

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета
Елена Владимировна Кустова

Е.В. Кустова
(подпись) (инициалы, фамилия)

« 29 » _____ 2024 г



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения
Диссертации Казаринова Никиты Андреевича,
представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по теме «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения»

по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», 2024

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

Диссертация Казаринова Никиты Андреевича посвящена решению актуальных задач механики динамического разрушения: исследованию структурно-временных особенностей и процессов динамического разрушения, эффектов динамического разрушения, связанных с пространственно-временной дискретностью данных процессов, а также разработке эффективных численных моделей на основе разработанных подходов. В результате проведения исследования открыта аналогия между процессом динамического разрушения и разрушением в системе «масса на пружине», дана трактовка ключевых эффектов динамического разрушения с позиций структурно-временного подхода и дискретных систем, разрешены центральные противоречия в области динамического распространения трещин, а также предложены новые численные подходы к решению задач динамического разрушения.

Актуальность работы обусловлена необходимостью детального изучения и объяснения ключевых эффектов динамического разрушения, в том числе связанных с пространственно-временной дискретностью, необходимостью разработки простых инженерных подходов к задачам о динамическом разрушении, наличии противоречащих друг другу экспериментальных данных о процессе распространения трещин, а также необходимостью в разработке эффективных численных методов для моделирования

№ 33-04-180 от 29.08.2024

разрушения в условиях динамического нагружения. В рамках диссертационного исследования поставлены и решены соответствующие задачи, которые, таким образом, являются **актуальными**.

Работа содержит 216 страниц и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

Первая глава посвящена исследованию аналогии между процессом динамического разрушения и разрушением в системе «масса на пружине» в условиях нагружения короткими импульсами. Критерий разрушения на основе концепции инкубационного времени был использован для аналитического исследования динамического старта трещин при коротких импульсных нагрузках. Особое внимание было уделено явлению задержки разрушения – фундаментальному эффекту разрушения, который можно наблюдать в экспериментах с короткими импульсными нагрузками. Эффект можно описать следующим образом: разрушение материала происходит после того, как локальные напряжения достигли своих максимальных значений, что означает, что разрушение происходит на стадии снижения локального разрывающего усилия и, следовательно, присутствует задержка разрушения. Показано, что эффект задержки разрушения проявляется при нагружении системы пороговыми нагрузками. Такие пороговые нагрузки являются ключевым инструментом для экспериментального исследования эффектов динамического разрушения. Обнаружено, что экспериментально зарегистрированная задержка разрушения может быть отчетливо объяснена в рамках концепции инкубационного времени. Найдены условия наличия задержки разрушения, оценены параметры пороговой нагрузки и даны соответствующие аналитические формулы. Кроме того, обсуждается важная для инженерных приложений аналогия, основанная на модели «масса на пружине». Аналитические формулы, выведенные для линейного осциллятора, используются для выявления некоторых неочевидных сходств между нестабильностью трещины при коротких импульсных нагрузках и разрушением линейного осциллятора при приложении аналогичных нагрузок: динамический процесс разрушения в окрестности трещины, по-видимому, демонстрирует инерционное поведение, связанное с наличием характерных временных параметров.

Во **второй главе** рассматривается разрушение системы «масса на пружине» (линейного осциллятора) в следствие воздействия двух типов нагрузки: кратковременной импульсной нагрузки и линейно возрастающей нагрузки. В дополнение к результатам, полученным в главе 1 (исследован эффект задержки разрушения в системе «масса на пружине» при нагружении короткими импульсами силы), исследовано разрушение линейного осциллятора при воздействии линейно возрастающей нагрузки и, соответственно, показано, что эффект роста прочности системы при увеличении скорости нагружения может быть исследован на примере разрушения линейного осциллятора. Таким образом, инерция рассматриваемой системы позволяет выявить ключевые эффекты динамического разрушения, а именно задержку разрушения при нагружении короткими импульсами силы и возрастание прочности системы при увеличении скорости нагружения. Проведенные исследования наглядно продемонстрировали неприменимость стандартных моделей прочности сплошных сред при рассмотрении динамических нагрузок. Также в данном разделе приведены результаты по калибровке модели линейного осциллятора для описания экспериментов по старту трещин при динамическом нагружении, а также по откольному разрушению в стержнях. Модель демонстрирует хорошие результаты, несмотря на ее простоту и силу сделанных при моделировании

предположений.

