

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ М.В. ЛОМОНОСОВА**



На правах рукописи

Агафонов Александр Александрович

**Линейные и нелинейные эффекты
при распространении упругих волн
в твердотельных клиньях**

Специальность:

1.3.7. Акустика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2024

Работа выполнена на кафедре акустики физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный **Коробов Александр Иванович**
руководитель: доктор физико-математических наук, профессор

Официальные **Есипов Игорь Борисович**
оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры физики факультета разработки
нефтяных и газовых месторождений Российского
государственного университета нефти и газа
(национального исследовательского университета)
имени И.М. Губкина

Карабутов Александр Алексеевич
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 (ИЦВИ ИОФ РАН)

Миронов Михаил Арсеньевич
кандидат физико-математических наук, старший научный
сотрудник,
начальник теоретического отдела Акустического института
имени академика Н.Н. Андреева

Защита диссертации состоится «23» мая 2024 года в 15:00 на заседании диссертационного совета МГУ.013.6 на физическом факультете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физическая аудитория имени Р.В. Хохлова.

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций Научной библиотеки Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Ломоносовский проспект, д. 27) и в сети Интернет: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/013.6/2874>

Автореферат разослан « ____ » апреля 2024 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета МГУ.013.6
доктор физико-математических наук, доцент
kosareva@physics.msu.ru



О.Г. Косарева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Клиновые упругие волны (КУВ) — это упругие возмущения, распространяющиеся вдоль рёбер твердотельных клиньев [1-3]. Прошло уже около полувека с момента открытия и рассмотрения клиновых акустических волн. Однако клиновые акустические волны продолжают привлекать внимание в силу проявления ими уникальных свойств. Клин является единственным типом волновода, в геометрии которого в идеальном случае отсутствует размерный параметр, и, следовательно, отсутствует внутримодовая дисперсия упругих волн. Скорость распространения волны в клине зависит от упругих свойств материала клина, угла при его вершине и от номера моды. Клиновым волнам, помимо отсутствия дисперсии и дифракционных потерь, свойственна низкая скорость распространения и высокая степень локализации акустической энергии у ребра клина [1-4]. Данные свойства делают клиновые волны перспективными для различных областей применения – дефектоскопии, акустоэлектроники, подводной акустики, геофизики, акустической визуализации, звукопоглощения, сенсоров [5-8]. В неразрушающем контроле можно использовать КУВ для диагностики композитных материалов, лопаток турбин, режущих кромок инструментов, различных рельсовых конструкций [7]. Поэтому, несмотря на трудность их аналитического рассмотрения и частую необходимость на определенной стадии применения компьютерного моделирования для исследования их свойств даже в простейших случаях, клиновые волны продолжают привлекать внимание исследователей и в нашей стране, и за рубежом.

Реальный клин может быть выполнен из поли- или монокристаллического материала, может иметь дефектную структуру на микро- или мезоскопическом уровне, отклонения геометрии от линейной, усечения, может контактировать с различными средами. Экспериментальное исследование особенностей распространения клиновых волн в таких клиньях имеет фундаментальное и прикладное значение.

Так, на настоящий момент выполнено недостаточно теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию нелинейных акустических волн в клиньях из анизотропных и изотропных твердых тел с дефектами [7]. В частности, ранее экспериментально не исследовалась генерация высших гармоник в анизотропных и изотропных остроугольных клиньях с искусственно созданными дефектами.

В работах [9-10] представлены исследования КУВ в образцах с геометрическими дефектами. Однако использование клиновых волн в области неразрушающего контроля твердых тел в настоящее время сдерживается по причине недостаточной информации о влиянии различных дефектов в материале клина – микротрещин, расслоений, остаточных упругих напряжений, а также

постоянных или переменных нагрузок – на нелинейные упругие свойства клиновых волн.

Актуальность исследования особенностей распространения нелинейных акустических волн в клиньях из поликристаллических металлов в условиях нагрузок сжатия-растяжения очевидна: металлические конструкции в процессе эксплуатации подвергаются переменным механическим нагрузкам, приводящим к накоплению дислокаций, микротрещин, остаточных напряжений и, как следствие, нарушению сплошности металла и его разрушению. Это указывает на необходимость постоянного мониторинга состояния таких конструкций. Акустические методы дефектоскопии обеспечивают возможность неразрушающего контроля структур, содержащих клин, в том числе, в процессе эксплуатации и дистанционно. Таким образом, решение фундаментальной задачи современной нелинейной акустики твердого тела, посвященной нелинейным акустическим волнам в клиньях из монокристаллов и изотропных поликристаллических металлов с дефектами, приобретает важное прикладное техническое значение.

В последнее время увеличился интерес к фундаментальным исследованиям упругих волн в клиньях с изменённой (криволинейной или сложной) геометрией [6, 8, 11]. Это обусловлено тем, что большинство клиновидных структур, которые нуждаются в неразрушающем контроле (ребра лопасти, крыло, кромки режущих инструментов (сверла, буры и др.)), не являются прямыми идеальными клиньями. Несмотря на то, что теория и моделирование предсказывает отсутствие дисперсии клиновых волн в прямом клине, из-за невозможности создания клина с идеальной вершиной (без ее закруглений или усечений), на высоких частотах в реальном клине появляется дисперсия упругих волн [4]. Граница частотного диапазона, в котором проявляется дисперсия, определяются величиной усечения ребра клина.

В изогнутых клиньях КУВ обладают дисперсией вследствие появления размерного параметра. Частным случаем таких клиньев является структура, ограниченная конической поверхностью с одной стороны и цилиндрической с другой, так называемые цилиндрические клинья [8]. Несмотря на наличие ряда работ по исследованию цилиндрических клиньев с положительной кривизной, свойства клиновых волн в цилиндрическом клине с отрицательной кривизной, такие как их дисперсия и локализация, численно и экспериментально исследованы не были. Также недостаточно выполнено работ по упругим волнам в клиньях спиральной формы, нет исследований КУВ в таких образцах на низких частотах (ниже 1 МГц). Поэтому исследование особенностей распространения упругих волн в клиньях с изменённой геометрией ребра клина, например, с усечением и изгибом ребра клина, остается актуальной задачей.

Представляет интерес распространение КУВ в клине, граничащем с жидкостью. Имеется ряд работ, посвящённых исследованиям клиновых волн в прямом клине, погружённом в жидкость [5, 12, 13]. Однако поведение упругих волн в клиньях при изменяющейся площади контакта боковой поверхности клина с жидкостью к настоящему времени исследовано недостаточно. В частности, такие

исследования отсутствуют для замкнутого клина, например, цилиндрического, в то время как именно этот тип клиньев может быть использован в качестве резонаторов клиновых волн. Действительно, в силу того, что их кромка образует окружность, возможна эффективная накачка энергии в этих образцах в стоячие клиновые волны.

Отдельно следует отметить работы, в которых были предсказаны и исследованы структуры, называемые «акустическими чёрными дырами» (АЧД) [14, 15]. АЧД представляют интерес для структурной акустики и звукопоглощения. Основным свойством таких объектов является то, что вдоль некоторого направления (в зависимости от геометрии структуры) скорость упругих волн уменьшается до нуля, что должно приводить к бесконечному времени распространения волны на конечном участке в пространстве. Это приводит к отсутствию отражённой волны при распространении падающей волны вдоль этого направления. В АЧД такое уменьшение скорости волны связано с уменьшением локальной жёсткости, которое обычно достигается с помощью модификации геометрии – например, при уменьшении толщины образца по степенному закону [15].

Недостаточно экспериментальных и теоретических работ в этой области выполнено для образцов АЧД из новых материалов, например, из различных полимеров, в то время как такие материалы являются весьма перспективными. При использовании техники 3D печати из них могут быть выполнены образцы различных форм и структур.

Цель и задачи

Целью настоящей работы являются экспериментальные исследования методами лазерной виброметрии и нелинейной ультразвуковой спектроскопии влияния внутренней структуры, геометрии и граничных условий на особенности распространения упругих волн в изотропных и анизотропных клиньях, а именно:

- нелинейных эффектов (генерация второй упругой гармоники, быстрая динамика и нелинейное поглощение упругих волн) в прямых клиньях из изотропного материала (поликристаллического сплава алюминия) с искусственно созданными дефектами, в том числе при воздействии растягивающих статических напряжений;
- нелинейных эффектов (генерация второй и третьей упругих гармоник, быстрая динамика и нелинейное поглощение) в прямых анизотропных клиньях (выполненных из монокристалла ниобата лития);
- влияния граничных условий (граница с воздухом, водой, глицерином и автомобильным маслом) на скорость распространения клиновых волн в цилиндрических клиньях с положительной и отрицательной кривизной и сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования;

- дисперсии и локализации упругих волн Лэмба в пластине с параболическим профилем, образующим клин, и сравнение полученных результатов с расчетами по имеющимся теоретическим моделям;
- дисперсии и локализации упругих волн в спиральном клине сложной геометрии (металлическом сверле).

Для достижения основной цели в работе были поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать и создать автоматизированную ультразвуковую экспериментальную установку для исследования линейных и нелинейных волн в твердотельных клиньях, в том числе, с использованием сканирующего лазерного виброметра.

2. Рассчитать и изготовить образцы прямых клиньев из материалов с искусственно созданными в них дефектами, образцы цилиндрических клиньев, образец клина с параболическим профилем из АБС-пластика методом 3D печати.

3. Разработать экспериментальные методики для исследования особенностей распространения линейных и нелинейных упругих волн в клиньях разной геометрии, в случае отсутствия или наличия жидкости на поверхности клина, без нагрузки или при растягивающем одноосном напряжении, направленном параллельно ребру клина, а также методики исследования распространения изгибных волн Лэмба в клине с параболическим профилем.

4. Выполнить экспериментальные исследования:

а) Линейных и нелинейных параметров упругих волн в прямых клиньях из изотропных и анизотропных материалов в случаях наличия или отсутствия дефектов в их структуре.

б) Влияния растягивающего механического напряжения, направленного параллельно ребру клина, на скорость распространения и амплитуду второй гармоники упругих волн в прямом изотропном клине.

в) Влияния геометрии клина на скорость и локализацию упругих волн.

г) Зависимости скорости КУВ от уровня различных жидкостей, заполняющих цилиндрический клин с различной кривизной.

д) Особенности распространения изгибных упругих волн в пластине, толщина которой меняется по параболическому закону.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются упругие волны в твердотельных клиньях с различными геометрией и граничными условиями, а также с анизотропией упругих свойств материала клина.

Предметом исследования являются линейные (локализация и дисперсия клиновых волн) и нелинейные (генерация высших гармоник, нелинейное поглощение и эффект быстрой динамики) эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях.

Методология исследования

Экспериментальные исследования линейных и нелинейных свойств КУВ проводились импульсным ультразвуковым методом и методом сканирующей лазерной виброметрии.

Импульсный ультразвуковой метод заключается в возбуждении в образце ультразвукового импульса с помощью пьезокерамических преобразователей, прикреплённых к ребру клина, и регистрации прошедших и отражённых импульсов. При использовании схемы на прохождение сигнал излучался одним преобразователем и принимался одним или несколькими преобразователями или регистрировался с помощью лазерного сканирующего виброметра PSV-300 (Polytec).

Амплитуда нормальной компоненты колебательной скорости клиновой волны в заданных точках поверхности исследованных образцов измерялась методом сканирующей лазерной виброметрии.

Анализ спектра акустической волны и визуализация формы собственных колебаний образца выполнялись с помощью встроенного программного обеспечения лазерного виброметра методом Фурье преобразования.

