

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**о диссертации Голуба Михаила Владимировича
на тему**

**«Дифракция упругих волн, локализация энергии и резонансные
эффекты в повреждённых многослойных структурах»,
представленной на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук
по специальности**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Целью научного исследования М.В. Голуба является изучение упругих колебаний многослойных волноводов с повреждениями различных типов. Данная тематика исследований весьма актуальна, поскольку многослойные композитные материалы последнее время широко используются в авиационной и аэрокосмической отраслях, при создании сенсоров и фильтров и прочих высокотехнологичных областях. При этом эксплуатация композитов вследствие их неоднородности может сопровождаться образованием дефектов, таких как трещины, полости, отслоения, зоны неидеального контакта.

В связи со значительным усовершенствованием в последние десятилетия устройств возбуждения и приема ультразвуковых сигналов, а также методов их цифровой обработки, системы волнового ультразвукового контроля находят все более широкое применение при неразрушающем контроле протяженных многослойных конструкций. Работоспособность систем диагностики может быть обеспечена качественным программным обеспечением, базирующимся на строгих математических моделях и эффективных численных методах. В диссертационной работе развиты новые математические модели, описывающие колебания поврежденных конструкций и позволяющие идентифицировать достижение дефектами критических размеров. Разрушение зачастую инициируется на микроскопическом уровне и может сопровождаться смыканием берегов трещины, то есть фактически, ослаблением адгезионных связей. М.В. Голубом предложен новый подход к описанию неидеального контакта, в основе которого лежит введение эффективных граничных условий.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается использованием современного математического аппарата механики сплошной среды, корректными математическими постановками задач теории упругости в плоской и трехмерной постановках, аккуратной компьютерной реализацией численных методов. В ходе выполнения работы все

математические модели прошли проверку сравнением с частными случаями, для которых решения на данный момент известны.

Во введении автором дается достаточно подробный обзор имеющихся работ по теме диссертации. Кроме того, обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи диссертационного исследования, приводятся основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе излагаются основные положения динамической теории упругости (уравнения движения и состояния), а также предлагаются новые эффективные граничные условия, используемые как для описания неоднородностей волновода, так и для моделирования контакта различных материалов. Приведена также общая схема решения динамических задач для многослойных структур с отслоениями и введены основные понятия и характеристики, на основе которых в дальнейшем анализируются волновые явления.

Во второй главе дается схема, описывающая распространение упругих волн в многослойных структурах при неидеальном контакте между слоями. Для описания взаимодействия различных слоев используются более общие граничные условия. Приводится постановка и решение задачи для фононных кристаллов с ослаблением адгезионных связей между слоями без локальных дефектов. В декартовой и цилиндрической системе координат выводятся соотношения, необходимые для построения матриц Грина задачи моделирования многослойных волноводов с неидеальным контактом слоев. Анализируется влияние степени ослабления адгезионных связей на распространение плоских и бегущих волн.

В третьей главе исследуется взаимодействие пьезоэлектрических преобразователей с многослойным упругим волноводом при разной степени контакта с ним. Соответствующая математическая модель основана на гибридном подходе, где волновые поля в многослойном пакете описываются с помощью интегрального подхода, а колебания пьезоэлектрического актуатора так называемым методом спектральных элементов (spectral element method). По результатам моделирования проведен анализ влияния степени контакта пьезоэлектрического актуатора на резонансные частоты и точки спектра. В случае идеального контакта выполнено сопоставление с упрощенной моделью и решением в пакете COMSOL. Для двух случаев идеально приклеенного и наполовину отслоившегося пьезоэлектрического актуаторов успешно проведена экспериментальная верификация разработанных математических моделей для различных центральных частот.

Колебания одиночных отслоений и методы решения соответствующих краевых задач рассмотрены в четвертой главе. Для различных геометрических форм отслоений, описываемых с помощью граничных

условий пружинного типа, развит метод граничных интегральных уравнений. Для всех частных решений выполнены сравнения с результатами других авторов, которые обладают допустимой точностью сходства. В работе также рассмотрены вопросы определения спектра рассматриваемых задач, изучено влияние на спектральные свойства различных параметров отслоений и волновода. Выявлено соответствие между положением точек дискретного спектра в комплексной плоскости частоты и ростом концентрации напряжений и блокированием упругих волн. Проведен подробный анализ рассеяния упругих волн одиночными отслоением в зависимости от формы дефекта и степени отслоения. Весьма наглядной представляется экспериментальная верификация рассчитанных резонансных эффектов в упругом слое.

Для конечного множества отслоений в пятой главе производится обобщение методов, представленных в предшествующей главе для одиночных дефектов. Также в главе исследуется влияние взаимного положения отслоений на прохождение бегущих волн через область с отслоениями и устанавливаются закономерности в движении спектральных точек в рассматриваемых задачах при изменении расстояния между ними и при введении дополнительных дефектов. В частности, убедительно показан процесс формирования запрещенных зон при равномерной расстановке неоднородностей (не только для отслоений, но и для жестких включений).

