

На правах рукописи



Братов Владимир Андреевич

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКИ И РАЗРУШЕНИЯ

1.1.8 (ранее 01.02.04) – механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Научный консультант:

доктор физ.-мат. наук, профессор, чл.-корр. РАН

Петров Юрий Викторович

Санкт-Петербург

2022

Работа выполнена в «Лаборатории динамики экстремальных состояний и структурных превращений» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем машиноведения Российской академии наук.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
АХАТОВ Искандер Шаукатович
(Сколковский институт науки и технологий)

доктор физико-математических наук
ВОЛКОВ Иван Андреевич
(ВГОУ ВПО «Волжский государственный университет водного транспорта».)

доктор физико-математических наук
ТКАЧЕНКО Олег Павлович
(Вычислительный центр
Дальневосточного отделения
Российской академии наук ФГБУН
Хабаровский Федеральный
исследовательский центр ДВО РАН)

Ведущая организация: ФГБУН Физико-технический институт
имени А.Ф. Иоффе Российской
академии наук

Защита состоится «02» июня 2022 г. В 14.00 часов на заседании совета
Д002.075.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при
Федеральном государственном бюджетном учреждении науки
Институте проблем машиноведения Российской академии наук по
адресу:
199178, Санкт-Петербург, Большой пр. В.О., 61.

С диссертацией можно ознакомиться в ОНТИ ФГБУН Института
проблем машиноведения Российской академии наук.

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

ВРИО Ученого секретаря
диссертационного совета Д 002.075.1
доктор технических наук



Е.Б. Сedaкова

Общая характеристика диссертации

Актуальность и степень разработанности темы. Поведение материалов в условиях высокоинтенсивных воздействий (высокоскоростные динамические термомеханические воздействия, экстремальные давления, интенсивные пластические деформации и т.п.) значительно отличается от поведения того же материала в «стандартных» условиях с умеренными и медленно меняющимися нагрузками. Разрушение и деформация материалов и конструкций в условиях динамического (высокоскоростного, ударного, взрывного) нагружения значительно отличаются от аналогичных процессов, развивающихся под действием медленных квазистатических нагрузок. Понимание и моделирование взаимодействия волн, вызванных высокоскоростным динамическим воздействием с границами и интерфейсами, является сложной и не всегда интуитивно понятной задачей даже в случае относительно простых воздействий и самых простых геометрий среды, в которой распространяются волны. Так, в главе 1 показано, что даже решение простой квазистатической задачи об энергоемкости процесса инициирования наклонной трещины в бесконечной плоскости в условиях плоской деформации далеко не тривиально. В случае динамических задач, когда необходимо учитывать происходящие в теле волновые процессы, как и в случае сложных геометрий среды, задача становится гораздо более трудной для математического моделирования. Невозможно предсказывать деформацию и превращения, происходящие в материалах под действием интенсивных термомеханических нагрузок, экстремальных локализованных давлений и т.п., используя подходы, применяемые для описания деформации, разрушения и превращений в статически нагружаемых конструкциях. В этой связи особый интерес представляют работы Ю.В. Петрова, Н.Ф. Морозова, В.З. Партона, О.Б. Наймарка, Г.И. Канеля, Р.В. Гольдштейна, В.Е. Фортова, Н.А. Златина, А.М. Брагова, D.A. Shockey, J.F. Kalthoff, A. Rosakes, L.B. Freund, K.B. Broberg, J. Finberg, J.W. Dally, A.S. Kobayashi, B.L. Karihaloo, S.N. Atluri.

Современное развитие промышленных технологий требует все более и более точного анализа поведения и прочности материалов в условиях нестационарных высокоинтенсивных воздействий, глубокого понимания принципов распространения, превращения и аккумуляции упругой энергии в средах различной реологии,

способности предсказывать деформацию и микроструктурные превращения в металлах, подвергаемых интенсивным пластическим деформациям и высокоскоростному ударному нагружению. При этом существующие методы и подходы далеко не всегда способны правильно учитывать влияние высокой концентрации энергии на структурные превращения в материалах.

Первые систематические экспериментальные исследования динамики разрушения и структурных превращений датируются началом и серединой XX века (работы J. Hopkinson, H. Wallner, H. Schardin, A.A. Wells и других авторов). В последнее время появляется все большее и большее количество новых качественных исследований в этой области (см. напр., Ravi-Chandar and Knauss, Rosakes and Zender, Dally and Shukla, Kalthoff, Fineberg and Bouchbinder, Iqbal). К сожалению, в настоящее время отсутствуют общепринятый подход в моделировании динамики разрушения и прочих структурных превращений в твердых телах под действием быстрых воздействий ударной и взрывной природы. Известные подходы (см. напр., Anderson, Khan and Huang, Broberg), как правило, обладают значительными недостатками, что делает их неприменимыми для анализа реальных динамических процессов. Это связано как с крайне узкой областью применимости (см. напр., работы Rosakes and Zehnder), так и с большим количеством параметров, которые необходимо идентифицировать для использования модели. При этом зачастую у данных параметров отсутствует понятный физический смысл и способ определения (см. напр., Freund). Указанных недостатков лишен подход, основанный на введенном Ю.В. Петровым понятии инкубационного времени, позволяющий строить различные критериальные соотношения для процессов разрушения (Ю.В. Петров, Н.Ф. Морозов), необратимого деформирования (А.А. Груздков, Ю.В. Петров) и структурных превращений (Г.А. Волков, Ю.В. Петров) в сплошных средах. В большом количестве работ показана применимость этого подхода для описания разрушения и других структурных превращений для широчайшего класса различных задач (см. напр., работы B.L. Karihaloo, Z.-C. Ou, L.-Y. Chi, X. Xu, A.A. Korobkin, Y. Kim, G. Mishuris, K. Osnis, Н.А. Казаринова, А.М. Брагова, Н.С. Селютиной и др.). Кроме того, для предсказания динамики хрупкого разрушения данный подход требует определения всего одного дополнительного прочностного параметра, характеризующего отклик материала на скорость изменения нагрузки. Подход инкубационного времени в динамике хрупкого разрушения является основой для большинства результатов, представленных в данной работе.

