

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
**«Петербургский государственный
университет путей сообщения
Императора Александра I»
(ФГБОУ ВО ПГУПС)**

Московский пр., д.9, Санкт-Петербург, 190031
Телефон: (812) 457-86-28, факс: (812) 315-26-21
E-mail: dou@pgups.ru, <http://www.pgups.ru>
ОКПО 01115840, ОГРН 1027810241502,
ИНН 7812009592/ КПП 783801001

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –
проректор по научной работе
ФГБОУ ВО ПГУПС

д.т.н., профессор

Т.С. Титова



« 11 » 11 2024 г.

11.11.2024 № 005-01.7./51-107

Отзыв ведущей организации

федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Петербургский государственный университет путей
сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС)

на диссертационную работу

Казаринова Никиты Андреевича

«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

Актуальность темы диссертации и соответствие специальности

Актуальность работы обусловлена необходимостью фундаментального изучения основных эффектов динамического разрушения, в частности, задержки разрушения и зависимости прочности от скорости нагружения/деформации. Также в области механики разрушения и её приложений стоит актуальная задача по созданию относительно простых инженерных подходов к моделированию предсказанию разрушения в условиях динамического нагружения. В диссертации решается задача создания эффективных расчетных схем для моделирования динамического разрушения. Поставленные и решенные в рамках исследования задачи представляются актуальными. Набор исследуемых задач, основные цели работы, а также используемые методы решения и общая тематика исследования позволяют сделать вывод, что представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

PK №33-06-1217 от 10.12.2024

Содержание диссертации

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

Во **введении** обоснована актуальность, практическая и теоретическая значимость и новизна выбранной темы диссертации; сформулированы цель и задачи исследования, представлены положения, выносимые на защиту, и основные научные результаты диссертационной работы.

В **первой главе** анализируется аналогия между динамическим разрушением и разрушением системы «масса на пружине» при воздействии короткими нагружающими импульсами. Для изучения процесса страгивания трещин при кратковременных импульсных нагрузках применялся критерий разрушения, основанный на концепции инкубационного времени. Особое внимание уделено явлению задержки разрушения, – ключевому эффекту, который можно наблюдать в экспериментах с короткими импульсными нагрузками. Суть эффекта заключается в том, что разрушение материала происходит после достижения локальным напряжением своего максимального значения. То есть разрушение происходит на стадии снижения локального разрывающего усилия, то есть имеет место задержка разрушения. Показано, что эффект задержки разрушения проявляется при нагружении системы пороговыми нагрузками. Пороговые нагрузки играют важную роль в экспериментальном изучении динамического разрушения. Они позволяют исследовать различные эффекты динамического разрушения материалов. Экспериментально зафиксированная задержка разрушения объясняется на основе концепции инкубационного времени. Определены условия, при которых наблюдается задержка разрушения, а также рассчитаны параметры пороговой нагрузки. Предложены соответствующие аналитические выражения. Обсуждается аналогия, основанная на модели «масса на пружине», имеющая инженерные приложения. Полученные результаты далее используются для выявления сходств между нестабильностью трещины при коротких импульсных нагрузках и разрушением линейного осциллятора при аналогичных нагрузках.

Во **второй главе** дается сравнительный анализ процесса разрушения системы «масса на пружине» под воздействием двух типов нагрузки: кратковременной импульсной и линейно возрастающей. В дополнение к результатам, представленным в первой главе, было исследовано разрушение линейного осциллятора под действием линейно возрастающей нагрузки. В результате показано, что эффект увеличения прочности системы при повышении скорости нагружения можно изучать на примере разрушения линейного осциллятора. Установлено, что инерционные свойства рассматриваемой системы позволяют выявить основные эффекты динамического разрушения: задержку разрушения при воздействии короткими импульсами силы и увеличение прочности системы при возрастании скорости нагружения. Проведённые исследования показали, что стандартные

модели прочности сплошных сред не подходят для анализа динамических нагрузок. В данной главе также представлены результаты калибровки модели линейного осциллятора для описания экспериментов по возникновению трещин при динамическом нагружении и по откольному разрушению в стержнях. Несмотря на простоту и допущения, предложенная модель демонстрирует приемлемую практическую работоспособность.

Третья глава посвящена исследованию процесса динамического разрушения одномерной цепочки, состоящей из идентичных линейных осцилляторов (масс, соединённых пружинами). Рассматривается система, состоящая из произвольного, но конечного числа звеньев, первая масса считается неподвижной, – один конец цепочки закреплён. Исследуются свободные колебания изначально статически растянутой цепи. Задача решается аналитически для произвольного конечного количества звеньев. Полученные решения позволили обнаружить эффект динамического разрушения, связанный с дискретной структурой системы: волна разгрузки, распространяющаяся по цепи, искажается, а деформация некоторых звеньев может превысить критическое значение даже если начальное статическое нагружение было докритическим. Решения для цепочки сравниваются с решениями аналогичных задач, сформулированных для упругого стержня, – непрерывного аналога рассматриваемой дискретной системы. Доказано, что обсуждаемый эффект разрушения не может быть обнаружен в непрерывной системе. Также в данной главе диссертации проведены расчёты с использованием метода конечных элементов, которые подтверждают гипотезу о возможности вторичного разрушения после разрыва одного из компонентов предварительно нагружённой периодической структуры.

