

ОТЗЫВ

официального оппонента
о диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
Удалова Артема Сергеевича
на тему:

**«Численные методы повышенного порядка точности в механике трещин»
по специальности 1.1.8. – Механика деформируемого твердого тела**

Прочность конструкционных материалов во многом зависит от микродефектов, возникающих как на стадии изготовления, так и в процессе эксплуатации деталей и механизмов. Дефекты материала в форме трещин особенно опасны, поскольку их взаимодействие и эволюция в рабочем процессе могут привести к их необратимому росту и разрушению.

Диссертационная работа Удалова А.С. посвящена исследованию напряжённо-деформированного состояния упругой среды, ослабленной заданной системой трещин, под действием внешнего механического и температурного воздействия. Специфика задач линейной механики трещин состоит в том, что в вершинах трещин напряжения бесконечны и характеризуются коэффициентами интенсивности. Надёжное определение коэффициентов интенсивности напряжений требует возможность определять решение в непосредственной близости от вершин трещин. Данная специфика задач сильно осложняет использование классических численных методов и требует создания новых эффективных приёмов решения.

В работе предложена модификация метода граничных элементов повышенного порядка точности, позволяющая достаточно эффективно и точно рассчитывать поля напряжений и перемещений в непосредственной окрестности границ и вершин трещин. Основной акцент исследований сосредоточен на оценке влияния на величину коэффициентов интенсивности напряжений соседних трещин, их взаимного расположения, наличия изломов, характера механического или температурного воздействия. **Актуальность** исследования таких задач не вызывает сомнений.

Создание надёжных, с точки зрения количественного определения коэффициентов интенсивности напряжений, численных методов решения задач нагрузки тел с трещинами позволяет существенно приблизить результаты расчетов к реальным процессам.

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы.

Во введении обоснованы актуальность работы, научная новизна, достоверность результатов. Представлена апробация работы, публикации и личный вклад автора, представлены положения, выносимые на защиту. Присутствующий во введении обзор литературы в целом дает представление об аналитических и численных методах, которые применяются для решения задач механики тел с трещинами.

В первой главе диссертации даны постановки задач и приводятся основы предлагаемой модификации метода разрывных смещений, позволяющие существенно повысить точность расчетов. В данном методе определяется плотность интегралов типа Коши. В классическом методе плотность определяется в классе кусочно-постоянных функций. В работе этот метод определяется, как метод нулевого порядка точности. Модификация заключается в повышении требований к этим функциям. Рассмотрение плотности в классе кусочно-непрерывных функций определяется как метод первого порядка точности, представление плотности в классе непрерывно дифференцируемых функций называется методом второго порядка точности.

Математической основой метода являются базовые решения, полученные с использованием теории функций комплексного переменного в теории упругости. Решение определяется в форме конечного ряда – разложения по базовым решениям. При этом, уравнения теории упругости удовлетворяются точно, а граничные условия выполнены на дискретном множестве точек границы (середины граничных элементов).

Автором проведен сравнительный анализ предлагаемого метода

численного решения с разными порядками точности сравнением с имеющимися аналитическими результатами. Показано, что наиболее эффективным и точным, является метод второго порядка точности. Он и используется в последующей работе. Разработанный численный метод и исследованные с его помощью новые задачи механики трещин позволяют говорить о **научной новизне** работы.

Преимущества выбранного метода состоят в том, что сеткой разбивается только граница, что позволяет фактически уменьшить на единицу размерность задачи и ускорить расчеты.

Разобраны два метода определения коэффициентов интенсивности напряжений. Первый, основан на возможности численного определения напряжений в близкой окрестности вершины трещины. Второй метод использует асимптотическое разложение решения в окрестности вершины трещины (М. Уильямс). Показано, что во втором случае можно достаточно точно определить коэффициенты интенсивности, используя расчеты в более дальней окрестности. Показана возможность определения так называемых T -напряжений, влияющих на возможные направления роста трещин.