В работе представлены результаты исследований, связанных с поведением материалов и конструкций, при нагружении высокоинтенсивными воздействиями, связанными с крайне высокой локальной концентрацией энергии и с крайне высокими скоростями изменения локальной концентрации плотности энергии. Изучаются вопросы, связанные с энергоэффективностью различных процессов, связанных с фазовыми превращениями в материале (разрушение, изменение дефектной структуры металлов).

Цель работы состоит в развитии аналитических и численных подходов для предсказания волновых процессов и разрушения в твердых телах под действием стационарных и нестационарных нагрузок. Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**:

- Разработка методов оценки энергоемкости и энергоэффективности процессов ведущих к разрушению в квазихрупких средах с имеющимися дефектами в квазистатической и динамической постановке.
- Развитие численных методов на основе метода конечных элементов путем внедрения новых критериев структурных превращений, применимых для случаев, когда невозможно применение стандартных известных подходов.
- Демонстрация эффективности предлагаемых подходов посредством решения задач, исследование которых представляет самостоятельный интерес.

Методы исследования. Основным методом, применяемым для решения задач статической и динамической теории упругости в рамках данной работы, является метод конечных элементов, используемый для решения соответствующих дифференциальных уравнений. Большинство задач решается в линейной постановке. Ряд задач, например, статическая задача о разрушении в окрестности наклонной трещины под действием сжимающей и сдвиговой нагрузок (глава 1) или динамическая задача о действии сосредоточенной силы на границе упругого полупространства (задача Лэмба, используемая в главе 3) допускают аналитическое решение. Такие решения представляют возможности для детального качественного и количественного анализа получаемых результатов и могут использоваться в качестве модельных при верификации используемых численных схем.

Решение большинства представленных задач связано с использованием критерия разрушения для предсказания условий инициирования и распространения разрушения в твердых телах. Для оценки условий возникновения разрушения в квазистатических задачах используется критерий разрушения Нейбера-Новожилова. В случае динамических задач с нестационарными ударными и взрывными нагрузками используется критерий разрушения Ю.В. Петрова и Н.Ф. Морозова на основе понятия инкубационного времени структурного превращения, подробно обсуждаемый ниже в данной работе.

Теоретическая и практическая значимость диссертации. Работа имеет теоретический характер. Развиваемые подходы могут послужить для оценки прочности и несущей способности материалов и конструкций при динамических ударных и взрывных воздействиях. С использованием подхода, развиваемого в главах 1 и 2, возможно производить оценку оптимальных энергосберегающих параметров работы промышленных машин, работающих на разрушение (измельчение и переработка) различных квазихрупких материалов. В частности, на основе получаемых результатов возможно предсказание оптимальных длительностей и амплитуд нагрузок на основе анализа микроструктуры разрушаемых материалов. Подход, развиваемый в главе 3, позволяет оптимизировать геометрию и материалы, используемые при возведении сооружений для защиты от волн сейсмической природы, для максимизации защитных функций. Подход, развиваемый в главе 4, позволяет создать новые универсальные численные схемы, корректно предсказывающие инициирование, распространение и остановку динамических трещин в твердых телах. Подход, развиваемый в главе 5, позволяет создать новые универсальные численные схемы, корректно предсказывающие эволюцию хрупкого разрушения в твердых телах при высокоскоростном контактом взаимодействии.

Достоверность полученных результатов достигается за счет строгой математической постановки задач, применения математически обоснованных методов решения и сравнения численных решений с результатами точных аналитических решений для случаев, допускающих получение аналитических решений в явном виде.

Научную новизну составляют следующие **результаты, выносимые на защиту**:

1. Впервые решена задача об энергии критического состояния, ведущего к разрушению, в задаче 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 в вершине имеющейся трещины по сравнению с чисто сжимающей нагрузкой. Полученный теоретически в рамках данной работы эффект значительного уменьшения энергозатрат, совпадает с эффектом ранее обнаруженным экспериментально.

