

О Т З Ы В

официального оппонента о диссертации Шаминой Анастасии Александровны на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук на тему «Взаимное влияние системы трещин в трехмерном упругом теле», представленную по специальностям 01.02.04 – «механика деформируемого твердого тела».

В работе рассматриваются задачи исследования трёхмерного напряжённо-деформированного состояния упругого тела, ослабленного системой трещин. В качестве основного инструмента используется разработанный при активном участии автора численный метод решения пространственных задач механики трещин – «метод разрывных смещений».

Разработанная программа на основе «метода разрывных смещений» позволяет проводить расчеты необходимых характеристик механики разрушения для большой системы произвольно ориентированных в пространстве трещин разной геометрической конфигурации, как в бесконечной упругой среде, так и в конечном упругом теле. Коды достаточно хорошо верифицированы сравнением с известными аналитическими решениями и численными результатами других авторов. Конкретные задачи, решение которых получено в диссертации (взаимное влияние круглых и эллиптических трещин, для плоскости с круговым вырезом, трещины с изломом поверхности, трещины ветвления, периодические системы трещин), имеют прикладную значимость. Всё выше перечисленное позволяет сделать вывод об актуальности данной работы.

Диссертация состоит из введения, которое включает обзор литературы, трех глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации 130 страниц. Список литературы включает 139 наименований.

Обзор литературы, приведенный в диссертации, даёт достаточно полное представление о состоянии проблемы прочности тела, содержащего систему трещин, а также о существующих численных методах исследований в данной области. Приведены наиболее известные и важные работы мирового уровня по теме диссертации. Их анализ показывает, что расчет пространственных трещин актуален.

В первой главе диссертации подробно описывается выбранный автором численный метод. Каждая трещина моделируется геометрически заданной частью двухсторонней поверхности, на которой терпит разрыв поле перемещений. Эта поверхность разбивается на плоские граничные элементы. Используя представление Трефца бигармонических функций, для каждого граничного элемента аналитически строится три линейно независимых решения уравнений теории упругости. Общее решение краевой задачи ищется в форме конечного ряда полученных аналитических решений с неопределенными коэффициентами. Сами коэффициенты определяются выполнением граничных условий задачи в геометрическом центре тяжести каждого граничного элемента. Таким образом, задача сводится к решению линейной системы уравнений для коэффициентов разложения. Этот метод можно было бы назвать методом коллокаций для граничных условий с использованием точных решений самих уравнений теории упругости.

Следует отметить, что после определения коэффициентов разложения, решение задачи для перемещений и напряжений представляется в виде конечных рядов по аналитически определённым функциям. Это существенно

ускоряет дальнейшие исследования, поскольку нахождение полей перемещений и напряжений сводится к простому суммированию конечных рядов. С данной точки зрения предложенный метод достаточно мобилен, поскольку после решения системы поля перемещений и напряжений могут быть исследованы в любой выбранной области среды, в том числе, в окрестности края трещин, что наиболее актуально для задач механики разрушения. Коэффициенты интенсивности напряжений определяются численной аппроксимацией асимптотического поведения напряжений и перемещений в окрестности края трещин.

Вторая глава диссертации содержит обоснование достоверности результатов, полученных с использованием предложенного численного метода. В данной части работы проведено сравнение с известными решениями задач о пространственных трещинах. Для круглых и эллиптических одиночных трещин есть аналитические решения в напряжениях. Известно решение для одноосных круглых трещин, которое сведено к решению системы двух граничных интегральных уравнений Фредгольма. Проведенная в диссертации верификация для одиночных и одноосных трещин позволяет сделать вывод о достоверности результатов. Показано удовлетворительное совпадение с численными результатами других авторов для системы двух трещин, лежащих в одной плоскости, двух одноосных параллельных трещин. Помимо верификации глава содержит интересные качественные результаты для случая, когда поверхность трещины является многосвязной областью (прямоугольное и круглое кольцо). Показано, что в случае выполнения критерия движения трещины её края будут двигаться внутрь кольца, стараясь сделать область односвязной.

В третьей главе приведено исследование конкретных новых задач:

- 1) Влияние взаимного сдвига центров двух параллельных трещин на характер распределения величины коэффициента влияния вдоль края трещины;
- 2) Деформация упругого пространства, ослабленного трещиной с изломом поверхности;
- 3) Пространственные трещины ветвления;
- 4) Периодические и двояко-периодические системы трещин.

