

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию

Федорова Андрея Юрьевича

«Исследование и оптимизация напряженного состояния в окрестности особых точек упругих тел», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.02.04 – «Механика деформированного твердого тела»

Актуальность темы диссертационной работы

Задачи о распределении напряжений в окрестности концентраторов напряжений привлекают повышенное внимание исследователей и инженеров. В процессе эксплуатации реальных конструкций именно в этих областях происходит интенсивное накопление повреждений в материале, приводящее к формированию микротрещин и началу разрушения детали или изделия. Актуальность подобных задач возрастает с разработкой и применением новых функционально-градиентных материалов, механические свойства которых существенно отличаются от свойств классических конструкционных материалов, что требует разработки новых подходов к анализу напряженно-деформированного состояния элементов конструкций. Диссертация А. Ю. Федорова направлена на решение именно этих актуальных задач механики деформируемого твердого тела, задач об определении полей напряжений в упругих телах (в том числе с функционально-градиентными свойствами) в окрестности особых точек и на разработку методов снижения уровня напряжений в исследуемых зонах за счет оптимального выбора свойств материалов и оптимизации формы исследуемых элементов конструкций.

Структура и содержание диссертационной работы

Структура диссертации традиционна – введение, три главы с изложением постановок задач, методов их решения и полученных результатов, заключение с выводами по работе, список использованной литературы.

Во введении дана краткая характеристика диссертации, обоснована актуальность темы исследования, сформулированы направления и цели работы, перечислены основные положения, выносимые автором на защиту. Описана научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены также сведения об апробации результатов диссертационной работы и основных публикациях, отражающих содержание диссертации.

В первой главе диссертационной работы представлены результаты анализа распределения напряжений в окрестности особых точек в двумерных задачах теории упругости. Рассмотрены задачи об особенностях распределения напряжений в окрестности вершин однородных и составных клиньев при различных вариантах граничных условий. Для однородного клина исследована зависимость показателя сингулярности напряжений от угла раствора при различных схемах нагружения. В пространстве

геометрических параметров клина и упругих характеристик материала рассчитаны граничные кривые, разделяющие области решений с сингулярностью и без сингулярности напряжений. Показано, что для составного клина граница, разделяющая исследуемые типы решений, также определяется как геометрическими параметрами задачи, так и упругими характеристиками материалов составляющих частей клина.

Обсуждены основные подходы к численному анализу напряженно-деформированного состояния упругих тел в окрестности особых точек с использованием метода конечных элементов. Показано, что использование сеток конечных элементов, сгущающихся к исследуемой особой точке, позволяет получить достоверную картину распределения напряжений в окрестности особых точек различных типов. Для степенного закона распределения напряжений в окрестности особых точек разработан алгоритм численного анализа, позволяющий получать результаты об особенностях полей напряжений в окрестности особых точек в упругих изотропных и анизотропных телах в рамках моделей классической и несимметричной теории упругости. Приведены примеры эффективного использования разработанного алгоритма для оценки напряженно-деформированного состояния и показателя сингулярности в модельных задачах различного вида. На основе анализа асимптотического поведения полученного решения при увеличении плотности разбиения получены оценки погрешности численного метода определения показателя сингулярности с использованием принятого варианта конечно-элементного анализа

Проведен численный анализ особенностей распределения напряжений в окрестности особых точек в телах, механическое поведение которых описывается моделями несимметричной теории упругости. Показано, что порядок степенной зависимости напряжений в окрестности вершины трещины, определенный с использованием модели несимметричной теории упругости практически совпадает с порядком, определенным в соответствии с представлениями классической теории. Для других типов особых точек получены различные значения показателя сингулярности напряжений, определенные в соответствии с классической теорией и моделью несимметричной теории упругости.

Результаты численного решения задач об определении особенностей распределения напряжений в особых точках, полученные с использованием принятого варианта метода конечных элементов и предложенного в диссертации алгоритма сопоставлены с данными, полученными другими авторами численно-аналитическим методом.