2. Впервые исследованы оптимальные энергосберегающие характеристики динамических воздействий на твердое квазихрупкое тело с имеющимися дефектами для распространения (разрушения) имеющихся дефектов. Показано, что возможно определять оптимальные энергосберегающие характеристики разрушающих воздействий на основе параметров разрушаемого материала и геометрических свойств дефектов, преобладающих в разрушаемом теле.
3. Разлит подход для предсказания оптимальных характеристик защитных сейсмических барьеров с интегрированными метаструктурами. На основе аналитических моделей произведена верификация разработанных численных решений. Получены зависимости влияния материалов и геометрии защитных барьеров и интегрированных метаструктур на способность защитных сооружений ослаблять действие распространяющихся волн сейсмической природы.
4. Разлит подход для численного моделирования инициирования, распространения и остановки динамических трещин в твердых телах. В сравнении с экспериментальными результатами показано, что с использованием данного подхода возможно корректное предсказание динамики трещин в широком диапазоне практических задач динамики разрушения.
5. Разлит подход для численного моделирования разрушения в изначально бездефектных твердых телах при высокоскоростном контактном взаимодействии. В сравнении с различными экспериментальными результатами показано, что с использованием данного подхода возможно корректное моделирование эволюции разрушения в квазихрупких изначально бездефектных телах под действием высокоскоростных ударов со стороны других объектов.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, представлялись на большом количестве международных и российских научных симпозиумов. В частности, на ежегодных летних конференциях “Актуальные проблемы механики» (С.-Петербург, 2003, 2004, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021), международных европейских конференциях по разрушению (ECF-15, Стокгольм, Швеция, 2004, ECF-17, Брно, Чехия, 2008, ECF-19, 2012, Казань, Россия), Международных конференциях по разрушению (ICF-12, Оттава, Канада, 2012), Всероссийских съездах по механике (Нижний Новгород, 2006 и 2011, Казань, 2015, Уфа 2019) и многих других.

Результаты диссертации представлялись на семинаре Института механики МГУ (руководитель семинара академик РАН И.Г. Горячева); семинаре чл.-корр. РАН Ю.В. Петрова; семинаре академика Н.Ф. Морозова; семинаре высшей школы теоретической механики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (руководитель семинара чл.-корр. РАН А.М. Кривцов).

Большая часть работы выполнена при поддержке грантов российского научного фонда (20-11-20133, 20-49-08002) и российского фонда фундаментальных исследований (19-51-45016, 18-58-41001, 17-01-00618, 16-51-45063, 15-01-05903, 14-01-00814, 13-01-00598, 12-01-33049, 12-01-31224).

Публикации по теме диссертации, полнота изложения материала. Результаты диссертации опубликованы в полном объеме в 39 работах (из них 4 – без соавторов), включая одну монографию, в изданиях рекомендованных ВАК России и/или входящих в международные базы цитирования Web of Science или Scopus. Список работ приведен в конце автореферата.

Личное участие автора. В большинстве работ, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит частичная постановка задач, разработка всех численных схем, численных алгоритмов и решение задач. Концептуальная постановка, анализ и обсуждение результатов проводились совместно с соавторами.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 301 странице и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка

использованной литературы. Диссертация содержит 74 рисунка. Библиография включает 287 наименований.

Краткое содержание диссертации

Во введении обосновываются актуальность, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приводится краткое описание используемых методов.

В главе 1 и главе 2 исследуются задачи, связанные с минимизацией энергозатрат на разрушение. Возможность оптимизации энергозатрат на разрушение материалов представляет большой интерес с точки зрения многих приложений. Важнейшее значение энергозатраты процесса разрушения при воздействии как медленными квазистатическими, так и импульсными динамическими нагрузками приобретают в таких областях как, например, ударный, взрывной, гидравлический, электроимпульсный и другие способы ведения горных работ, бурение, процессы измельчения и пр. В этих случаях энергозатраты составляют значительную, если не наибольшую, часть производственных затрат. Если учесть, что КПД таких процессов обычно не превышает нескольких процентов, важность оптимизации энергозатрат на разрушение становится очевидной.

В главе 1 исследуется задача об энергоемкости инициирования малой наклонной трещины в плоскости в условиях медленных квазистатически меняющихся нагрузок. Задача решается в условиях плоской деформации. Задача решается аналитически. Исследуется плотность энергии, которую необходимо сообщить плоскости для инициирования имеющейся трещины при различных видах нагрузки, приложенной на бесконечности. Решение данной задачи получено впервые и представляет значительный интерес для процессов, связанных с измельчением и фрагментацией квазихрупких гетерогенных сред с существующими дефектами (трещинами). Такие процессы, в частности, соответствуют промышленным процессам, связанным с переработкой полезных ископаемых и горных пород, при которых важнейшим этапом является постепенное измельчение добытой породы с поэтапным разделением на фракции. При этом, такие процессы отличаются крайне высокой энергоемкостью и даже относительно небольшое уменьшение энергозатрат на распространение имеющихся в материале дефектов оборачивается значительным экономическим эффектом. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования оптимальных параметров энергосбережения промышленных машин, работающих при измельчении и фрагментации квазихрупких материалов.

В параграфе 1.1 приводится обзор литературы по экспериментальному исследованию энергоемкости процессов дробления и измельчения квазихрупких гетерогенных материалов и по теоретическому исследованию критериев и условий инициирования трещин в условиях сложного напряженного состояния.

В параграфе 1.2 приводится постановка задачи. В рамках линейной механики разрушения решается задача о наклонной трещине в плоскости, нагруженной на бесконечности сочетанием сжимающей и сдвиговой нагрузки.

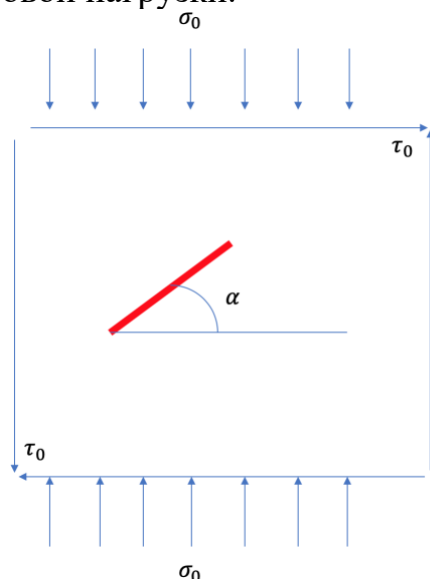


Рис. 1 Наклонная трещина в плоскости, нагруженная сочетанием сжимающей и сдвигающей нагрузки, приложенной на бесконечности.