Исследования нелинейных свойств КУВ проводились методом импульсной ультразвуковой спектроскопии. Определение амплитуды и фазы принимаемого сигнала осуществлялось с помощью ультразвукового измерительного комплекса RAM-5000 SNAP SYSTEM (Ritec) методом встроенной квадратурной обработки сигналов.

Для экспериментальных исследований влияния одноосного растяжения клина на нелинейные упругие свойства КУВ использовалась разработанная механическая система для создания контролируемой силы, действующей на образец параллельно ребру клина.

Научная новизна

В диссертационной работе получены следующие оригинальные научные результаты:

1. Проведены экспериментальные исследования генерации второй упругой гармоники клиновой волны в изотропном клине с искусственно созданными дефектами. Обнаружена неклассическая степенная зависимость амплитуды второй клиновой гармоники от амплитуды основной частоты и эффекты быстрой динамики и нелинейного поглощения для упругих волн в изотропных клиньях с дефектами внутренней структуры.

2. Обнаружена и исследована зависимость амплитуды второй гармоники упругих волн в клине от величины приложенной к клину статической силы, направленной параллельно ребру клина.

3. Экспериментально исследованы локализация и дисперсия КУВ в цилиндрических клиньях двух типов геометрии, в спиральном клине, а также

локализация КУВ в прямом клине. Обнаружено, что на коэффициент локализации и дисперсию оказывает влияние геометрия клина. Увеличение количества размерных параметров в геометрии клина приводит к возрастанию дисперсии наиболее медленной моды КУВ.

4. Экспериментально исследована зависимость скорости распространения КУВ в цилиндрических клиньях от расстояния от ребра клина до поверхности жидкости, заполняющей клин, с которой они граничат одной гранью. Обнаружено, что основное изменение величины скорости происходит, когда жидкость граничит с поверхностью клина в области локализации КУВ, и зависит от плотности жидкости.

5. В анизотропном клине из монокристалла ниобата лития с дефектами обнаружена неклассическая степенная зависимость амплитуды второй и третьей клиновых гармоник от амплитуды волны основной частоты и эффекты быстрой динамики и нелинейного поглощения.

6. Экспериментально определён частотный диапазон для изгибных волн Лэмба в клине с параболическим профилем из АБС-пластика, при котором он выполняет функцию концентрирующего волновода.

Практическая значимость работы

1. Обнаруженные неклассическая степенная зависимость амплитуды для высших упругих гармоник клиновых волн от амплитуды основной частоты, а также нелинейное поглощение и эффект быстрой динамики могут служить диагностическим признаком наличия дефектов внутренней структуры в материале клина.

2. Мониторинг деформации, напряжений и накопления дефектов внутренней структуры конструкций, содержащих клин и находящихся под механической нагрузкой, может быть осуществлен с помощью регистрации их нелинейных упругих свойств с использованием клиновых волн.

3. Обнаруженная в работе зависимость скорости распространения КУВ в цилиндрических клиньях с жидкостью от расстояния от ребра клина до поверхности жидкости может служить физическим принципом работы датчиков для определения уровня жидкости, в том числе, в агрессивных средах, а также основой методики контроля плотности жидкости при изменении внешних условий.

4. Проведенные эксперименты с параболическим клином показали, что он является волноводом, концентрирующим энергию акустической волны, что является важным в разработке акустических метаматериалов и поглощающих устройств, работающих по принципу “акустической чёрной дыры”.

Положения, выносимые на защиту:

1. Для изотропного поликристаллического материала (сплава Д16 с остаточными упругими напряжениями), коэффициенты M_2 , определяющие степенную зависимость второй упругой гармоники клиновой волны от амплитуды

основной частоты, равны $M_2 = 1,01 \pm 0,05$ для 30° клина, $M_2 = 1,06 \pm 0,05$ для 60° клина и $M_2 = 1,14 \pm 0,05$ для 44° клина, и отличны от коэффициента классической нелинейности $M_2 = 2$.

2. Статическая деформация образца изотропного клина с искусственно созданными дефектами приводит к увеличению его упругой нелинейности. При увеличении растягивающего механического напряжения σ от 0 до 25 МПа происходит возрастание амплитуды второй гармоники на $\approx 0,7\%$ по закону, близкому к линейному.

3. Локализация наиболее медленной моды КУВ в прямых, цилиндрических и спиральном клиньях близка к экспоненциальной. В прямом изотропном клине в частотном диапазоне от 200 до 1000 кГц коэффициент локализации не зависит от частоты и уменьшается с увеличением угла клина. Коэффициент локализации в спиральном клине в диапазоне от 160 до 580 кГц имеет частотно-зависимый характер.

4. В образцах цилиндрических клиньев с положительной и отрицательной кривизной в полосе частот от 120 до 600 кГц и от 150 до 400 кГц соответственно обнаружена дисперсия (изменение скорости составляет 2,8 % и 1,9 % для исследованных клиньев соответственно). В спиральном клине в полосе частот от 100 до 600 кГц обнаружена дисперсия (изменение скорости составляет 18 %).

5. Скорость распространения КУВ в цилиндрическом клине при контакте его внутренней поверхности с жидкостью уменьшается. При изменении плотности жидкости от 0,9 до 1,2 г/см³ происходит увеличение относительного изменения скорости КУВ от 16,7 до 18,4 % для положительного клина и от 12,6 до 15 % для отрицательного клина.

6. Для анизотропного материала (монокристалла ниобата лития с дефектами) коэффициенты M_2 и M_3 определяющие степенную зависимость второй и третьей упругих гармоник клиновой волны от амплитуды основной частоты, равны $M_2 = 2,51 \pm 0,05$ и $M_3 = 1,70 \pm 0,05$, и отличны от коэффициентов классической нелинейности $M_2 = 2$ и $M_3 = 3$.

7. Клин с параболическим профилем из АБС-пластика выполняет функцию концентрирующего волновода для изгибных волн Лэмба в диапазоне частот от 20,5 до 93,3 кГц, что приводит к увеличению амплитуды колебательной скорости и уменьшению скорости распространения волны при приближении упругой волны к ребру клина. В исследуемом образце клина на частоте 64,9 кГц амплитуда увеличивается примерно в 22 раза, а скорость уменьшается в 5,8 раза.

Достоверность результатов

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается соответствием результатов экспериментов априорной информации, теоретическим расчётам, результатам численного моделирования и результатам, полученным в работах других авторов.

Апробация результатов

Результаты, полученные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных конференциях: на XV, XVII, XXXIII Всероссийских школах-семинарах «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова (г. Можайск, 5 – 10 июня 2016 г., 26 – 31 мая 2019 г., 5 – 10 июня 2022 г.), на XXIII, XXVI, XXVII, Международных научных конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» (г. Москва, 11 – 15 апреля 2016 г., 8 – 12 апреля 2019 г., 10 – 27 ноября 2020 г.); на 12й Международной конференции по численному моделированию и прикладной математике ICNAAM (г. Родос, Греция, 22 – 28 сентября 2014 г.) и на Международном симпозиуме по ультразвуку IUS 2016 (г. Тур, Франция, 18 – 21 сентября 2016 г.), и обсуждались на научных семинарах кафедры акустики физического факультета МГУ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 19-12-00098, РФФИ 17-02-01123 и стипендии Американского акустического общества (ASA International Student Grant).

Публикации

Основные результаты диссертации изложены 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. Список работ автора приведен в конце автореферата перед списком литературы.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором лично, либо при его определяющем участии. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем. Автором самостоятельно создавались экспериментальные установки и методики измерения, проводились все аналитические расчеты и эксперименты. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Содержание научно-квалификационной работы отражает персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, двух глав, основных результатов и выводов (заключения) и списка литературы. Общий объем работы составляет 142 страницы, 72 рисунка и 128 библиографических ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **Введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, её научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели работы и описано ее краткое содержание.

Глава 1 состоит из семи **параграфов** и носит обзорный характер. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств упругих волн в изотропных клиньях, клиньях с изменённой геометрией и дефектами, в клиньях, граничащих с жидкостью, а также линейных и нелинейных свойств клиньев с анизотропией упругих свойств.

§1.1 Главы 1 посвящён рассмотрению основных свойств клиновых волн, таким как количество мод в клине, их скорости, локализация и дисперсия клиновых волн. Описаны результаты исследований клиновых волн численными методами и приближённые аналитические теории, построенные для описания распространения КУВ в твердотельном клине.

В [2] была предложена эмпирическая формула для скоростей антисимметричных мод клиновых волн:

$$V(n) = V(R) \sin(n\theta), \quad n\theta < \pi/2, \quad (1)$$

где $V(R)$ – скорость волны Рэлея на боковой поверхности клина, n – номер антисимметричной клиновой моды, θ – угол раскрытия клина.

Для основной моды клиновой антисимметричной волны Лагассом в работе [1] численно показано, что амплитуда колебаний уменьшается с расстоянием от ребра клина по экспоненциальному закону. Следовательно, амплитуду колебательной скорости в основной моде клиновой антисимметричной волны в зависимости от расстояния до ребра клина можно записать в общем случае в виде:

$$A = A_0 \exp\left(-B \frac{x}{\lambda}\right), \quad (2)$$

где A и A_0 – амплитуды колебательной скорости на расстоянии x от ребра клина и на самом ребре соответственно, x – расстояние от ребра клина, λ – длина волны КУВ, B – безразмерный коэффициент, характеризующий степень локализации КУВ у ребра клина. В приближении тонкого клина в работе [4] аналитически было получено, что параметр $B = 2\pi$.

В **§1.2** рассматриваются результаты исследования распространения клиновых волн в клиньях с геометрическими дефектами – выемками, усечением, рассматривается рассеяние мод КУВ на торцах клина. Указывается на невозможность изготовления идеального клина без усечения вершины, что приводит к появлению дисперсии на высоких частотах: наклон дисперсионной кривой растёт при увеличении усечения клина.

§1.3 посвящён исследованиям упругой нелинейности, проявляющейся при распространении КУВ в твердотельном клине. В изотропном твёрдом теле, обладающем высокой симметрией, при распространении изгибной клиновой волн, не должна генерироваться вторая гармоника клиновой волны за счёт классической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки в материале

клина [16]. Однако генерация второй гармоники при распространении антисимметричных мод клиновых волн может быть обусловлена анизотропией образца, нарушением геометрии клина или наличием дефектов в нем [17].

В твердых телах с дефектами (дислокациями, микротрещинами, нарушениями сплошности, остаточными механическими напряжениями) наряду с нелинейностью сил межмолекулярного взаимодействия (классическая нелинейность) проявляется структурная (неклассическая) упругая нелинейность [16]. Эта нелинейность может значительно превышать классическую нелинейность, связанную с ангармонизмом кристаллической решётки [17].

В параграфе отмечается, что методы нелинейной акустики являются перспективными для неразрушающего контроля структур, содержащих клин. Однако теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию нелинейных КУВ в изотропных твердых клиньях с неклассической нелинейностью, связанной с наличием дефектов выполнено недостаточно.

§1.4 посвящён исследованиям нелинейных свойств КУВ в клиньях с анизотропией упругих свойств [2, 18]. В работе [19] в твердотельном прямоугольном анизотропном клине из монокристалла кремния наблюдался ряд квадратичных нелинейных эффектов: увеличение крутизны фронта, сужение импульса и образование ударного профиля, что описывается нелинейным эволюционным уравнением для клиновых волн. Тем не менее отсутствуют экспериментальные исследования функциональной зависимости 2й гармоники от амплитуды волны на основной частоте для клиновых волн в изотропных и анизотропных клиньях. Не исследованы нелинейные эффекты быстрой динамики и нелинейного поглощения для клиновых волн в изотропных и анизотропных клиньях.

