

В диссертационный совет ЮФУ 801.01.10
при Институте математики, механики
и компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета по адресу
344090, г. Ростов-на-Дону,
ул. Мильчакова 8а.

ОТЗЫВ

официального оппонента
на диссертационную работу Нестерова Сергея Анатольевича
«Прямые и обратные задачи термомеханики для неоднородных тел»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого
твёрдого тела

В последние годы в свете активного внедрения в практику новых материалов (слоистых, функционально-градиентных материалов, наноструктурированных композитов) основное внимание ученых направлено на решение задач о деформировании и колебаниях таких структур, идентификации их материальных характеристик. Интерес к функционально-градиентным материалам, свойства которых непрерывно меняются по пространственным координатам, связан с возможностью создания на их основе теплозащитных и износостойких покрытий, биоимплантатов, лопаток газовых турбин, деталей режущих инструментов. Интерес к градиентным моделям механики определяется развитием современных методов получения микроструктурных материалов, малоразмерных элементов микросистемной техники, в которых в значительной степени могут проявляться неклассические масштабные эффекты, которые могут требовать привлечения соответствующих расчетных моделей. Отметим, что в настоящее время недостаточно разработаны модели деформирования и колебаний слоистых и

функционально-градиентных структур с учетом связанности полей, проявления масштабного эффекта.

Точность решения прямой задачи термомеханики для функционально-градиентных материалов (ФГМ) зависит от знания законов неоднородности. Однако в силу переменности характеристик они не могут быть определены из простых макроэкспериментов. Поэтому требуется создание эффективных методов идентификации переменных характеристик на основе аппарата коэффициентных обратных задач термомеханики. Обратные задачи теории упругости или теплопроводности являются актуальными задачами уже несколько десятилетий. Однако эффект связанности полей деформации и температуры для некоторых материалов имеет существенное значение. В связи с этим востребованными являются исследования, связанные с решением прямых и обратных задач термомеханики для слоистых и функционально-градиентных материалов. Именно эти аспекты, рассмотренные в диссертационной работе Нестерова С.А., определяют актуальность исследования.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, приложения и списка литературы.

Во **введении** представлен обзор основных работ по теме диссертации, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, сформулирована научная новизна, кратко изложено содержание работы.

В **первой главе** основное внимание уделено исследованию динамических связанных задач термомеханики для тел, изготовленных из функционально-градиентных материалов. Задача о неустановившихся колебаниях неоднородного термоупругого стержня решается на основе сведения к системе интегральных уравнений Фредгольма (ИУФ) 2-го рода в трансформантах Лапласа и обращении трансформант на основе теории вычетов. Динамические задачи термоупругости для трубы и термоэлектроупругости для стержня решаются на основе применения метода пристрелки и обращении трансформант на основе метода разложения

оригинала по смещенным многочленам Лежандра. Выяснено, что различные законы неоднородности материальных характеристик оказывают большое влияние на граничные физические поля.

Вторая глава посвящена решению статических задач градиентной механики для составных и слоистых тел. Получены постановки задач градиентной теории упругости, термоупругости и электроупругости для стержня, балки, слоя, цилиндра. На основе асимптотических методов Вишика-Люстерника и Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна получены приближенные выражения для нахождения напряженно-деформированного состояния слоистых тел. Путем сравнения классических и градиентных решений выявлены неклассические эффекты, возникающие в области сопряжения составных тел.

В третьей главе исследуется коэффициентная обратная задача термоупругости для функционально-градиентных тел, когда дополнительная информация измерена на полубесконечном интервале (первая постановка). Для решения поставленной обратной задачи двумя способами получены операторные уравнения в трансформантах Лапласа. Построена итерационная схема решения нелинейной обратной задачи, на каждом этапе которой решаются интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода в трансформантах Лапласа. Представлены результаты вычислительных экспериментов по реконструкции различных законов неоднородности материальных характеристик стержня, трубы, конечного цилиндра и прямоугольника.