Далее, в параграфе 1.3, приводится аналитическое решение для напряжений в окрестности вершин трещины для ортогональной и полярной систем координат, а также для коэффициентов интенсивности напряжений для первой K_I и второй K_{II} моды, возникающих в вершинах трещины. Далее, необходимо выбрать критерий разрушения, применимый для анализа условий инициирования трещины в решаемой задаче. В параграфе 1.4 обсуждаются различные подходы для определения критических условий инициирования трещины в условиях сложного напряженного состояния и выбирается условие инициирования трещины в виде критерия Нейбера-Новожилова. Эквивалентное напряжение для поля напряжений в окрестности вершины трещины в решаемой задаче получено как:

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{1}{d} \int_0^d \sigma_\theta(r) dr = \sqrt{\frac{2}{\pi d}} \cos \frac{\theta}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta \right] + \sigma_n \sin^2 \theta. \quad (1)$$

В соответствии с подходом Нейбера-Новожилова, разрушению соответствуют ситуации, когда $\bar{\sigma}_\theta \geq \sigma_c$, где σ_c - критическое напряжение растяжения (предельное напряжение), характерное для разрушенного материала при нагружении образца без макроскопических дефектов.

В параграфе 1.5 с целью возможного сравнения с экспериментальными измерениями проводится анализ направления, в котором следует ожидать инициирования разрушения. Направление распространения трещины можно найти как направление, для которого выполняется условие разрушения для наименьшей возможной амплитуды разрушающей нагрузки: $\frac{\partial \bar{\sigma}_\theta}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial^2 \bar{\sigma}_\theta}{\partial \theta^2} < 0$. Такого рода условие для определения направления распространения трещины было получено в работе Петрова и Поникарова¹. Подставляя (1):

$$\frac{\partial \bar{\sigma}_\theta}{\partial \theta} = K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1) - \frac{8\sigma_n}{3} \sqrt{2\pi d} \cos \theta_0 \sin \frac{\theta_0}{2} = 0, \quad (2)$$

где θ_0 задаст направление прогнозируемого распространения трещины. На основе полученных формул, строятся зависимости направления распространения разрушения от начального угла наклона трещины для различных сочетаний сжимающей и сдвиговой нагрузки, приложенных на бесконечности.

В параграфе 1.6 вычисляется удельная энергия, которую необходимо сообщить плоскости, для инициирования имеющейся наклонной трещины для различных комбинаций приложенной сжимающей и сдвиговой нагрузки. Приводятся зависимости удельной энергоёмкости разрушения от угла начального наклона трещины. Вычисляется минимально возможная (для угла наклона трещины, сообщающего минимум удельной энергоёмкости) удельная энергия, необходимая для инициирования разрушения в зависимости от отношения интенсивностей приложенных сдвиговой и сжимающей нагрузок. Также вычисляется удельная энергия, которую необходимо передать плоскости для инициирования разрушения в 30% существующий трещин (в предположении равномерного распределения ориентаций существующих трещин).

¹ Ю.В. Петров, Н.В. Поникаров О направлении роста трещины в ортотропном материале//МТТ, №4:180-184, 1998

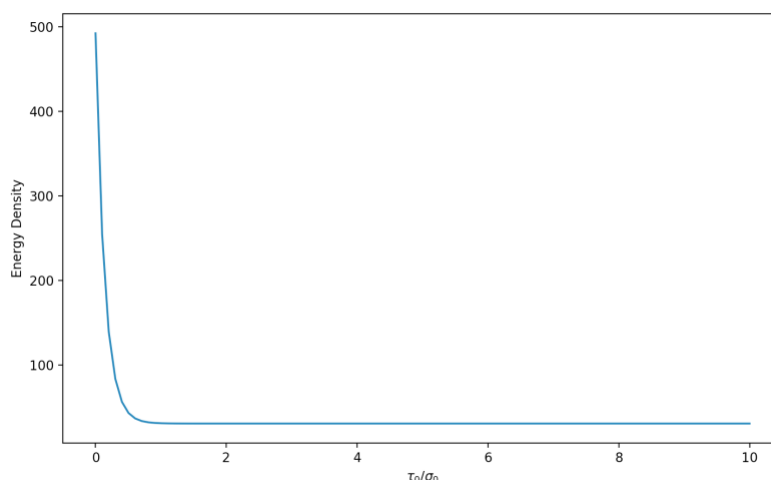


Рис. 2. Удельная энергия, необходимая для инициирования разрушения в вершинах 30% существующих трещин (предполагая равномерное распределение ориентаций существующих трещин) как функция отношения τ_0/σ_0 .

В параграфе 1.7 проводится обсуждение полученных результатов и их сравнение с известными экспериментальными измерениями. Как видно из рисунка 2, попытка инициировать разрушение в вершине существующей трещины с использованием чисто сжимающей нагрузки является наименее энергетически выгодной из всех рассмотренных возможностей нагружения. Добавление сдвигающего компонента к приложенной нагрузке приводит к значительному снижению энергии, необходимой для инициирования разрушения в вершине существующей трещины. Для отношения $\tau_0/\sigma_0 \approx 1$ (амплитуда сжимающей и сдвигающей нагрузок примерно равны) требуемая энергия снижается почти в 6 раз. Дальнейшее увеличение амплитуды сдвигающей нагрузки не приводит к значительному снижению минимальной энергии, необходимой для создания разрушения в вершине имеющейся трещины. Такие выводы совпадают с известными экспериментальными измерениями (Л.А. Вайсберг), в которых показано, что добавление сдвига к сжимающей нагрузке значительно уменьшает энергоемкость процесса дробления горных пород.