При растяжении пространства, ослабленного двумя параллельными одноосными трещинами, нормальной нагрузкой была известна тенденция уменьшения коэффициента интенсивности напряжений по мере уменьшения расстояния между плоскостями трещин. При этом коэффициент влияния (отношение коэффициента интенсивности для «трещины в системе» к коэффициенту интенсивности одиночной трещины) всегда меньше единицы. В данной работе впервые решена задача в том случае, когда трещины не одноосны (есть взаимный сдвиг центров). Введена т.н. теневая область, как общая часть первой трещины и ортогональной проекции второй на плоскость первой. Для одноосных трещин теневая область совпадает с поверхностью трещины. С ростом сдвига она уменьшается и при некоторой величине сдвига исчезает. Показано, что при сдвиге величина этой области играет важную роль. С увеличением сдвига появляются точки границы, в которых коэффициент влияния становится больше единицы. Наиболее опасным для разрушения является ситуация, когда теневая область вырождается в точку. В этом предельном случае с уменьшением расстояния между плоскостями коэффициент влияния неограниченно возрастает.

Для трещины с изломом поверхности основной целью в работе является исследование поведения коэффициента интенсивности напряжений в окрестности точки излома её края. Решается задача нагрузки упругого пространства с круглой в плане трещины, которая имеет заданный угол излома по диаметру. Известно, что разрыв граничных условий в линейно упругой среде приводит к появлению особенности. В данной задаче край трещины является линией разрыва граничных условий. Линия излома поверхности трещины также является линией разрыва граничных условий. В точке пересечения линии излома и кривой края трещины присутствуют две особенности. Приведенные в работе результаты позволяют сделать вывод о том, что в окрестности данной точки величина коэффициента интенсивности напряжений максимальна. Это означает, что при выполнении критерия движения рост трещины начнется здесь.

Из экспериментов известно, что на практике распространение трещин часто сопровождается их ветвлением. В диссертации рассмотрена одиночная пространственная трещина с двумя симметричными ветвями под внутренним давлением. Проведены расчеты для разных углов ветвления и найдена зависимость коэффициента интенсивности напряжений от угла ветвления. Оказалось, что при некотором угле ветвления коэффициент интенсивности напряжений имеет максимальное значение. В диссертации выдвинута гипотеза, что данный угол ветвления наиболее вероятен.

В задаче о трещине с повторно ветвящимися ветвями исследована величина раскрытия трещины в центральном сечении. Показано, что линии ветвления являются линиями скачка раскрытия берегов трещины. При направлении от основной трещины скачок может быть, как отрицательным, так и положительным в зависимости от геометрической конфигурации.

В задаче о бесконечной периодической системе трещин выдвинута гипотеза о возможности сведения данной задачи к численному исследованию достаточно большой, но конечной системы трещин. Гипотеза проверена для периодических и двояко-периодических систем. Показано, что при увеличении количества трещин с сохранением геометрической схемы их расположения коэффициент интенсивности центральной трещины стремится к предельному значению, характерному для бесконечной периодической системы.

В заключении сформулированы основные выводы, следующие из результатов работы.

На защиту выносится новый численный метод решения пространственных задач для упругого тела с трещинами и полученные с его помощью решения перечисленных выше новых задач. Этим определяется **новизна** результатов диссертации.

Достоверность результатов определяется использованием строгих моделей и точных математических методов решения. В работе достаточно полно проверено соответствие полученных численных решений с известными аналитическими и численными решениями других авторов.

Практическая значимость полученных результатов заключается в возможности получить изложенными в работе методами величины коэффициентов интенсивности напряжений вблизи краёв для систем трещин разной формы и геометрической конфигурации, что определяет возможный рост трещин и прочность тела.

Результаты работы известны научной общественности, поскольку докладывались на 22 научных конференциях и **опубликованы в 14 печатных работах**, 7 из которых в рецензируемых журналах, **индексируемых в**

международных базах Scopus, Web of Science, RSCI. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

По работе можно сделать следующие замечания:

- Формулировка целей и научной новизны работы содержат изложение сделанного в работе при нечетком определении целей и научной новизны;
- В работе говорится о «хорошем» качественном и количественном совпадении численных и аналитический решений – отличие не превышает 13%. Но в таблице 2 отличие достигает 30%;
- В работе отсутствуют решения реальных задач, например, хотя бы гидроразрыва;
- Как обычно, в тексте есть ошибки и многие рисунки не имеют обозначения осей.

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 паспорту специальности 01.02.04 – «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 приложениям № 5, 6 Положения о диссертационном совете Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, соискатель Шамина Анастасия Александровна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент: Бондарь Валентин Степанович
Доктор физико-математических наук, профессор
Профессор кафедры «Техническая механика и компьютерное моделирование»
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Московский политехнический университет»

Бондарь Валентин Степанович

14 10 2021 г

Контактные данные:

тел.: 8 (495) 729-10-00

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

Адрес места работы:

107023 г. Москва, ул. Большая Семеновская, д.38

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение

высшего образования «Московский политехнический университет»

Тел. 8 (495) 729-10-00

ПОДПИСЬ Бондаря В.С. заверяю

ВЕДУЩИЙ ДОКУМЕНТОВЕД
Е. В. АЛЕКСЕЕВА