Четвертая глава посвящена решению коэффициентных обратных задач термоупругости, когда дополнительная информация измерена на конечном временном интервале (вторая постановка). Путем обращения операторных уравнений в трансформантах получены операторные уравнения 1-го рода в оригиналах и проведены вычислительные эксперименты по идентификации одной из характеристик стержня, слоя и цилиндрической трубы. В случае реконструкции двух характеристик стержня и цилиндрической трубы в итерационном процессе получена система

интегральных уравнений Фредгольма 1-го рода. Реконструкция пары термомеханических характеристик конечного цилиндра и прямоугольника осуществляется путем построения двухэтапного процесса, на каждом этапе которого восстанавливается только одна характеристика.

В пятой главе исследуется коэффициентная обратная задача термоэлектроупругости для функционально-градиентных пироматериалов. Приведена общая постановка обратной задачи термоэлектроупругости и получены операторные уравнения в трансформантах Лапласа для ее решения на основе итерационного процесса. Представлены постановки и операторные уравнения в оригиналах для решения обратных задач термоэлектроупругости для стержня, цилиндра и слоя. Проведены вычислительные эксперименты по реконструкции различных законов неоднородности. Выяснено, что теплофизические и механические характеристики восстанавливаются с приемлемой точностью даже при 1%-м зашумлении входной информации; погрешность реконструкции пьезомодулей, коэффициентов температурных напряжений и пирокoeffициентов намного превышает погрешность реконструкции других характеристик даже при больших параметрах связанности.

Приложение состоит из двух частей. Первая часть посвящена построению модели термоупругого деформирования системы «покрытие-положка». Во второй части рассматривается применение метода алгебраизации для идентификации теплофизических характеристик неоднородного стержня.

В заключении приводятся основные положения диссертационного исследования.

Научная новизна работы определяется развитием фундаментальных знаний в области динамических связанных задач термомеханики для неоднородных тел, градиентной механики составных и слоистых тел, разработкой новых методов и вычислительных схем идентификации материальных законов неоднородности тел, изготовленных из

функционально-градиентных материалов.

Можно отметить следующие наиболее значимые **новые результаты**, полученные в диссертационной работе:

1. представлены новые методы решения динамических связанных задач термомеханики для тел, изготовленных из функционально-градиентных материалов, исследовано влияние законов неоднородности на граничные физические поля;
2. получены асимптотические решения градиентной механики для составных и слоистых тел (стержня, полосы, балки, цилиндра), проведен сравнительный анализ решений, полученных в классической и градиентной постановке;
3. в зависимости от временного отрезка съема дополнительной информации представлены две постановки коэффициентной обратной задачи термоупругости и получены операторные уравнения для ее решения;
4. построена итерационная схема решения коэффициентной обратной задачи термоупругости и термоэлектроупругости и проведены вычислительные эксперименты по идентификации одной и двух термомеханических характеристик стержня, слоя, цилиндрической трубы, конечного цилиндра и прямоугольника.

Практическая значимость результатов диссертационного исследования состоит в следующем:

1. Разработанные методы решения прямых задач термомеханики служат для уточнения НДС слоистых тел и тел, изготовленных из ФГМ, с учетом связанности полей, законов неоднородности, масштабных эффектов.
2. Схемы решения обратных коэффициентных задач служат теоретической базой для неразрушающего контроля исследуемых стержневых, слоистых и цилиндрических конструктивных элементов

с целью уточнения предполагаемых функционально-градиентных свойств.

В ходе реализации предлагаемых схем исследования прямых и обратных задач на модельных примерах были применены различные численные и аналитические **методы исследования** задач механики связанных полей. Динамическая связанная задача для неоднородного термоупругого стержня исследуется методом, основанном на сведении к системе интегральных уравнений Фредгольма 2-го рода относительно трансформант Лапласа и обращении трансформант на основе теории вычетов. Динамические связанные задачи для термоупругой трубы и термоэлектроупругого стержня решаются путем применения метода пристрелки для задачи в трансформантах Лапласа и обращении трансформант на основе метода разложения оригинала по смещенным многочленам Лежандра. Исследование задач градиентной механики для составных тел при малых значениях масштабного параметра проведено на основе асимптотических методов Вишика-Люстерника и Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна. На основе слабой постановки задачи в трансформантах и обобщенного соотношения взаимности получены операторные уравнения для решения обратных задач термоупругости и термоэлектроупругости, которые представляют собой интегральные уравнения Фредгольма 1-го рода с гладкими ядрами. Для построения регуляризованного решения интегральных уравнений и их систем использовался метод Тихонова А.Н.