В главе 2 исследуется аналогичная задача в динамической постановке — исследуются энергозатраты на инициирование имеющейся в полуплоскости трещины при воздействии динамическими импульсными нагрузками различной амплитуды и длительности. Исследованы как случай нагрузки, приложенной на бесконечности, так и случай, когда нагрузка приложена на берегах имеющейся трещины. Показано, что минимуму энергозатрат на разрушение соответствует строго определенная комбинация

амплитуды и длительности прикладываемой нагрузки. Полученные зависимости минимизирующих энергозатраты характеристик воздействия от длины трещины позволяют предсказывать минимизирующие характеристики разрушающих воздействий исследованием преобладающего размера трещин в разрушаемых материалах, что позволяет предсказывать оптимальные энергосберегающие режимы работы промышленного оборудования, измельчающего квазихрупкие гетерогенные материалы (в частности, горные породы).

В параграфе 2.1 приводится обзор литературы по критериям динамического разрушения и обсуждается постановка задачи об энергоемкости разрушения при динамическом нагружении.

В параграфах 2.2 и 2.3 обсуждаются критерии разрушения, применимые для динамически нагружаемых квазихрупких гетерогенных материалов, и вводится критерий разрушения, базирующийся на понятии инкубационного времени хрупкого разрушения^{2,3,4}:

$$\frac{1}{\tau} \frac{1}{d} \int_{x-d}^x \int_{t-\tau}^t \sigma(x', t') dx' dt' \geq \sigma_c, \quad (3)$$

где τ - инкубационное время разрушения – параметр, характеризующий отклик разрушаемого материала на динамически прикладываемые нагрузки (т.е. τ является константой для выбранного материала и не зависит от геометрии образца, способа приложения нагрузки, временной формы и амплитуды импульса воздействия). d имеет смысл характерного размера разрушения и зависит от выбранного материала и масштабного уровня, на котором проводится эксперимент. σ - напряжение в точке, меняющееся во времени. σ_c - его критическое значение в условиях статики, характерное для исследуемого материала и выбранного масштабного уровня. x' и t' - локальные координата и время.

Рассматривается применение критерия (3) для совместного использования с методом конечных элементов. Обсуждаются требования к конечноэлементной дискретизации, шагу интегрирования по времени в динамических задачах, контролю выполнения условия разрушения (3) а также изменения геометрии

² Y.V. Petrov, A.A. Utkin Sov Material Science. 1989, V 25, N 2, P.153-156 /Presented on the 1st All-Union Conference on Fracture Mechanics of Materials, Lvov, Oct 20-22, 1987/

³ Ю.В. Петров. Докл. АН СССР Т.321, N1, С.66-68

⁴ Y.Petrov, N.Morozov. ASME J Appl Mech, On the Modelling of Fracture. 1994, V61 710-712

(образование новой поверхности) при выполнении условия (3) в какой-либо точке тела.

В параграфах 2.5, 2.6 и 2.7 с помощью метода конечных элементов с внедренным критерием разрушения в виде (3) исследуются энергозатраты на инициирование центральной трещины, динамически нагружаемой по первой моде. В параграфе 2.7 рассматривается случай нагружения волной, пришедшей из бесконечности (такой задаче соответствует нагружение на поверхности разрушаемого тела, в точках достаточно удаленных от трещины). Задача решается для бесконечной полосы в линейно-упругой постановке (рисунок 3). Нагрузка задается прямоугольным импульсом давления:

$$\sigma_y|_{\infty} = P (H(0) - H(T)), \quad (4)$$

характеризующихся амплитудой P и длительностью T .

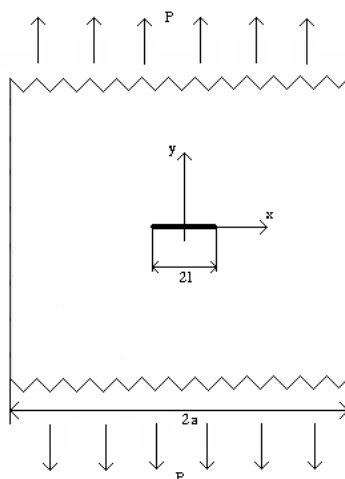


Рис. 3. Бесконечная полоса с центральной трещиной.

Задача решается численно с использованием метода конечных элементов (пакет ANSYS), решающего задачу по нахождению динамически меняющихся полей, возникающих вблизи вершин трещины при взаимодействии с набегающей волной. Моделирование проводится для материала со свойствами гранита ($E=96.5$ ГПа, $\rho=2890$ м/с, $\nu=0.29$, где E - модуль упругости, ρ - плотность, ν - коэффициент Пуассона), однако полученные результаты качественно применимы для достаточно широкого круга материалов. В результате решения динамической задачи о взаимодействии набегающей волны с трещиной получается временная зависимость коэффициента интенсивности напряжений в вершинах трещины. Типичная получаемая зависимость представлена на рисунке 4.