Проведенные в данной главе верификации с точными аналитическими решениями трещин простой геометрии, позволяет автору сделать вывод об удовлетворительной точности предложенного метода.

Вторая глава посвящена верификации и валидации программного кода сравнением с имеющимися решениями для систем трещин. Показанная в результате работы эффективность метода позволила автору рассмотреть и исследовать ряд новых задач. Исследована линейно-упругая среда, ослабленная большой (в том числе, и бесконечно большой) периодической системой трещин. Показана возможность сведения бесконечной системы трещин к конечной, исходя из конечности области влияния трещины. При рассмотренных конфигурациях системы трещин установлено существенное влияние относительного сдвига соседних слоев на коэффициенты

интенсивности напряжений (может происходить их увеличение или уменьшение в несколько раз). Установлено, что для трещин V-образного излома коэффициенты интенсивности напряжений всегда меньше, чем для прямолинейной трещины той же длины. Показано, что предложенные численные методы позволяют с достаточной степенью точности моделировать поиск траектории возможного роста трещины.

В третьей главе аналогичный численный метод предложен и использован для исследования плоских задач теплопроводности тел с трещинами. Проведена его верификация сравнением с аналитическими задачами. Рассмотрены новые задачи для периодической системы трещин. Исследовано взаимное влияние трещин для разных конфигураций взаимного расположения в условиях тепловой нагрузки.

Использованные строгие математические методы и результаты верификации позволяют сделать вывод о **достоверности результатов** диссертационной работы.

В конце диссертации подведены итоги. Работа имеет законченную форму. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Результаты работы достаточно широко апробированы. Они докладывались на научных конференциях и **опубликованы в 5 печатных работах, 4 из которых в рецензируемых журналах, индексируемых в международных базах Scopus, Web of Science, RSCI.** Автореферат **полностью соответствует содержанию диссертации.**

Тем не менее, к работе есть следующие замечания:

1. Описание предложенной методики очень схематичное, в основном словесное, без подробных математических выкладок, что затрудняет изучение и повторение сторонними исследователями предложенных автором численных алгоритмов.

Не очень четкая структуризация рассмотренных задач: в одном разделе рассматриваются по несколько задач, с только словесным

описанием, что также затрудняет анализ результатов автора.

2. В задаче о росте трещины (с.55) ничего не сказано о том, происходит ли рост под действием возрастающей нагрузки, или при постоянной нагрузке. Как правило, в однородной среде в рамках квазистатической задачи устойчивый рост трещины реализуется только при убывающей нагрузке, при значении, превышающем предельное значение срагивания трещины. При постоянной же нагрузке рост трещины обычно рассматривают с помощью более сложных моделей усталостного роста.
3. Задачи с негладкими формами поверхности трещин, например, с трещин в изломе (с.52, 59), содержат дополнительные источники сингулярности, кроме концов трещин, которые могут продуцировать ветвление трещин. Предложенный метод, по-видимому, не учитывает этих особенностей.
4. Задача теплопроводности в главе 3 рассмотрена с граничными условиями только 2-го рода, что позволяет находить ее решение только с точностью до константы, об этом следовало бы отметить в диссертации.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.1.8 - «механика деформируемого твердого тела» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова.

Считаю, что соискатель Удалов Артём Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент:

Димитриенко Юрий Иванович

Доктор физико-математических наук, профессор,

Заведующий кафедрой «Вычислительная математика и математическая физика» Федерального государственного бюджетного образовательного

учреждения высшего образования «Московский государственный

технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный

исследовательский университет)» (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Контактные данные:

тел.:8(499) 263-64-45 e-mail dimit@bmstu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.02.04 - «Механика деформируемого твердого тела»

Адрес места работы:

10500 Москва, ул.2-я Бауманская, д.5, МГТУ им. Н.Э. Баумана

Под
Ди

