

## ОТЗЫВ

официального оппонента Соловьева Аркадия Николаевича

на диссертацию Голуба Михаила Владимировича

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

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

**Актуальность исследований.** Теоретическое и экспериментальное изучение волновых явлений в многослойных упругих волноводах имеет многочисленные приложения в различных разделах науки и техники. В частности, результаты исследования дифракционных и резонансных свойств дефектов различных видов, а также соответствующие механико-математические модели уже нашли применение в современных методах неразрушающего контроля и при создании систем диагностики состояния производственных объектов, позволяющих обнаруживать повреждения в ходе их эксплуатации. Однако дальнейшее развитие ультразвуковых методов обнаружения и идентификации дефектов и их успешное применение для диагностики конструкций из современных композиционных материалов требует решения ряда задач, связанных с особенностями возникновения повреждений в композитах. Большое внимание Голуб М.В. в своей диссертационной работе заслуженно уделил проблеме описания дефектов типа отслоений, идентификация и обнаружение которых на практике по-прежнему сопряжено с большими сложностями. В работе предложен новый подход к описанию частично отслоившихся зон и границ с неидеальным контактом материалов, при этом выведены соотношения между поврежденностью и упругими свойствами многослойного композита. Соискателем разработаны и реализованы в виде комплексов программ сложные механико-математические модели, позволяющие описывать поведение широкого класса многослойных композитов при наличии повреждений произвольной формы. Диссертантом

также были рассмотрены такие постановки задач, при которых поврежденными могут быть пьезоэлектрические преобразователи, применяемые во многих системах диагностики в качестве излучателей и датчиков. Результаты диссертации получены в рамках выполнения федеральных целевых программ, а также проектов, поддержанных различными научными фондами, что также указывает на актуальность и практическую значимость полученных результатов.

**Достоверность и обоснованность** результатов обеспечивается строгостью постановок и математических методов решения рассматриваемых задач. Часть полученных в ходе исследования результатов подтверждена экспериментально. **Научная и практическая значимость** работы обусловлена разработкой новых моделей для многослойных волноводов с повреждениями и установлением важных закономерностей, таких как связь между резонансными явлениями, концентрацией напряжений, захватом и локализацией энергии и формированием запрещенных зон, а также связь между поврежденностью и жесткостью соединения.

Диссертация Голуба М.В. состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы из 213 наименований. Работа изложена на 240 страницах, включая 6 таблиц и 128 рисунков.

Во введении автором сделан подробный обзор известных подходов и методов описания динамического поведения упругих композитов при воздействии поверхностных сил и при наличии повреждений разных типов и форм, отдельное внимание уделено спектральным задачам, решение которых является ключевым фактором для понимания резонансных и блокирующих эффектов, что в полной мере демонстрируется в диссертационной работе. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, убедительно показано, в чём состоит новизна исследования и какова практическая значимость полученных результатов.

В первой главе приведены основные уравнения и граничные условия, необходимые для постановки краевых задач, описывающих волновую динамику поврежденных многослойных упругих волноводов. Приведена классификация типов отслоений и повреждений для многослойных волноводов, определяющая логичность и последовательность дальнейшего изложения материала в диссертационном исследовании.

Во второй главе рассматривается распространение волн в многослойных упругих волноводах с учетом возможного ослабления адгезионных связей на интерфейсах. Рассмотрен новый класс задач для многослойных композитов с периодической организацией слоев, называемых фононными кристаллами. Для этих структур, в случае плоских падающих волн, построены матрицы переноса, связывающие волновые поля на интерфейсных границах, как для одного многослойного пакета, так для их наборов. Изложена разработанная схема определения, так называемых запрещенных и разрешенных зон в фононных кристаллах. Приведены алгоритмы построения символов матриц Грина в случае ослабления адгезионных связей на границах между слоями в волноводе конечной толщины и проанализировано влияние изменения характера связей на распространение волн Лэмба. Полученные результаты открывают предпосылки для определения на практике степени повреждения интерфейсов по изменению групповых скоростей волн, распространяющихся в волноводе.

Изучению воздействия пьезоэлектрических преобразователей на многослойные структуры посвящена третья глава. Для описания колебаний модифицирован метод конечных элементов высокого порядка точности, а для моделирования взаимодействия пьезоэлектрических преобразователей, в том числе отслоившихся, с волноводом разработан гибридный подход, где описание динамики волновода производится с помощью интегрального подхода, изложенного ранее в тексте работы. Во второй части главы приведены результаты анализа явлений, возникающих при взаимодействии пьезоэлектрического преобразователя с волноводом. Показано, что спектральные точки краевой задачи при идеальном контакте расположены

вдали от вещественной оси и рост поступающей в волновод энергии связан действием краев источника колебаний. В то же время для частично отслоившегося пьезоэлектрического преобразователя продемонстрировано приближение точек спектра к вещественной оси. Резонансные колебания наглядно проиллюстрированы с помощью вектора плотности потока энергии и соответствующих линий тока энергии. Надежность и корректность построенных математических моделей убедительно подтверждена экспериментальными данными, полученными соискателем.