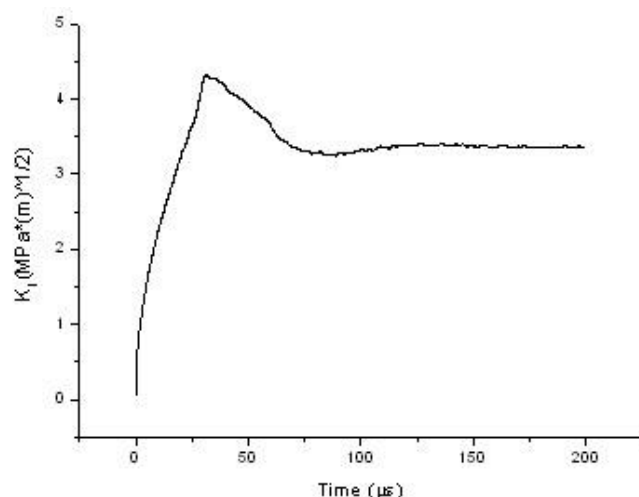


Рис. 4. Типичная зависимость K_I от времени

Далее с использованием критерия разрушения инкубационного времени (3) выясним, какие из всех возможных импульсов вида (4) будут вызывать разрушение в вершине трещины, а какие нет. После этого с использованием аналитического решения возможно оценить величину энергии, которую необходимо сообщить нагружаемой полосе для создания импульсов вида (4), способных вызвать разрушение в вершине имеющийся трещины. На рисунке 5 представлена огибающая множества возможных разрушающих значений энергии, которую необходимо передать полосе для создания разрушения в вершине трещины. Как видно из представленного рисунка, данная энергия минимальна для определенной длительности воздействия T , значительно увеличиваясь для воздействий с длительностями, отличными от оптимальной.

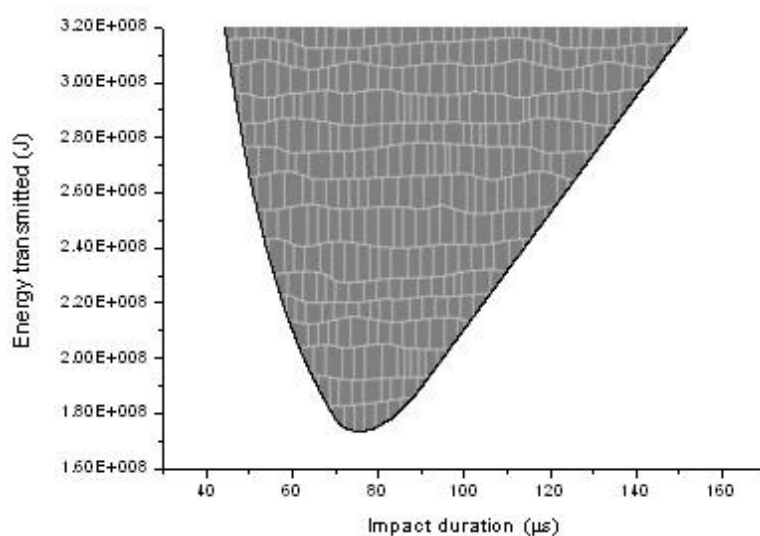


Рис. 5. Огибающая множества возможных разрушающих значений энергии, переданной образцу нагружающим устройством

В параграфе 2.7 рассматривается аналогичная задача для случая, когда нагрузка задается давлением, приложенным непосредственно на берегах имеющейся трещины. Такой тип нагружения характерен, например, для гидравлического способа разрушения горных пород. Задача решается численно, аналогично предыдущему случаю. Отличие состоит в том, что в случае нагрузки, приложенной непосредственно на берегах разреза, нет возможности точной аналитической оценки энергии, которую необходимо передать телу для создания разрушающего воздействия. Оценка этой энергии производится численно. В результате строятся зависимости минимальных возможных разрушающих энергий для различных длительностей и амплитуд нагрузки, приложенной на берегах трещины. Оказывается, что как и в случае нагрузки, приложенной на бесконечности, минимально возможная разрушающая энергия достигается при вполне определенной комбинации длительности и амплитуды воздействия и значительно возрастает при удалении параметров воздействия от оптимальных.

Производится анализ зависимостей оптимальных энергосберегающих параметров нагружающих воздействий (оптимальных длительности и амплитуды) от длины имеющейся трещины и свойств разрушаемого материала. На рисунке 6 представлена полученная зависимость оптимальных энергосберегающих параметров разрушающих воздействий для различных длин имеющихся в материале трещин.

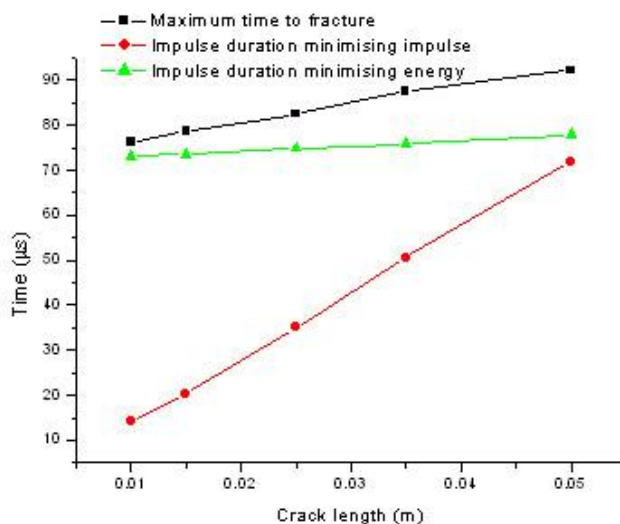


Рис. 6. Зависимость характеристик воздействий, минимизирующих энергию, затрачиваемую на продвижение трещины, от длины трещины.