В **четвёртой главе** изучается динамическое распространение трещин в хрупких материалах при разных видах воздействия. Анализируется распространение трещин как при квазистатическом нагружении, так и при ударно-импульсном способе приложения нагрузки. Основное внимание уделяется зависимостям продвижения трещины, которые имеют нестационарный характер. Распространение трещины при квазистатическом нагружении изучается с точки зрения неустойчивости скорости её продвижения. Также рассматривается проблема разброса значений коэффициента интенсивности напряжений при движении трещины при высокоскоростном воздействии. Это явление приводит к противоречивым трактовкам и дискуссиям о применимости энергетического баланса к задачам быстрого роста трещин. В рамках исследования использовался метод конечных элементов вкуче со структурно-временным критерием разрыва среды. Данный критерий определяет дискретный механизм разрушения на фиксированном масштабном уровне. Были проведены количественные и качественные сравнения результатов расчётов с экспериментальными данными.

Установлено, что учёт пространственно-временной дискретности процесса разрушения позволяет предсказать и объяснить некоторые экспериментально наблюдаемые эффекты, которые не соответствуют традиционным теоретическим представлениям о динамическом разрушении. Кроме того, была представлена расчётная схема для моделирования распространения трещин в произвольном направлении при ударном нагружении. Разработанная численная схема даёт возможность исследовать процессы динамической фрагментации в хрупких телах при динамическом воздействии, например, изучать размеры и свойства фрагментов.

В пятой главе описаны результаты экспериментальных и численных исследований динамического разрушения пластин из хрупких материалов при ударной нагрузке. Остаточная скорость снаряда и, следовательно, прочность преграды определялась при помощи высокоскоростной съёмки. Для проведения экспериментов использовался стальной снаряд цилиндрической формы, который разгоняли с помощью газовой пушки. Были исследованы образцы ПММА квадратной формы трёх толщин. При этом выстрелы производились с различными начальными скоростями снарядов. В результате проведенных экспериментов для трех геометрий преград были определены баллистические пределы, – минимальные значения скоростей снаряда, приводящие к пробитию преграды. Проведённые эксперименты смоделированы численно с применением метода конечных элементов с явной схемой интегрирования по времени и с использованием критерия разрушения на основе инкубационного времени. Также в данной главе предложен численный подход на основе искусственных нейронных сетей (ИНС), позволяющий быстро получать решение трудоемких и сложных прочностных задач. Эффективность данного подхода продемонстрирована на задаче о пробивании перфорированных пластин. Исследована работоспособность различных архитектур ИНС. Показано, что механическая постановка задачи может сильно влиять на выбор предпочтительной архитектуры ИНС. Полученные результаты представляют практическую ценность для разработчиков программных комплексов расчета прочности сплошных сред.

Наиболее **важные результаты**, полученные в диссертационной работе:

- Выявлена и изучена аналогия между динамическим разрушением и разрушением линейного осциллятора.
- Разработана модель динамического разрушения, основанная на линейном осцилляторе. Эта модель применена для анализа экспериментальных данных и изучения основных аспектов динамического разрушения, включая задержку разрушения.
- Проанализированы эффекты неустойчивого поведения характеристик процесса распространения трещин, такие как колебания скорости движения

трещин и разброс значений коэффициента интенсивности напряжений. Зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости трещины определяется типом нагрузки и диапазоном значений КИН.

- С помощью численных методов изучены процессы динамической фрагментации при ударной нагрузке. Результаты расчётов качественно согласуются с экспериментальными данными по фрагментации хрупких материалов.
- Созданы новые численные и экспериментальные методы для оценки прочности материалов при квазистатическом, циклическом и динамическом видах нагрузки.
- Выявлен и исследован эффект разрушения в периодических структурах при быстрой разгрузке.
- Предложен метод на основе искусственных нейронных сетей для ускорения вычислений и решения проблем неустойчивости в задачах о пробивании преград.

Научная новизна результатов исследования. Впервые обсуждается фундаментальная аналогия между процессами динамического разрушения и разрушением дискретных систем с инерцией (в данном случае, – линейного осциллятора). Нагружение образцов прямоугольными импульсами позволило определить собственную частоту осциллятора, который ассоциируется с процессом разрушения при инициации трещины. Этот результат получен исключительно в работах автора и его соавторов.

Эффект вторичного разрушения, который наблюдается в дискретных периодических структурах и обсуждается в третьей главе диссертации, впервые был исследован группой учёных, включая автора работы. Кроме того, было впервые продемонстрировано, что указанный эффект можно ожидать в реальных конструкциях с дискретным периодическим строением. Это открывает новые перспективы для экспериментальных исследований.