Вторая глава диссертации представляет исследование особенностей полей напряжений в особых точках в телах с упругими функционально-градиентными свойствами. Получено аналитическое решение задачи о распределении напряжений в окрестности вершины клина из функционально-градиентного материала с непрерывно изменяющимися свойствами. Принят наиболее общий вид распределения свойств материала в виде степенного ряда по радиусу. Показано, что распределение напряжений в

окрестности вершины клина из рассматриваемого материала определяется углом раствора клина и значениями упругих характеристик материала в его вершине.

Принятый вариант метода конечных элементов и разработанный алгоритм и программа использованы для решения частных модельных задач о распределении напряжений в особых точках составных тел, включающих элементы из функционально-градиентных материалов. Получены решения для различных типов особых точек с различными законами распределения упругих свойств. Показано, что характер распределения напряжений в исследуемых областях также зависит как от геометрических параметров, так и от свойств функционально-градиентных материалов в рассматриваемой точке. В пространстве упругих характеристик построены границы, разделяющие области свойств материалов, соответствующие сингулярным решениям о распределении напряжений и области решений без сингулярности. На основе обобщения аналитических и численных исследований сделан вывод, что особенности поля напряжений в функционально-градиентных материалах в окрестности особых точек различного вида не зависят от распределения упругих свойств материала в целом и определяется лишь значениями характеристик материала в рассматриваемых точках.

В третьей главе диссертации представлены результаты использования разработанных аналитических и численных методов анализа особенностей распределения напряжений в окрестности особых точек упругих тел для оптимизации узлов сочленения с целью снижения уровня концентрации напряжений в элементах конструкций. Разработана постановка задачи об оптимизации формы и упругих свойств материалов в окрестности особых точек. Предложен метод численного решения рассматриваемых задач оптимизации основанный на анализе напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и процедуре минимизации соответствующего функционала. Реализация метода решения задач оптимизации осуществлена с использованием разработанного в процессе выполнения диссертационной работы нового алгоритма и специальной программы в рамках коммерческого конечно-элементного комплекса ANSYS.

Получено решение ряда модельных задач по оптимизации формы и комбинации упругих характеристик с целью снижения концентрации напряжений в особых точках различного типа. На основе обобщения полученных численных решений сформулировано общее свойство оптимальных решений рассматриваемых задач, в соответствии с которым оптимальная совокупность геометрических параметров исследуемых элементов конструкций и упругих характеристик материалов в окрестности особых точек определяет границу между решениями с сингулярностью и без сингулярности напряжений.

Разработанные в диссертации методы исследования напряженно-деформированного состояния элементов конструкций в особых точках

использованы для критического анализа существующих в настоящее время стандартов определения прочности клеевых соединений. Показано, что стандартные схемы испытаний клеевых соединений не обеспечивают требуемой однородности распределения напряжений в зоне контакта соединяемых деталей. С использованием разработанных методов решена задача оптимизации схемы испытаний на прочность клеевых соединений при нормальном отрыве с целью снижения концентрации напряжений в окрестности кромок соединяемых элементов. Предложена новая форма образца для подобных испытаний, отличающаяся от стандартного оптимальной величиной угла на кромках стыка исследуемого соединения. Проведена серия экспериментов по определению прочности клеевых соединений на образцах с различными углами кромок, результаты которой подтвердили оптимальное значение угла кромок, полученное в результате расчетов в соответствии с разработанной диссертантом методикой оптимизации геометрических параметров соединения элементов конструкций.

В заключении сформулированы основные выводы и предложения по практическому использованию результатов работы.

Достоверность представленных результатов

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием апробированных моделей механического поведения материалов при разработке алгоритмов численного решения поставленных задач; тщательным анализом сходимости конечно-элементного алгоритма; сопоставлением результатов расчетов с аналитическими решениями, экспериментальными данными и работами других авторов.