Полученные результаты говорят о возможности минимизаций затрат на разрушение материалов с трещинами, таких

как, например, горные породы. Данные свидетельствуют о том, что энергозатраты на продвижение трещины существенно зависят от амплитуды и частоты прикладываемой нагрузки. Таким образом, на основе построенных зависимостей возможно предсказывать оптимальные энергосберегающие режимы работы промышленных машин, работающих на измельчение и дробление горных пород и других гетерогенных квазихрупких материалов.

В главе 3 исследуются задачи, связанные с распространением высокоэнергетических волн вблизи поверхности в твердых телах. В частности, изучаются возможные механизмы защиты от волн сейсмической природы при помощи сейсмических барьеров – включений вблизи поверхности, изготовленных из материалов со свойствами, сильно отличающимися от свойств среды, в которой распространяется возмущение. Оказывается, что используя защитные барьеры изготовленные из, например, бетона, для защиты от высокоэнергетических волн сейсмической природы, распространяющихся в грунте (в основном это относится к волнам Релея), возможно значительно (в несколько раз) уменьшить амплитуды перемещений и ускорений в защищаемой области. Кроме того, в главе 3 представлены исследования, связанные с распространением волн и концентрацией энергии в задачах о движущейся нагрузке на примере задачи о движении высокоскоростного железнодорожного состава.

В параграфе 3.1 приводится обзор литературы по точным аналитическим решениям задач распространения волн и обсуждаются вопросы возможности ослабления воздействия поверхностных высокоэнергетических волн при помощи сейсмических барьеров и сейсмических метаматериалов и метаструктур.

В параграфе 3.2 рассматриваются способы защиты от поверхностных и головных волн сейсмической природы при помощи сейсмических барьеров. Сейсмический барьер представляет собой структуру, заглубленную в грунт с целью защиты от распространяющихся высокоэнергетических волн сейсмической природы. На рисунке 7 представлены схемы типичных задач с вертикальными барьерами, уменьшающими амплитуды перемещений и ускорений в точках на поверхности после барьера.



Рис. 7. а) Внешняя и б) внутренняя задачи Лэмба с вертикальными барьерами.

Обсуждаются различные типы потенциально опасных волн сейсмической природы - волны Рэлея, волны Рэлея – Лэмба (волны, распространяющиеся в слоистом полупространстве), волны Лява, а также головные SP волны. Обсуждаются типичные для землетрясений характеристики распространяющихся волн и скорости их распространения. Далее ставится задача об исследовании защитных свойств вертикальных сейсмических барьеров (см. рис. 7), изготовленных из материалов со свойствами, которые возможно моделировать в рамках линейно-упругого поведения (например, бетон) в сравнении с барьерами, изготовленными из гранулированных метаматериалов (поведение которых может описываться с использованием уравнений состояния на основе модели Кулона-Мора). Кроме того, ставится задача определения оптимальной геометрической формы сейсмического барьера с целью обеспечения максимально возможных защитных свойств.

Задача взаимодействия набегающей волны с сейсмическим барьером решается численно с использованием метода конечных элементов. В случае отсутствия сейсмического барьера получаемое численное решение для перемещений и ускорений на поверхности полуплоскости сравнивается с доступным аналитическим решением (задача Лэмба). Хорошее совпадение результатов численного моделирования с аналитическими расчетами говорит о применимости разработанной численной модели. Исследуются барьеры, изготовленные из различных материалов (более жесткие и более мягкие по сравнению с материалом полуплоскости) и различной формы (например, рисунок 8).

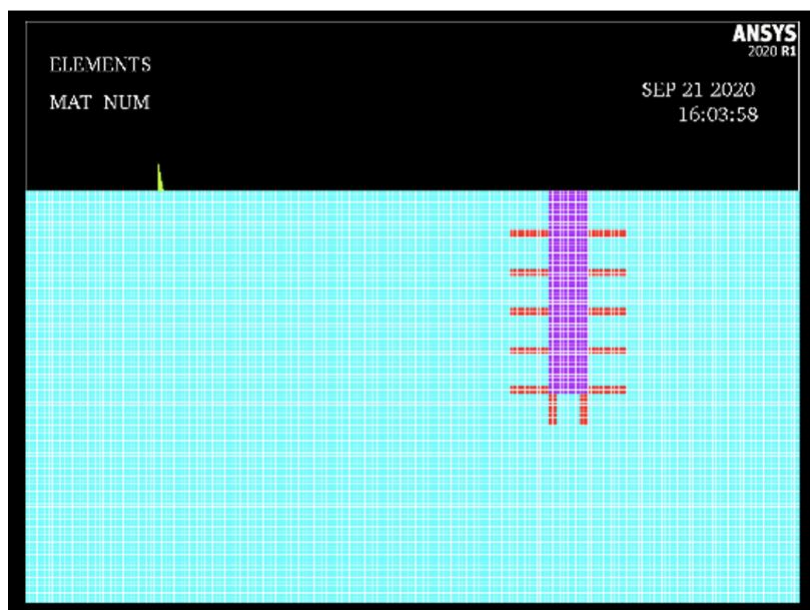


Рис. 8. Упругая полуплоскость с защитным барьером с метаструктурами

По результатам моделирования делается вывод о том, что выбор материала и формы сейсмического барьера значительно влияет на его защитные свойства. В некоторых случаях (при использовании гранулированных метаматериалов в качестве заполнителя барьера и при оптимальном выборе геометрии барьера) удастся более чем на порядок улучшить защитные свойства барьера (т.е. уменьшить амплитуды перемещений и ускорений за барьером) по сравнению с традиционно изучаемыми линейно-упругими барьерами простой прямоугольной формы. Кроме того, проведенные исследования указывают на существенное увеличение протяженности зоны тени. Такие результаты открывают перспективы применения метаструктурных сейсмических барьеров для защиты протяженных объектов, например, взлетных полос аэродромов, мостов, акведуков и т.п.

