

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе
Национального исследовательского
Нижегородского государственного
университета им. Н.И.

Лобачевского», д.ф.-м.н.

В.Б. Казанцев

2016 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский Нижегородский
государственный университет им. Н.И. Лобачевского» о диссертационной
работе Шпак Алисы Николаевны «Динамическое взаимодействие
пьезоактуаторов с упругим волноводом при различных условиях контакта»,
представленной на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук
по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

В настоящий момент все более активно используются системы контроля работоспособности объектов, основывающиеся на применении упругих волн. В таких системах мониторинга для решения задач неразрушающего контроля используются пьезоэлектрические датчики, которые возбуждают и улавливают упругие волны. Для эффективной работы системы нужен постоянный контроль работоспособности таких датчиков. Несмотря на то, что моделированию процессов возбуждения пьезоэлектрическими накладками упругих волн в различных структурах посвящено большое количество научных работ, вопросы влияния разрушения датчиков на генерируемые ими упругие волны, остаются мало изученными. Перечисленные выше причины указывают на **актуальность** данного диссертационного исследования.

В институте математики, механики и информатики Кубанского государственного университета, где выполнена диссертационная работа, традиционно используется и развивается интегральный подход, позволяющий строить интегральные представления волновых полей, генерируемые в упругом теле поверхностными нагрузками и внутренними источниками. Вопросы, изучаемые в диссертационном исследовании, тесно связаны с тематикой работ, выполняемых в институте математики, механики и информатики в рамках проектов Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 12-01-33011 «Теоретико-экспериментальное решение обратных задач по восстановлению упругих свойств слоистых композитов и идентификации в них неоднородностей с применением упругих волн Лэмба», 14-08-00370 «Волновой

мониторинг состояния композитных материалов и тонкостенных конструкций с использованием активных пьезосенсоров», 13-01-96516 «Возбуждение пьезоактивными элементами упругих волн в изотропных и анизотропных композитных волноводах и их дифракция на локальных неоднородностях»), Министерства образования и науки Российской Федерации (1.189.2014К «Математическое и компьютерное моделирование волновых процессов в приложении к проблемам развития инфокоммуникационных технологий и волнового мониторинга композитных материалов», 11.9216.2014 «Анализ волн Лэмба, возбуждаемых отклеенными круглыми пьезоэлектрическими сенсорами»), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (14.740.11.0578, «Моделирование динамического поведения композитных материалов с повреждениями, неоднородностями и зонами неидеального контакта: приложения в неразрушающем контроле»), в реализации которых автор принимал участие.

Диссертационная работа посвящена изучению влияния отслоения пьезоэлектрического актуатора от поверхности волновода на генерируемые им в структуре упругие волны и возможности диагностирования таких повреждений. Для этих целей автором была разработана математическая и компьютерная модель, позволяющая строить волновые поля, возбуждаемые в упругом слое пьезоэлектрической накладкой с различными условиями контакта: полное отслоение части клеевого соединения или частичное разрушение всего адгезионного слоя.

Диссертация Шпак А.Н. «Динамическое взаимодействие пьезоактуаторов с упругим волноводом при различных условиях контакта» состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 106 источников, и содержит 71 рисунок и 2 таблицы.

Во **введении** обоснована актуальность темы, отмечена научная новизна, определены цели и задачи работы, сформулированы положения, выносимые на защиту. Соискателем описаны основные методы, используемые при построении математических моделей, описывающих распространение упругих волн в протяженных структурах.

Первая глава посвящена теоретическому изложению базовых понятий и методов, используемых при решении поставленных в диссертации задач. Автором приведены основные положения динамической теории упругости и пьезоупругости: уравнения состояния и уравнения движения, вариационная формулировка уравнений движений, способы задания граничных условий, различные варианты задания матриц констант материалов; описаны принципы перехода к двумерной постановке в случае плоского деформированного или плоского напряженного состояний.

Во **второй** главе диссертации решается задача моделирования динамического поведения пьезоэлектрического образца при подаче электрических импульсов на электродированную поверхность. Ее решение строится на основе модификации метода конечных элементов с использованием различных интерполяционных полиномов, что обеспечивает дополнительный контроль точности и достоверности решения.

