

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Александрова Андрея Анатольевича

«Особенности распространения и дифракции волн в слоистых фоновых кристаллах», представленной на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

по специальности 01.02.04 — механика деформируемого твердого тела

В последнее время существенно увеличился интерес к фоновым кристаллам, в связи с чем началось активное изучение задач о распространения упругих волн в структурах с периодической организацией, называемых фоновыми кристаллами и акустическими метаматериалами. Интерес к фоновым кристаллам связан с разработкой нового поколения «смарт-материалов» и структур для пьезоэлектрических систем, где требуется управление упругими колебаниями. Вследствие их необычных волноводных свойств возможно использование фоновых кристаллов для повышения эффективности работы различных механических резонаторов, датчиков, фильтров и т.д.

Основной целью диссертационного исследования А. А. Александрова является моделирование и анализ волновых явлений в слоистых фоновых кристаллах, **актуальность изучения которых не представляет сомнений**. В работе изучено формирование разных типов частотных диапазонов для слоистых фоновых кристаллов конечной толщины и представлена их подробная классификация. Для слоистых периодических термоэлектроупругих композитов с большим количеством ячеек, нахождение волновых полей достаточно точными и устойчивыми методами является нетривиальной задачей. Эта задача была решена в настоящей диссертационной работе посредством разработки полуаналитического метода, устойчиво вычисляющего волновые поля для любого числа ячеек различной конфигурации. Создание фонового кристалла возможно путем напыления, чем обусловлена необходимость рассмотрения соискателем функционально-градиентных прослоек, а повышенный интерес к современным задачам наномеханики обусловил исследования ячеек с учетом масштабных факторов, для чего была использована нелокальная теория, которая учитывает характеристику межатомных связей. Кроме того, в работе посредством граничных условий

пружинного типа была учтена возможность наличия распределенных микродефектов и ослабления связей на границах между слоями и проанализировано их влияние на распространение волн.

В диссертационной работе А. А. Александра все теоретические положения строятся на основе динамической теории упругости и пьезоэлектричества, как в классических формулировках, так и в принятых в статьях последнего времени, как, например, на основе нелокальных моделей. **Достоверность и обоснованность полученных в ходе исследования результатов** обеспечена применением эффективных и апробированных методов исследования, а также сравнением с результатами, полученными с помощью различных методов.

Диссертация Александра А. А. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 119 страницах, включая 9 таблиц, 66 рисунков и библиографический список из 106 наименований.

Во **введении** даётся обзор известных исследований, результатов и подходов к моделированию в случае упругих периодических структур, обоснована научная новизна исследования. Сформулированы цели и задачи диссертационного исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, продемонстрировано, в чём состоит новизна исследования и какова практическая значимость полученных результатов.

В **первой главе** рассматриваются постановки начально-краевых задач линейной теории термоэлектроупругости, приводятся различные граничные условия, которые включают в себя механические, электрические и тепловые условия на границе. Также кратко описана нелокальная теория с введением нелокальных напряжений и электрической индукции для характеристик межатомных связей.

Во **второй главе** даны постановки задачи для одномерного слоистого фононного кристалла с конечным и бесконечным числом ячеек. В качестве методов решения применяется метод матриц переноса, для которого показана неустойчивость с ростом числа ячеек в обычной формулировке. Для устранения этой неустойчивости предложен и обоснован устойчивый полуаналитический метод расчёта волновых полей, использующий матрицы переноса и усовершенствования, связанные с вычислением коэффициентов прохождения. Представлена математическая модель, в основе которой лежит применение приближенных, но эффективных граничных условий, которая позволяет

описывать динамику фононных кристаллов со стохастически распределенными микродефектами. Кроме того, выводятся дисперсионные соотношения для фононного кристалла с бесконечным количеством ячеек, а также указана связь между его решениями и свойствами фононных кристаллов конечной толщины.

Третья глава посвящена анализу многочисленных численных результатов для упругих, пьезоэлектрических и термоэлектроупругих фононных кристаллов с однородными слоями. Приводятся результаты параметрического анализа для упругих изотропных и анизотропных, а также для пьезоэлектрических фононных кристаллов. Рассмотрено влияние температуры на запрещенные зоны, отмечен интересный эффект практически полного сохранения свойств квазипоперечных волн при значительном затухании квазипродольных волн в случае учета температуры. Проанализировано влияние наноразмерного эффекта на положение и размеры типов частотных диапазонов на основе модели нелокальной теории, показано возникновение частот отсечки для каждого из типов волн.

В четвертой главе приводятся результаты для функционально-градиентных прослоек и поврежденных фононных кристаллов с ослабленными адгезионными связями. Показано влияние функционально-градиентных прослоек и соотношений между толщинами однородных и функционально-градиентных упругих и пьезоэлектрических слоев на запрещенные зоны. Продемонстрировано существенное расширение запрещенных зон при наличии в фононном кристалле ослабленных адгезионных связей и распределённых микродефектов. Установлено, что запрещенные зоны тем шире, чем ближе дефект к интерфейсу и чем больше поврежденность фононного кристалла.