Научная новизна

Научная новизна результатов, полученных диссертантом, несомненна. Получены новые аналитические и численные решения задач о распределении напряжений в окрестности особых точек в упругих телах с функционально-градиентными свойствами. Разработан новый численный алгоритм и его программная реализация, позволяющая оценить порядок степенной зависимости напряжений в окрестности особых точек в изотропных и анизотропных телах, свойства которых определяются различными моделями механического поведения материала. Разработан новый метод численной оптимизации геометрических параметров и механических характеристик в окрестности особых точек упругих тел и соединений элементов конструкций..

Практическая значимость

Результаты диссертации представляют несомненный научный интерес и имеют очевидное практическое значение. В качестве основных результатов, определяющих практическую значимость работы, следует отметить

разработку постановки и алгоритма численного решения задач оптимизации геометрических параметров и свойств материалов в окрестности особых точек, а также практические рекомендации по совершенствованию методов экспериментальной оценки прочности клеевых соединений.

Публикации и апробирование результатов диссертационной работы

По материалам диссертации опубликовано 31 научная работа, из которых 4 статьи опубликованы в изданиях, входящих в перечень ВАК, 3 – в системы цитирования Web of Science и Scopus, 9 - в прочих журналах и сборниках материалов конференций, 18 тезисов докладов. Материалы исследований представлены на различных конференциях, в том числе на 6-ти международных и XI Всероссийском съезде по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Работа выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является законченным научным исследованием. Автореферат и публикации автора в полной мере и правильно отражают содержание диссертации.

Замечания по диссертации

1. В диссертации отсутствует список принятых обозначений, который мог бы существенно облегчить ее прочтение.
2. Уравнения (1.17), (1.18), (1.19), (1.20), (1.21), (1.22), (1.23) представлены в диссертации без выводов. Следовало бы привести ссылки на работы, в которых описан вывод указанных уравнений.
3. На рис. 2.3, 2.4, 2.6 и 2.8 представлены графики распределения напряжений в окрестности особых точек для расчетных случаев, различающихся лишь значениями коэффициента Пуассона. На рис. 2.12-2.14 показаны распределения напряжений для случаев, различающихся соотношением геометрических параметров задачи. На рис. 2.18 и 2.19 представлены распределения напряжений для различных вариантов изменения упругих характеристик в функционально-градиентном материале. Следовало бы представить результаты вычислений в более компактном виде, объединив указанные серии графиков. Такое объединение облегчило бы анализ представленных результатов и позволило бы сократить объем диссертации.
4. Расчеты по оптимизации клеевого соединения за счет выбора упругих характеристик адгезива выполнены в диссертационной работе для специфических материалов с низкими значениями модуля упругости. Следовало бы рассмотреть и более общий случай соединения традиционных конструкционных материалов, таких как металлы и керамика.
5. В главе 3 диссертации описан эксперимент по оценке влияния угла кромки стыка адгезионно соединяемых частей образца на прочность клеевого соединения разнородных материалов при нормальном отрыве. Результаты эксперимента представлены в виде экспериментальной

зависимости предельного значения силы от величины угла. Следовало бы представить экспериментальные данные в виде аналогичной зависимости прочности соединения. В работе не представлены также результаты статистической обработки полученных экспериментальных данных.

Заключение

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертации. Работа выполнена на высоком методологическом уровне, отличается полнотой изложения и является завершенным научным исследованием. Представленные результаты вносят существенный вклад в развитие методов анализа особенностей распределения напряжений в особых точках в упругих телах и оптимизации соединений элементов конструкций с целью снижения концентрации напряжений. Диссертация в целом отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, **Федоров Андрей Юрьевич** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности: 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Ведущий научный сотрудник
Научно-исследовательского института механики
Московского государственного университета
им. М.В.Ломоносова,
доктор технических наук,
Адрес: 119619, Москва, ул. Производственная, д.4
Телефон: 8-495-939-1273 E-mail: zezin@imec.msu.ru



Зезин Юрий Павлович

Отзыв составлен 31 мая 2016 г.

Подпись ведущего научного сотрудника Ю.П. Зезина заверяю:

Директор НИИ механики
МГУ им. М. В. Ломоносова
Академик РАЕН



Окунев Юрий Михайлович