Предложенный соискателем подход позволяет эффективно моделировать динамическое поведение и рассчитывать резонансные частоты пьезоэлектрического тела при различных граничных условиях, что подтверждается сравнением с результатами, полученными в программе COMSOL. Кроме того, автором представлены оценки сходимости полученного решения для различных аппроксимирующих функций.

В **третьей** главе диссертации решается связанная задача, причем действие пьезоэлектрического датчика описывается методом конечных элементов, а волновые поля в упругом слоистом волноводе описываются на основе интегрального подхода. В зависимости от характера контакта пьезоэлектрического датчика с волноводом формулируются граничные условия.

Предлагаемый в диссертации метод основан на представлении перемещений в виде интегральных представлений, включающих Фурье-трансформанты матрицы Грина и поверхностной нагрузки. Приводятся выражения для Фурье-трансформант матриц Грина упругого слоя в плоской постановке. Кроме того, в этой главе подробно рассмотрены упрощенные модели, позволяющие решать задачу о возбуждении упругих волн пьезоэлектрическим актуатором в диапазоне относительно низких частот.

Предложенный соискателем гибридный подход позволяет описывать перемещения и напряжения, возникающие в обеих средах, а также вычислять прочие величины, необходимые для анализа волновых колебаний. В данной главе даются оценки сходимости решения в перемещениях и напряжениях, изучается зависимость функции поверхностной нагрузки и энергии, поступающей в упругий слой, от вида отслоений пьезоэлектрического актуатора от волновода.

Четвертая глава посвящена экспериментальным исследованиям и верификации разработанной математической модели. Соискателем были проведены и описаны эксперименты с полностью приклеенным и частично отклеенным прямоугольным пьезоактуатором. Были проведены сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами, которые показали, что на низких частотах разработанная модель позволяет эффективно описывать волновые поля, возникающие в упругом слое как при идеальном контакте с датчиком, так и в случае его отслоения. Указывается, что на высоких частотах двумерная постановка недостаточно точно описывает реальные перемещения точек пластины, возникающие во время проведения эксперимента.

Соискателем проведен вейвлет-анализ сигналов, записанных во время экспериментов с частично отклеенными круговыми пьезоэлектрическими датчиками, и обнаружена зависимость времени прихода и значения несущей частоты сигнала от формы отслоения.

Заключение резюмирует основные результаты диссертационного исследования. В диссертационной работе на основе метода конечных элементов и полуаналитического интегрального подхода разработана математическая модель, описывающая динамическое поведение пьезоактуатора и генерируемые им волновые поля в слое при отслоениях разного размера или при ухудшении свойств клеевого соединения. Проведены экспериментальные исследования с

частично отклеенными пьезоэлектрическими датчикам, произведено сравнения экспериментальных данных с теоретическими расчетами.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в следующем: разработана математическая модель для описания динамического взаимодействия пьезоэлектрического сенсора с упругим волноводом при различных условиях контакта, проведены экспериментальные исследования по изучению влияния отслоения пьезоэлектрического преобразователя от поверхности упругого волновода на генерируемые в нем волновые поля.

Соискателем предложен модифицированный метод конечных элементов высокого порядка точности для описания динамического поведения пьезоупругого образца, а также гибридный подход на основе метода конечных элементов и интегрального подхода для моделирования волновых полей, генерируемых пьезоактуатором в упругом волноводе. Предложенный подход позволяет анализировать динамическое взаимодействие пьезоактуатора с упругим слоем при различных условиях контакта, в том числе находить резонансные частоты и вычислять энергию упругих волн.

Обоснованность сформулированных в диссертации положений и выводов определяется корректной математической постановкой задач и применением строгих математических методов. **Достоверность** полученных результатов подтверждается сравнением найденных решений с экспериментальными данными, а также с численными результатами, полученными иными методами.

Научная и практическая значимость работы определяется тем, что полученные результаты могут найти применение при разработке методов мониторинга пьезоэлектрических датчиков, что внесет значительный вклад в развитие методов неразрушающего контроля.