В заключении сформулированы выводы и обоснована возможность теоретического и практического применения полученных результатов.

Степень достоверности и обоснованности научных приложений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается применением строгих математических методов при анализе краевых задач динамической теории термоэлектроупругости, совпадением частных случаев численного анализа с результатами других авторов и сравнением результатов с другими способами исследования.

Среди результатов, полученных соискателем и определяющих **научную новизну** работы, можно особо отметить оценку влияния функционально-градиентных и однородных прослоек и стохастически распределенных

микротрещин, классификацию частотных диапазонов, а также устойчивый полуаналитический метод для расчёта волновых полей.

По диссертационной работе и ее автореферату имеется ряд замечаний.

1. Имеется большое число небрежностей и неточностей в текстах диссертации и автореферата. Так обозначения зачастую описываются не сразу после их первого упоминания, а после нескольких последующих формул. Некоторые обозначения не описаны или, наоборот, лишние; имеются опечатки, неточности в ссылках на номера формул. Можно отметить также, что использование одинаковых множителей в левых и правых частях формул (7), (8) автореферата и формул (2.11), (2.12) диссертации выглядит странно.

2. В работе приведено много интересных численных результатов, полученных для различных моделей и типов фоновых кристаллов. Однако ссылки на источники, откуда взяты данные по модулям материалов, в большинстве таблиц отсутствуют, а в некоторых таблицах имеются также погрешности редакционного характера.

3. Ряд вопросов вызывает используемая нелокальная модель применительно к фоновым кристаллам с учетом наноразмерных эффектов. Это новая модель взята из статей последних лет других авторов. На взгляд оппонента, в этих цитируемых работах нет должного обоснования модели, а статьях Эрингена (Eringen) не изучались задачи пьезоэлектричества. Странно, что в итоговой форме нелокальной модели электроупругости нелокальность присутствует только в инерционном члене, т.е. для статических задач нелокальность не будет иметь места, а следовательно, наноразмерные факторы не будут учитываться. Кроме того, эта модель в своей нелокальности не учитывает вида анизотропии пьезоэлектрических сред. Не ясно, почему функция влияния скалярна и полностью идентична для механических и электрических полей с одним и тем же множителем, и т.д. Оппоненту кажется, что использование новых моделей других авторов требует предварительного критического осмысления этих моделей.

4. Влияние температурных и пьезоэлектрических полей проведено не достаточно полно. Так, при расчетах все материальные модули, связанные с температурными полями, приведены, как для изотропных материалов, в то время как механические, пьезоэлектрические и диэлектрические модули приведены для материалов более сложных анизотропных классов. При этом, как отмечалось ранее, ссылки на источники по материальным константам

отсутствуют. Анализ влияния пьезоэлектрических и диэлектрических модулей с помощью одинаковых множителей, названных пьезоэлектрическими и диэлектрическими постоянными не совсем полный. Кроме того, тексты, связанные с описанием пьезоэлектрической постоянной имеют погрешности (ошибки в индексах суммирования в (3.13) в диссертации, отсутствие объяснения в автореферате, что это такое, и пр.)

5. Численных результатов очень много, а их анализ зачастую представляется не полным. Самым характерным примером является анализ фононных структур с наноразмерными эффектами. Параграф 3.6 занимает всего 2.5 страницы, в которых имеется два больших рисунка суммарно занимающих более страницы текста. Наверное, наноразмерные эффекты заслуживают более подробного анализа, тем более, что кривые на этих двух рисунках имеют крайне сложный вид.

6. Для пьезоэлектрических фононных кристаллов не рассмотрен ряд задач с электрическим возбуждением через электродированные поверхности, имеющие несомненный практический интерес.

7. Вызывает сомнение, что работа, приведенная в автореферате под номером 3, действительно опубликована в издании, индексируемом в базе данных Scopus.

Указанные замечания не затрагивают основных результатов диссертационной работы и не влияют на общую положительную оценку работы Александрова А. А.

Автореферат правильно и достаточно полно отражает содержание диссертации.

Результаты работы неоднократно докладывались на всероссийских и международных конференциях и были опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК РФ, а также в нескольких трудах международных конференций. Работа имеет очевидные практические применения в современном приборостроении.

Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа Александрова А.А. «Особенности распространения и дифракции волн в слоистых фононных кристаллах» является завершенным научным исследованием и полностью соответствует требованиям «Положения о

присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013г. (в ред. Постановления Правительства РФ от 21.04.2016 г. № 335), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Александров Андрей Анатольевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Главный научный сотрудник
Института математики, механики и компьютерных наук им. И.И. Воровича
Южного федерального университета
доктор физико-математических наук,
профессор



Наседкин Андрей Викторович

15.08.2018

344006, г. Ростов-на-Дону, ул. Большая Садовая, 105/42,
Институт математики, механики и компьютерных наук,
ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет»

<http://www.mmcs.sfedu.ru>

Тел.: +7(863) 297-52-82

E-mail: nasedkin@math.sfedu.ru



Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Личную подпись Наседкина А.В.

ЗАВЕРЯЮ:

Специалист по работе с персоналом
категории Н.И. Годишников
«16» августа 2018 г.