

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Есипова Игоря Борисовича о диссертационной работе Агафонова Александра Александровича на тему «Линейные и нелинейные эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.7. Акустика.

Диссертационная работа А.А. Агафонова посвящена экспериментальному исследованию влияния внутренней структуры, геометрии и граничных условий на особенности распространения упругих волн в клиньях. Клиновые волны, или деформации, распространяющиеся вдоль рёбер упругих клиньев, как явление было открыто сравнительно недавно. Первые публикации, посвященные исследованиям этого явления, появились пятьдесят лет тому назад. Исследователей привлекла исключительная особенность клиновых волн – это отсутствие частотной дисперсии скорости их распространения. Клин является единственным типом волновода, в геометрии которого в идеальном случае отсутствует размерный параметр, и, следовательно, отсутствует внутримодовая дисперсия упругих волн. Клиновым волнам, помимо отсутствия дисперсии и дифракционных потерь, свойственна низкая скорость распространения и высокая степень локализации упругой энергии у ребра клина. Все это делает клиновые волны перспективными для различных областей применения. Это, прежде всего дефектоскопия, акустоэлектроника, поглощение звука, разработка акустических сенсоров. Таким образом, становится очевидной актуальность данной диссертационной работы, в которой автор приводит результаты систематического экспериментального исследования особенностей распространения упругих волн в клиньях. При этом рассматриваются как линейные, малоамплитудные волны, которые не взаимодействуют со средой, так и особенности распространения интенсивной упругой волны в структурно неоднородном клине, когда существенны нелинейные эффекты. Заметим, что многочисленные эксперименты с клиновыми волнами различной геометрии и в различных материалах автором диссертации выполнены по единой методике с применением неконтактных лазерных методов измерения деформаций, что делает результаты этой диссертации особо ценными.

Представленная диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и библиографии. Общий объём работы составляет 142 страницы, 72 рисунка и 128 библиографических ссылок.

Во **введении** обсуждается актуальность темы исследования, излагаются цели и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость работы, методология исследования, положения, выносимые на защиту, обосновывается

достоверность результатов, представляются данные об апробации работы и о публикациях результатов, вошедших в диссертацию.

Первая глава носит обзорный характер. В ней в семи параграфах подробно обсуждаются известные результаты теоретических и экспериментальных исследований свойств упругих волн в изотропных клиньях, клиньях с изменённой геометрией и дефектами, в клиньях, граничащих с жидкостью, а также клиньев с анизотропией упругих свойств. Последующие, оригинальные результаты автора сопоставляются с приведенными в этой главе обзорными данными.

Во **второй главе** приводятся основные результаты экспериментального исследования волновых эффектов, как в изотропных, так и в анизотропных упругих клиньях, а также приводится сравнение полученных экспериментальных результатов с результатами теоретических работ и численного моделирования из известных отечественных и зарубежных источников.

В §2.1 этой главы приведено описание экспериментальной установки и методики для исследований особенностей распространения упругих волн в твердом клине. Здесь представлены общие сведения об используемом в экспериментальных исследованиях импульсном ультразвуковом методе и о методе лазерной сканирующей виброметрии. Описаны основные принципы работы лазерного сканирующего виброметра, с помощью которого автор выполнял эксперименты, обсуждаются, также, преимущества использования визуализации клиновых упругих волн для исследования их свойств.

Далее, в §2.2 приводятся результаты исследований дисперсии и локализации клиновых упругих волн в образце прямого клина из изотропного поликристаллического сплава алюминия Д16 с углом 60° . В этих опытах была обнаружена небольшая дисперсия скорости распространения волн в интервале частот 0,2–1,0 МГц, обусловленная конечными размерами образца и ненулевым усечением вершины клина, что согласуется с численными расчетами других исследователей. Оказалось, что упругая волна локализуется в этом образце на частотах от 200 до 1000 кГц около ребра клина, а сам характер локализации близок к экспоненциальному. Был определен показатель экспоненты такой локализации. Эти результаты можно считать новыми.

Если в §2.2 рассматривались особенности распространения линейных волн в прямом однородном клине, то в §2.3 и в §2.4 приводятся результаты экспериментального исследования нелинейных упругих волн в прямом изотропном клине с дефектами. Экспериментальные образцы клина также были выполнены из поликристаллического сплава алюминия Д16 с дополнительно созданными остаточными упругими напряжениями методом наклепа. Было обнаружено нелинейное поглощение волн в клине и определена зависимость

скорости распространения клиновой волны от её амплитуды. Такую зависимость автор называет эффектом быстрой динамики. Оказалось, что в клине с большим углом раскрыва исследуемые эффекты проявляются сильнее, чем в клине с меньшим углом, что связывается с более сильной локализацией упругой волны в образце более широкого клина. Впервые экспериментально исследована генерация второй гармоники клиновой волны. Оказалось, что для клиньев с искусственно созданными дефектами амплитуда второй гармоники клиновой волны практически линейно зависит от амплитуды ее возбуждения. Такой характер зависимости уровня второй гармоники сигнала типичен для структурной нелинейности материала клина. Было установлено, что изменения скорости клиновых волн в клине примерно при одних и тех же механических растяжениях на порядок больше, чем для продольных волн в аналогичном материале. То есть, обнаруженные нелинейные упругие эффекты в клиновой волне могут служить диагностическими признаками наличия дефектов в материале клина.

Далее, в §2.5 и в §2.6 приводятся результаты исследований дисперсии и локализации упругой волны, как в цилиндрическом, так и в спиральном клине с различными граничными условиями. Результаты экспериментов показали, что изменение скорости упругих волн в цилиндрическом клине, заполненном жидкостью, достаточно велико, и качественно соответствует результатам численного моделирования. Это может быть полезным для развития методики контроля плотности жидкости.