В **третьей главе** рассматривается динамический разрыв одномерной цепочки идентичных линейных осцилляторов (масс, соединенных пружинами). Предполагается, что система состоит из произвольного, но конечного числа звеньев, а первая масса считается неподвижной – один из концов цепочки закреплен. Обсуждаются свободные колебания изначально статически растянутой цепи. Задача решается аналитически для произвольного числа звеньев. Исследованы полученные решения и выявлен эффект динамического разрушения, связанный с явно дискретной структурой системы: волна разгрузки, распространяющаяся по цепи, искажается, и деформация некоторых звеньев может превышать критическое значение даже при неразрушающем (с точки зрения континуальных подходов) нагружении. Полученные решения для цепочки сравниваются с решениями аналогичных задач, сформулированных для упругого стержня – континуального аналога рассматриваемой дискретной системы. Показано, что обсуждаемый эффект разрушения не может быть обнаружен в непрерывной системе. Также в данном разделе проведены расчеты при помощи метода конечных элементов, подтверждающие гипотезу о возможности вторичного разрушения, следующего за разрывом одного из компонентов преднагруженной периодической структуры.

В **четвертой главе** рассматриваются вопросы динамического распространения трещин в хрупких материалах при различных воздействиях. Изучается распространение трещин при квазистатическом нагружении, а также при ударно-импульсном способе приложения нагрузки. Особое внимание уделяется зависимостям, характеризующим продвижение трещины и имеющим нестационарный характер. Так, для случая распространения трещины при квазистатическом нагружении исследуется вопрос осцилляций скорости продвижения трещины. Также рассматривается вопрос, связанный с наблюдаемым в ряде экспериментов разбросом значений коэффициента интенсивности напряжений при движении трещины под воздействием высокоскоростного воздействия, что приводит к противоречивым трактовкам и дискуссиям о применимости энергетического баланса к задачам быстрого роста трещин. Исследования проводились на основе метода конечных элементов с внедренным в схему расчетов структурно-временным критерием разрыва среды, принципиально определяющим дискретный механизм реализации процесса разрушения на заданном масштабном уровне. Проводилось как количественное, так и качественное сравнение результатов расчётов с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что учет пространственно-временной дискретности процесса позволяет предсказать и объяснить ряд экспериментально наблюдаемых эффектов, которые не укладываются в традиционные теоретические представления о динамическом разрушении. Также приведена расчетная схема для моделирования распространения трещин в произвольном направлении в условиях ударного нагружения. Данная численная модель позволяет исследовать фрагментацию в хрупких телах при динамическом нагружении, в частности, исследовать распределение фрагментов по размерам. Приведены результаты применения данной численной модели, полученные результаты качественно соответствуют экспериментам по фрагментации в хрупких телах.

В **пятой главе** представлены экспериментальные и численные результаты по динамическому разрушению пластин из хрупких материалов, подвергнутых ударной нагрузке. Экспериментальные испытания проводились с использованием стального снаряда цилиндрической формы, разгоняемого с помощью газовой пушки. Для оценки

характеристик испытываемых образцов остаточная скорость удара была определена с помощью высокоскоростной фотосъемки. Образцы ПММА квадратной формы трех толщин были исследованы с использованием различных начальных скоростей снаряда. Для всех трех типов образцов были экспериментально получены баллистические пределы. Проведенные эксперименты были численно смоделированы с использованием метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени и модели разрушения на основе инкубационного времени для прогнозирования разрушения материала. Эксперименты со всеми тремя конфигурациями образцов были успешно смоделированы с использованием одного параметра – инкубационного времени, которое было оценено по существующим экспериментальным данным о динамическом разрушении ПММА. В дополнение к моделированию проведенных экспериментов были проведены оценки прочности образца с размерами, для которых экспериментальные данные отсутствовали. Также в пятой главе предложен подход к преодолению типичных для задач о пробивании проблем – высоких требований к вычислительным ресурсам и потенциальным численным нестабильностям, возникающим из-за высоких напряжений в зоне контакта и высоких скоростей деформации. Подход основан на применении искусственных нейронных сетей (ИНС), обученных на массивах численных результатов решения задач о пробивании. Работа подхода продемонстрирована на примере задачи о пробивании перфорированных пластин.

Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:

