

ФАНО РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАШИНОВЕДЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИПМаш РАН)



В.О., Большой проспект, д.61, Санкт-Петербург, 199178
Тел.: (812)-321-4778; факс: (812)-321-4771; www.ipme.ru

ОГРН 1037800003560, ИНН/КПП 7801037069/780101001

УТВЕРЖДАЮ:

ВРИО директора,
доктор физико-математических наук,
профессор
А.К. Беляев



25.11. 2016 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу
Голуба Михаила Владимировича
«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

Актуальность темы диссертации. Диссертационная работа М.В. Голуба посвящена выявлению качественных и количественных закономерностей, присущих волновым процессам в неоднородных поврежденных упругих телах. В качестве неоднородных тел в диссертации рассматриваются как волноводы конечной толщины, состоящие из нескольких слоев с различными упругими свойствами, так и фоновые кристаллы (разновидность метаматериалов) — пакеты упругих слоёв с периодической структурой, заключенные между двумя упругими полупространствами. Для описания повреждённости упругого тела автором используется оригинальная концепция “отслоения” — двумерного дефекта в трехмерном упругом теле. С физической точки зрения наличие отслоения на некоторой поверхности внутри тела предполагает неидеальность контакта между частями этого тела, расположенными по разные стороны от этой поверхности. Простейший тип отслоения — трещина,

т.е. разрез в теле. Рассматриваются также более сложные типы отслоений, предполагающие наличие внутренних связей между берегами, а также пространственные системы отслоений, в том числе со стохастическим распределением. Известно, что наличие подобного рода дефектов в бесконечных (или полубесконечных) в одном из направлений упругих телах может приводить к тому, что спектр частот собственных колебаний тела оказывается смешанным. Именно, полный спектр частот состоит из “классического” непрерывного спектра, частотам которого соответствуют бегущие волны, и дискретного спектра частот, которым соответствуют нераспространяющиеся локализованные (ловушечные) моды колебаний. Несмотря на то, что из литературы известно множество механических систем, обладающих смешанным спектром частот собственных колебаний, к настоящему времени не сформулированы критерии, позволяющие установить факт наличия смешанного спектра и возможности локализации волновых процессов для конкретной механической системы. С другой стороны, локализация волновых процессов, если она имеет место, имеет существенные практические последствия. Она может приводить к неожиданно высокому уровню вибраций в реальных инженерных системах и даже к разрушению. Более того, можно сказать, что к настоящему времени в науке нет ясного понимания степени важности роли, которую играют механические системы со смешанным спектром в понимании явлений окружающего мира. В связи с тем, что одной из задач диссертации является исследование резонансных эффектов, связанных с явлением локализации упругих волн в окрестностях отслоений, **нет никаких сомнений в актуальности темы диссертации.**

Обоснованность и достоверность результатов обеспечивается строгой математической постановкой задач динамической теории упругости, использованием математически строгих методов их решения, сравнением результатов, полученных при помощи различных методов, сравнением предельных случаев рассматриваемых задач с известными результатами, полученными другими исследователями, сравнением с экспериментальными результатами.

Общая характеристика работы. Диссертация М.В. Голуба “Дифракция упругих волн, локализация энергии и резонансные эффекты в повреждённых многослойных структурах” изложена на 240 страницах и состоит из введения, шести глав, заключения, приложения и списка литературы, включающего в себя 213 литературных ссылок.

Во **введении** представлен библиографический обзор работ по динамической теории упругости, посвященных распространению волн в слоистых структурах с повреждениями. Сформулированы доводы, доказывающие актуальность диссертационного исследования, достоверность и обоснованность его результатов, его цели и задачи.

В **первой главе** обсуждается общая формулировка задач динамической теории пьезоупругости для многослойных упругих волноводов и фононных кристаллов. Предлагаются различные модели отслоений. Обсуждается общая схема решения задач дифракции волн на отслоениях, а также возможность локализации волнового поля.

Вторая глава посвящена распространению упругих волн в многослойных структурах при неидеальном контакте между слоями.

В **третьей главе** обсуждаются методы моделирования взаимодействия пьезоэлектрических преобразователей с многослойными волноводами. Рассматривается динамика пьезоэлектрического преобразователя, анализируются резонансные свойства системы актуатор-волновод, обсуждаются резонансные явления и явления локализации в системе с отслоившимся пьезоактуатором. Для верификации моделей приводятся результаты численных и натуральных экспериментов.

В **четвертой главе** автор рассматривает упругие колебания волноводов с одиночными отслоениями. При этом рассматриваются отслоения разной геометрической формы. Обсуждаются методы решения краевых задач для отслоений различной геометрии. Анализируются дифракционные и резонансные свойства отслоений на границе раздела двух сред. Изучается дифракция волн Лэмба на отслоениях (приводятся результаты натурального эксперимента для подтверждения эффекта локализации и захвата энергии в слое с отслоением).

Пятая глава посвящена колебаниям многослойных структур с конечным числом отслоений. Обсуждаются методы решения краевых задач в случае системы отслоений. Исследуются резонансные колебания системы отслоений. Изучается частный случай равномерно распределенных отслоений, характерный формированием запрещенных и разрешенных зон. Также рассматриваются резонансы, локализация энергии и ее фокусировка в фононном кристалле с полосовыми отслоениями.

В **шестой главе** обсуждаются многослойные структуры с распределенными системами отслоений. Рассматриваются вопросы моделирования прохождения упругих плоских волн через границу двух сред, на которой расположена стохастически распределенная система раскрытых трещин. Обсуждается эквивалентность модели поврежденного интерфейса со стохастическим распределением микротрещин и пружинной модели. Исследуется периодическая система отслоений, а также эффекты локализации и резонансные эффекты в фононном кристалле с периодически расположенными отслоениями. Приводится сравнительный анализ подходов к моделированию поврежденных интерфейсов.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем: автором предложены и решены оригинальные задачи, позволяющие по-новому взглянуть на влияние локализации волновых процессов на динамические прочностные свойства материалов и конструкций, а также расширить современные научные представления о свойствах систем со смешанным спектром собственных частот, в частности, о резонансных эффектах, связанных с явлением локализации упругих волн в окрестностях включений. Предложенные модели могут также быть использованы для описания волновых процессах в метаматериалах. Рассмотренные автором модельные задачи решены при помощи предложенных им новых модификаций численных методов, на основе которых автором созданы новые алгоритмы и программы.

Научная значимость и практическая ценность результатов не вызывают никаких сомнений. Научная значимость, в первую очередь, состоит в том, что результаты диссертации расширяют и углубляют представления о существенности влияния локализации как в природе в целом, так и в материалах и конструкциях в частности. Практическая значимость полученных автором результатов состоит в возможности их применения в области неразрушающих методов контроля прочностных свойств материалов и конструкций. Кроме того, рассмотренные в работе задачи могут быть использованы при исследовании свойств нового класса материалов — метаматериалов. Предложенные в работе модификации численных методов, а также разработанные автором алгоритмы и программы могут быть использованы при практических расчетах композитных конструкций с дефектами типа отслоений.

Результаты диссертации могут быть использованы при проведении научных исследований в ФГБУН Институт проблем механики РАН (ИП-Мех РАН), Южном федеральном университете, ФГБУН Институт механики сплошных сред Уральского отделения РАН (ИМСС УрО РАН), Санкт-Петербургском политехническом университете Петра Великого и др.

Результаты диссертации опубликованы в 22 работах в журналах, входящих в базы данных Scopus, Web of Science и рекомендованных ВАК.