В **§1.5** приводится обзор работ, посвященных распространению КУВ в клиньях с геометрией ребра, отличной от прямой. Интерес к данному направлению исследования обусловлен широкой распространённостью в технике структур, содержащих изогнутые клинья (лопатки турбин, сверла, лопасти винтов и т.д.). Рассматриваются особенности дисперсии в клиньях с изменённой геометрией, возникающие в силу наличия размерного параметра в их геометрии: цилиндрические, дискообразные, и спиральные клинья, клинья с билинейным профилем.

Особое внимание уделяется работе [8], в которой с помощью лучевого подхода в приближении тонкого клина получены формулы для дисперсии так называемых положительного и отрицательного цилиндрических клиньев (рис. 1.) [8]:

$$V_{\text{цил}} = V_1 \left(1 \pm \frac{3}{2} \frac{1}{\beta_0 r_0} \right) \quad (3)$$

где V_1 , $\beta_0 = \omega/V_1$ - скорость и волновой вектор первой моды в прямом клине, $r_0 = R/\sin(\theta/2)$ - радиус кривизны клина (биссектриса угла клина, пересекающая его ось симметрии), θ - угол клина, R - радиус ограничивающего цилиндра.

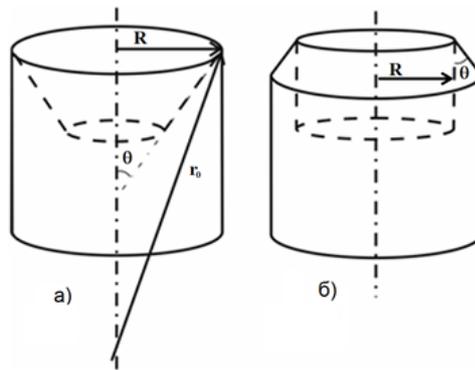


Рис. 1. Цилиндрические клинья двух типов кривизны – а) положительный и б) отрицательный [8].

Знак в формуле (3) определяется типом геометрии клина – для клина с положительной кривизной в формуле для скоростей должен стоять знак «+», а в клине с отрицательной кривизной – знак «-».

В §1.6 рассматриваются работы по исследованию распространения клиновых волн в прямом клине, граничащем с жидкостью и в сложных (твердотельных) структурах [12, 13]. Представлены возможные области применения исследований КУВ в образцах, граничащих с жидкостью – подводная акустика, гашение шумов гребных винтов и турбин, сейсмология, создание акустической радиационной силы и производство акустических датчиков, в том числе датчиков уровня жидкости.

§1.7 посвящён изгибным волнам, распространяющимся в клине со степенным профилем и акустическим чёрным дырам. Приводится основная информация о понятии акустических чёрных дыр, принципе их действия, их основных типах и особенностях в идеальном и реальном случаях (с усечениями и частотными ограничениями). Изложена теория распространения изгибной волны в пластине с профилем, медленно меняющимся по степенному закону. Также в этом разделе представлены результаты выполненных автором численных расчётов скорости нулевой моды изгибной волны распространяющейся в образце пластины, используемом в диссертационной работе, с помощью характеристического уравнения, соответствующего антисимметричным модам волн Лэмба.

Во **2й главе** описаны разработанные автором экспериментальные установки и методики исследований, исследуемые образцы и полученные экспериментальные результаты, а также приводится сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами теоретических работ и численного моделирования из известных отечественных и зарубежных источников.

§2.1 Главы 2 посвящён описанию разработанной автором экспериментальной установки для исследований линейных и нелинейных упругих свойств КУВ на базе ультразвукового измерительного комплекса RAM-5000 SNAP SYSTEM (Ritec) и сканирующего лазерного виброметра PSV-300 (рис. 2).

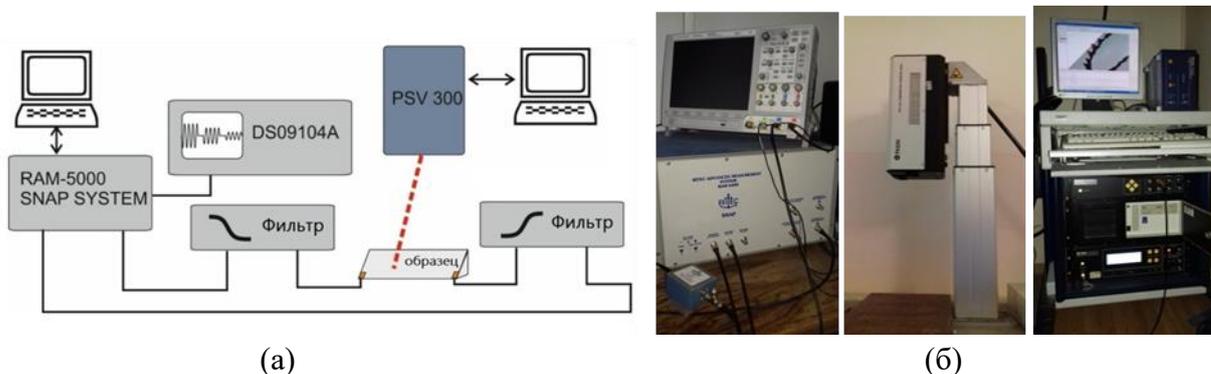


Рис. 2. Схема (а) и фотографии (б) экспериментальной установки.

Также в данном разделе представлены общие сведения об используемом в экспериментальных исследованиях импульсном ультразвуковом методе и о методе лазерной сканирующей виброметрии. Описаны основные принципы работы лазерного сканирующего виброметра и преимущества использования визуализации распространения КУВ для исследования их свойств.

В §2.2 приводятся результаты исследований дисперсии и локализации КУВ в образце прямого клина из изотропного поликристаллического сплава алюминия Д16 с углом 60° (рис. 3а). Выполнена визуализация КУВ, распространяющейся в образце. Обнаружена небольшая дисперсия (2,5 %) в интервале частот 0,2–1,0 МГц, обусловленная конечными размерами образца и ненулевым усечением вершины клина, что находится в согласии с численными расчетами других исследователей. Локализация КУВ в этом образце на частотах от 200 до 1000 кГц была близка к экспоненциальной (Рис 3б. Погрешности измерений составили не более 0,01).

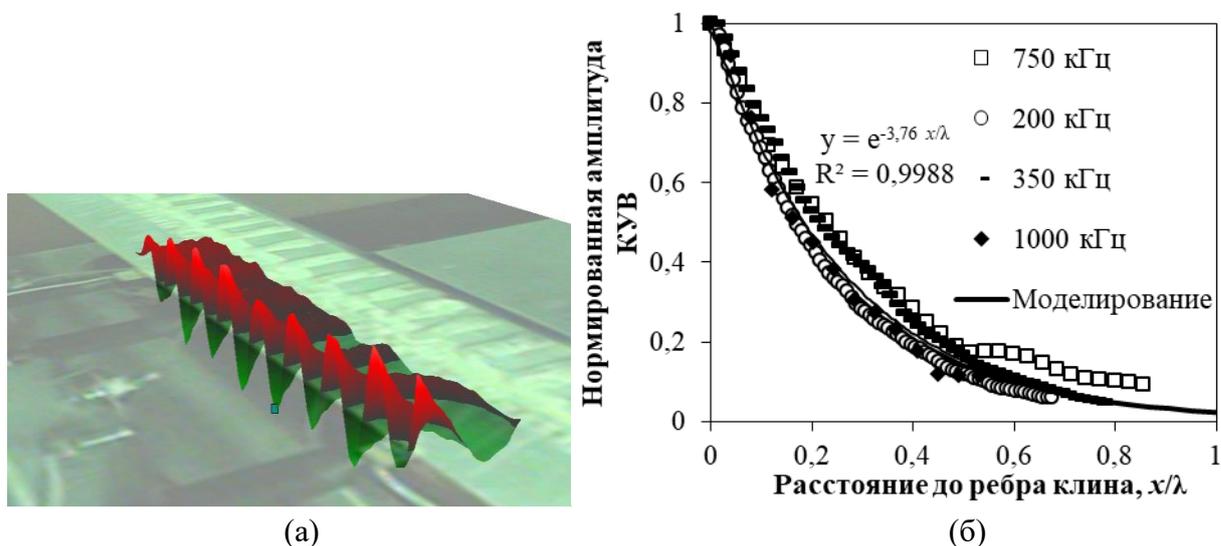


Рис. 3. а) Визуализация колебательной скорости КУВ. б) Локализация КУВ в 60-градусном прямом клине.

Определён коэффициент локализации B в показателе экспоненты (2). Показано, что на всех исследуемых частотах он был примерно одинаков и равен $3,8 \pm 0,4$. Полученные экспериментальные результаты находятся в соответствии с результатами аналитического рассмотрения и численного моделирования, выполненными в [1-4, 20].

§2.3 диссертационной работы посвящён экспериментальным исследованиям нелинейных упругих свойств КУВ в прямом изотропном клине с дефектами. Экспериментальные образцы клина с углами 30° и 60° были выполнены из поликристаллического сплава алюминия Д16 с дополнительно созданными остаточными упругими напряжениями методом наклепа. Описывается спектральный метод исследования нелинейных упругих свойств клиновых волн и полученные экспериментальные результаты.

В образцах клина проведены исследования зависимости поглощения КУВ от её амплитуды (эффект нелинейного поглощения), зависимость скорости распространения КУВ от её амплитуды (эффект быстрой динамики) и зависимость амплитуды второй клиновой гармоники от амплитуды КУВ на основной частоте.

В клиньях обнаружено нелинейное поглощение и эффект быстрой динамики КУВ, при этом в клине с углом 60° исследуемые эффекты проявляются сильнее, чем в клине с углом 30° , что связывается с более сильной локализацией самой медленной моды КУВ в образце 60° -градусного клина, по сравнению со 2ой модой 30° клина.

Также было показано, что в образце с дополнительно созданными дефектами эффекты нелинейного поглощения и быстрой динамики КУВ проявляются при более низких амплитудах ($0,4$ мВ по сравнению с 1 мВ), чем в образце без дополнительных искусственных дефектов, а также отличается характер зависимости (Рис. 4). Погрешности измерений на рис. 4а и б при $\Delta V/V < -10^{-4}$ составили $0,1 \cdot 10^{-4}$ ед. и $0,02$ м $^{-1}$ соответственно. (Погрешности при нуле значительно больше).

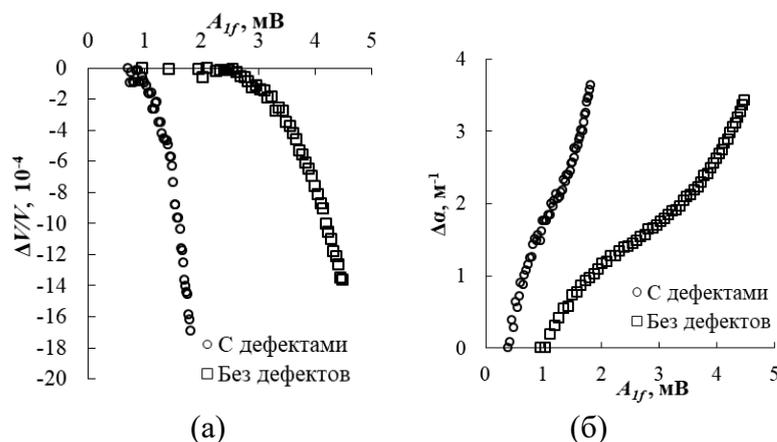


Рис. 4. Эффекты быстрой динамики (а) и нелинейного поглощения (б) КУВ в клиньях без дополнительно созданных дефектов и с искусственно созданными дефектами на частоте 317 кГц.

