

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Шпак Алисы Николаевны на тему «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

Одним из заметных современных трендов проектирования инженерных конструкций является интеграция в них систем сенсоров и актуаторов различных типов, необходимость в автоматическом режиме сканировать и, тем самым, своевременно обнаруживать наличие различного рода повреждений в объекте в процессе его эксплуатации. При создании таких систем необходимо учитывать особенности оборудования, входящего в их состав, и иметь эффективные механико-математические модели, описывающие как поведение элементов конструкций, так и системы неразрушающего контроля. Для ультразвукового сканирования структур из композитных материалов широко применяются методы, базирующиеся на применении пьезоэлектрических преобразователей и генерируемых ими бегущих упругих волн. В случае повреждения актуатора результаты сканирования могут приводить к ошибочным оценкам, поэтому возникает необходимость автотестирования самих структур сенсоров. Моделирование поведения пьезоэлектрических преобразователей с учетом возможности их отслоения, рассмотренное в диссертационной работе, является **актуальной задачей** ультразвукового неразрушающего контроля с теоретической и практической точки зрения. Соискателем разработана механико-математическая модель, позволяющая описывать волновые поля, генерируемые в структуре с отслоившимся пьезоэлектрическим преобразователем, а также проведена экспериментальная верификация результатов.

В диссертационной работе Шпак А. Н. все теоретические положения строятся на основах классической динамической теории пьезоэлектричества. **Достоверность и обоснованность** полученных в ходе исследования результатов обеспечивается применением эффективных и апробированных методов исследования, а также сравнением с результатами, полученными с помощью других методов и в ходе экспериментов.

Научная и практическая значимость работы основывается на том, что полученные результаты могут быть использованы для дальнейшего развития методов ультразвукового неразрушающего контроля. Результаты по моделированию процесса возбуждения в протяженной структуре упругих волн пьезоэлектрическим преобразователем с различной степенью контакта также представляют значительный теоретический интерес.

Диссертация Шпак А. Н. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 136 страницах, включая 2 таблицы и 71 рисунок. Библиографический список состоит из 106 наименований.

Во **введении** автором приведен обзор известных результатов и подходов при моделировании упругих волн в протяженной структуре и влияния пьезоэлектрических преобразователей на вид генерируемых волновых полей. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, показано, в чём состоит новизна исследования и какова практическая значимость полученных результатов.

В **первой** главе приведены основные положения теории упругости и пьезоэлектричества, используемые в данной работе. Описываются виды механических и электрических граничных условий, рассмотрены вариационная и слабая постановки задач линейной теории электроупругости.

Во **второй** главе решается задача моделирования динамического поведения пьезоэлектрического преобразователя под действием электрического поля. Отдельно дается краткое описание метода конечных элементов высокого порядка точности и интерполяционных полиномов, которые используются для решения поставленных задач. Излагается общая схема моделирования указанным методом, обсуждаются оценки сходимости, полученные при использовании различных интерполяционных полиномов. Проводится сравнение полученных результатов с результатами моделирования в конечно-элементном пакете Comsol. Показано, что разработанный метод эффективен при нахождении резонансных свойств пьезоэлектрического преобразователя, проведен анализ собственных частот колебаний в зависимости от размеров преобразователя.

Третья глава посвящена моделированию взаимодействия пьезоэлектрического преобразователя с упругим волноводом и анализу генерируемых волновых полей в зависимости от степени отслоения актуатора от поверхности соприкосновения с упругим слоем. Рассмотрены также две упрощенные модели. Моделирование распространения волновых полей в слое проводилось на основе подхода, в рамках которого строится преобразование Фурье матрицы Грина для упругого слоя в двумерном случае. Описана схема «сшивки» пьезоэлектрического преобразователя с упругим волноводом на основе граничных условий в области контакта.

Для построенной математической модели автором был проведен анализ сходимости решения для перемещений и напряжений, в том числе в случае частичного отслоения или деградации соединительного слоя. В работе приведены результаты анализа энергии упругих волн в зависимости от условий контакта между преобразователем и слоем.

В **четвертой** главе диссертации Шпак А. Н. описывается схема проведения эксперимента с приклеенными и частично отклеенными пьезоэлектрическими актуаторами. Полученные экспериментальные данные соискатель использует для верификации численных методов и результатов. Результаты сравнения позволяют судить о достоверности построенной математической модели как в случае идеального контакта, так и в случае отслоения актуатора от поверхности протяженной структуры.

