

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета Волкова Александра Евгеньевича 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.

Актуальность. Диссертация посвящена разработке методов решения задач о разрушении образцов под действием динамических воздействий. Подобные задачи неизменно привлекают большое внимание исследователей и являются особенно актуальными в настоящее время в связи с необходимостью предсказывать разрушение материалов при ударных воздействиях в ходе дробления горных пород, пробивания преград ударником, краш-тестов, столкновения стенок космических аппаратов с микрометеоритами.

Практическое значение. Результаты работы включают создание методов расчета прочности и разрушения материалов, используемых в системах защиты от ударных воздействий, а также выяснения оптимальных режимов воздействий для создания и продвижения трещины, например, в горных породах при разработке полезных ископаемых или при дроблении добытой породы. Разработанные расчетные схемы, основанные на коммерческих пакетах ANSYS и LSDYNA пригодны для их внедрения в инженерную практику.

Фундаментально-научное значение. Диссертация является значительным шагом вперед в понимании природы особенностей разрушения при динамических воздействиях, выявляет роль инерции в формировании временных зависимостей прочности, устанавливает взаимосвязь между разрушением в дискретных и непрерывных системах, показывает необходимость использования структурно-временного подхода, учитывающего как пространственную, так и временную нелокальность разрушения и установления связи параметров этого критерия со структурой материала.

Достоверность результатов обусловлена тщательным анализом особенностей динамического разрушения, использованием современного математического аппарата и конечно-элементного программного обеспечения, аккуратностью выполнения аналитических расчетов, соответствием результатов расчетов в рамках диссертации данным, полученными другими исследователями, как в экспериментах, так и в модельных расчетах.

Автором проделан большой объем работы, выполнены трудоемкие аналитические выкладки и численные расчеты. Среди **наиболее важных результатов** следует выделить следующие.

1. На простых моделях, таких как пружинный осциллятор или цепочка осцилляторов продемонстрировано, что среди принципов, определяющих временные характеристики прочности лежат такие фундаментальные характеристики, как инерция и жесткость взаимодействия элементарных объемов среды. Важный фактор скоростных (временных)

РК № 33-06-1194 от 09.12.2024

зависимостей – инерция. В конечном итоге и деформация, и разрушение происходят путем движения вещества, из которого изготовлены тело или конструкция. В диссертации показано, что в модели осцилляторов их параметры – масса, жесткость и предельная деформация – связаны с параметрами материала – упругими константами, статической прочностью и инкубационным временем. Совершенствование осцилляторных моделей может служить хорошей иллюстрацией механизмов разрушения и альтернативным методом расчета динамического разрушения.

2. Среди важных достижений следует отметить получение аналитического решения задачи о колебаниях цепочки линейных осцилляторов. Данное решение позволяет прогнозировать разрушение для различных воздействий на цепочку, в частности, разрушение статически растянутой цепочки при мгновенном снятии нагрузки. Очевидно, это связано с перераспределением в процессе колебаний энергии, запасенной при статическом нагружении. Подчеркнуто, что такой эффект отсутствует в континуальной модели. Поскольку в реальных структурах всегда имеется дискретность, то можно говорить об ограниченности применения континуального подхода. Дискретный же подход может позволить рассмотреть разрушение в дискретных средах.

Введя минимальное расстояние продвижения трещины, **автор реализовал эффективный метод рассмотрения процесса разрушения на конкретном масштабном уровне.**

3. Сделан большой шаг в плане адаптации конечно-элементных пакетов LS-DYNA и ANSYS для расчета разрушения с применением структурно-временного критерия разрушения, нелокального как по пространству, так и по времени. Для этого созданы специальные программные модули. Создан модуль вычисления коэффициента интенсивности напряжений методом виртуального продвижения трещины. Предложен оригинальный метод анализа фрагментации на основе теории графов. Созданы и реализованы алгоритмы преобразования и удаления конечных элементов при их разрушении в процессе продвижения трещины.

Разработана более точная, по сравнению с используемой в ANSYS, процедура расчета J-интеграла.

4. Предложен подход численного решения задач с произвольной траекторией распространения трещин. Выполнен расчет фрагментации при столкновении тел при помощи специальной расчетной схемы для анализа динамического распространения трещин.

Получена зависимость остаточной скорости ударника от начальной скорости, а также пороговые значения скорости снаряда (баллистический предел) "

5. Создан расчетный модуль на основе искусственных нейронных сетей, который позволил прогнозировать разрушение быстрее, чем с помощью конечно-элементных программ, и также в случаях, когда эти программы не могут получить результат ввиду проблем со сходимостью. Исследована работоспособность различных архитектур нейронных сетей, показано, что постановка задачи может сильно влиять на их выбор.

6. Предложена форма образцов для экспериментального изучения эффекта вторичного разрушения в образцах с периодической структурой.

Диссертация написана ясным языком, вывод формул описан достаточно подробно, графики и таблицы понятны и достаточно полно отражают результаты вычислений и экспериментов. Введение дает достаточное представление о результатах проделанной работы и их новизне.

Апробация. Работа доложена на ряде ведущих научных российских и международных конференций. Ее результаты опубликованы в ряде ведущих журналов, рекомендованных ВАК.

Работа не имеет существенных недостатков. Все замечания носят характер пожеланий или касаются отдельных неточностей в формулировках или опечаток.

Замечания.

