

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Фрейдина Александра Борисовича на диссертацию Казаринова Никиты Андреевича на тему: «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация Н.А. Казаринова посвящена исследованиям динамического разрушения. Целью работы является разработка дискретных подходов к интерпретации инерционных эффектов процесса разрушения, связанных с пространственно-временной дискретностью процессов, а также разработка эффективных численных моделей и процедур на основе структурно-временного подхода для решения практически важных задач динамического разрушения. В задачи работы входят анализ особенностей разрушения сред с дискретным периодическим строением, анализ дискретного характера неустойчивостей процесса динамического разрушения, а также адаптация структурно-временного подхода для анализа разрушения в задачах об ударном нагружении и разработка новых методов для работы с численными неустойчивостями, встречающимися в данных задачах.

Актуальность исследований разрушения при динамических воздействиях обусловлена тем, что при динамическом нагружении наблюдаются эффекты, которые не описываются классическими статическими трактовками прочности.

Научная значимость и новизна работы Н.А. Казаринова обусловлены обнаруженной и исследованной аналогией между динамическим разрушением материала и разрушением линейного осциллятора, а также новой инерционной трактовкой структурно-временного подхода к описанию динамического разрушения.

Практическая значимость работы заключается в том, что в ней предложена упрощенная модель для оценки прочности материала при динамическом разрушении, основанная на линейном осцилляторе. Также следует отметить развитие в работе практически значимые численные подходы к решению задач динамического разрушения.

Достоверность обусловлена соответствием результатов теоретических расчетов имеющимся экспериментальным данным, а также непротиворечивым использованием уже апробированных идей структурно-временного подхода и апробированными численными методами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников из 202 наименований, и изложена на 216 страницах.

Введение содержит историю вопроса и критический анализ текущего состояния исследований, касающихся темы диссертации, дает обоснования актуальности темы, новизны, достоверности, теоретической и практической значимости работы, дает формулировку целей и задач работы, описывает методы исследования и хорошо представляет диссертацию в целом.

Первая глава представляет развиваемую автором аналогию между процессами динамического разрушения и разрушением в системе «масса на пружине».

Аналитические формулы, выведенные для линейного осциллятора, используются для выявления сходств между нестабильностью трещины и разрушением линейного осциллятора при приложении коротких импульсных нагрузок. Особое внимание также уделено объяснению эффекта задержки разрушения.

Во второй главе продолжено рассмотрение системы «масса на пружине». Рассмотрено разрушение линейного осциллятора при линейно возрастающей нагрузке и показан эффект роста прочности при увеличении скорости нагружения. Также приведены результаты по калибровке модели линейного осциллятора для описания экспериментов по старту трещин при динамическом нагружении и по откольному разрушению в стержнях.

Материалы первых двух глав убедительно показывают, что задержка разрушения при воздействии коротких импульсов силы и возрастание прочности при увеличении скорости нагружения могут быть связаны с инерционными эффектами.

В третьей главе рассмотрен динамический разрыв одномерной цепочки идентичных линейных осцилляторов. В результате аналитического решения системы дифференциальных уравнений, описывающих движение цепочки, выявлен эффект динамического разрушения, связанный с дискретной структурой, которая приводит к возможности такого искажения волны разгрузки, которое вызывает в некоторых звеньях деформацию, превышающую критическое значение даже при изначально неразрушающем нагружении.

В четвертой главе на основе метода конечных элементов рассмотрены вопросы динамического распространения трещин в хрупких материалах при различных воздействиях: при квазистатическом нагружении и при ударно-импульсном приложении нагрузки. Разработанная численная модель, реализующая структурно-временной критерий разрушения с явным введением характерного размера – минимального объема разрушающегося материала, определяющего в случае роста трещины ее минимальный проскок, позволила, в частности получить экспериментально наблюдаемые в пластинах из ПММА осцилляции скорости трещины. Также модель позволила исследовать фрагментацию в хрупких телах при динамическом нагружении и, в частности, исследовать распределение фрагментов по размерам.

В пятой главе представлены экспериментальные и численные результаты по динамическому разрушению – пробиванию пластин из хрупких материалов, подвергнутых ударной нагрузке. Экспериментальные испытания проводились с использованием стального снаряда цилиндрической формы, разгоняемого с помощью газовой пушки. Для определения остаточной скорости удара использовалась высокоскоростная фотосъемка. Проведенные эксперименты были численно смоделированы с использованием метода конечных элементов и структурно-временного критерия разрушения.

Кроме того, в данной главе представлены методика и результаты использования искусственных нейронных сетей, обученных на массивах численных результатов решения задач о пробивании.

В заключении суммируются результаты работы.

К основным результатам работы можно отнести, в том числе, следующие:

1. Развита аналогия между разрушением, происходящем при старте динамической трещины и разрушением линейного осциллятора. Аналогия естественным образом вводит инерцию процесса разрушения. При этом жесткость и критическая деформация пружины осциллятора определяют статическую прочность материала, а масса отвечает за динамические эффекты.