Четвертая глава диссертации Голуба М.В. посвящена анализу колебаний многослойных волноводов с одиночными повреждениями. Диссертантом разработана модификация метода граничных интегральных уравнений для многослойных волноводов с ослаблением адгезионных связей при наличии одиночных отслоений круговой, прямоугольной, полосовой формы, а также развита методика на основе вариационно-разностного подхода, позволяющая описывать планарные отслоения произвольных форм. Необходимо отметить, точное совпадение резонансных частот, определенных с помощью метода граничных интегральных уравнений, с результатами проведенных экспериментов. При этом в ходе экспериментов полностью подтвердились предсказанные численно явления резонанса и локализации волновых колебаний. В главе проанализированы резонансные свойства отслоений различных типов, а также рассмотрены фононные кристаллы с одиночными дефектами.

В пятой главе приводятся результаты, обобщающие технику метода граничных интегральных уравнений на случай конечного количества планарных отслоений. Как и в четвертой главе помимо отслоений произвольной формы, для которых применен вариационно-разностный подход, решены задачи о колебаниях систем круговых и полосовых дефектов. Выявлен и проанализирован эффект формирования запрещенных и разрешенных зон при периодическом расположении отслоений, исследовано изменение спектральных свойств волновода при добавлении дополнительных отслоений.

Показана возможность фокусировки волновой энергии в фононных кристаллах путем расстановки неоднородностей типа тонких разрезов, что представляет большой теоретический и практический интерес.

Распространение упругих колебаний при наличии в волноводе распределенных систем отслоений рассмотрено в шестой главе. Для моделирования данных процессов развит подход на основе введения в поврежденной области граничных условий пружинного типа. Получены определяющие соотношения, связывающие жесткость распределенной пружины, с характеристиками поврежденного интерфейса, при этом проделан значительный объем аналитических выкладок для вывода явных выражений для жесткости. Рассмотрен также случай периодического распределения отслоений и осуществлен подробный сравнительный анализ всех трех подходов к описанию повреждённых интерфейсов. Исследованы резонансные режимы колебаний фононных кристаллов с периодической системой разрезов, изучена возможность влияния расположения системы неоднородностей на разрешенные и запрещенные зоны.

В заключении кратко перечислены основные результаты проведенных в рамках диссертационной работы исследований, **научная новизна** которых не вызывает сомнения.

Автореферат диссертации правильно и в полной мере отражает ее основное содержание.

По диссертационной работе имеется ряд замечаний, которые носят рекомендательный характер:

1. В третьей главе рассмотрена практически важная и интересная задача об отслоении актуатора и приводятся экспериментальные данные при отклейке половины актуатора, однако ничего не сказано о влиянии клеевого слоя и о схлопывании отклеенного края актуатора, которое может наблюдаться в реальности.

2. Автор приводит постановки и решения некоторых задач для пьезоэлектрических тел, однако, к сожалению, для фононных кристаллов

рассматриваются только упругие материалы без учета пьезоэффекта. Было бы интересно не только с точки зрения теории, но и практики, изучить особенности колебаний пьезоупругих фононных кристаллов, и возможность управления их электромеханическими свойствами путем расстановки электродов и неоднородностей.

3. Учитывая большое внимание, уделяемое спектральным характеристикам рассматриваемых дифракционных задач, автору стоило бы привести на стр. 32-33 более детальную классификацию спектральных точек. Кроме того, осуществленное автором отождествление терминов «точка дискретного спектра» и «комплексная резонансная частота» хоть и понятно из контекста, но не является до конца верным, см., например, *С.А. Назаров, ЖВММиМФ, 2013, т. 53, с. 878–897.*

4. На с. 105 в выражении для символа ядра интегрального уравнения указаны неверные множители элементов 13 и 23 (вместо мнимой единицы должен стоять знак «минус»), в автореферате в формуле (8) пропущен множитель.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов и не снижают научной и практической значимости диссертационной работы.

Диссертация Голуба М.В. является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором самостоятельно на высоком научном и профессиональном уровне. Положения, выносимые на защиту, составляют оригинальный научный результат, который может быть квалифицирован как решение актуальной научной проблемы.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Основные положения диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в открытой печати и апробированы на международных и всероссийских конференциях. Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, опубликованы в 22 статьях в научных изданиях, входящих в перечень,

рекомендованных ВАК РФ, также имеется 13 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Диссертационное исследование «Дифракция упругих волн, локализация энергии и резонансные эффекты в повреждённых многослойных структурах» представляет собой научно-квалификационную работу и удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемых к докторским диссертациям (п.п. 9, 10 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» о 24 сентября 2013 г. № 842), а автор исследования – Голуб Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,  
заведующий кафедрой «Теоретическая и прикладная механика»  
Донского государственного технического университета,  
доктор физико-математических наук, доцент  
тел. 8-863-2381509 (раб.), 8-904-5041638 (моб.)  
e-mail: solovievarc@gmail.com

«30» ноября 2016г.

Соловьев Аркадий Николаевич

Адрес: ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»  
(ДГТУ), пл. Гагарина, дом 1, 344000, г. Ростов-на-Дону.

Подпись А.Н. Соловьева удостоверяю:  
Ученый секретарь Ученого совета ДГТУ



В.Н. Анисимов