Полученные в ходе выполнения диссертационной работы результаты являются **оригинальными и обоснованными**.

Достоверность полученных автором результатов основывается на корректности математических моделей, применении известных апробированных методов, проведением большого количества вычислений на ЭВМ с контролируемой точностью, проведением сравнительного анализа результатов работы с результатами, полученными аналитическими и конечно-

элементными методами, а также подтверждается совпадением с известными результатами для частных случаев, полученными другими авторами.

Автореферат дает четкое представление о диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

По диссертационной работе Нестерова С.А. имеются следующие **замечания:**

1. В параграфе 1.2 говорится о получении аналитического решения для однородного термоупругого стержня. Однако это не совсем корректно, т.к. обращение преобразования Лапласа проводится численным методом Дурбина.

2. Прямая задача термоупругости для неоднородного стержня решается методом сведения к системе ИУФ 2-го рода. Можно ли этот метод применить для решения задач термоупругости для трубы и термoeлектроупругости для стержня и цилиндра?

3. При большой амплитуде внешнего температурного поля наблюдается изменение физико-механических характеристик материала и уравнение теплопроводности следует использовать в нелинейной постановке. В работе применяется линейная теория и не обозначены границы использования построенных решений.

4. В первой главе представлены постановки прямой задачи термоупругости для конечного цилиндра только для граничных условий, когда торцы цилиндра теплоизолированы и находятся в условиях скользящей заделки. Почему выбраны именно такие условия? Можно ли использовать предложенный подход при формулировке других граничных условий, например, для свободных или заземленных торцов.

5. Граничные условия для моментов и напряжений (2.1.3) написаны неточно. Это, конечно, всего лишь досадная описка. Следовало бы также указать, что кинематические условия (2.1.4) дают пары альтернативных условий к условиям (2.1.3.), причем первое условие (2.1.4) составляет альтернативную пару со вторым условием (2.1.3), а второе условие (2.1.4) альтернативную пару с моментным статическим условием.

6. На стр. 92 приводятся оригинальная, но не вполне полная контактная задача, которая записывается в терминах напряжений Коши. При этом условия контакта по перемещениям просто опускаются. Такое представление краевой задачи допустимо для рассматриваемой одномерной постановки, но, тем не менее, желательно было бы более полно описать процедуру там, где автор ограничился фразой «Для этого выразим полные напряжения, моментные напряжения и градиенты перемещений через напряжения Коши».

7. Автора не удивляет появление сингулярностей в решении контактной задачи (2.2.6-2.2.11). Однако контактная задача (2.2.6-2.2.11), допускающая аналитическое решение, не имеет никаких сингулярностей. Перемещение является линейной комбинацией линейных и экспоненциальных функций. Градиентные решения как раз обладают эффектами сглаживания возможных особенностей за счет более гладких краевых условий, по перемещениям и нормальным производным. Допускается скачок первого рода по нормальным деформациям в классическом решении (контакт только по перемещениям), но градиентное решение должно быть гладким.

Вместе с тем отметим, что указанные выше замечания не снижают научной ценности и практической значимости результатов, полученных автором в диссертационной работе.

Основные положения диссертации неоднократно докладывались на всероссийских и международных научных конференциях, изложены в 87 публикациях, 39 из которых опубликованы в рецензируемых журналах из Перечня изданий ЮФУ и баз цитирования Scopus и WoS. Опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

Заключение. Считаю, что диссертационная работа Нестерова Сергея Анатольевича на тему «Прямые и обратные задачи термомеханики для неоднородных тел» соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Южный федеральный

университет», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, а ее автор заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела.

«15» декабря 2023 г.

Официальный оппонент,
доктор технических наук
(специальность 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела),
профессор, главный научный сотрудник лаборатории
«Неклассические модели механики композиционных
материалов и конструкций» ФГБУН «Института прикладной механики
Российской академии наук»,
www.iam.ras.ru

Лурье Сергей Альбертович
E-mail: salurie@mail.ru

Лурье С.А.

125040, г. Москва, Ленинградский проспект, д. 7 стр 1
тел.: +7(495) 946-18-06,
e-mail: iam@iam.ras.ru

Согласен на обработку моих персональных данных.

Подпись Лурье Сергея Альбертовича заверяю

Директор ИПРИМ РАН