Аналогия наглядно объясняет на первый взгляд противоречащие друг другу ключевые эффекты динамического разрушения – в зависимости от амплитуды и длительности (формы) импульса увеличение прочности (величины разрушающего напряжения) при росте скорости нагружения или задержку разрушения, которая приводит к реализации ниспадающей ветви на диаграмме нагружения и уменьшению разрушающего напряжения.

2. Показана согласованность развитой аналогии и концепции инкубационного времени, что придает уже работающей концепции новые качественно и количественно подтвержденные важные смыслы.

В частности, показано, что «осцилляторная аналогия» дает трактовку подхода, основанного на критерии инкубационного времени, которая позволяет эффективно решать прикладные задачи определения пороговых нагрузок, определять минимальные импульсы силы, при которых реализуются режимы максимальной задержки разрушения и режимы без задержки разрушения.

3. Решена задача о разрушении периодической структуры: продемонстрирован динамический эффект вторичного разрушения равномерно (статически) деформированной цепочки, при котором волны, возникающие при разрушения слабого звена, приводят к последующему разрыву одного из других звеньев.
4. На основе критерия инкубационного времени развиты численные конечноэлементные подходы к постановке и решению задач о динамическом разрушении. Подходы применены к решению двумерных задач о распространении прямолинейных магистральных трещин и множественных трещин с произвольным направлением. Последнее означает исследование задачи фрагментации, которое дополнено использованием алгоритмов теории графов.
5. Решены задачи о разрушении трехмерных бездефектных тел, в том числе задача о пробивании преграды. Проведено сравнение решения с результатами экспериментов.
6. Для задач механики разрушения развит численный подход на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющий провести быстрый анализ прочности конструкции при динамическом нагружении. Эффективность подхода продемонстрирована на примере задач о пробивании пластин с перфорацией.

По работе имеются вопросы и замечания.

1. Рассматривая эффект вторичного разрушения в цепочке осцилляторов, автор утверждает, что в сплошном однородном стержне такой эффект не наблюдается. С одной стороны, это означает важный вывод о том, что учет дискретности геометрии тела вследствие его микроструктуры может приводить к таким эффектам, но очевидно

ли, что одномоментный разрыв нагруженного однородного стержня не приводит к формированию в стержне зон с напряжениями, превышающими начальный уровень и предел прочности.

2. Масса на пружинке может вернуться назад, не достигнув критического отклонения от равновесного положения. Такие процессы в данной модели не влияют на последующее разрушение. Получается, что история докритического нагружения не влияет на прочность. Можно ли модифицировать развиваемый подход так, чтобы учесть влияние многократно и, с точки зрения модели, докритического нагружения?
3. Используемый в 2D и 3D-постановках критерий разрушения проверяется для конкретных площадок. В случае задачи пробивания (трехмерный случай, 1-й параграф 5-ой главы) ничего не говорится о площадках, на одной из которых срабатывает критерий, приводящий к разрушению элемента (сколько площадок, как они ориентированы, как меняются во времени?)
4. Во второй главе в качестве массы берется масса некоторого характерного объема в окрестности вершины трещины. При дальнейших расчетах этот характерный объем остается неизменным. Вместе с тем, область, захваченная инерционными процессами, меняется по мере развития волновой картины. Но тогда должна меняться и масса. В какой степени можно пренебрегать этим эффектом?
5. Встречаются опечатки, например, «в следствие» вместо «вследствие» на стр. 67.

Эти замечания не имеют квалификационного значения. Работа написана хорошим языком. Ее интересно читать. Развито новое видение эффектов динамического разрушения и новая трактовка структурно-временного подхода. Результаты демонстрируют возможности наглядного представления инерционных эффектов в механике разрушения, а также для других быстро протекающих процессах. Развита численные процедуры, отражающие дискретизацию структуры материала. Кроме того, работа в целом отчетливо ставит проблемы сочетания континуального и дискретного в механике деформируемого твердого тела в целом и механике разрушения в частности, что имеет самостоятельное методологическое значение.

Результаты достойно представлены в высокорейтинговых публикациях (20 статей, входящих в базы данных Scopus, WoS, 11 из которых опубликованы в журналах кварття Q1), хорошо апробированы на международных и Российских конференциях.

С учетом всего вышесказанного полагаю:

Содержание диссертации Казаринова Никиты Андреевича на тему: «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения» соответствует специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение.

Нарушений пунктов 9, 11 Порядка присуждения Санкт-Петербургским государственным университетом ученой степени кандидата наук, ученой степени доктора наук соискателем ученой степени мною не установлено.

Диссертация соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора наук, установленным приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете» и рекомендована к защите в СПбГУ.

Член диссертационного совета

Д. ф.-м.н., с.н.с., профессор кафедры теории упругости

Санкт-Петербургского государственного

университета

06.12.2024



Фрейдин А.Б.