

В диссертационный совет Д 002.075.01
при Федеральном государственном
бюджетном учреждении науки
«Институт проблем машиноведения
Российской академии наук»

Отзыв официального оппонента
на диссертацию Братова Владимира Андреевича
«Численные модели волновой динамики и разрушения»,
представленную к защите на соискание ученой степени доктора физико-
математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – «Механика
деформируемого твёрдого тела»

Актуальность темы диссертационной работы.

Тема диссертации охватывает широкий круг явлений механики. Конкретно автор работы исследует случаи высокоинтенсивных динамических воздействий на материал, разрабатывает новые методы оценки процессов разрушения, применяет численные методы для моделирования механических процессов. Вышеперечисленные проблемы и методы входят в круг быстро развивающихся областей науки.

По мнению экспертов, многие техногенные катастрофы, связанные с разрушением зданий (аквапарк «Трансвааль», рынки в Москве и Казани, бассейн и каток в Перми и Германии), происходили не по причине ошибочного проектирования этих объектов, а из-за неточности расчетов возможных последствий при изменении конструкций в процессе эксплуатации (появлении трещин, изломов у несущих опор и т.п.). Как правило, такие изменения происходят в результате динамических процессов, когда направление и величина действующих сил быстро меняется. Математические модели приведенных естественных процессов описываются дифференциальными уравнениями и системами уравнений в частных производных. Особенности геометрии областей (наличие трещин, изломов), поведение исходных данных (правых частей уравнения, начальных и граничных условий) приводят к быстрому росту решений. Факторы, вызывающие нерегулярность решения, служат, как правило, источниками роста трещин, а точки, в которых функция решения стремится к бесконечности, являются критическими.

Вопросы численного решения таких задач активно исследуются. Для решения двумерных задач теории упругости в области с трещиной к настоящему времени разработаны различные эффективные численные методы, обладающие существенными преимуществами по сравнению с классическим методом конечных элементов.

Первую группу составляют методы конечных элементов со сглаживанием (Smoothed Finite Element Methods). В их основе лежит ультраслабая постановка дифференциальной задачи (weakened weak formulation), а стандартная схема метода конечных элементов дополнена специальной

методикой построения поля деформаций со сглаживанием производных (PIM, point interpolation method), или построении его только с использованием перемещений. Этот вариант МКЭ разрабатывается в работах Zeng W, Liu GR, Jiang C, Dong XW, Chen HD, Bao Y, и других ученых, они опубликованы в журналах Applied Mathematical Modelling, International Journal of Mechanical Sciences, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, и прочих рейтинговых изданиях.

Другим современным методом решения задачи о трещине является расширенный метод конечных элементов (XFEM), впервые предложенный в 1999 году [N. Moes, J. Dolbow, and T. Belytschko. Int. J. Numer. Meth. Engng., 46:131–150, 1999.]. В его основе лежит идея о расширении конечно-элементного пространства с помощью специальных функций, позволяющих учесть асимптотику решения вблизи вершины трещины и учесть разрывность решения на трещине. Этот метод интенсивно развивается, как и бессеточные методы, такие, как EFGM (element-free Galerkin method), предложенный в [T. Belytschko, L. Gu, Y. Lu. Mater. Sci. Eng. 2 (3A) (1994) 519].

Вышеперечисленные методы, как правило, разрабатываются для стационарных и квазистационарных задач. Обзор состояния теории по нестационарным задачам есть в автореферате диссертации. Разработка новых методов решения динамических задач, с новыми критериями разрушения является актуальной проблемой, успешно исследуемой в представленной работе.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, включающего 287 наименований. Общий объем диссертации составляет 301 страницу.

Во Введении обоснована актуальность работы, раскрыты научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, а также основные положения, выносимые на защиту. Определены основные направления исследования, приведен литературный обзор, очерчен круг примененных методов решения задач. Сформулирована цель диссертационной работы – развитие аналитических и численных подходов для предсказания волновых процессов и разрушения в твердых телах под действием стационарных и нестационарных нагрузок. В рамках этой широкой темы соискатель выделяет три ключевые задачи:

- разработка методов оценки энергоемкости и энергоэффективности процессов ведущих к разрушению в квазихрупких средах с дефектами в квазистатической и динамической постановке;
- развитие численных методов на основе МКЭ путем внедрения новых критериев структурных превращений, применимых для случаев, когда невозможно применение известных подходов;
- демонстрация эффективности предлагаемых подходов посредством решения задач, исследование которых представляет самостоятельный интерес.

