

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Федорова Андрея Юрьевича

"Исследование и оптимизация напряжённого состояния в окрестности особых точек упругих тел", представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Диссертационная работа Федорова А.Ю. посвящена и выполнена на актуальную тему построения решений задач о напряжённом состоянии в окрестности особых точек, которое зависит от параметров, определяющих геометрию упругого тела и механических характеристик материала(ов) в их окрестности, схемы приложения внешней нагрузки.

Особые точки разных типов достаточно часто встречаются в расчётных схемах различных прикладных задач теории упругости. Многообразие задач определяется не только геометрией клиновидных или конических областей, но и тем, что на клиновидные и конические области могут быть наложены различные граничные условия, а для составных областей — заданы различные условия контакта между составными частями. Механические характеристики областей могут соответствовать изотропным, анизотропным, функционально-градиентным материалам и даже несимметричной теории упругости.

Следующее актуальное направление связано с поиском оптимальных форм, обеспечивающих минимальное напряжённое состояние в упругих телах и численной оптимизацией формы упругих тел, в которых, наряду с учётом сингулярности, используется анализ поведения напряжений в окрестности особых точек, выполненный на основе задачи о собственных значениях для плоских клиньев. Один из подходов связан с постановкой и решением задач оптимизации формы поверхности, при которой напряжённое состояние удовлетворяет заданному прочностному критерию, либо возникающие напряжения являются минимальными из всех возможных конструктивных решений

Существующие способы, методы и технологические приемы, направленные на увеличение прочности клеевых соединений, связаны с изменением геометрии и(или) механических свойств клеевых соединений вблизи краёв клеевого слоя. Здесь проявляется актуальность постановки и решения задачи поиска наилучшего варианта геометрии и упругих постоянных материалов вблизи краёв поверхности контакта клеевого соединения.

Таким образом, основными направлениями рассматриваемой

комплексной работы является получение новых решений задач о напряжённо-деформированном состоянии в окрестности особых точек упругих тел, в том числе с функционально-градиентными и анизотропными свойствами, с учётом моментного поведения материала; постановка и решение задач оптимизации геометрии и свойств материала в окрестности особых точек упругих тел.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Объем диссертации значительный и составляет 172 страницы.

Во введении предельно четко выполнен обзор работ по направлениям исследований, определены цели работы, представлена научная новизна, практическая значимость и достоверность, основные положения выносимые на защиту, личный вклад автора. Среди опубликованных автором тридцать одной работы имеются публикации в журналах, рекомендованные ВАК и международных базах данных.

В первой главе обобщены и систематизированы результаты для двумерных областей (или к ним сводящихся) аналитических исследований поведения напряжений в окрестности особых точек (нарушения гладкости поверхности тела, границы контактов материалов, смены граничных условий, края поверхности контакта различных материалов) при построении собственных решений для областей специального вида. Показана возможность определения показателей сингулярности напряжений и построения границы между решениями с сингулярностью и без неё, в пространстве параметров, определяющих это решение.

Наряду с аналитическими оценками, предложен новый численный алгоритм определения показателя степенной зависимости напряжений в окрестностях особых точек для различных задач теории упругости для анизотропных тел и тел, описываемых несимметричной теорией упругости. В основе которого положен численный конечно-элементный анализ напряжений на сгущающейся к особой точке сетке с оценкой показателя сингулярности.

Далее рассматриваемый алгоритм успешно применяется для анализа напряжений в окрестности особых точек анизотропных упругих тел для трансверсально-изотропных и ортотропных тел. Автором показано, что наличие анизотропных свойств не влияет или в некоторых случаях незначительно влияет на характер сингулярности напряжений в вершине трещины.

Представляют интерес и результаты численного анализа напряжений в окрестности особых точек тел в рамках модели несимметричной теории упругости. Получены следующие новые результаты: для двумерных задач поведение напряжений в окрестности вершины трещины одинаковое для классической и несимметричной теорий упругости; в особых точках, где имеет место смена типа граничных условий или контакт различных

материалов, показатели сингулярности напряжений, полученные в рамках моделей классической и несимметричной теорий упругости отличаются и зависят от механических характеристик, определяющих моментное поведение материала.

Во второй главе представлены исследования аналитическими и численными методами поведения напряжений в упругих клиновидных телах из функционально-градиентных материалов (ФГМ), свойство которых непрерывно изменяется вдоль одной из координат. При рассмотрении клина из функционально-градиентного материала при изменении свойств в виде степенного ряда задача сведена к построению собственных решений однородного клина с известными упругими характеристиками в вершине клина. Далее автор вполне успешно проводит серию численных экспериментов о поведении напряжений вблизи особых точек упругих тел из ФГМ на задачах с особыми точками при смене граничных условий при различных вариантах изменения коэффициента Пуассона, на поверхности скрепления различных материалов, при клеевом соединении двух пластин. В работе показано, что поведение напряжений в различных вариантах особых точек упругих тел из ФГМ не зависит от варианта непрерывного распределения упругих свойств в окрестности особых точек и определяется их значениями в этих точках.

В третьей главе представлена математическая постановка задачи оптимизации геометрии и упругих характеристик материала в окрестности особых точек и её численная реализация. Принимается, что локальные изменения геометрии в окрестности любой из особых точек не влияет на напряженное состояние в других особых точках и задача минимизации функционала сводится к задаче нелинейного математического программирования. При решении двумерных модельных задач (однородного упругого цилиндра под равномерной нагрузкой, составного цилиндра, трапецеидального тела с зоной из ФГМ) для описания изменяемой части границы тела использовались сплайны первого и третьего порядков. Результаты, полученные в этой главе, подтверждают и развивают положение об общем свойстве оптимальных геометрий и оптимальном распределении свойств материала в окрестности особых точек, состоящее в том, что оптимальные решения определяют границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности напряжений.

