

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Дорошенко Ольги Валерьевны на тему «Распространение и дифракция упругих волн в слоистых средах с неидеальным контактом», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

В последние годы возможности акустических методов контроля существенно расширились. Помимо классических проблем идентификации плоскостных и объемных дефектов данные акустического мониторинга могут быть использованы при оценке степени поврежденности граничных соединений в местах контакта различных материалов. Определение зон неидеального контакта с помощью упругих волн требует дальнейшего совершенствования теоретической базы. Отслоения, расположенные между двумя средами с различным акустическим импедансом, при ультразвуковом воздействии проявляются в виде малых возмущений ультразвукового сигнала, что затрудняет возможность такой диагностики. Диссертационная работа Дорошенко О.В. посвящена **актуальной задаче** изучения дифракции на межповерхностных круговых трещинах малых размеров и моделированию зон концентрации микродефектов и их влиянию на волновые поля.

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, содержит большое количество рисунков, определяющих геометрию рассматриваемых задач и демонстрирующих точность построенных решений.

Во **введении** обоснована актуальность исследования, сформулированы цели диссертации, описана ее научная новизна, дан краткий обзор содержания диссертации. Здесь же приведен обзор подходов и способов моделирования трещиноватой среды и существующих численных и аналитических методов решения для описания дифракции на дефектах, а также описан круг задач, решенных к настоящему времени.

В **первой главе** изложены элементы динамической теории упругости, необходимые для дальнейшего изложения материала и основные свойства интегральных преобразований Фурье и Ханкеля, которые используются при решении поставленных задач. Также приведена общая схема построения Фурье-образа матрицы Грина в двумерном и пространственном случаях.

Во **второй главе** рассматриваются задачи дифракции упругих волн на одиночных трещинах и приводится общая схема определения волновых полей. В диссертационной работе предложен подход к решению задачи об определении скачка перемещений на круговой и полосовой интерфейсных трещинах, основанный на асимптотическом анализе интегральных уравнений с разностными ядрами. Для ядер интегральных уравнений



построена асимптотика и найдены приближенные аналитические решения для функции раскрытия берегов трещины, характерный размер которой меньше длины падающей волны.

Частные случаи задачи рассеяния на круговой трещине в однородном материале были ранее рассмотрены другими авторами, с которыми в работе проведено сравнение. Для верификации результатов в случае различных сред производится сравнение с решением, полученным на основе вариационно-разностного подхода.

**Третья глава** посвящена моделированию зон неидеального контакта двумя различными способами. В первом случае вводится стохастически распределенное поле микротрещин, которое характеризуется удельной плотностью повреждения. Применение техники усреднения по ансамблю позволяет свести выражение для перемещений, возникающих в дальней от интерфейса зоне, к скачку смещений на одиночной трещине. Альтернативный подход заключается в моделировании зоны неидеального контакта тонким слоем, что аналогично использованию контактных условий пружинного типа. Основной характеристикой повреждения интерфейса в этом подходе являются коэффициенты жесткости пружин, моделирующих межфазные силы между двумя соединенными материалами. Приравнивание амплитудных коэффициентов прохождения сигнала в дальней зоне позволяет автору вывести аналитические формулы для пружинных жесткостей. Здесь же приводится подробное сравнение с работами других авторов, в которых находились эти жесткости, и обсуждаются причины расхождения результатов.

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

**Степень достоверности и обоснованности** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается применением строгих математических методов при анализе краевых задач динамической теории упругости, 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, отметим вывод трансформанты матрицы Грина для решения трехмерной задачи о нахождении скачка перемещений на одиночной круговой трещине; асимптотическое решение данной задачи и оценку его применимости, результаты вычислительных экспериментов для установившихся колебаний слоистых материалов с внутренним круговым отслоением при произвольных углах падения волнового поля и разных материалов; описание и применение нового подхода к моделированию неполного контакта при соединении разнородных материалов, состоящего в использовании граничных условий пружинного типа; вывод соотношений



для контактных условий, позволяющих задавать степень поврежденности интерфейса.

