связанных с деформированием сред.

3. Научная новизна основных результатов диссертации.

Научная новизна работы заключается в построении уточненной корректной градиентной теории и градиентной теории упругости тонких стержней и пластин с учетом поверхностных эффектов, установлении критерия корректности прикладных нелокальных теорий; определении структуры адгезионных модулей и их трактовке; проведении анализа влияния дополнительных физических параметров, связанных со свойствами поверхности, на изгибную жесткость и на динамическую изгибную жесткость стержней и пластин.

4. Научная и практическая значимость результатов диссертации.

Научная ценность результатов диссертационной работы заключается в том, что, благодаря разработанным в диссертации уточненным моделям деформирования тонких структур, появляются возможности более полного и достоверного прогнозирования поведения сверхтонких структур, которыми, в частности, являются биологические системы, элементы измерительных систем, сенсорные устройства, устройства микроэлектроники.

Практическая ценность результатов работы заключается в возможности использования полученных результатов по уточнению динамических свойств сверхтонких систем и тонкостенных структур при решении задач тестирования механических свойств (деградации механических свойств) с

помощью метода акустической эмиссии, а также для повышения точности измерительных устройств.

5. Рекомендации по использованию результатов диссертации.

Разработанные в диссертации градиентные модели представляется возможным использовать в прикладных задачах расчета характеристик стержней и пластин применительно к нано- и микросистемам.

6. Оценка стиля диссертации и автореферата.

Стиль изложения теоретического материала, использование математического аппарата и специальной терминологии соответствуют требованиям к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности «Механика деформированного твердого тела».

Автореферат в полной мере отражает содержание диссертации.

Выносимые на защиту результаты диссертации опубликованы в девяти печатных работах, в том числе в трех статьях в журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

7. Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

По диссертационной работе имеются следующие замечания.

1. Диссертация содержит п. 1.1.9 называющийся “заключение” и содержащий, по сути, выводы по **параграфу** 1.1. Начинается п.1.1.9 со слов “В данной **главе** приведен метод...”. С другой стороны, в п.1.3, также называющемся “Заключение” и содержащем, по сути, выводы по **главе** 1, говорится о том, что сделано в данном **разделе**, а не главе. Считаю, чтобы избежать путаницы, надо было называть параграфы, содержащие выводы по главам, “выводы по главе № ...”, а выводы по всей диссертации надо было разместить в разделе “Заключение” – единственном с таким названием для всей диссертации.

2. Последнее равенство в граничных условиях (4.39), (4.41) и (4.42) имеет вид: $-z(L) = 0$. Возникает вопрос: “Зачем нужен минус в таком равенстве?”
3. Отсутствует единый стиль оформления рисунков. Так, например, обозначения на рисунке 11 огромные, а на рисунках 15-17 – напротив, чрезвычайно мелкие.

По автореферату диссертационной работы имеются следующие замечания.

4. На стр. 9 автореферата излагается критика недавно опубликованных градиентных моделей прикладной теории стержней, из которых следует, что формальное использование градиентной теории деформаций вместо классической теории упругости приводит к тому, что изгибная жесткость классической теории стержней модифицируется за счет масштабного параметра $(l/h)^2$. Эта критика основана на примере получения полуобратным методом, без привлечения вариационного подхода, аналитического решения задачи о чистом изгибе балки с использованием частного варианта градиентной теории, в которой градиентные эффекты связаны с изменением объемной деформации. К сожалению, рассмотрение этого примера на стр. 10 заканчивается **не выводом**, который бы подтверждал обоснованность критики результатов, полученных другими авторами, а всего лишь формулами для соответствующих напряжений и жесткости.
5. На стр. 17 автореферата при описании результатов, полученных в п. 4.7, говорится о “разных краевых” условиях, но в то же время указываются одни и те же краевые условия при $x=0$: $w(0) = 0$, $w'(0) = 0$, $w''(0) = 0$ как для жесткой “жесткой” заделки, так и для жесткой “мягкой” заделки, причем отсутствует пояснение этих двух терминов.

б. На этой же странице из-за недостатка пояснений очень странной выглядит фраза “Отмечается, что это нужно учитывать при сравнении решений с экспериментальными данными и, вообще говоря, требует **пересмотра экспериментов** для тонких стержней” – создается впечатление, что для обоснования справедливости теории “разрешается” проводить лишь какие-то особые эксперименты.

Перечисленные выше замечания не препятствуют положительной оценке диссертации.

С учетом перечисленного выше следует заключить, что *диссертационная работа представляет собой завершённое исследование, выполненное на высоком научном и методическом уровне.*

Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней.

Представленная к защите диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук является законченной научно-квалификационной работой, в которой построена уточненная корректная градиентная теория масштабозависимых стержней и пластин, позволяющая учесть аномальное изменение механических свойств при уменьшении толщины системы, и разработан вариационный метод построения теории масштабозависимых стержней и пластин для нелокальной градиентной теории упругости.

Структура диссертации, язык изложения материала и терминология соответствуют современному уровню и существующим требованиям к научно-квалификационным работам.

Результаты диссертационной работы получены соискателем самостоятельно, являются новыми, обладают как теоретической, так и практической значимостью, опубликованы в достаточном количестве в периодических изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, обсуждены на международных и российских научных конференциях, симпозиумах и семинарах с участием ведущих специалистов в области исследования.

Область исследования и основные результаты диссертационной работы полностью соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

В целом, работу следует оценить положительно.


Диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор, Маслова Екатерина Игоревна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Отзыв обсужден и одобрен на заседании лаборатории волновой динамики 8 декабря 2016 г., протокол № 1.

Заместитель директора по научной работе
ИПМ РАН,
доктор физико-математических наук


ПАВЛОВ
Игорь Сергеевич

Старший научный сотрудник
лаборатории волновой динамики и
виброзащиты машин ИПМ РАН,
кандидат физико-математических наук


КАЖАЕВ
Владимир
Владимирович

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук» (ИПМ РАН)

603024, Россия, г. Нижний Новгород,

Ул. Белинского, д. 85

Телефон: +7 (831) 432-05-76

E-mail: imsh@mts-nn.ru