Два раздела данной главы посвящены совершенствованию методов определения прочности клеевых соединений и технологий склеивания на основе использования свойств оптимальных решений в окрестности особых точек. Для этого Федоровым А.Ю. построены численные модели распределения напряжений в стандартных образцах с оценкой точности получаемых решений – выполнении естественных краевых условий. Приведённые результаты расчётов показали существенно неоднородное

распределение отрывных напряжений с выраженной концентрацией напряжений в окрестности выхода границы контакта металл – резина на внешнюю боковую поверхность образца, что не соответствует стандартным методикам, основанных на предположении однородного распределения напряжений.

Федоровым А.Ю. при выборе оптимального варианта дуги окружности внешней поверхности клеевого слоя рассмотрена задача построения оптимального решения. Проведённый эксперимент качественно подтвердил обнаруженные свойства оптимальных решений в окрестности особых точек, а именно полученное значения угла в соответствующей задаче для составного клина определяет границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности напряжений.

В заключении автор приводит основные результаты диссертационной работы.

Актуальность проведенного исследования определяется повышенным интересом к теме построения решений и оптимизации напряженного состояния около особых точек во всем мире. Множество экспериментов ставится с целью получения оптимальных форм и поиском новых технических решений.

Новизна исследования подтверждается тем, что многие результаты автора диссертации получены впервые. Надо отметить, что идея алгоритма для получения порядка степенной зависимости напряжений в окрестности особых точек, также принадлежит автору.

Практическая ценность диссертации состоит в том, что ее результаты могут быть использованы, как в фундаментальных исследованиях (задачи и алгоритмы оптимизации геометрии и свойств в окрестности особых точек), так и в прикладных (рекомендации по совершенствованию методики определения прочности клеевых соединений).

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается результатами экспериментов и сравнением численных и аналитических решений.

Обоснованность научных положений и выводов базируется на материалах публикаций, выполненных автором самостоятельно и в соавторстве. Всего по материалам диссертации автором опубликованы 31 работа. Результаты также докладывались автором на международных и российских конференциях, семинарах.

Материалы диссертации со всей полнотой изложены в опубликованных работах автора. **Автореферат отражает содержание диссертации.**

В диссертации можно отметить и некоторые недостатки. В основном они будут касаться применяемых численных алгоритмов, используемых в работе:

1. Построению адаптивных алгоритмов МКЭ с апостериорной оценкой погрешности в том числе со сгущающимися сетками в особых точках посвящено достаточно много классических работ Е.А. Волкова, В.В. Шайдурова, И. Бабушки и многих других. Используемый в работе способ построения локального сгущения сетки в угловых точках и определения напряжений в заданных точках в работе не представлен. Было бы полезно, привести информацию о мерах качества сгущающейся сетки, оценках скорости сходимости от характерного размера сетки, используемых постановках задач и конечно-элементных аппроксимациях. Автор и сам на стр. 59 говорит о необходимости демонстрации погрешности конечно-элементного решения.
2. Отсутствует информации о сеточных областях и в других численных экспериментах (п. 1.3 и др.).
3. К сожалению, в работе нет упоминания и об алгоритме задания непрерывно изменяющихся свойств при конечно-элементной аппроксимации в задачах моделирования ФГМ.
4. Задача оптимизации геометрии и упругих характеристик с учетом особых точек в главе 3 представлена в общем виде. В процессе оптимизационного поиска используется процедура метода конечных элементов, реализованная в пакете ANSYS, которая должна быть представлена, а ее реализация протестирована. Описание адаптации сетки и оценки погрешности в этом случае также ограничиваются общими фразами (см. стр. 106).
5. Отсутствие списка обозначений для достаточно объемной работы затрудняет с ней знакомство.

Сделанные замечания не изменяют общую положительную оценку диссертации.

Результаты диссертации достоверны, научно обоснованы и прошли достаточно полную апробацию на научных конференциях и при практическом использовании. Все основные результаты диссертации опубликованы в печати, автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

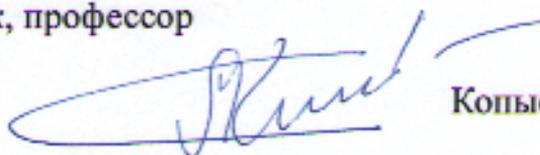
Диссертация Федорова А.Ю. представляет собой законченную работу, выполненную на высоком научном уровне. По совокупности полученных результатов можно сделать вывод, что данная работа имеет существенное значение для исследований и оптимизации напряженного состояния в окрестности особых точек упругих тел и определяет новые направления в аналитических, численных и экспериментальных методах их решения.

Диссертационная работа отвечает п.7 «Положения о порядке

присуждения ученых степеней» и всем дополнительным требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям. Считаю, что А.Ю. Федоров заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,

заведующий лабораторией вычислительных и информационных технологий Института механики УрО РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор



Копысов Сергей Петрович

«3» июня 2016 г.

Адрес: 426067, г. Ижевск, ул. Т. Барамзиной, 34
Тел. +7 (3412) 214583,
e-mail: s.kopysov@gmail.com

Подпись С.П. Копысова удостоверяю.

Ученый секретарь
Института механики УрО РАН
к.ф.-м.н.



Северюхин Александр Валерьевич