

Отзыв научного руководителя

доктора физико-математических наук, профессора Звягина Александра Васильевича на диссертационную работу Удалова Артёма Сергеевича «**Численные методы повышенного порядка точности в механике трещин**», представленную на соискание степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела»

Все годы обучения в университете, а затем в аспирантуре Удалова Артёма Сергеевича выделяют трудолюбие, научная любознательность и целеустремлённость. В представленной им работе предложен и апробирован численный метод исследования напряжённо деформированного состояния упругой среды, ослабленной системой произвольно ориентированных трещин разного масштаба и геометрии.

Данная проблема остаётся актуальной в приложениях механики прочности тел с внутренними дефектами. Следует отметить, что возможность численного исследования задач тел с дефектами для достаточно большой системы трещин произвольной геометрии и ориентации продолжает оставаться **актуальной задачей** современной механики разрушения. Во многом это связано со спецификой задач механики трещин, где требуется достаточно точное определение полей напряжений в близкой к каждой трещине области. Основные физические характеристики прочности и устойчивости трещины (например, коэффициенты интенсивности напряжений) связаны с поведением напряжений в непосредственной близости от концов трещины. На концах трещин напряжения имеют особенности (на концах трещины они принимают бесконечные значения). Эта специфика задач с трещинами достаточно сильно ограничивает применение классических численных методов и требует разработки специальных численных методов.

Математической основой диссертационной работы является предложенный оригинальный численный метод, позволяющий представить решение в виде ряда-разложения по найденной системе базовых решений теории упругости, имеющих разрыв перемещений на граничном элементе, представляющем элементарный элемент трещины. Коэффициенты разложения определяются из условия выполнения граничных условий на дискретном множестве точек границы (в центрах граничных элементов). В классическом исполнении используются граничные элементы с постоянными разрывами перемещений. В данной работе использованы квадратичные представления для скачков перемещений, что позволило обеспечить непрерывную дифференцируемость плотности интегралов типа Коши, используемых при получении базовых решений. Это и использование специальных элементов на концевых граничных элементах позволило автору значительно увеличить точность вычисления полей напряжений и перемещений в непосредственной близости к границам трещины. По сути, определяется аналитическое представление решения в форме конечного ряда

по базовым функциям. Сами базовые функции определены аналитически. Уравнения теории упругости внутри области выполнены точно.

В диссертации проведен достаточно полный обзор работ по тематике исследования. Список литературы включает 99 источников.

Описанию численного метода и его верификации посвящена **первая глава** диссертации. Проведена достаточно большая работа по верификации кодов программы путём сравнения с известными аналитическими решениями и с приближенными решениями других авторов.

Показано, что предложенный метод позволяет достаточно точно (ошибка менее процента) определять поля перемещений и напряжений. В данной главе представлены две методики определения таких специфических, характерные для задач линейной механики разрушения параметров, как коэффициенты интенсивности напряжений, T -напряжения, коэффициенты влияния.

Первая методика основана на вычислении по определению. Это стало возможным, поскольку разработанный метод позволяет приближаться к трещине бесконечно близко и непосредственно вычислять предельные значения параметров. Вторая методика использует представление M . Уильямса для поля напряжений в окрестности конца трещины. На основе численно определённых величин напряжений методом наименьших квадратов находятся коэффициенты ряда M . Уильямса. Это позволяет найти коэффициенты интенсивности напряжений, T -напряжения и в принципе представить поле напряжений в окрестности конца трещины компактными аналитическими выражениями.

Во второй главе исследованы новые задачи. Проанализировано взаимное влияние двойки периодической системы параллельных трещин. Показано, что, в зависимости от геометрии их взаимного расположения, наличие системы трещин может быть как менее опасным по сравнению с одиночной трещиной, так и более опасным. Получено, что в некоторых конфигурациях разупрочнение по коэффициенту интенсивности напряжений может быть более, чем в два с половиной раза, по сравнению с одиночной трещиной.

В задаче о ломаной V -образной трещине показано, что коэффициент интенсивности напряжений всегда меньше, чем его значение для одиночной трещины той же длины.

Одной из практически важных задач является описание бесконечных периодических систем трещин. Ввиду геометрического разнообразия таких систем аналитическое решение таких задач получить невозможно. Существующие решения получены лишь для простейших конфигураций. Была выдвинута гипотеза о возможности сведения бесконечной системы к достаточно большой, но конечной системе трещин. При этом коэффициенты интенсивности напряжений определялись для трещины, лежащей в центре большой системы. Проверка показала, что использование данной гипотезы позволяет с необходимой точностью определять все необходимые параметры в окрестности центральной трещины и эти параметры соответствуют

бесконечной периодической системе. Это проверено для периодических и двойкопериодических систем.

В третьей главе диссертации рассмотрены задачи стационарной теплопроводности тела с трещинами. Предложен и верифицирован численный метод повышенного порядка точности, позволяющий, как и в теории упругости, достаточно эффективно и точно описывать поля температуры и градиента температуры. Определять интенсивность теплового потока в концах трещин. Исследовано взаимное влияние на температурное поле двойко периодической системы трещин. Показано, что взаимное расположение трещин существенно влияет на коэффициент интенсивности теплового потока. Найдены конфигурации, усиливающие или ослабляющие коэффициент интенсивности теплового потока в несколько раз.

Результаты диссертации опубликованы в 5 научных работах, в том числе 4 публикациях в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базах данных RSCI, Web of Science, Scopus.

По результатам диссертации было сделано 10 докладов на российских и международных научных форумах (тезисы опубликованы).

Содержание диссертации обсуждалось на научных семинарах кафедр механико-математического факультета:

- ◆ научно-исследовательский семинар кафедры волновой и газовой динамики механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством академика РАН Р.И. Нигматулина (2023 г.);
- ◆ научно-исследовательский семинар кафедры механики композитов механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством проф. В.И. Горбачева (2023 г.);
- ◆ научно-исследовательский семинар кафедры теории упругости механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством проф. Д.В. Георгиевского (2023 г.);
- ◆ научно-исследовательский семинар кафедры теории пластичности механико-математического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством члена-корр. РАН Е.В. Ломакина (2023 г.).

Считаю, что диссертационная работа Удалова Артёма Сергеевича «Численные методы повышенного порядка точности в механике трещин» выполнена на высоком научном уровне и имеет характер законченного самостоятельного научного исследования. Она соответствует специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела». Работа удовлетворяет всем требованиям Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова.

Рекомендую диссертацию Удалова Артёма Сергеевича «Численные методы повышенного порядка точности в механике трещин» к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.8 – «Механика деформируемого твёрдого тела».

Я, Звягин Александр Васильевич, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного Совета и их дальнейшую обработку.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук (по специальности 1.1.8)

Профессор кафедры газовой и волновой динамики

механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова

(119991, Ленинские горы, д. 1, тел. 312-34-11)

e-mail: zvyagin@phd.msu.ru

Звягин А.В.

ревич А.И.