1. В работе построена аналогия между процессом разрушения при старте трещины и разрушением линейного осциллятора важна с точки зрения более глубокого понимания особенностей динамического разрушения хрупких тел. Возможность приписать процессу разрушения некоторую инерцию позволяет наглядно объяснить ключевые эффекты динамического разрушения – увеличение прочности системы при росте скорости нагружения и задержку разрушения. При решении задачи о старте трещины в результате нагружения прямоугольными импульсами был применен критерий разрушения на основе концепции инкубационного времени. Это позволило отождествить процесс динамического разрушения с некоторым линейным осциллятором с определенной собственной частотой, что может служить основанием для экспериментального поиска резонансных явлений в задачах о старте трещин. Стоит также отметить, что были определены оптимальные с точки зрения импульса силы прямоугольные импульсы, приводящие к старту трещины как для режима максимальной задержки разрушения, так и для случая с перегрузкой, когда разрушение происходит в момент завершения нагружения. Данный результат может быть полезен с практической точки зрения для задач, в которых разрушение является благоприятным исходом (например, задачи горнодобывающей отрасли).
2. Построена важная для инженерного анализа эффектов разрушения модель на основе линейного осциллятора. Жесткость и критическая деформация пружины осциллятора определяются из соображений статической прочности исследуемого материала, масса же отвечает за динамические эффекты разрушения и может быть либо выбрана исходя из соответствия экспериментальным данным, либо масса может быть определена как масса некоторого объема исследуемого материала, задействованного в разрушении. Такой подход с одной стороны наглядно демонстрирует естественность эффектов, наблюдаемых при динамическом разрушении, а с другой позволяет провести

быстрый анализ прочности конструкции при динамических нагрузках.

3. Решение задачи о разрушении периодических структур при внезапной разгрузке важно и теоретически, и практически. Эффект вторичного разрушения был продемонстрирован на задаче о разрушении цепочки линейных осцилляторов – если цепочка была предварительно равномерно деформирована, и затем одно из звеньев рвется, может произойти вторичный разрыв. В континуальной задаче такой эффект не наблюдается, что позволяет ставить задачи о предельном переходе от дискретной системы к задаче о струне, а также вопросы о применимости континуальных моделей для описания реальных материалов и сред. Проведенный численный анализ позволит проектировать образцы для экспериментальной проверки исследуемого эффекта, а также открывает возможности для создания нового способа нагружения материала короткими импульсами, который может быть использован для анализа эффекта задержки разрушения.

4. В работе разработан целый ряд численных подходов к задачам о динамическом разрушении и динамическом распространении трещин. Построенные численные схемы основаны на методе конечных элементов и критерии инкубационного времени. Они предназначены для решения двумерных задач о распространении прямолинейных магистральных трещин и множественных трещин с произвольным направлением, а также для решения трехмерных задач о разрушении в бездефектных средах (например, в задачах о пробивании преград). Некоторые из расчетных схем снабжены дополнительными функциями: решение задачи о распространении магистральной трещины может сопровождаться вычислением текущего значения коэффициента интенсивности напряжений при помощи метода виртуального продвижения трещины, также предложен метод анализа фрагментации на основе теории графов. Все разработанные численные схемы могут быть применены на практике для расчета прочности конструкций. Расчетные схемы основаны на коммерческих программных пакетах, что может способствовать их относительно простому внедрению в инженерную практику.

5. Также в работе предложен численный подход на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющий быстро получать решение трудоемких задач, а также получать решение в задачах, для которых решение затруднено в силу численных сложностей. Работа данного подхода продемонстрирована на задаче о пробивании преград с дискретной структурой – пластин с перфорацией. Исследована работоспособность различных архитектур ИНС, показано, что механическая постановка задачи может сильно влиять на выбор предпочтительной архитектуры ИНС. Данный результат имеет высокую практическую значимость для разработчиков расчетных программных комплексов и сред.

Научная новизна работы

Фундаментальная аналогия между процессами динамического разрушения и разрушением дискретных систем с инерцией (в данном случае – линейного осциллятора) обсуждается впервые. Более того, рассмотрение прямоугольных импульсов нагружения позволило определить собственную частоту осциллятора, отождествляемого с процессом разрушения при инициации трещины. Данный результат получен только в работах автора и соавторов.

Как отмечено в первом параграфе вводной главы, линейный осциллятор и раньше

использовался для моделирования динамического разрушения, однако особенностью подхода, представленного в данной работе, является физическая и механическая обоснованность параметров модели, а также минимизация числа параметров, которые необходимо задать для работы модели. Фактически удалось свести это число к одному параметру, отвечающему за размер области материала, отвечающей за формирование массы осциллятора. Также впервые модель осциллятора была использована для изучения эффектов динамического разрушения – задержки разрушения и увеличения прочности системы при росте скорости нагружения.

Эффект вторичного разрушения, наблюдаемый в дискретных периодических структурах и обсуждаемый в третьей главе диссертации, был впервые исследован коллективом исследователей, в который входит автор диссертации. Более того, впервые показано, что обсуждаемый эффект стоит ожидать в реальных конструкциях с дискретным периодическим строением, что открывает широкое поле деятельности для экспериментаторов.