Глава 1 посвящена анализу квазистационарной задачи с наклонной трещиной, с точки зрения минимизации затрат энергии на разрушение. В главе 2 исследуется аналогичная задача в динамической постановке, с различными способами приложения нагрузки к области. Установлены зависимости энергозатрат на продвижение трещины от параметров прикладываемой нагрузки.

В главе 3 исследуются задачи о распространении волн с высокой энергией вблизи поверхности в твердых телах. Изучено распространение сейсмических волн в областях с барьерами-включениями.

Глава 4 посвящена исследованию задач, связанных с инициацией, распространением и остановкой макроскопических трещин в квазихрупких средах под влиянием ударных нагрузок. Исследование построено на внедрение критерия инкубационного времени разрушения в численные схемы МКЭ.

В главе 5 аналогичный подход применяется к численному исследованию возникновения, развития и остановки разрушения в изначально бездефектных сред. Выполнены вычислительные эксперименты и дополнительные исследования по четырем важным прикладным задачам: динамическому кратерообразованию, разрушению асфальтобетонного покрытия, пробиванию пластин, изготовленных из полиметилметакрилата, высокоскоростными металлическими ударниками, и задачи о разрушении керамических пластин при ударной нагрузке.

Научная новизна диссертации.

1. Решена задача об энергии критического состояния, ведущего к разрушению, в проблеме о статическом нагружении плоскости с наклонной трещиной комбинированной нагрузкой сжатия-сдвига. Показано, что комбинация сжимающей нагрузки с нагрузкой сдвига позволяет значительно уменьшить энергозатраты на разрушение по сравнению с чисто сжимающей нагрузкой.
2. Исследованы оптимальные энергосберегающие характеристики динамических воздействий на твердое квазихрупкое тело с имеющимися дефектами. Показано, что возможно найти оптимальные энергосберегающие характеристики разрушающих воздействий на основе параметров материала и геометрических свойств дефектов, преобладающих в разрушаемом теле.
3. Развита методика для нахождения оптимальных характеристик защитных сейсмических барьеров с интегрированными структурами. Найдены зависимости влияния свойств материалов и геометрии защитных барьеров на способность защитных сооружений ослаблять действие сейсмических волн.
4. Предложен новый подход к численному моделированию инициации, распространения и остановки динамических трещин в твердых телах. Проведено сравнение с экспериментальными данными, которое показало, что применение предложенного подхода позволяет корректно предсказать динамику трещин для широкого класса практических задач разрушения.

5. Предложены и обоснованы алгоритмы для численного моделирования разрушения в изначально бездефектных твердых телах при высокоскоростном контактном взаимодействии. Выполнено сравнение численных результатов с экспериментальными данными.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке новых подходов в численном моделировании динамики деформирования и разрушения твердых тел, исследовании проблемы энергоэффективности разрушения сред с дефектами.

Практическая значимость работы.

На основе результатов глав 1, 2 возможно производить оценку оптимальных параметров работы промышленных машин, работающих на измельчение и переработку квазихрупких материалов, с точки зрения энергосбережения. Подход, развиваемый в главе 3, должен позволить оптимизировать геометрию и материалы, используемые при возведении сооружений для защиты от волн сейсмической природы, с целью максимизации защитных функций. Подходы, развиваемые в главах 4, 5, могут способствовать созданию новых вычислительных алгоритмов, корректно предсказывающих поведение динамических трещин в твердых телах, а также эволюцию хрупкого разрушения в них при высокоскоростном контактном взаимодействии тел.

Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в ведущих рецензируемых журналах, входящих в международные базы цитирования Web of Sciences или Scopus, а также рекомендованных ВАК РФ для публикации результатов диссертаций. Кроме того, по результатам работы опубликована монография. Результаты, вошедшие в диссертацию, докладывались соискателем на нескольких десятках международных и всероссийских конференциях по соответствующей научной специальности. Научные исследования Братова В.А. были поддержаны грантами РФФИ и РНФ.

Замечания к содержанию работы.