Шестая глава посвящена счетным множествам отслоений. Рассмотрены как периодически, так и случайно распределенные отслоения круговой, прямоугольной и полосовой формы. С использованием техники усреднения по ансамблю были найдены коэффициенты прохождения плоских волн через поврежденный интерфейс. С другой стороны, было показано, что поврежденный интерфейс между двумя материалами может быть описан граничными условиями пружинного типа, в которых матрица жесткости связывает нормальные и касательные напряжения с вектором перемещений на границах интерфейса. При этом компоненты матрицы жесткости зависят от удельной плотности трещин, среднего размера трещин и упругих свойств контактирующих материалов. Выведенные соотношения успешно проверены сопоставлением с известными результатами для одинаковых материалов, а в случае разнородных материалов приводится сравнение с периодическим распределением. Модель расширяет границы применимости теории, в том числе ввиду возможности комбинации эффективного метода граничных интегральных уравнений с упрощающими предположениями для описания множественных дефектов и зон неидеального контакта материалов.

По работе имеются замечания.

1. В четвертой главе рассматриваются основные геометрические формы одиночных отслоений: полосовые, круговые и прямоугольные. Следует заметить, что в реальности встречаются также формы микроповреждений близкие к эллиптической форме, что в данной работе учтено не было.

2. После вывода асимптотического решения для круговых трещин на рисунке 6.4 приведены результаты сравнения асимптотического и численного решения, при этом не дано объяснений, почему на левых и правых графиках, соответствующих падению продольных и поперечных волн, имеет место расхождение для разных пар материалов, а для поперечных волн решения начинают существенно различаться на более низких частотах.

3. Построенные автором математические модели позволяют описывать частичные отслоения в конечной области, при этом приведено лишь два примера влияния частичного контакта между берегами на рассеяние. В затронутой проблеме остается еще большое количество нерешенных вопросов. В частности, при проведении эксперимента образец склеивался из двух пластин, очень интересным и важным выглядело бы сравнение экспериментальных данных с моделью с ослаблением адгезионных связей у краев.

4. Автор утверждает, что "Спектральный метод с разложением в ряд по полиномам Лежандра при этом позволяет более точно определять точки непрерывного спектра и исследовать резонансные явления для круговых и прямоугольных отслоений", однако не приводит конкретных численных примеров.

5. В п. 6.5 сравнительный анализ моделей множественных отслоений в основном сделан с работами других авторов. Картина исследования была бы более полной, если также было бы приведено сравнение собственных моделей для случаев разных форм дефектов, а также сравнение случайно распределенных отслоений с периодической геометрией дефектов.

6. В работе имеются ряд математических неточностей и опечаток:

- В формуле (1.20) неправильно использован символ пересечения множеств, что запутывает понимание ново вводимого граничного условия;
- Ядро интегрального уравнения приведено с опечатками в знаках.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов и их можно рассматривать как рекомендации для проведения будущих

исследований. Они не снижают моего общего высокого мнения о диссертационной работе.

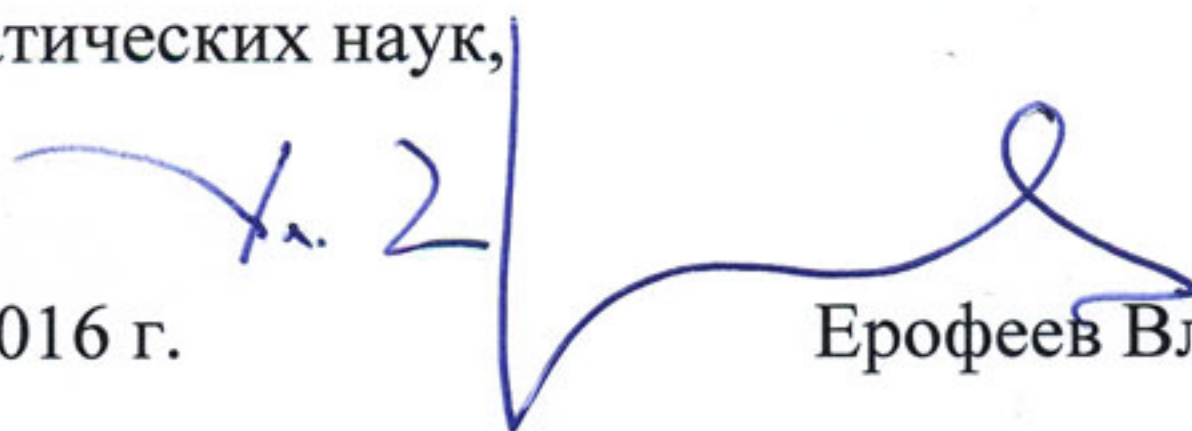
Автореферат правильно отражает содержание диссертации. Основные результаты диссертации полно и подробно представлены в центральной печати, среди которых 22 статьи в журналах, входящих в Перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ. Результаты могут найти применение в дальнейшем при решении обратных задач идентификации отслоений.

Диссертация М.В. Голуба является завершенным исследованием высокого научного уровня. Работа содержит новые важные результаты, вносящие существенный вклад в развитие методов решения задач механики сплошных сред и волновой динамики.

Считаю, что работа «Дифракция упругих волн, локализация энергии и резонансные эффекты в повреждённых многослойных структурах» удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемых к докторским диссертациям, а ее автор – Михаил Владимирович Голуб заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Директор
Института проблем машиностроения РАН
Российской академии наук,
доктор физико-математических наук,
профессор

«1» декабря 2016 г.



Ерофеев Владимир Иванович

Институт проблем машиностроения РАН – филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения
«Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук»
603024, Нижний Новгород, ул. Белинского, 85
тел. 8 (831)432-03-00
e-mail: erof.vi@yandex.ru

Подпись В.И. Ерофеева удостоверяю:

Ученый секретарь ИПМ РАН,
к.т.н., доцент



Е.А. Мотова