Обнаружено также, что в отличие от прямого клина, в спиральном клине (сверле) 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. Кроме того показано, что в отличие от упругих волн в прямых и цилиндрических клиньях, локализация клиновых волн в образце спирального клина зависит от частоты.

В §2.7 приведены результаты экспериментального исследования нелинейных упругих свойств волны в анизотропном клине из ниобата лития. Была исследована зависимость амплитуд второй и третьей гармоник клиновой волны от амплитуды основной частоты. Автор связывает измеренную степень роста второй гармоники $M_2 = 2,51 \pm 0,05$ и третьей гармоники $M_3 = 1,70 \pm 0,05$ с проявлением неклассической (структурной) нелинейности кристалла ниобата лития, обусловленной наличием дефектов, появившихся при его изготовлении

§2.8 посвящен исследованию особенности распространения упругих волн в клине с параболическим профилем. Для проведения экспериментов по был рассчитан и изготовлен методом технологии 3D-печати из упругого полимера 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. В широком диапазоне частот была измерена длина волны Лэмба, распространяющаяся перпендикулярно ребру клина. Обнаружено уменьшение длины волны и увеличение ее амплитуды при ее приближении к ребру клина, что находится в согласии с известными теоретическими результатами. Эксперименты показали, что разработанный автором диссертации образец клина является волноводом, концентрирующим энергию акустической волны у ребра клина, что является важным при разработке акустических метаматериалов и поглощающих устройств, работающих по принципу “акустической черной дыры”.

В заключительном разделе диссертации приведены **основные результаты и выводы**. Полученные результаты имеют существенную практическую значимость для разработки новых принципов диагностики упругих материалов.

Автореферат соответствует содержанию диссертационной работы.

Достоинством диссертации является то, что в ней систематизированы известные и оригинальные результаты широкого круга опытов распространения клиновых волн в различных материалах при различных граничных условиях. При этом новые результаты получены по единой методике на оригинальной, созданной с участием автора диссертации автоматизированной экспериментальной установке. Установка включала в себя современный аттестованный ультразвуковой измерительный комплекс RAM-5000 SNAP SYSTEM (Ritec), а также сканирующий лазерный виброметр PSV-300 (Polytec, Германия) для неконтактных измерений упругих колебаний поверхности клина. Высокая точность неконтактных измерений продуманного эксперимента на современном аттестованном измерительном комплексе и сопоставление с результатами компьютерного моделирования определяет **достоверность** выводов работы.

Измерительные возможности созданной с участием автора экспериментальной установки позволили ему получить ряд новых результатов, определяющих локализацию и дисперсию упругих волн в различного типа клиньях, а также особенность проявления нелинейных эффектов в клиновых волнах в неоднородной среде, в том числе в среде с дефектами. Все это говорит о **новизне** полученных результатов.

Нацеленность диссертации на развитие новых методов дефектоскопии материала свидетельствует об **актуальности** выполненных исследований.

Выводы, сделанные автором, согласуются с общими научными принципами, а методы исследования являются апробированными и современными.

При этом необходимо отметить, что диссертационная работа не лишена недостатков.

1. Это, прежде всего, форма представления диссертации, где все оригинальные исследования автора были собраны в одну главу, и название диссертации. Обычно, название научной работы указывает на ее особенность, новизну результатов исследований. В данном случае название диссертации не фокусирует внимание ее читателя на то, что отличает полученные автором результаты от уже известных.

2. Продолжая обсуждение формы представления диссертации, обращаю внимание на неудачную редакцию некоторых, выносимых на защиту положений. Например, Положение 1, где автор защищает измеренные значения степенных показателей для гармоник упругой волны в клине с раскрывом в 60° и 44° . В защите нуждается определенное утверждение, расширяющее наше представление об исследуемом явлении, а не простая констатация фактов. Такое же замечание можно сделать и в отношении Положения 4 и Положения 6.

3. В качестве нового результата в диссертации утверждается, что «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». И еще «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». С этими утверждениями вполне можно было бы согласиться, если бы автор показал, что для не клиновых упругих волн эти эффекты выглядят по-другому. Указанные здесь эффекты известны для структурно-неоднородных сред. Особенность их проявления для клиновых волн не показана в должной мере.

Отмеченные недостатки относятся скорее к тексту диссертации и не снижают общей оценки выполненных А.А. Агафоновым исследований. Автор представил в диссертации обширный материал экспериментального исследования влияния внутренней структуры, геометрии и граничных условий на особенности распространения упругих волн в клиньях. Разработанные в диссертации методы являются оригинальными, а полученные в ходе исследований результаты имеют как научное, так и практическое значение. Основные результаты, лежащие в основе диссертации, опубликованы в рецензируемых научных журналах и докладывались на российских и международных научных конференциях.

Оценивая работу в целом, можно заключить, что представленная диссертация «Линейные и нелинейные эффекты при распространении упругих

волн в твердотельных клиньях», представляет собой законченное научное исследование. Считаю, что диссертация «Линейные и нелинейные эффекты при распространении упругих волн в твердотельных клиньях» 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 по специальности 01.04.06 — «Акустика», профессор, профессор кафедры физики факультета разработки нефтяных и газовых месторождений Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Есипов Игорь Борисович
13.05.2024

119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 65, корп. 1

Телефон: +7 (499) 507-86-81

E-mail: kafedra_physics@mail.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.06 — «Акустика» (по физико-математическим наукам)

Подпись профессора И.Б. Есипова заверяю: