

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента

Карабутова Александра Алексеевича о диссертационной работе
Агафонова Александра Александровича «Линейные и нелинейные
эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях»,
представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика

Диссертационная работа А.А. Агафонова посвящена исследованию особенностей распространения клиновых упругих волн в образцах клиньев, имеющих особенности геометрии, либо содержащих дефекты, а также при наличии анизотропии упругих свойств.

Клиновые волны – это особый вид волноводных мод, которые можно отнести к фундаментальным акустическим волнам по аналогии с объёмными волнами и поверхностными волнами Релея. Упругие волны в твердотельном клине отличаются своей низкой скоростью распространения, отсутствием дисперсии в идеальном случае, отсутствием дифракционной расходимости. Это делает клиновые волны перспективными для некоторых приложений. В частности, в неразрушающем контроле объектов, содержащих клин в своей геометрии, использование клиновых волн может быть весьма продуктивным.

Ультразвуковые методы дефектоскопии обеспечивают возможность неразрушающего контроля целостности и качества твердотельных материалов, композитов и конструкций. С использованием лазерного возбуждения и приёма сигналов этот метод может быть также бесконтактным и дистанционным. Поэтому представленные в диссертационной работе А.А. Агафонова исследования линейных и нелинейных свойств клиновых волн для различных типов геометрии и материалов твердотельных клиньев являются актуальными и перспективными.

Диссертация состоит из введения, обзорной части, включающей 7 параграфов и экспериментальной части, состоящей из 8 разделов, заключения и библиографии. Разделы экспериментальной части посвящены описанию методик экспериментальных исследований, и включают в себя описание экспериментов, их результатов и основные выводы. Общий объем работы составляет 142 страницы, 72 рисунка, 0 таблиц и 128 библиографических ссылок.

Во **введении** к диссертационной работе обосновывается актуальность, новизна и практическая значимость исследуемой проблемы, приводится краткий обзор литературы, сформулированы цели и задачи работы, а также описывается методология исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава разделяется на 7 параграфов и представляет собой обзор теоретических, экспериментальных и численных результатов исследований отечественных и зарубежных авторов по теме упругих волн в твердотельных клиньях.

Рассматриваются основные свойства клиновых волн, количество и скорости их мод, локализация и дисперсия. Описаны результаты работ по исследованиям клиновых волн в образцах клиньев с так называемыми геометрическими дефектами усечениями, выемками, наличием торцов. Рассматривается влияние данных особенностей геометрии на свойства распространения в них клиновых волн малой амплитуды. Рассматриваются также нелинейные явления, возникающие при распространении волн в твердотельном клине. Обсуждается влияние наличия классической и структурной нелинейности на распространение клиновых волн, влияние различных особенностей геометрии образцов клина на их акустические свойства. Рассматриваются работы, посвящённые исследованиям волн в клиньях, граничащих с жидкостью, а также в составных твердотельных структурах. А также представлен небольшой обзор таких уникальных структур как акустические «чёрные дыры», в том числе в виде пластин с толщиной, изменяющейся по степенному закону и представляющих собой клин.

Во **второй главе** диссертации представлены экспериментальная установка и методики, разработанные автором, а также результаты проведенных экспериментальных исследований линейных и нелинейных свойств клиновых волн для различных материалов, геометрий клина, а также в случае наличия дефектов внутренней структуры.

Первый параграф второй главы содержит описание автоматизированной экспериментальной ультразвуковой установки и методик исследования линейных и нелинейных свойств упругих волн в твердотельном клине: импульсный ультразвуковой метод и метод лазерной сканирующей виброметрии.

Во втором параграфе представлены результаты исследований дисперсии и локализации упругих волн в изотропном твердотельном клине. Обнаружено отсутствие зависимости показателя экспоненты, описывающей локализацию клиновой волны у ребра от частоты.

Параграф 2.3 посвящён исследованиям нелинейных эффектов в изотропном твердотельном клине, в том числе при наличии в нём искусственно созданных дефектов. Обнаружены эффекты генерации второй гармоники клиновых волн, быстрой динамики и нелинейного поглощения волн в образцах клина. Исследована зависимость амплитуды второй гармоники клиновой волны от амплитуды волны на основной частоте. Обнаруженная зависимость близка к линейной.

В параграфе 2.4 описаны результаты экспериментальных исследований нелинейных упругих свойств изотропного клина в условиях создания в нем упругого напряжения, путём приложения растягивающей силы. Исследована зависимость амплитуды второй гармоники и скорости распространения клиновых волн от величины приложенной силы.

В параграфе 2.5 изложены результаты исследования клиновых волн в так называемых цилиндрических клиньях. Исследована их локализация и дисперсия.