Кроме того, соискателем проанализирована возможность применения вейвлет-анализа к нестационарным сигналам для исследования наличия, формы и размера отслоения актуатора от пластины. Полученные как экспериментальные, так и теоретические результаты могут служить основой для разработки метода идентификации поврежденных пьезоактуаторов.

В **заключении** приводятся основные результаты диссертационного исследования.

Научную новизну работы составляют следующие результаты: разработана математическая модель на основе метода конечных элементов с использованием полиномов высоких степеней для описания динамического поведения пьезоэлектрического преобразователя под действием электрического поля; построена связанная модель на основе сочетания метода конечных элементов и интегрального подхода, позволяющая

находить волновые поля, генерируемые преобразователем в слое при различных условиях контакта; получены результаты экспериментальных исследований волновых полей, генерируемых пьезоэлектрическими актуаторами с различной степенью контакта; проведен вейвлет-анализ нестационарных сигналов, полученных в ходе экспериментов с частично отклеенными пьезоэлектрическими актуаторами.

Оппонент имеет следующие **замечания** по диссертационной работе:

1. В диссертации используется неудачный термин «пьезоупругость» и его производные. Лучше было бы использовать более корректные термины «пьезоэлектричество» или «электроупругость».

2. Глава 1 о постановке краевых задач теории электроупругости могла бы быть написана математически более строго. Граничные условия на электродированных поверхностях должны содержать условия независимости от координат электрического потенциала (условия эквипотенциальности). В параграфе 1.3 не указаны формы векторов T и S . В (1.16) множитель диэлектрической проницаемости вакуума должен быть опущен. В завершении главы имело смысл привести слабую постановку задачи.

3. Всюду сравнение конечно-элементных результатов корректно проводить при приблизительно одинаковом числе степеней свободы. Важно также указывать время расчетов. Не везде указаны параметры конечно-элементных сеток.

4. Было бы полезно дать комментарии по поводу сильных осцилляций напряжений, полученных при расчетах в COMSOL, приведенных на с. 60.

5. При вычислении резонансных частот было бы хорошо использовать современные методы решения обобщенных задач на собственные значения, такие как методы итераций в подпространстве, методы Ланцоша и др.

6. Картины численных результатов сложны для восприятия, неудачна шкала численной градации цветов. Хорошо было бы увидеть масштабированные формы колебаний и т. д.

7. По-видимому, не имеет смысла сравнение численных результатов в окрестности точек сингулярности решений.

8. Граничные условия отслоения не являются настоящими контактными граничными условиями, так как допускают взаимное

проникновение колеблющихся тел. Было бы хорошо привести анализ этого допущения.

9. При численной реализации решались двумерные задачи, а эксперимент проведен для трехмерной конструкции, где актуатор недостаточно сильно протяжен. Было бы хорошо сравнить результаты решений двумерных и трехмерных задач, например, в пакете COMSOL.

10. Для общности изложения было бы полезно отметить возможность распространения МКЭ ВПТ на более сложные конечные элементы (треугольные, криволинейные и т. д.)

11. При постановке задачи в параграфе 3.1 задаются граничные условия пружинного типа, где для обозначения коэффициента жесткости используется параметр k . Затем в параграфе 3.6 это же обозначение используется для коэффициентов прохождения.

12. В тексте диссертации встречаются грамматические ошибки, например, слово «конечно-элементный» написано без дефиса.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов и не снижают научной и практической значимости диссертационной работы Шпак А. Н.

В целом, диссертационное исследование Шпак А. Н. проведено на высоком профессиональном уровне, является самостоятельным и завершенным. Результаты диссертации отражены в отчетах по выполненным в КубГУ проектам 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 ВАК РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям (п.п. 9, 10 «Положения о присуждении ученых степеней»), а автор исследования – Шпак Алиса Николаевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент

Наседкина Анна Андреевна

Кандидат физико-математических наук (05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ)

доцент Института математики, механики и компьютерных наук им. И. И. Воровича

ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», личную подпись *А. А. Наседкиной*

адрес: 344090, г. Ростов-на-Дону, ул. Мильчакова 8А.

E-mail: nasedkina@math.sfedu.ru

Тел. +79034320292