Рекомендации по использованию результатов и выводов приведенных в диссертации. Верифицированные математические модели динамического поведения пьезоупругих тел, а также их взаимодействия с упругими волноводами могут быть использованы в Институте проблем машиностроения РАН, Институте проблем механики РАН, РФЯЦ-ВНИИЭФ, Институте механики МГУ, Южном федеральном университете и других организациях проводящих теоретические и экспериментальные исследования в области пьезоэлектростатической упругости.

По диссертации имеется ряд **замечаний**:

1. В параграфах 1.1 и 1.2 первой главы содержатся хорошо известные сведения из теории пьезоэлектростатической упругости, которые можно было бы сократить и ограничиться ссылками на соответствующую литературу.

2. В параграфе 2.4 второй главы представлены длинные выкладки с многократными суммами, которые было бы целесообразно записать в тензорной форме и сократить.

3. В третьей главе проведено исследование сходимости перемещений и напряжений, рассчитанных на основе разработанной модели. В случае идеального контакта наблюдается хорошая сходимость при использовании обоих интерполяционных полиномов. Тем не менее, в случае частичного

отслоения сходимость решения показана недостаточно точно. Так, на рисунке 3.9 сходимость перемещений на верхней поверхности слоя практически не наблюдается. В то же время, соискателем не было предложено обоснованных выводов по этому рисунку.

4. Для более полного исследования сходимости предложенного в диссертации метода следовало бы провести анализ сходимости решения по значениям перемещений и напряжений поточечно, например, в центре и на краях области контакта актуатора с волноводом.

5. Достоверность построенной математической модели в случае идеального контакта или частичного отслоения обеспечивается сравнением с результатами, полученными иными методами, и с экспериментальными данными. В то же время результаты моделирования в случае неидеального контакта, который моделируется на основе граничных условий пружинного типа, никак не подтверждаются.

6. Рисунки 3.25 и 3.26 построены по всей видимости с недостаточной точностью, что затрудняет интерпретацию результатов, представленных на них.

7. В третьей главе приводятся зависимости энергии, закачиваемой в упругий волновод, от характеристик актуатора, но не приводятся графики или таблицы с резонансными частотами. Для полноты анализа, с нашей точки зрения, следовало бы провести анализ резонансных частот аналогичный проведенному в главе 2.

Приведенные замечания не снижают научной и практической значимости работы.

Исследование проведено на высоком профессиональном уровне, является самостоятельным и завершенным. Результаты диссертации получены при выполнении в КубГУ проектов федеральных целевых программ, исследования имели поддержку научных фондов, что также указывает на **актуальность и практическую значимость** полученных результатов.

Тема и содержание диссертации **соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела** (пп. 1,4,7). Основные положения диссертационного исследования достаточно полно опубликованы в открытой печати и апробированы на ряде семинаров и конференций. Основные результаты исследований, выполненных по теме диссертации, опубликованы в 17 работах, в том числе 2 статьи в научных изданиях, входящих в перечень, рекомендованных ВАК РФ, также имеется 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Автореферат диссертации в полной мере отражает ее основное содержание.

Диссертационное исследование «Динамическое взаимодействие пьезоактуаторов с упругим волноводом при различных условиях контакта» представляет собой научно-квалификационную работу и **удовлетворяет** требованиям п.п. 9–11, 13 и 14 «Положения о присуждении ученых степеней (утверждено постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в редакции от 21 апреля 2016 г.)), предъявляемых к кандидатским диссертациям, а автор исследования – Шпак Алиса Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Диссертация рассмотрена, отзыв обсужден и одобрен на заседании лаборатории моделирования методом граничных элементов Научно-исследовательского института механики Национального исследовательского Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского 19 мая 2016 г., протокол № 1.

Директор, заведующий лабораторией
моделирования методом граничных
элементов Научно-
исследовательского института
механики Национального
исследовательского Нижегородского
государственного университета
им. Н.И. Лобачевского,
доктор физико-математических наук,
профессор

Игумнов
Леонид Александрович

603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корпус 6;
Тел. (831) 465-66-11; E-mail: igumnov@mech.unn.ru