Это связывается с тем, что в обоих образцах, помимо классической нелинейности, присутствует структурная нелинейность, обусловленная поликристаллической структурой металла, а также нелинейность, связанная с изготовлением и обработкой образцов. Во втором образце искусственно созданные остаточные упругие напряжения увеличивают общую суммарную нелинейность образца.

В 30° и 60° клиньях с искусственно созданными остаточными упругими напряжениями впервые экспериментально исследована генерация второй гармоники КУВ (рис. 5. Погрешности измерений составили $0,1$ мкВ).

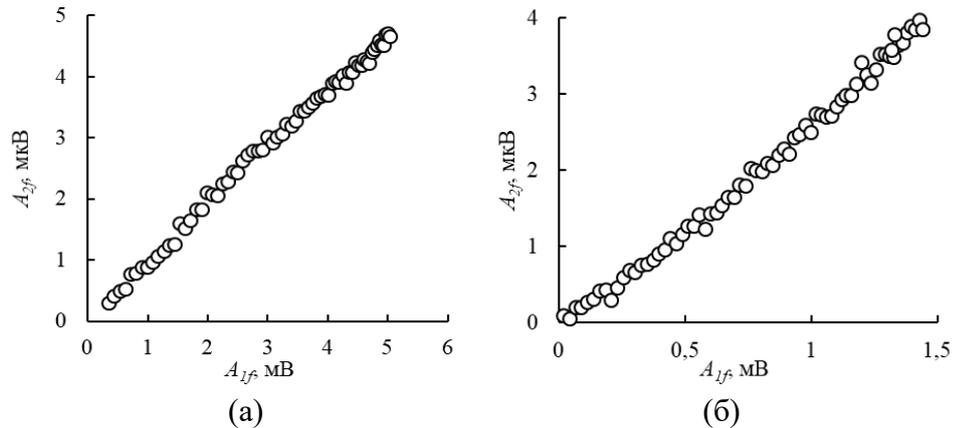


Рис. 5. Зависимость амплитуды второй гармоники клиновой волны A_{2f} от амплитуды первой гармоники A_{1f} а) в 30° клине, б) в 60° клине.

Зависимость амплитуды второй гармоники A_{2f} от амплитуды основной волны A_{1f} в твердых телах определяется следующим уравнением [16]:

$$A_{2f} \sim N_2 k^2 L A_{1f}^{M_2} \quad (4)$$

Безразмерный параметр N_2 характеризует величину упругой нелинейности в образце, а параметр M_2 – коэффициент, определяющий степенную зависимость амплитуды гармоники от амплитуды основной частоты. Для случая генерации второй упругой гармоники $M_2 = 2$.

Амплитуда третьей гармоники КУВ пропорциональна амплитуде основной частоты в степени $M_3 = 3$:

$$A_{3f} \sim N_3 k_f^3 L A_{1f}^{M_3}, \quad (5)$$

N_2 и N_3 — нелинейные упругие параметры, характеризующие квадратичную и кубичную нелинейную упругость материала клина.

Для клиньев с искусственно созданными дефектами амплитуда второй гармоники A_{2f} КУВ практически линейно зависит от амплитуды первой гармоники A_{1f} КУВ. Определены численные значения показателя M_2 в уравнении (4): $M_2 = 1,01$ для 30° клина и $M_2 = 1,06$ для 60° клина. В образце 60° клина без искусственно созданных дефектов амплитуда второй гармоники не превышала уровень шума.

Согласно [21], линейная зависимость второй упругой гармоники A_{2f} от амплитуды первой гармоники A_{1f} наблюдается в дефектных средах. Это позволяет сделать вывод, что генерация второй гармоники КУВ и эффект быстрой динамики в изотропных образцах клиньев объясняется наличием в них дефектов, приводящих к появлению структурной нелинейности в материале клина. Обнаруженные нелинейные упругие эффекты в КУВ могут служить диагностическими признаками наличия дефектов в материале клиньев.

§2.4 посвящён исследованию влияния одноосного растяжения прямого изотропного клина на нелинейные упругие свойства КУВ.

Образец клина с искусственно созданными остаточными сдвиговыми деформациями и углом 44° был изготовлен из цилиндрического прутка, выполненного из сплава Д16.

Для деформирования образца была разработана система для создания контролируемой силы, действующей на образец параллельно ребру клина, включающая домкрат, управляемый шаговым двигателем, и датчик давления для регистрации значения силы, прикладываемой к образцу (рис. 6).

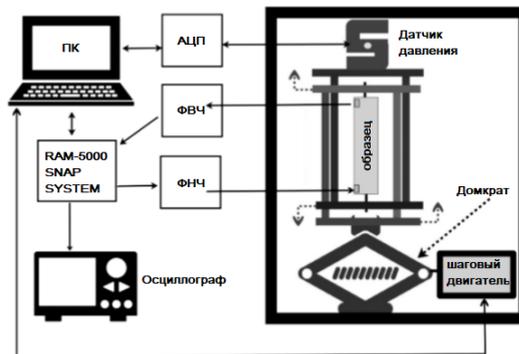


Рис. 6. Экспериментальная установка, включающая система для создания контролируемого одноосного растяжения.

В образце проведены исследования зависимости амплитуды второй гармоники КУВ от амплитуды волны основной частоты и от величины статической механической силы, а также зависимости скорости распространения КУВ от величины статической механической силы (акустоупругий эффект) (рис. 7а и б. Планки погрешности измерений меньше размеров маркера точки и составили $0,1$ мкВ и $0,02 \cdot 10^{-4}$ ед. соответственно). Растягивающее напряжение σ , приложенное параллельно ребру клина, изменялось в интервале $0 - 25 - 0$ МПа. Измерения проводились в импульсном режиме на частоте зондирующего сигнала $f = 300$ кГц.

Как и в образцах изотропных прямых клиньев с остаточными упругими деформациями с углами 30° и 60° , в 44° клине амплитуда второй гармоники A_{2f} КУВ практически линейно зависит от амплитуды первой гармоники A_{1f} КУВ. При этом коэффициент M_2 оказался равен 1,14.

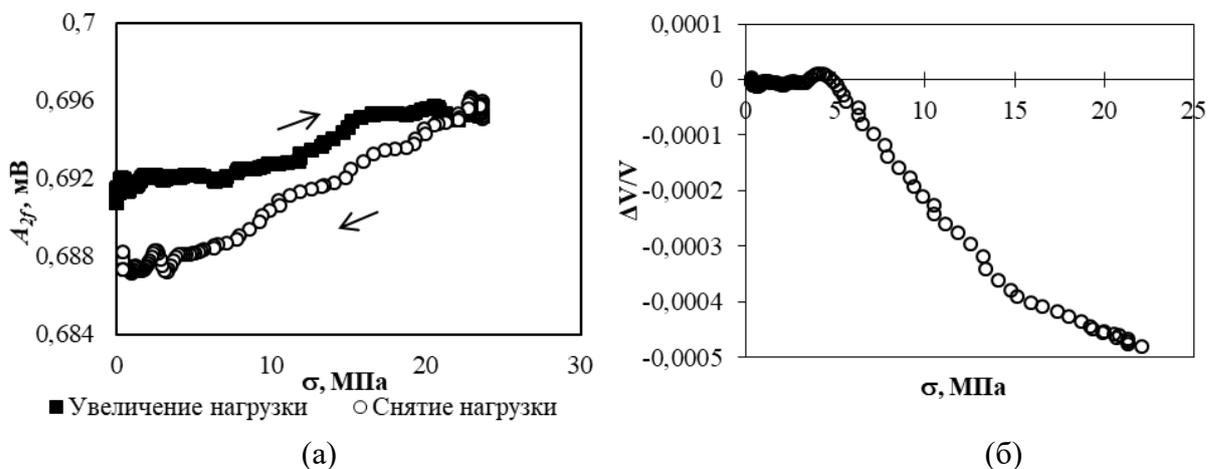


Рис. 7. Влияние механического напряжения на величину амплитуды второй гармоники и скорость КУВ в клине с апертурой угла 44° .

С ростом величины растягивающего напряжения от 0 до 25 МПа амплитуда второй гармоники практически линейно возросла примерно на 0,7 %, при уменьшении приложенного давления от 25 МПа до 0 амплитуда второй гармоники КУВ уменьшалась также практически линейно на $\approx 1,4$ %. При этом амплитуда второй гармоники при $\sigma = 0$ не возвращалась к первоначальному значению. Максимальное значение приложенного к образцу статического механического напряжения $\sigma = 25$ МПа значительно меньше условного предела текучести $\sigma_{0.2} = 340$ МПа в материале клина сплава Д16 [22]. Поэтому в интервале механических напряжений 0 – 25 – 0 МПа, приложенных к клину, материал клина находился в области упругих деформаций. Полученная зависимость амплитуды второй гармоники КУВ от реверсивно изменяющегося механического напряжения вызвана не пластической деформацией образца, а связана с перестройкой дефектной структуры в материале клина. Отметим, что изменения скорости для клиновых волн в клине из Д16 примерно при одних и тех же механических напряжениях на порядок больше, чем для продольных волн в аналогичном материале [23].

В § 2.5 приведены результаты исследований дисперсии и локализации КУВ в цилиндрическом клине, внутренняя поверхность которого граничит с воздухом и жидкостью.

Для проведения экспериментов в цилиндрических клиньях с положительной и отрицательной кривизной из цилиндрического прутка сплава алюминия Д16 диаметром 98 мм было изготовлено два цилиндрических клина (рис. 1а,б). с близкими по величине углами раскрытия: угол клина с положительной кривизной – 33° , а клина с отрицательной кривизной – 32° . Диаметр ограничивающего цилиндра в клине с отрицательной кривизной составлял 73,2 мм, а с положительной кривизной был равен 98 мм.

В изготовленных образцах клиньев была исследована дисперсия и локализация КУВ в диапазоне частот от 100 до 600 кГц (рис. 8а). Было проведено сравнение полученных дисперсионных кривых с расчетами, выполненными по формуле (3), и с результатами численного моделирования, выполненного сотрудником института физики Земли имени Шмидта к. ф.-м. н. Жостковым Р. А.

Экспериментальные значения находятся в хорошем соответствии с результатами численного моделирования. Отклонения экспериментальных значений скорости КУВ от результатов расчётов по формуле Крылова (3) связываются с тем, что формула (3) получена в приближении тонкого клина, без учёта ограниченности размеров клина и наличия усечения.

Согласно проведенному моделированию, амплитуда антисимметричной моды КУВ так же, как и в случае прямого клина, убывает экспоненциально в направлении, перпендикулярном ребру клина, в зависимости от расстояния от ребра клина (2) (рис. 8б, в. Погрешности нормированных амплитуд равны 0,003 и 0,005 соответственно. Для частот 278,5 и 578,5 кГц погрешность выше и составила 0,03 ед.). Коэффициент B для клина с положительной кривизной был равен $B = 5,2 \pm 0,2$, а для клина с отрицательной кривизной $B = 4,8 \pm 0,2$. Это указывает на то, что

локализация КУВ у ребра клина в цилиндрических клиньях с положительной кривизной выше, чем в клине с отрицательной кривизной.

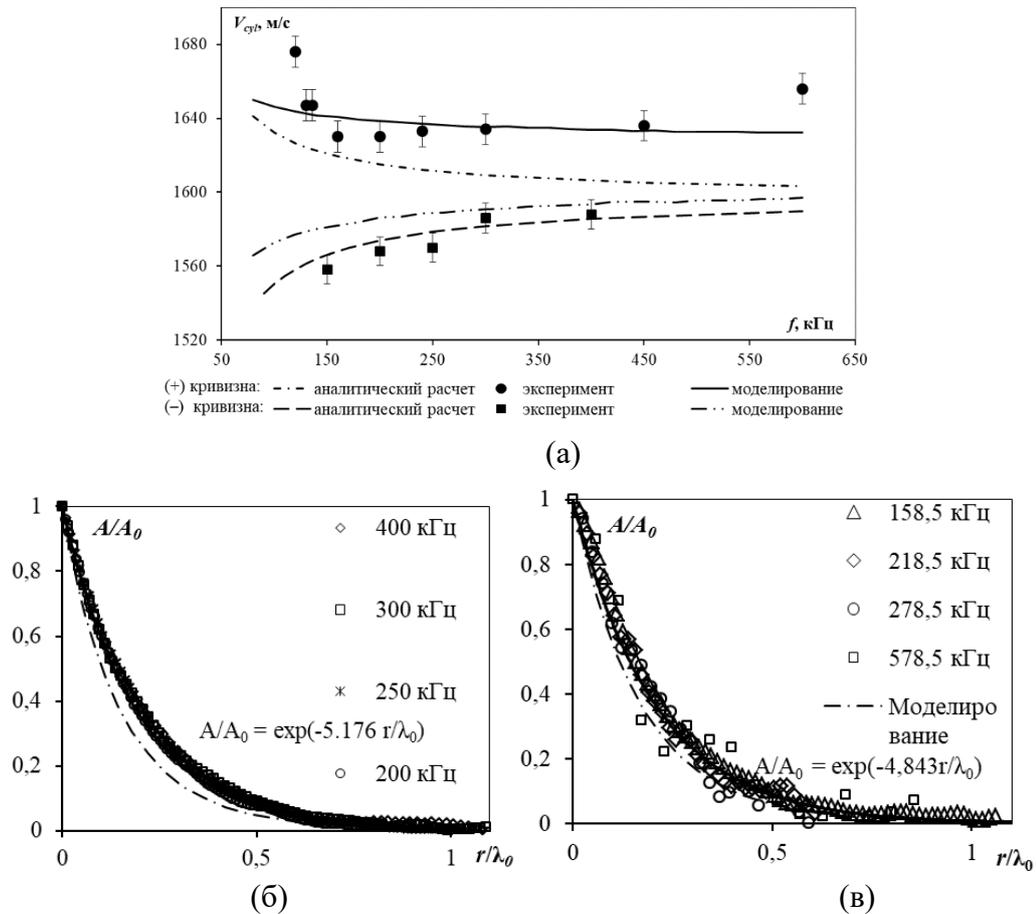


Рис. 8. Сверху а) Дисперсионные кривые для цилиндрических клиньев с положительной и отрицательной кривизной. Снизу - локализация КУВ в цилиндрическом клине с положительной кривизной б) и с отрицательной кривизной в).

При сравнении значений коэффициента локализации B из (2) в прямом клине и в цилиндрических клиньях на одном графике (рис. 9), видно, что коэффициент локализации КУВ для обоих типов цилиндрического клина меньше, чем значение B для прямого клина при том же угле.

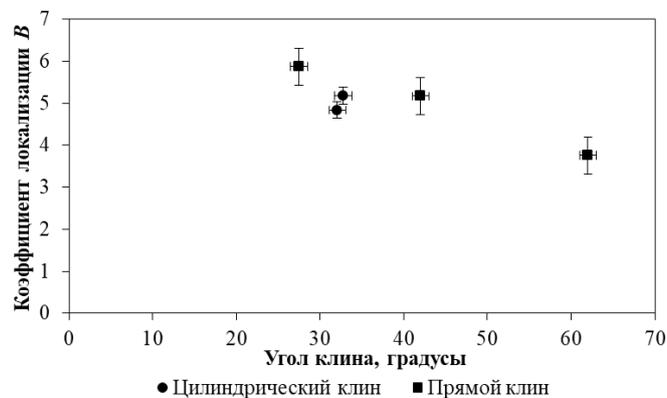


Рис. 9. Зависимость коэффициента B для локализации КУВ в показателе экспоненты (2) от угла клина для прямого и цилиндрического клиньев.

Для исследования влияния контакта внутренней поверхности цилиндрического клина с жидкостью на распространения клиновых волн в нем

использовались жидкости, имеющие различную вязкость и плотность: вода (плотность – 1000 кг/м^3 , скорость звука – 1490 м/с , кинематическая вязкость – $0.894 \text{ мм}^2/\text{с}$), 86% водный раствор глицерина (измеренная плотность – $1221 \pm 0.5 \text{ кг/м}^3$, измеренная скорость звука – $1950 \pm 20 \text{ м/с}$, динамическая вязкость $0.0926 \text{ Па}\cdot\text{с}$ [24]) и машинное масло марки по SAE 10W-30 (измеренная плотность $890 \pm 1 \text{ кг/м}^3$, кинематическая вязкость – $146.5 \text{ мм}^2/\text{с}$ [25], измеренная скорость звука – $1420 \pm 20 \text{ м/с}$). Все значения приведены для температуры 25°C и атмосферном давлении.

Наличие жидкости на внутренней поверхности образца клина привело к различным граничным условиям на внутренней и внешней сторонах клина. Результаты численного моделирования и экспериментального исследования зависимости скорости КУВ от уровня жидкости, заполняющей цилиндрический клин, приведены на рис. 10. Относительные погрешности скорости КУВ на данном графике составили примерно 0,5 %.

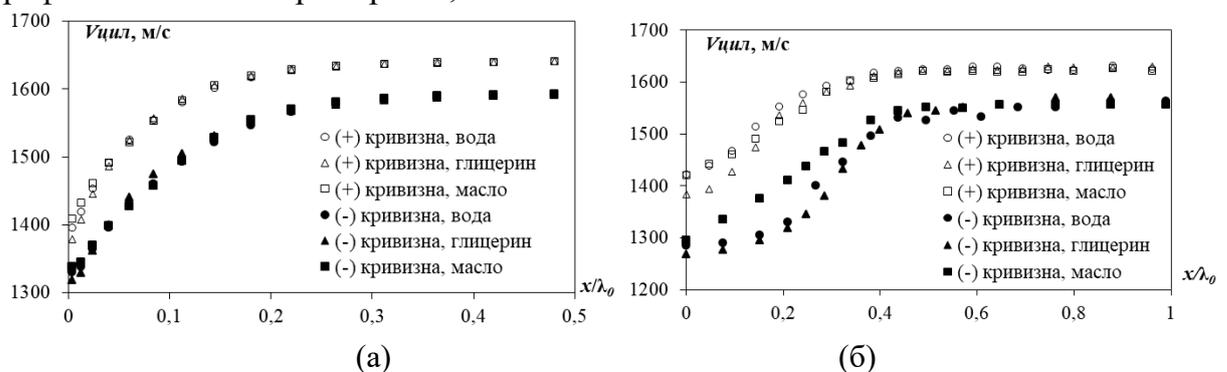


Рис. 10. Зависимость скорости КУВ в клине с жидкостью от нормированного на длину КУВ расстояния от ребра клина до поверхности жидкости, при этом значению 0 соответствует уровень жидкости у вершины клина (частота - 250 кГц): (а) моделирование; (б) эксперимент.

Как видно на рис. 10, при малом уровне жидкости скорость остается практически постоянной, резко уменьшаясь, начиная с расстояний $\lambda_0/2$ (до значений ниже скорости звука в жидкости). Таким образом, заметное влияние жидкости на величину скорости КУВ происходит, как и следовало ожидать, в области локализации клиновой волны.

При изменении плотности жидкости от $0,9$ до $1,2 \text{ г/см}^3$ происходит увеличение относительного изменения скорости КУВ от $16,7$ до $18,4 \%$ для положительного клина и от $12,6$ до 15% для отрицательного клина.

В исследуемых пределах вязкости (динамическая вязкость от $0,0009$ до $0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$, объёмная вязкость – от $0,0025$ до $0,28 \text{ Па}\cdot\text{с}$), зависимости скорости КУВ от вязкости жидкости не обнаружено, что может быть связано с поляризацией клиновой волны, не содержащей сдвиговой компоненты. Более медленное изменение скорости КУВ при экспериментальных исследованиях по сравнению с результатами численного моделирования объясняется наличием небольшого мениска жидкости у поверхности клина и особенностями его формы для клиньев разной геометрии.

Таким образом, проведённые эксперименты показали, что изменение скорости КУВ в цилиндрическом клине, вызванное наличием жидкости, достаточно велико, и качественно соответствует результатам численного моделирования. Это может служить основой для методики контроля плотности жидкости при изменении внешних условий.

В §2.6 приводятся результаты исследования особенностей распространения клиновых волн в образце сложной спиральной формы - в спиральном сверле по металлу диаметром 28 мм (длина режущей части образца - 192 мм). Клин такой формы имеет несколько размерных параметров. Основными, помимо диаметра сверла, являются также ширина ленточки сверла – 2,7 мм и длина шага сверла – 160 мм. Угол между линией кромки ленточки и осью сверла составлял 29 ± 1 градусов.

Методом лазерной сканирующей виброметрии в диапазоне 100 до 580 кГц исследована дисперсия клиновых волн в образце сверла (рис. 11. Величина погрешности на рис. 11б не превышала 0,03 ед.).

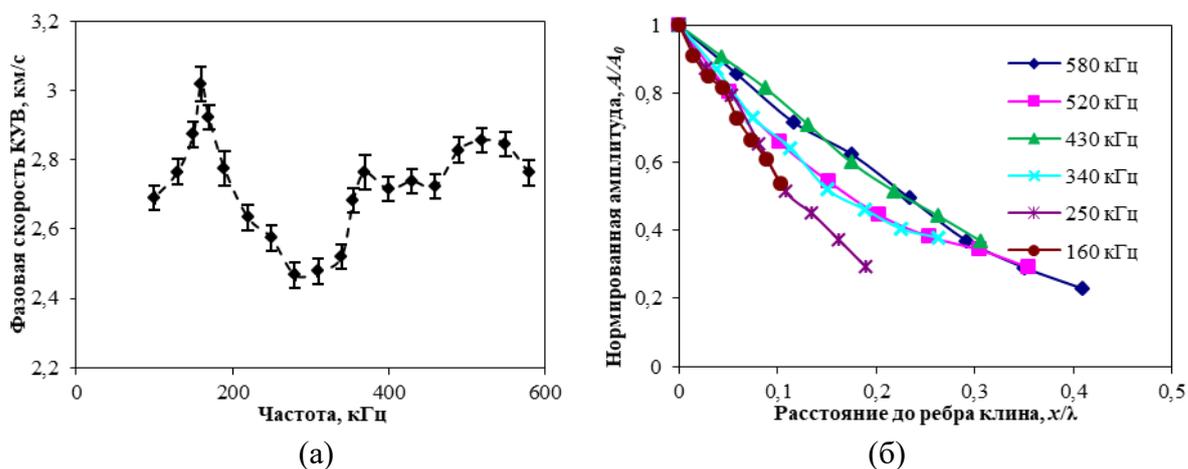


Рис. 11. Дисперсия (а) и локализация (б) клиновых волн в образце сверла.

Обнаружено, что в отличие от прямого клина, в образце сверла наблюдается дисперсия, что является следствием наличия размерных параметров в геометрии сверла. Дисперсионные характеристики в образце сверла являются более выраженными и имеют более сложный характер, по сравнению с дисперсионными свойствами цилиндрических клиньев, что может быть объяснено наличием нескольких размерных параметров в профиле образца сверла – диаметра, ширины и высоты кромки режущей части, искривления сверла в поперечном сечении и шага сверла в продольном направлении. Обнаружено, что в отличие от клиновых волн в прямых и цилиндрических клиньях, коэффициент локализации клиновых волн в образце спирального клина зависит от частоты, что может быть объяснено сложной геометрией образца сверла.

В §2.7 описаны результаты исследования нелинейных упругих свойств КУВ в анизотропном клине из ниобата лития. Для экспериментальных исследований нелинейных упругих эффектов в анизотропном материале был использован 64° клин, изготовленный из пластинки ниобата лития YZ -среза размерами $2 \times 10 \times 60$ мм.

На ребре клина имелся небольшой дефект, глубина которого была в несколько раз меньше длины клиновой волны, а продольные размеры дефекта – сопоставимы с длиной волны. В образце клина на частоте $f = 3,85$ МГц возбуждалась изгибная мода КУВ, скорость которой была равна (3190 ± 40) м/с. В спектре прошедшей клиновой волны, помимо сигнала на основной частоте A_{1f} , были также экспериментально зарегистрированы и измерены амплитуды второй A_{2f} и третьей гармоники A_{3f} в зависимости от амплитуды клиновой волны на основной частоте A_{1f} (рис. 12. Погрешности составили 0,1 мкВ).

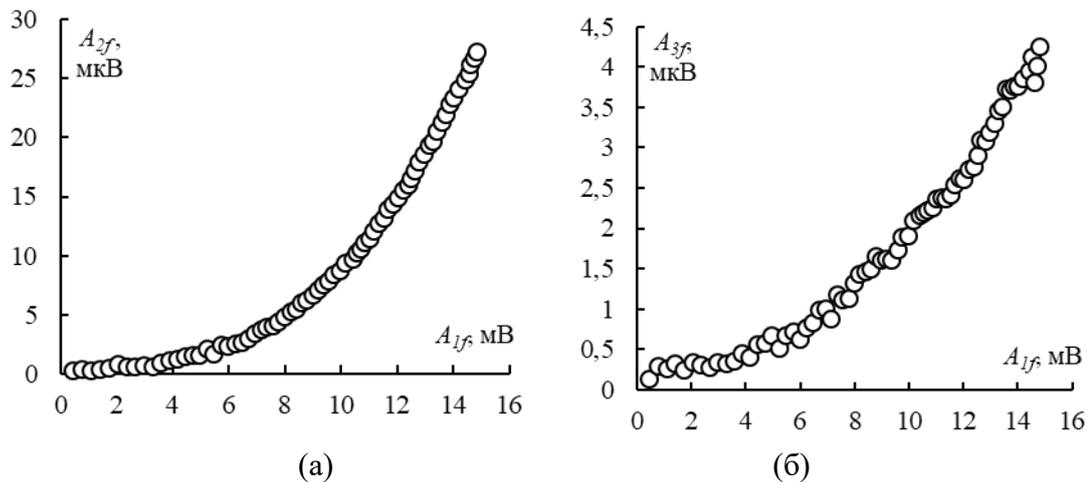


Рис. 12. Зависимости (а) амплитуды второй гармоники A_{2f} и (б) - амплитуды третьей гармоники A_{3f} от амплитуды первой гармоники A_{1f} КУВ.

Зависимость амплитуд второй и третьей гармоник от амплитуды основной частоты носит нелинейный характер. Для второй гармоники $M_2 = 2,51 \pm 0,05$, и для третьей $M_3 = 1,70 \pm 0,05$. Такие значения показателей степени указывают на наличие в исследуемом образце клина, кроме классической нелинейности, связанной с ангармонизмом кристаллической решетки ниобата лития, неклассической (структурной) нелинейности, обусловленной наличием дефектов в материале клина, появившихся при его изготовлении.

Результаты экспериментального исследования зависимости поглощения и скорости КУВ от их амплитуды приведены на рис. 13а,б соответственно. Погрешности измерений составили $0,02 \text{ м}^{-1}$ и $0,01 \cdot 10^{-3}$ соответственно.

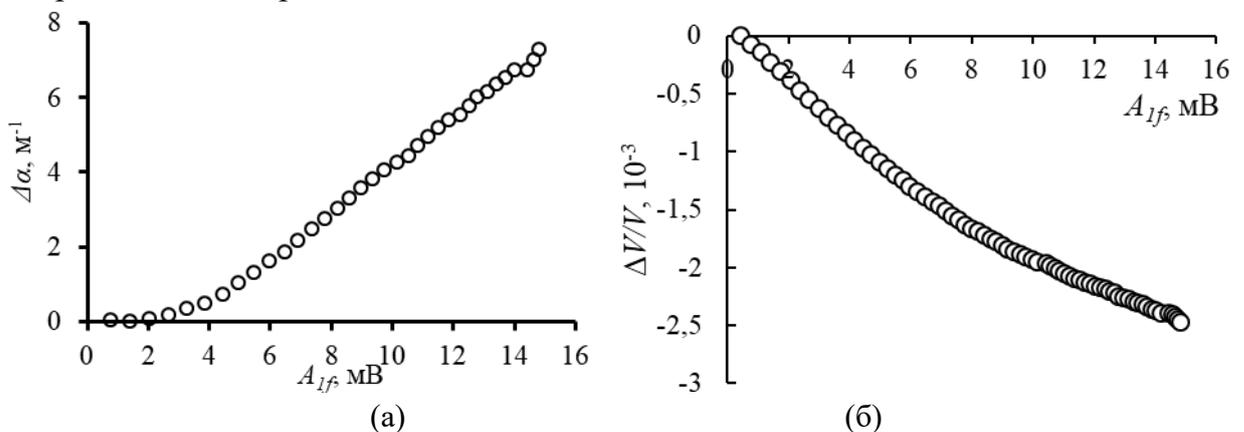


Рис. 13. Зависимости (а) изменения поглощения КУВ и (б) относительного изменения скорости от амплитуды КУВ в клине из ниобата лития.

Обнаруженная зависимость изменения скорости и поглощения клиновых волн от их амплитуды указывает на наличие нелинейности в клине.

В §2.8 исследуются особенности распространения упругих волн в клине с параболическим профилем. Для проведения экспериментов по распространению упругих волн в параболическом клине был рассчитан и изготовлен методом технологии 3D-печати из полимера АБС экспериментальный образец, состоящий из пластины постоянной толщины, на двух противоположных сторонах которой были изготовлены клинья, толщины которых уменьшались по параболическому закону при приближении к ребру клина (рис. 14). Форма параболического профиля определяется формулой $h = b \cdot x^2$, где h – толщина клина, x – расстояние от ребра клина. Коэффициент $b = 10 \text{ м}^{-1}$.

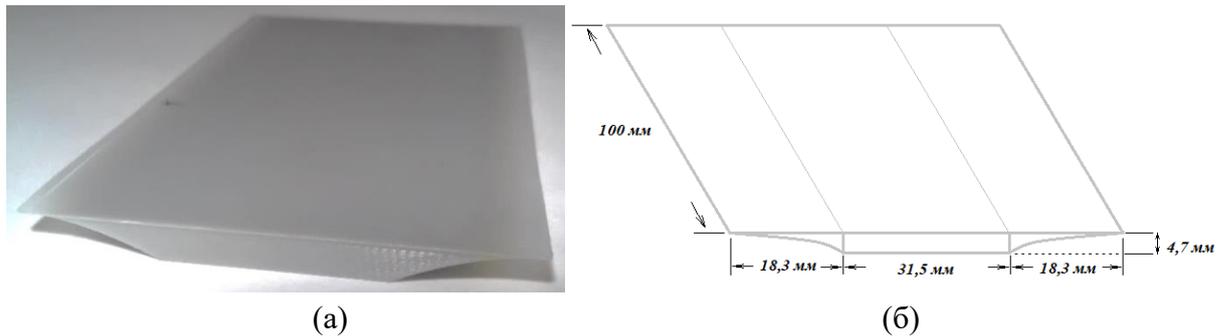


Рис. 14. (а) Фото образца; (б) размеры образца.

В диапазоне частот $f = (20,5-93,3)$ кГц были измерены длины волн Лэмба, распространяющейся перпендикулярно ребру клина на разных участках образца: в пластине и клине (рис. 15).

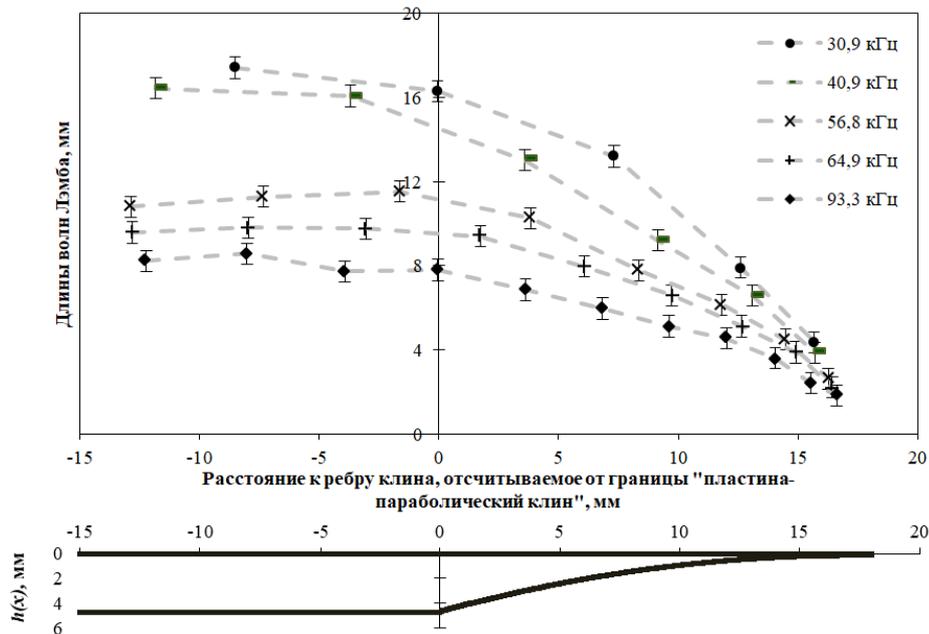


Рис. 15. Зависимость длины волны Лэмба от расстояния от границы между пластиной и параболическим клином в диапазоне частот $f = (20,5-93,3)$ кГц на разных участках образца (в клине и в пластине).

Под графиком помещён профиль параболического клина, точно соответствующий координатам « x » графика. Ноль в образце на оси Ox находится на границе пластина-параболический клин. Для всех частот наблюдается тенденция

значительного уменьшения длины волны в клине при приближении волны к ребру клина. Это вызвано уменьшением толщины клина по направлению к ребру клина и, как следствие, уменьшением скорости волны Лэмба, что находится в согласии с формулами из статьи [14]. Скорости не обращаются в ноль на ребре образца клина в силу того, что невозможно физически реализовать уменьшение толщины клина до нуля по параболическому закону. При толщине клина в основании - 4,7 мм, и у ребра клина - 0,14 мм, их отношение составляет примерно 34. Согласно [14], скорость КУВ пропорциональна корню квадратному из толщины образца. Поэтому скорости у основания и ребра образца в эксперименте отличаются в 5,8 раз.

Экспериментально исследовано изменение скорости распространения и амплитуды колебательной скорости в изгибной волне при ее приближении к ребру клина (рис. 16.).

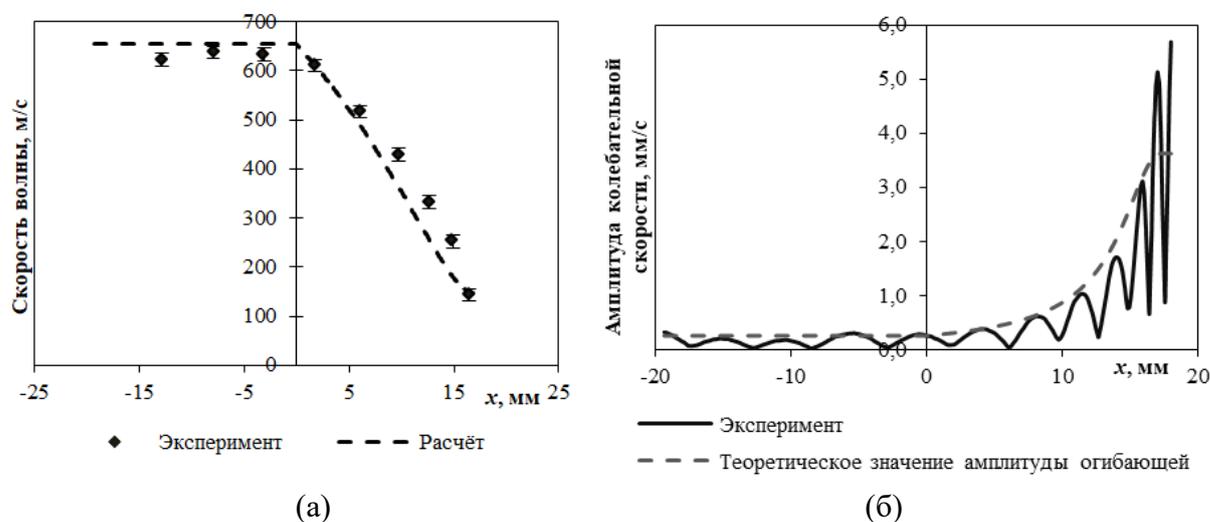


Рис. 16. Зависимость скорости распространения (а) и амплитуды колебательной скорости (б) волны Лэмба на частоте $f = 64,9$ кГц в образце от расстояния вдоль направления распространения волны. Точками и сплошной линией показаны результаты эксперимента, а пунктирной линией – расчёты скорости распространения и амплитуды огибающей по формуле из [14, 26].

Обнаружено уменьшение длины волны и увеличение ее амплитуды при ее приближении к ребру клина, что находится в согласии с теоретическими результатами, полученными в [14].

Лазерный виброметр позволил визуализировать распространение изгибных клиновых волн в образце и измерять их амплитуду при различных вариантах установки пьезопреобразователей на нем. На рис. 17а от преобразователя в направлении к ребру параболического клина возбуждалась изгибная волна Лэмба с плоским фронтом. При этом волна распространялась в двух частях образца: первоначально в пластине, в которой ее толщина и скорость волны постоянны, а затем в клине, толщина которого, а, следовательно, и скорость волны при ее приближении к ребру клина уменьшались в направлении распространения волны. Это приводит к уменьшению длины волны Лэмба при её приближении к ребру клина.

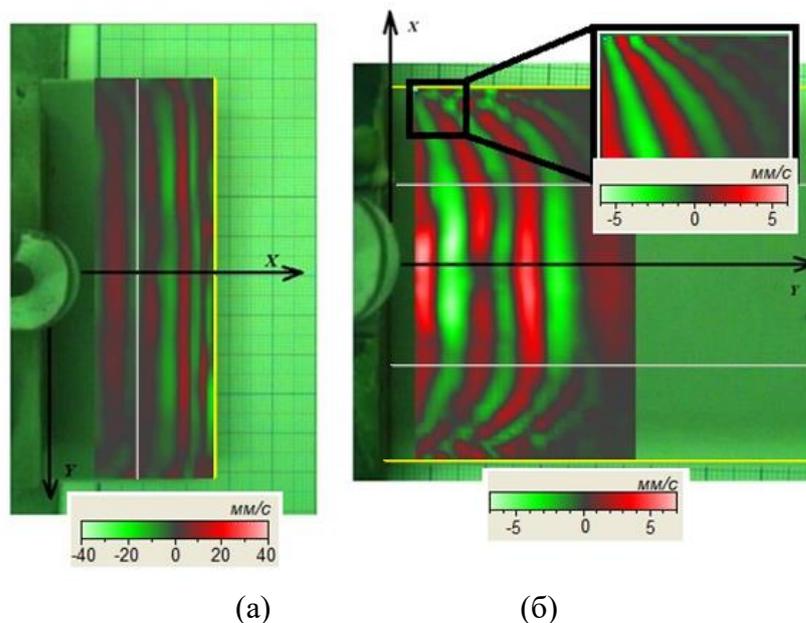


Рис. 17. Визуализация распространения волны Лэмба в образце клина в направлении: (а) перпендикулярно к ребру клина на частоте 60 кГц; (б) вдоль ребра клина на частоте 64,9 кГц. Рёбра клиньев показаны жёлтой линией, а граница «пластина-параболический клин» – серой линией.

При возбуждении упругой волны в образце преобразователем, расположенным на образце перпендикулярно рёбрам клина (Рис. 17б), плоская волна одновременно излучается в три части образца: в тонкую пластину постоянной толщины, и в два боковых клина, расположенных на двух противоположных сторонах пластины. Так как толщины этих клиньев, как уже отмечалось ранее, уменьшаются по параболическому закону при приближении к ребру клина, то, как следствие, - уменьшается скорость фронта волны. Вследствие этого первоначально излученные в образце волны с плоскими фронтами в процессе ее распространения начинают отличаться от плоских.

В **Заключении** предложены основные результаты и выводы всей работы, благодарности, публикации автора и список литературы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработаны и созданы автоматизированная ультразвуковая экспериментальная установка и методики для исследования линейных и нелинейных упругих свойств клиньев с дефектами и анизотропией упругих свойств, а также исследования линейных упругих свойств клиньев с различной геометрией и с различными граничными условиями.

2. Для проведения экспериментальных исследований были рассчитаны и изготовлены следующие образцы клиньев: из поликристаллического сплава Д16 – изотропный прямой клин с углом 60° , прямые изотропные клинья с углами 30° , 44° , 60° с остаточными деформациями и два образца цилиндрических клиньев с отрицательной и положительной кривизной и углами (33° и 32° соответственно); из монокристалла ниобата лития – анизотропный клин с углом 64° ; из полимера АБС

– клин с параболическим профилем (методом 3D-печати). В качестве образца спирального клина использовалось стальное сверло диаметром 28 мм.

3. В изотропных и анизотропных клиньях с дефектами (выполненных из поликристаллического сплава Д16 с остаточными упругими напряжениями и из монокристалла ниобата лития с дефектами) экспериментально исследованы нелинейные эффекты: генерация клиновых гармоник и эффекты быстрой динамики и нелинейного поглощения КУВ. Обнаружено, что зависимость высших гармоник от амплитуды основной гармоники имеет неклассический характер, что связывается с наличием структурной нелинейности. Эти результаты могут служить основой для нелинейной упругой диагностики дефектной структуры клиновидных объектов.

4. Экспериментально исследована зависимость скорости КУВ и амплитуды ее второй гармоники от величины механического напряжения, созданного силой, приложенной к образцу параллельно ребру клина из поликристаллического сплава Д16 с углом 44° . Обнаружено, что статическая деформация (до 25 МПа) образца приводит к увеличению его упругой нелинейности – возрастанию амплитуды второй упругой гармоники клиновых волн (на 0,7 %). При этом относительное изменение скорости КУВ в клине примерно при одних и тех же механических напряжениях на порядок больше (0,0005), чем для продольных волн в том же материале. Эти результаты могут служить основой для нелинейной упругой диагностики дефектной структуры нагружаемых клиновидных объектов.

5. Экспериментально исследованы дисперсионные характеристики упругих волн в клиньях различной геометрии – в прямых, цилиндрических (с отрицательной и положительной кривизной) и в спиральном клине. Для прямых клиньев из сплава Д16 обнаружена дисперсия клиновых упругих волн (2,5 %) в полосе частот от 200 до 1000 кГц, что объясняется наличием усечения ребра клина. В образцах цилиндрических клиньев с положительной и отрицательной кривизной в полосе частот от 120 до 600 кГц и от 150 до 400 кГц соответственно обнаружена дисперсия (изменение скорости составило 2,8 % и 1,9 % соответственно). Различие дисперсионных кривых положительного и отрицательного клиньев связано с отличием их типа кривизны. В спиральном клине в полосе частот от 100 до 600 кГц обнаружена дисперсия (изменение скорости составило 18 %), связанная с наличием размерных параметров в образце, сравнимых с длиной упругой волны в клине.

6. Исследованы особенности локализации КУВ для прямых, цилиндрических и спирального клиньев. Обнаружено, что локализация основной моды КУВ у ребра клина во всех исследованных образцах является экспоненциальной: $A = A_0 \exp(-Bx/\lambda)$. Коэффициент локализации КУВ B в прямом клине не зависит от частоты, при этом наблюдается зависимость от угла клина (для клиньев с углами 30° , 44° , 60° он равен, соответственно $B = 5,9 \pm 0,2$, $B = 5,2 \pm 0,2$ и $B = 3,8 \pm 0,2$). В положительном и отрицательном цилиндрических клиньях он составляет соответственно $B = 5,2 \pm 0,2$ и $B = 4,8 \pm 0,2$, при этом коэффициент локализации КУВ для обоих типов цилиндрического клина меньше, чем рассчитанное по

теоретическим моделям значение B для прямого клина при том же угле, что объясняется наличием кривизны клиньев. В спиральном клине (сверле) локализация КУВ близка к экспоненциальной, при этом наблюдается немонотонная зависимость коэффициента B от частоты клиновой волны, что связано со сложной геометрией образца, включающей ряд размерных параметров, сравнимых с длиной упругой волны в клине.

7. Экспериментально исследовано распространение клиновых волн в цилиндрических клиньях для случая, когда внутренняя поверхность клина граничит с жидкостями с различной плотностью и вязкостью (вода, автомобильное масло марки по SAE 10W-30, 86 % водный раствор глицерина). Обнаружена зависимость скорости КУВ от плотности жидкости: значение минимальной скорости КУВ увеличивается с ростом плотности жидкости, заполняющей клин. В исследуемых пределах вязкости (динамическая вязкость от 0,0009 до 0,1 Па·с, объёмная вязкость – от 0,0025 до 0,28 Па·с), зависимости скорости КУВ от вязкости жидкости не обнаружено. Установлено, что по мере увеличения уровня жидкости в области локализации КУВ их скорость в цилиндрическом клине уменьшается. При увеличении плотности жидкости от 0,9 до 1,2 г/см³ происходит увеличение относительного изменения скорости КУВ от 16,7 до 18,4 % для положительного клина и от 12,6 до 15 % для отрицательного клина. Полученные экспериментальные результаты коррелируют с результатами численного моделирования.

8. Экспериментально исследованы особенности распространения изгибных волн Лэмба в пластине с параболическим профилем из АБС пластика, изготовленной по технологии 3D-печати. Установлено, что экспериментально измеренная дисперсионная кривая для основной антисимметричной моды волны Лэмба в пластине образца соответствует теоретически рассчитанной дисперсионной кривой. Установлено, что длина волны Лэмба уменьшается при ее приближении к ребру параболического клина, а амплитуда волны увеличивается, что находится в согласии с результатами теоретических исследований. В частности, в исследуемом образце на частоте 64,9 кГц амплитуда увеличивается примерно в 22 раза, а скорость уменьшается в 5,8 раз. Обнаружено изменение направления распространения изгибной волны при её распространении в направлении параллельном ребру клина. Проведенные в диапазоне частот 20,5 – 93,3 кГц эксперименты показали, что разработанный в работе образец клина является волноводом, концентрирующим энергию акустической волны, что является важным в разработке акустических метаматериалов и поглощающих устройств, работающих по принципу “акустической черной дыры”.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных журналах, удовлетворяющих Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова:

- A1. Агафонов А.А., Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Кокшайский А.И., Одина Н.И. Особенности распространения волн Лэмба в клине из АБС-пластика с параболическим профилем // *Акустический журнал*. 2022. Т. 68. № 5. С. 467–474.

Переводная версия: Agafonov A.A., Korobov A.I., Izosimova M.Yu., Kokshayskiy A.I., Odina N.I. *Peculiarities of Lamb wave propagation in an ABS wedge with a parabolic profile* // *Acoustical Physics*. 2022. Vol. 68. No. 5. P. 415–422. **IF = 0,8 (WoS)**. Общий объем статьи = 1,00 п.л.; личный вклад = 0,70 п.л.

- A2. Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Агафонов А.А., Кокшайский А.И., Жостков Р.А. Упругие волны в цилиндрических металлических клиньях с разной геометрией // *Акустический журнал*. 2020. Т. 66. № 3. С. 251–257.

Переводная версия: Korobov A.I., Izosimova M.Yu., Agafonov A.A., Kokshaiskii A.I., Zhostkov R.A. *Elastic waves in cylindrical metal wedges with different geometries* // *Acoustical Physics*. 2020. Vol. 66. No. 3. P. 228–234. **IF = 0,8 (WoS)**. Общий объем статьи = 0,88 п.л.; личный вклад = 0,53 п.л.

- A3. Коробов А.И., Агафонов А.А., Изосимова М.Ю. Нелинейные упругие волны в твердотельном изотропном клине с дефектами // *Журнал технической физики*. 2018. Т. 88. № 3. С. 385–391.

Переводная версия: Korobov A.I., Agafonov A.A., Izosimova M.Yu. *Nonlinear elastic waves in a solid isotropic wedge with defects* // *Technical Physics*. 2018. Vol. 63. No. 3. P. 374–380. **IF = 0,7 (WoS)**. Общий объем статьи = 0,84 п.л.; личный вклад = 0,67 п.л.

Публикации в других рецензируемых научных журналах:

- A4. Коробов А.И., Агафонов А.А., Кокшайский А.И., Изосимова М.Ю. Акустические волны в клине кристалла ниобата лития // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. 2019. № 1. С. 1910301. **IF = 0,062 (РИНЦ)**

- A5. Агафонов А.А., Кокшайский А.И., Тоцов Е.А. Исследование эффекта быстрой динамики в клине со структурной нелинейностью с использованием клиновых волн // *Ученые записки физического факультета Московского Университета*. 2015. № 4. С. 154329. **IF = 0,062 (РИНЦ)**

Статьи в сборниках и тезисы докладов:

- A6. Korobov A., Izosimova M., Kokshaiskii A., Agafonov A. Elastic waves in a wedge of aluminum alloy with permanent residual deformations // *AIP Conference Proceedings*. 2015. V. 1685. P. 080005.

- A7. Korobov A., **Agafonov A.**, Izossimova M. Influence of a static force on the elastic parameters of the acoustic wave in the solid wedge with defects // *Proc. of IEEE International Ultrasonics Symposium*. 2016. DOI:10.1109/ULTSYM.2016.7728667
- A8. Коробов А.И., Изосимова М.Ю., **Агафонов А.А.**, Кокшайский А.И. Акустические волны в спиральном клине // *Сборник трудов XXXIII Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022»)*, 2020. Секция 6. «Акустика неоднородных сред». 2022. С. 25–26.
- A9. **Агафонов А.А.**, Кокшайский А.И. Влияние жидкой границы на распространение упругих волн в цилиндрическом клине // *Сборник трудов XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2020»*, 2020. Секция «Физика», подсекция «Акустика». (Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2020». Второе издание: переработанное и дополненное / Отв.ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс] – М.: МАКС Пресс, 2020.)
- A10. **Агафонов А.А.**, Коробов А.И., Изосимова М.Ю., Кокшайский А.И., Жостков Р.А. Распространение клиновых волн в цилиндрическом клине // *Сборник тезисов докладов Двенадцатой Международной конференции «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология»*, 2020, с. 18-19.
- A11. Коробов А.И., **Агафонов А.А.**, Изосимова М.Ю., Кокшайский А.И., Жостков Р.А. Особенности дисперсии клиновых волн в цилиндрических образцах с внешней и внутренней конусообразной поверхностью клина // *Сборник трудов XVII Всероссийской школы-семинара «Физика и применение микроволн» имени профессора А.П. Сухорукова (Волны-2019)*, 2019. Секция 9. «Акустика и акустооптика». С.19-22.
- A12. **Агафонов А.А.**, Кокшайский А.И. Упругие волны в цилиндрическом клине, граничащем с жидкостью // *Сборник трудов XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019»*, 2019. Секция «Физика», подсекция «Акустика». (Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019» / Отв. ред. И.А. Алешковский, А.В. Андриянов, Е.А. Антипов. [Электронный ресурс]. – М.: МАКС Пресс, 2019.)
- A13. Кокшайский А.И., **Агафонов А.А.** Упругие клиновые волны в цилиндрическом клине // *Сборник Тезисов докладов XXV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных по фундаментальным наукам «Ломоносов-2018»*, 2018. Секция Физика. С. 674–675.
- A14. Кокшайский А. И., **Агафонов А. А.** Экспериментальное исследование влияния нагрузки на распространение клиновых волн // *XXIII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальным*

наукам "Ломоносов-2016". Секция "Физика". Сборник тезисов, 2016. Т. 2. С. 112–113.

- A15. Коробов А.И., Агафонов А.А. Нелинейное распространение клиновых акустических волн в кристалле из ниобата лития // *Сборник трудов XV Всероссийской школы-семинара Волновые явления в неоднородных средах (Волны-2016)*, 2016, секция «Акустика неоднородных сред». С. 9–12.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lagasse P. E. Analysis of a dispersion free guide for elastic waves // *Electronics Letters*. 1972. V. 8. N. 15. P. 372–373.
2. Lagasse P. E., Mason I. M., Ash E. A. Acoustic surface waveguides – analysis and assessment // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. 1973. V. 21. N. 4. P. 225–236.
3. Maradudin A. A., Wallis R. F., Mills D. L., Ballard R. L. Vibrational edge modes in finite crystals // *Physical Review B*. 1972. V. 6. N. 4. P. 1106–1111.
4. McKenna J., Boyd G. D., Thurston R. N. Plate theory solution for guided flexural acoustic waves along the tip of a wedge // *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1974. V. 21. N. 3. P. 178–186.
5. Matsuya I., Honma Y., Mori M. and Ihara I. Measuring Liquid-Level Utilizing Wedge Wave // *Sensors*. 2017. V. 18. N. 1. doi:10.3390/s18010002.
6. Yu T.-H. Transient wave motion analysis for modal suppression of a circular cylindrical wedge wave ultrasonic motor // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2014. V. 212. P. 133–142.
7. Hess P., Lomonosov A. M., Mayer A. P. Laser-based linear and nonlinear guided elastic waves at surfaces (2D) and wedges (1D) // *Ultrasonics*. 2014. V. 54. N. 1. P. 39–55.
8. Krylov V. V. Localized vibration modes propagating along edges of cylindrical and conical wedge-like structures // *Journal of Sound and Vibration*. 1991. V. 227. N. 1. P. 215–221.
9. Chen M.-I, Tesng S.-P., Lo P.-Y., Yang C.-H. Characterization of Wedge Waves Propagating Along Wedge Tips with Defects // *Ultrasonics*. 2018. V. 82. P. 289–297.
10. Крылов В. В., Шанин А. В. Рассеяние клиновой акустической волны на неглубокой выемке // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. №. 2. С. 292-298.
11. Yang C.-H., Hsu C.-H., Du S.-N. A New Method for the Inspection of Tool Wear Based on the Dispersion of ASF Modes // *Proc. of IEEE Ultrasonics Symposium*. 2007. P. 2061–2063.
12. Chamuel J. R. Flexural edge waves along free and immersed elastic waveguides // *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. 1996. V. 16. P. 129–136.

13. De Billy M. On the influence of loading on the velocity of guided acoustic waves in linear elastic wedges // *Journal of Acoustical Society of America*. 1996. V. 100. N. 1. P. 659–662.
14. Миронов М. А. Распространение изгибной волны в пластине, толщина которой плавно уменьшается до нуля на конечном интервале // *Акуст. журн.* 1988. Т. 34. № 3. С. 546–547.
15. Krylov V.V., Tilman F.J.B.S. Acoustic ‘black holes’ for flexural waves as effective vibration dampers // *Journal of Sound and Vibration*. 2004. V. 274. N. 3-5. P. 605–619.
16. Зарембо Л. К., Красильников В. А. Введение в нелинейную акустику. М.: Наука, 1966.
17. Руденко О. В. Гигантские нелинейности структурно-неоднородных сред и основы методов нелинейной акустической диагностики // *Успехи физических наук*. 2006. Т. 176. № 1. С. 77–95.
18. Adler R., Hoskins M., Datta S. et al. Unusual Parametric Effects on Line Acoustic Waves // *IEEE Transactions on Sonics and Ultrasonics*. 1979. V. 26. N. 5. P. 345–347.
19. Lomonosov A. M., Pupyrev P. D., Hess P., Mayer A. P. Nonlinear one-dimensional guided wedge waves // *Physical Review B*. 2015. V. 92. N. 1. P. 014112-1–014112-5.
20. Можаяев В. Г. Лучевой и скалярный подходы к описанию клиновых акустических волн // *Конференция АУОИ. Черкассы*. 1988. С. 55–56.
21. Krylov V.V., Parker D.F. Harmonic generation and parametric mixing in wedge acoustic waves // *Wave Motion*. 1992. V. 15. N. 1. P. 185–200.
22. Конструкционные материалы. Справочник. Под ред. Арзамасова Б. Н. М.: Машиностроение, 1990.
23. Коробов А. И., Батенев А. В., Бражкин Ю. А. Нелинейные упругие свойства сплава алюминия марки Д16 и чугуна КЧ35-10 // *Дефектоскопия*. 2000. № 2. С. 37–44.
24. Беззубов Л. П. Химия жиров. М.: Пищепромиздат, 1962.
25. Calculating the viscosity curve. <https://widman.biz/English/Calculators/Graph.html>.
26. Викторов И. А. Физические основы применения ультразвуковых волн Рэлея и Лэмба в технике. М.: Наука, 1966.