1. Используя структурно-временной критерий, автор реализовал эффективный метод рассмотрения процесса разрушения на конкретном масштабном уровне. **Было бы интересно сравнить результаты расчетов продвижения трещины на разных масштабных уровнях.**
2. Во введении (с.19), а затем на с.96 автор пишет, что границы зерен, дислокации и дефекты, влияют на зарождение и распространение трещин. Включив пространственно-временную дискретность в модели, можно лучше уловить влияние микроструктурных особенностей на распространение трещин и более точно предсказать модели разрушения в реальных материалах.
Однако, как, включив такую дискретность, учесть влияние границ зерен и других дефектов в диссертации не показано.
3. Недостаточно показаны ограничения расчетов с помощью нейронных сетей. Не указаны условия, при которых нейронные сети могут дать сильно неверный результат.
4. При описании фрагментации учитывается ли энергия образующейся свободной поверхности, если да, то как? Хотелось бы увидеть комментарии по форме распределения фрагментов по размерам.
5. На рис.1.2 и подобных рисунках логичнее строить график $t^*(T)$, а не наоборот, так как мы задаем длительность импульса, а она определяет время до разрушения.
6. Неясно, как в формулу (2.15) был введен параметр a и каков его смысл. Далее говорится, что этот параметр снижает жесткость, но, по-видимому, не везде, так как тогда можно было бы просто использовать другое значение жесткости. **Таким образом, стоило бы подробнее раскрыть смысл этого параметра, если таковой имеется.**
7. С.83. "Отметим, что точки, соответствующие низким временам разрушения (и, соответственно, высоким амплитудам нагрузки) хорошо описываются моделью осциллятора, однако наблюдаются расхождения для значений P_m , которые близки к нижней границе рассматриваемого диапазона ". **Но из графика видно, что хорошо описываются только две-три точки.**
8. Учитывается ли энергия образующейся свободной поверхности, если да, то как?

9. На с.95 автор высказывает скепсис в отношении разработанных осцилляторных моделей: "Однако здесь стоит отметить, что продемонстрированные примеры применения модели осциллятора служат в основном демонстрационным и образовательным целям, поскольку успех моделирования, основанного на описанном подходе, может быть чистым совпадением". Однако, этот скепсис не совсем оправдан, так как успех моделирования уже не может быть чистым совпадением, поскольку он учитывает наиболее существенную причину специфики динамического разрушения – инерцию. Выбор нужного количества параметров модели и подбор их значений может дать удобное и, вместе с тем, достаточно простое описание явлений динамического разрушения. Стоит отметить, что автор на с.96 частично высказывает похожие соображения в пользу дискретных моделей.
10. Имеются отдельные неточности, среди которых можно отметить следующие.
- С. 53. "с1 и с2 – скорости упругих волн". Стоит сразу указать, каких волн, не считая это очевидным или указывая это много позже в таблице 1.1.
 - С.78. Формула (2.17) написана слишком мелким шрифтом. По всей видимости в ней опечатка: вместо $\sigma_{yy}^{[4]}$ должно быть $\sigma_{yy}^{[1]}$. Если этот индекс написан правильно, то почему применено такое обозначение.
 - На с.85. нужно: "рис.2.6b" вместо 7b.
 - С.103. "Введем обобщенные координаты q_1, q_2 , описывающие смещения масс от положения равновесия при отсутствии нагрузки". Нелогичность обозначений: только что на этой же странице буквой q обозначалась безразмерная координата.
 - С.106. Нужно было добавить пояснение, что поскольку равенство (3.19) точно невыполнимо, то в работе ищется момент времени для его приближенного выполнения.
 - С.122. 1) Рис.3.4. "(с) – элемент сетки конечных элементов" – смысл не понятен;
2) красная линия не показана.
 - С.128. "Рис. 4.1. Траектория трещины ". На рисунке траектория трещины не показана.
 - С.131. " $U_2 (X=\Gamma_1, t) = vt$, v – скорость приложения нагрузки". Здесь две неточности, нужно было записать что $X \in \Gamma_1$, а v – скорость перемещения поверхности трещины;
в подписи к рис.4.3 нужно было словами объяснить обозначения $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3$.
 - С.138. "Инкубационное время для Аралдита Б по-прежнему недоступно, и было использовано значение 1.1 мкс. ". Если это значение недоступно, то откуда такая точность?
 - С.139. "На рисунке 4.8а показаны результаты моделирования в виде дискретных данных – отдельным скоростям соответствуют «столбики» значений КИН (высота столбиков определяет разброс значений) ". **Нужно было подробнее объяснить, почему при моделировании получается разброс значений.**
 - С.162. На рис.5.3 конечно-элементная сетка не видна.

Сделанные замечания не затрагивают результатов диссертации по существу, но либо носят характер пожеланий, либо касаются отдельных неточностей. Они не изменяют общего положительного заключения по диссертации.

Диссертация Н.А. Казаринова является законченной научно-исследовательской работой, имеющей большое значение для развития механики разрушения при высокоэнергетических скоростных воздействиях и для разработки практических средств моделирования разрушения в таких условиях.

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», соискатель Казаринов Никита Андреевич заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела. Нарушения пунктов 9 и 11 указанного Порядка в диссертации не обнаружены.

Председатель диссертационного совета

доктор физ.-мат. наук, без звания
профессор кафедры теории упругости им.Н.Ф.Морозова
Санкт-Петербургского государственного университета



Волков А.Е.

Дата 09.12.2024