В четвёртой главе применяется подход, основанный на структурно-временном принципе, который предполагает пространственную и временную дискретизацию процесса разрушения. Благодаря интеграции данного подхода в расчётную схему с использованием метода конечных элементов удалось впервые объединить два взгляда на зависимость текущего значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) от скорости трещины. Расчёты показали, что эту зависимость действительно можно установить для относительно низких скоростей трещины и медленного нагружения. Однако при интенсивном и быстром нагружении, а также при высоких скоростях движения трещины разброс значений коэффициента интенсивности напряжений не позволяет создать однозначную зависимость. Двойственность зависимости КИН от скорости трещины была получена впервые.

Кроме того, стоит отметить первую реализацию метода виртуального продвижения трещины в рамках коммерческого программного продукта, использующего метод конечных элементов.

Теоретическая значимость. Полученные результаты наглядно объясняют ключевые эффекты динамического разрушения хрупких материалов благодаря использованию аналогий с разрушением простых дискретных систем и применению моделей на основе линейного осциллятора. Предложенные аналитические и численные методы представляются ценными для перспективных исследований в области дискретных систем. Предлагаемый подход на основе структурно-временного критерия разрушения позволил исследовать эффекты, наблюдаемые при движении трещин, а также разрешить некоторые разногласия между исследователями относительно особенностей распространения трещин.

Практическая значимость. Предложенные аналитические подходы и вычислительные схемы можно рекомендовать к использованию при создании конструкций и планировании экспериментов. Результаты, полученные для периодических структур, могут стать основой для экспериментальных исследований обнаруженного эффекта разрушения при разгрузке.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций. В работе использовались современные методы измерений и испытаний, а также апробированные численные и аналитические подходы к решению задач механики сплошной среды. Полученные результаты исследования можно признать вполне достоверными.

Публикации по диссертационной работе. 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).

Замечания по содержанию и оформлению, общая оценка диссертации

По содержанию работы имеются следующие замечания:

- 1) Глава 1: что понимается (какая физическая/механическая величина) под статической критической силой f_c в системе «масса на пружине»?
- 2) В Главе 1 указывается, что более реалистичной математической моделью для сравнения с экспериментом является образец ограниченных размеров с краевой трещиной. Может быть можно использовать модель упругой полуплоскости с нагрузкой на берегах трещины, отличной от равномерной (как в расчете), например, в виде сосредоточенной силы или распределенной нагрузки на ограниченном отрезке берегов трещины?

- 3) Не совсем ясно, что такое параметр удлинения или длины зоны Δl для образца с трещиной, – это механическая константа материала или вспомогательный параметр в конкретной экспериментальной схеме?
- 4) Имеет ли модель линейного осциллятора какую-либо теоретическую или практическую перспективу, или она использовалась только для объяснения некоторых экспериментально наблюдаемых эффектов динамического разрушения?
- 5) В Главе 4 исследуется зависимость коэффициента интенсивности напряжений от скорости движения трещины. А что можно сказать о длительности или дальности её распространения? Это актуально для протяженных объектов.

Сделанные замечание не влияют на общее положительное заключение о диссертации.

Заключение. Оценивая работу Казаринова Н.А., можно отметить, что диссертация представляет собой хорошо структурированную работу, в которой четко сформулированы основные цели исследования и выносимые на защиту положения, а также подробно изложены решения поставленных задач. Результаты работы были опубликованы в научных журналах, а также представлены на различных конференциях и семинарах, что подтверждает научную значимость и актуальность темы исследования. Автором получены важные с практической точки зрения научные результаты, обладающие научной новизной и имеющие прикладное применение для расчетов прочностных характеристик материалов при динамических и статических воздействиях.

Автор демонстрирует высокий уровень квалификации и уверенное владение современными методами механики деформируемого твердого тела.

Заключение ведущей организации федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС) на диссертационную работу Казаринова Никиты Андреевича «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения» по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела является положительным.

Диссертация Казаринова Никиты Андреевича на тему «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», а соискатель Казаринов Никита Андреевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по

специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Диссертация Казаринова Никиты Андреевича «Пространственно-временная дискретность и эффекты динамического разрушения» обсуждена на расширенном заседании кафедры «Механика и прочность материалов и конструкций» ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (протокол № 2 от 02.10.2024 г.). На заседании присутствовало 15 человек. Результаты голосования: «за» – 15 чел., «против» – нет, «воздержались» – нет.

Отзыв подготовлен доктором технических наук, профессором Смирновым Владимиром Игоревичем, научная специальность 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела.

Заведующий кафедрой
«Механика и прочность
материалов и конструкций»
ФГБОУ ВО ПГУПС
к.т.н., доцент



Видюшенков Сергей Александрович

Профессор кафедры
«Механика и прочность
материалов и конструкций»
ФГБОУ ВО ПГУПС
д.т.н.



Смирнов Владимир Игоревич