Также исследовано влияние границы с различными жидкостями на распространение клиновых волн в образцах цилиндрических клиньев в области локализации волны. Сравниваются результаты эксперимента и моделирования для зависимости уменьшения скорости клиновой волны в образце с жидкостью от плотности жидкости.

В параграфе 2.6 исследованы локализация и дисперсия клиновых волн в стальном сверле. Обнаружена ярко выраженная дисперсия, имеющая немонотонный характер. При этом локализация клиновых волн в образце сверла сохраняет форму кривых близкую к экспоненциальной.

Параграф 2.7 посвящён исследованиям нелинейных свойств клиновых волн, распространяющихся в анизотропном клине из монокристалла ниобата лития. Исследованы эффекты генерации второй и третьей высших гармоник, быстрой динамики и нелинейного поглощения клиновых упругих волн. Получены коэффициенты степенной зависимости амплитуды второй гармоники клиновых волн от амплитуды волны на основной частоте.

В параграфе 2.8 представлены результаты исследования распространения изгибных волн Лэмба в пластине с толщиной, уменьшающейся по параболическому закону, представляющей собой клин. Исследовано явление увеличения амплитуды и уменьшения скорости изгибной волны в пластине при приближении к её ребру для ряда частот. Визуализировано изменение направления распространения изначально плоских изгибных волн при исходных направлениях волнового вектора параллельного и перпендикулярного тонкому краю пластины.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертации А.А. Агафонова, благодарности, список публикаций автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа А.А. Агафонова представляет собой законченную научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне. Достоверность и обоснованность представленных в диссертационной работе результатов подтверждается проведенными численными и физическими экспериментами, а также соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчетам и результатам, полученным в работах других авторов. Автореферат полно и правильно описывает содержание диссертационной работы.

В качестве основных **достоинств работы** (наиболее интересных научных результатов работы) можно выделить следующие:

- Экспериментально исследована дисперсия скорости распространения и пространственная структура колебаний волн в клиньях различной геометрии – прямолинейной и спиральной.

- Выполненные в диссертационной работе исследования нелинейных свойств изотропных клиньев с дефектами дают представление о качестве и характере влияния структурной нелинейности в клине на распространение в нём клиновых волн.
- Исследования распространения волн в клине из изотропного материала при действии растягивающей силы предоставляют возможности для определения качества частей конструкций, находящихся под воздействием механической нагрузки.

Основные результаты диссертации А.А. Агафонова опубликованы в 15 печатных работах, в том числе в 3 статьях в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении учёных степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова, 2 статьях в других рецензируемых научных журналах и 10 публикациях в сборниках тезисов конференций.

В то же время к работе имеются следующие **замечания**:

В первом положении, выносимом на защиту, формулировка «выполненных из изотропного поликристаллического сплава Д16 с остаточными упругими напряжениями» не очень удачна и носит противоречивый характер, поскольку при наличии внутренних напряжений материал не будет изотропным.

Исследования, описанные в параграфе 2.4 по влиянию остаточных механических напряжений на распространение клиновых волн, выполнялись с клином, изготовленным из дюралевого прутка. Остаточные деформации создавались при кручении клина в жестких зажимах. Однако в металлических прутках, не прошедших термическую обработку, анизотропия скорости ультразвука может достигать 1.5%- 2%. В тексте диссертации не указано, проводилась ли предварительная нормализация материала клина и измерялась ли анизотропия скорости ультразвука в ненагруженном клине.

Указанные замечания не умаляют заслуг соискателя, равно как и их высокой оценки и не влияют на общее положительное впечатление от диссертации.

Результаты, представленные в диссертационной работе А.А. Агафонова, вносят существенный вклад в исследование свойств клиновых волн и в применение их в дефектоскопии твердотельных образцов, содержащих клин в своей геометрии.

Считаю, что диссертация «Линейные и нелинейные эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях» полностью соответствует специальности 1.3.7. «Акустика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени

кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Агафонов Александр Александрович — заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. «Акустика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник
лаборатории лазерного ультразвука
Научного центра волновых исследований
Института общей физики имени А.М. Прохорова
Российской академии наук (НЦВИ ИОФ РАН)

Карабутов Александр Алексеевич
мая 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (499) 503-87-77 (доб. 1-91).

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена докторская диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика» (по физико-математическим наукам)

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, ул. Вавилова, д. 38

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Телефон: +7 (499) 503-87-34; e-mail: office@gpi.ru

Подпись Карабутова Александра Алексеевича **ЗАВЕРЯЮ:**

ВРИО учёного секретаря
учёного совета ИОФ РАН
д.ф.-м.н., доцент

Глушков В.В.