1. Поставленные начально-краевые задачи являются чрезвычайно сложными с математической точки зрения, как это отмечено в работах группы французских математиков F. Ciarlet, M. Dauge, M. Costabel. У истоков исследования этих задач с сингулярностью решения стоят такие ученые, как О.А. Ладыженская, В.А. Кондратьев, В.Г. Мазья, Б.А. Пламеневский, Р. Grisvard, M. Dauge. Сложность вызвана тем, что в решении задачи Ламе в окрестности конца трещины напряжения в линейном приближении стремятся к бесконечности. Это вызывает трудности при попытке численного решения задачи. Обычный метод конечных элементов, включенный в большинство CAD/CAE систем, может дать большую погрешность в окрестности конца трещины. Этот вопрос никак не комментируется в диссертации.

2. При решении начально-краевой задачи (2.4), (2.5)-(2.9) применяется коммерческий пакет ANSYS. В работе используются аналитические опорные решения, но численно и аналитически решаются разные задачи. Короткий тест именно для постановки задачи (2.4)-(2.9) мог бы показать области с повышенной погрешностью, или послужить дополнительным обоснованием численного решения.
3. В главе 3 вычислительный алгоритм верифицируется путем сопоставления численного и аналитического решения задачи Лэмба для полуплоскости без включения сейсмического барьера. Но, как известно, вычислительные трудности при решении таких задач возникают именно в окрестности включений или разрезов в области. Можно ли оценить погрешность, вносимую в численное решение добавлением включения в расчетную область?
4. В связи с предыдущим, вопрос: как контролировалась аппроксимация точного решения численным решением? И дополнительно, за какое машинное время получены численные результаты глав 2, 3, и на каких конфигурациях вычислительных машин?
5. Литературные ссылки сделаны по американским стандартам. Учитывая, что требования к оформлению диссертации сформулированы в очень общем виде, формально это допустимо. Но в российских журналах обычно так не принято.
6. Обзор литературы во Введении представляется неполным. В разделе «Актуальность» из 36 литературных ссылок только 13 относятся к нынешнему столетию, а из них только 5 – за последние 10 лет. Можно только отметить, что классические труды в исследуемой области представлены в этом обзоре качественно. Дополнительные ссылки на литературу имеются в тексте диссертации, всего процитировано 287 источников.
7. Некоторые замечания по оформлению работы.
- (а) Рисунок 1 автореферата (1.1 диссертации) при первом взгляде вводит в заблуждение относительно направлений касательных напряжений. Это легко исправлялось проведением дополнительных линий – границ образца, и уменьшением длины стрелок для касательных напряжений.
- (б) Формула (1) автореферата оперирует с неопределенным углом θ . В диссертации этот угол объясняется обычным образом.
- (в) Некоторые предложения читаются с трудом; они встречаются в описательных частях диссертации, например, в начале пунктов 2.1, 2.2, и в автореферате в начале страниц 13, 16.
- (г) В тексте диссертации мне не удалось найти расшифровки аббревиатуры ПММА (полиметилметакрилат).

Заключение.

Сделанные замечания отражают сложность проведенного исследования и не влияют на общее положительное впечатление от работы. Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне и является завершенным научным исследованием. Все результаты получены с использованием

строгих математических методов и апробированных пакетов прикладных программ, и их достоверность не вызывает сомнений. Результаты работы вносят важный вклад в развитие актуального направления механики деформируемого твердого тела – механики динамического разрушения – и способствуют решению современных прикладных задач в этой области. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, цели и задачи работы, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации. Диссертация соответствует паспорту специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела (физико-математические науки).

Таким образом, диссертация «Численные модели волновой динамики и разрушения» соответствует критериям, указанным в п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор, Братов Владимир Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.1.8 (ранее 01.02.04) – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент: ведущий научный сотрудник Вычислительного центра Дальневосточного отделения Российской академии наук ФГБУН Хабаровский Федеральный исследовательский центр ДВО РАН, доктор физико-математических наук, доцент



Ткаченко Олег Павлович

11 мая 2022 г.

Место работы: Вычислительный центр Дальневосточного отделения Российской академии наук - обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Хабаровского Федерального исследовательского центра Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Адрес: 680000, г. Хабаровск, ул. Ким-Ю-Чена, д. 65.

Тел.: +7 4212 22-72-67.

E-mail: olegt1964@gmail.com

Я, О.П. Ткаченко, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и дальнейшую обработку.

Подпись

Ткаченко ОП

заверяю

Главный специалист
по кадрам

Солонина Т.Ю.