Применяемый в четвертой главе работы подход на основе структурно-временного подхода, который подразумевает пространственную и временную дискретизацию процесса разрушения. Интеграция данного подхода в расчетную схему на основе метода конечных элементов позволила впервые объединить две точки зрения на зависимость текущего значения коэффициента интенсивности напряжений от скорости трещины. Расчеты показали, что данная зависимость действительно может быть построена для относительно низких скоростей трещины и медленного нагружения, однако для интенсивного и быстрого нагружения и высоких скоростей трещины разброс значений КИН (коэффициент интенсивности напряжений) не позволяет построить однозначную зависимость. Двойственность зависимости *КИН – скорость трещины* была получена впервые. Также стоит отметить первую реализацию метода виртуального продвижения трещины в рамках коммерческого программного продукта, реализующего МКЭ (метод конечных элементов). Представленная в четвертой главе расчетная схема для анализа динамической фрагментации имеет уникальную структуру: метод конечных элементов дополнен алгоритмами теории графов, что позволяет проводить анализ фрагментации исследуемого объекта на каждом временном шаге решения задачи.

Представленная в пятой главе трехмерная расчетная схема является первой трехмерной численной реализацией критерия на основе концепции инкубационного времени. Стоит отметить, что реализованная расчетная схема основана на коммерческом расчетном программном продукте, что может способствовать внедрению разрабатываемого подхода в инженерную практику. В пятой главе также впервые предложен подход, позволяющий преодолеть численные сложности, которые часто сопровождают моделирование задач о разрушении при ударном нагружении. Подход основан на применении искусственных нейронных сетей (ИНС) для задач, постановка которых не позволяет провести МКЭ расчет из-за нестабильного поведения контактного взаимодействия и чрезмерного искажения элементов в силу высоких напряжений и скоростей деформации. Предлагаемый подход не позволит найти точное решение задачи, однако позволит получить оценку решения без изменений в постановке задачи и без изменений настроек численных алгоритмов решения. Такой метод преодоления численных трудностей при решении задач о пробивании предложен впервые.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что в работе получены ряд теоретических результатов, благодаря которым ключевые эффекты динамического разрушения хрупких материалов получают наглядное объяснение благодаря использованию аналогий с разрушением элементарных дискретных систем и использованию моделей на основе линейного осциллятора. Также в работе рассмотрены эффекты разрушения, которые свойственны структурам с дискретным периодическим строением, причем использованные при этом аналитические и численные подходы значимы для дальнейших исследований в области дискретных систем. Разработанные численные подходы на основе структурно-временного критерия разрушения помогли исследовать эффекты, наблюдаемые при движении трещин, а также разрешить существующие среди исследователей разногласия в трактовке особенностей распространения трещин.

Практическая значимость результатов исследования заключается в том, что разработанные в рамках исследования численные подходы могут быть применены при разработке конструкций и для планирования экспериментов. Предложенный в рамках исследования подход для решения вычислительных проблем в задачах о пробивании может быть распространен и на другие задачи механики и может быть полезен в инженерной практике. Результаты, полученные для периодических структур, могут быть основой для экспериментальных исследований обнаруженного эффекта разрушения при разгрузке.

Степень достоверности результатов

Достоверность результатов обоснована применением современных методик измерений и испытаний, воспроизводимостью экспериментальных результатов, согласованностью полученных результатов с результатами других зарубежных и отечественных научных групп.

Апробация результатов

Результаты научных исследований Казаринова Н.А. представлены на 15 конференциях и симпозиумах и опубликованы в 20 работах, все статьи опубликованы в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science (9 статей издано в журналах, входящих в Q1 согласно SJR/CJR). Научные исследования диссертанта выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2022-1114) и РФФИ (гранты 22-71-10019, 22-11-00091)

Считаем, что диссертация Казаринова Никиты Андреевича на тему «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения» содержит новые результаты, направленные на решение важных научных проблем механики динамического разрушения, связанными с пространственно-временной дискретностью процессов динамического разрушения, а также новые подходы к решению задач механики динамического разрушения.

Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.1.8 Механики деформируемого твердого тела.

деформируемого твердого тела.

Нарушения со стороны Казаринова Никиты Андреевича

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

И Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников Кафедры теории упругости рекомендовал диссертацию **Казаринова Никиты Андреевича** по теме «**Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения**» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении голосования коллектива сотрудников кафедры Теории упругости (протокол заседания № 44/8/22-02-7 от 29.08.2024) в количестве 15 человек, участвовавших в заседании из 17 человек штатного состава:

Проголосовали «за»: 14 (Казаринов Н.А. участие в голосовании не принимал),

«против»: 0,

«воздержались»: 0.

Подписал: И.о. заведующего

(должность)

кафедрой теории упругости

(наименование структурного подразделения)

к.ф.-м.н.

(ученая степень)

доцент

(ученое звание)



(подпись)

Б.Н. Семенов / 29.08.2024

Расшифровка подписи, дата