Замечания по работе и ее оформлению. Основные замечания сводятся к следующему:

1. В конце каждой из глав диссертации отсутствуют заключения: не сформулированы основные результаты, полученные в данной главе. Этот факт сильно затрудняет чтение диссертации.
2. Основные результаты диссертации, представленные в заключении к диссертации (с. 217–218) и в автореферате (с. 38–39), сформулированы не

вполне идентично по форме. В частности, количество пунктов в списке основных результатов в автореферате — семь, а в диссертации — шесть. В то же время, внимательно прочитав соответствующие формулировки, можно понять, что, по существу, они идентичны (в частности, пункты 3 и 4 основных результатов в автореферате соответствуют пункту 3 основных результатов диссертации), так что в данном случае содержание автореферата правильно отражает содержание диссертации.

3. Глава 3 диссертации называется “Возбуждение пьезоэлектрическими преобразователями упругих колебаний в волноводе с отслоениями”, при этом во введении к этой главе (см. стр. 66) автор утверждает, что глава 3 посвящена методам моделирования взаимодействия пьезоэлектрических преобразователей с многослойными волноводами без дефектов.
4. На с. 130 диссертации при исследовании локализации волн Лэмба на отслоении утверждается, что “численный анализ показывает, что полюса обоих типов могут касаться оси $\operatorname{Re} \omega = 0$, становясь в этих точках чисто вещественными при расчётах”. В первую очередь следует заметить, что, несмотря на то, что полученные в диссертации результаты являются очень серьезным аргументом в пользу того факта, что ω может становиться чисто вещественным, строго говоря, при помощи численного анализа этот факт (т.е. возможность полной локализации волнового процесса) доказать невозможно. Во вторых, в процитированной выше фразе, речь, по-видимому, идет об оси $\operatorname{Im} \omega = 0$. Неясно также утверждение на с. 130 о том, что “полюса первого типа с увеличением длины отслоения l в основном приближаются к вещественной оси”.
5. Из текста диссертации не вполне очевидно, как связан материал параграфа 4.8, начинающегося со слов “для подтверждения корректности расчетов в случае фононных кристаллов были проведены сравнения с известными результатами”, с содержанием предыдущих параграфов данной главы.
6. На с. 118 диссертации при введении сферической системы координат зенитный и азимутальный углы обозначены одной и той же греческой буквой “тэта” с разными начертаниями: ϑ и θ , соответственно.
7. На с. 106 в формуле (4.5) используется обозначение z , которое вводится только на с. 109 (по-видимому, имеется в виду x_3).
8. На с. 119 в формуле (4.22) производится асимптотическая оценка интеграла в правой части (4.5) методом стационарной фазы. Условие, при котором справедлива оценка (4.22), записано в диссертации как $R = |\mathbf{x}| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2} \rightarrow \infty$. В то же время, структура двукратного интеграла в

правой части (4.5) позволяет предположить, что методом стационарной фазы он может быть оценен только при $\sqrt{x_1^2 + x_2^2} \rightarrow \infty$.

Сделанные замечания не влияют общую положительную оценку работы.

Общее заключение. Диссертация выполнена в рамках паспорта специальности ВАК 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела (пп. 5,6,7,8). Считаю, что диссертационная работа М.В. Голуба соответствует п.п. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 (в ред. постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. №335), а ее автор Голуб Михаил Владимирович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа М.В. Голуба рассмотрена на Городском семинаре по механике при ИПМаш РАН (рук. член корр. РАН Д.А. Индейцев) 29 сентября 2016 г.

Научный руководитель,
член-корр. РАН, проф.

В.н.с.,
д.ф.-м.н.

25.11.2016

 Д.А. Индейцев
 С.Н. Гаврилов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем машиноведения Российской академии наук (ИПМаш РАН);
Почтовый адрес: В.О., Большой пр. 61,
Санкт-Петербург, 199178;
тел. (812)3214778;
e-mail: ipmash.ran@gmail.com



Д.А. Индейцева и С.Н. Гаврилова
ПОМОЩНИКА ДИРЕКТОРА

2016 г.