**Значимость** для науки и практики полученных в диссертации научных результатов состоит в совершенствовании методик расчета волновых полей в составных телах при наличии трещин, зон ослабления контакта и дальнейшей идентификации по данным акустического зондирования

Результаты, полученные в диссертации, **могут быть использованы** при проведении научных исследований в Южном федеральном университете, Кубанском госуниверситете, Нижегородском госуниверситете, Санкт-Петербургском госуниверситете, МГТУ им. Баумана, в других организациях, занимающихся вопросами распространения волн в телах с дефектами и их идентификацией.

Вместе с тем работа не свободна от недостатков. Оппонент отмечает следующие **замечания** по диссертационной работе:

1. Глобальное замечание к материалу всей диссертации состоит в том, что автор, рассматривая задачи об установившихся колебаниях области с бесконечно удаленной точкой, игнорирует условия излучения, которые необходимо формулировать. Оппонент обнаружил лишь упоминание о них на с.38 и в представлении (1.41), однако в дальнейшем все интегральные представления решений содержат интегралы по вещественной полуоси, а не по контуру в комплексной плоскости, обходящего особенности подынтегральных функций (см. например, монографию Бабешко В. А., Глушков Е. В., Зинченко Ж. Ф. Динамика неоднородных линейно-упругих сред. М. Наука, 1989, на которую, кстати, автор ссылается). Неясно, к каким последствиям при численной реализации привело это упущение.
2. В работе достаточно много внимания уделяется анализу волновых полей при наличии дефектов различной природы, однако не сделан главный шаг по пути идентификации степени поврежденности по данным акустических измерений.
3. В списке литературы отсутствует ссылка на принципиально важную работу Ватульян А. О, Явруян О. В Асимптотический подход в задачах идентификации трещин // ПММ, 2006 №4.С.714-724, где определена структура полей смещений в однородном слое при малых относительных размерах трещин и произвольной их ориентации, и на основе этого осуществлена процедура идентификации.
4. Имеется ряд терминологических и математических неточностей и опечаток



- с. 53. Текст внизу «Функция раскрытия берегов трещины, как и в антиплоском случае, аппроксимируется рядом ортогональных полиномов Чебышева, поскольку, как было указано выше, они имеют корневое поведение на берегах». Как полиномы могут иметь корневое поведение?
- на с. 60 два раза на одной странице использована буква  $\pi$  с разным смыслом (один раз вверху страницы - это число  $\pi$ , другой смысл - показатель степени в формуле ниже);
- На с. 61 диссертации автор пишет «На низких частотах и при малых размерах дефекта квадратные корни (1.36) можно разложить в ряд Тейлора», а далее следует формула асимптотического представления, которая никакого отношения к ряду Тейлора не имеет; более того, это разложение справедливо независимо от размера дефекта;
- с. 89. В отечественной литературе принято использовать термин «параметры Дандерса»;
- в формулах 1.39-1.40 путаница с индексами (индекс вверху, внизу);
- в формуле 2.3 потерян множитель  $\frac{1}{2\pi}$  перед интегралом;
- в формуле 2.5 должно быть  $\Delta U_y$ ;
- непонятно происхождение символа  $i$  в формуле (3.17);
- $1$  в первой формуле на с.52 неверно определено прямое преобразование Фурье от координатных функций (знак в экспоненте другой);
- В списке литературы содержатся неверные выходные данные монография № 89, которая вышла не в издательстве «Физматлит», а в издательстве ЮФУ.

Несмотря на сделанные замечания, оппонент отмечает, что они в большей степени носят редакционный характер и не влияют на положительную в целом оценку работы Дорошенко О. В.

**Автореферат** правильно и полно отражает содержание диссертации.

Работа прошла весомую апробацию, неоднократно докладывалась на Всероссийских и международных конференциях, основные результаты опубликованы в журналах, рекомендуемых ВАК РФ.