В параграфе 3.3 исследуется проблема аккумуляции энергии в задаче о движущейся нагрузке, вызванной высокоскоростным железнодорожным движением. Кроме задач сеймики, другой областью, для которой крайне важны решения динамических задач о распространении волн в средах со сложной геометрией, являются задачи высокоскоростного транспорта и, в частности, задача о движении высокоскоростного железнодорожного состава. Одна из основных проблем высокоскоростных железнодорожных перевозок связана с тем, что при высокой скорости движения состава, сопоставимой со скоростью распространения волн в грунте, на котором сооружена железнодорожная насыпь, энергия, передаваемая составом насыпи и грунту, не успевает покинуть область движения

состава, в результате чего происходит аккумуляция энергии в зоне движущегося состава. Такого рода эффекты, связанные со значительной локальной концентрацией энергии, могут вести к существенному увеличению расчетных амплитуд перемещений и ускорений в насыпи, что, в свою очередь, может вести к ускоренной деградации и даже внезапному существенному повреждению железнодорожного пути. В работе на основе разработанной численной модели (рисунок 9) анализируется квазистатическая и динамическая деформация железнодорожной насыпи и подлежащего грунта. Численное моделирование выполнено для геометрии железнодорожной насыпи, используемой в Российской Федерации. Условия нагружения соответствовали силам, создаваемым высокоскоростным поездом САПСАН (Siemens Velaro Rus) и французским составом TGV.

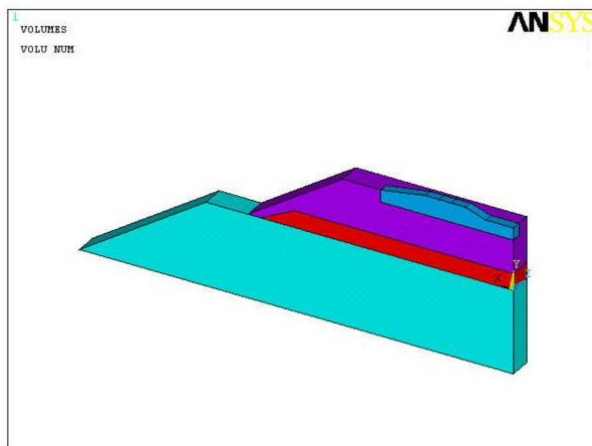


Рис. 9. Трехмерная конечноэлементная модель железнодорожной насыпи в среде ANSYS

В частности, с использованием разработанной модели получены максимальные перемещения, возникающие в железнодорожной насыпи в зависимости от скорости движения железнодорожного состава (рисунок 10).

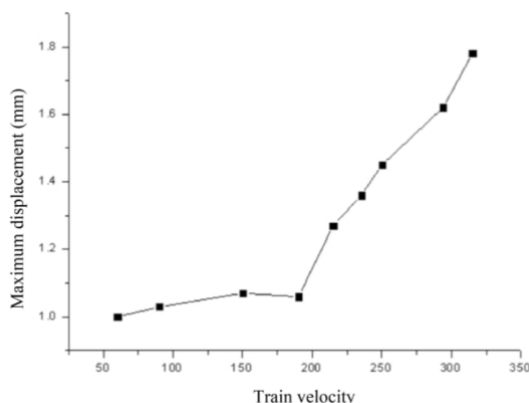


Рис. 10. Максимальное смещение, возникающее в насыпи как функция скорости поезда. Состав SAPSAN.

Основной особенностью примененного метода является показанная возможность использования упрощенного двумерного варианта для анализа сложной трехмерной задачи. Данный подход позволяет моделировать особенности динамического волнового поля на основе анализа динамики плоских сечений. По результатам исследования показано, что до скоростей движения составов порядка 180-190 километров в час (при условии идеального состояния подвижного состава) возникающие просадки мало отличаются от статических, соответствующих данному составу, движущемуся с малыми скоростями. В тех же условиях, при повышении скорости движения до 215 километров в час максимальные значения просадок увеличиваются на 27% по сравнению со статическими. При повышении скорости движения до 294 километров в час максимальные значения просадок увеличиваются на 62% по сравнению со статическими. Повышение скорости движения до 315 километров в час приводит к росту просадок, которые увеличиваются на 78% по сравнению со статическими (то есть смещения практически удваиваются).

В главе 4 с использованием критерия инкубационного времени, внедренного в численные схемы на основе метода конечных элементов, исследуются задачи, связанные с инициацией, распространением и остановкой имеющих макроскопических трещин в квазихрупких средах, нагружаемых динамическими ударными и взрывными нагрузками.

В параграфе 4.1 приводится обзор литературы по экспериментальному, теоретическому и численному исследованию динамики распространения трещин. Производится анализ известных теоретических подходов в моделировании распространения трещин. Дается обзор критерия разрушения на основе понятия инкубационного времени, введенного Ю.В. Петровым и Н.Ф. Морозовым. Показывается применимость данного подхода для предсказания инициирования трещин в случае динамического ударного и взрывного нагружения. Далее этот подход применяется для предсказания динамики распространения и остановки квазихрупких трещин.

В параграфе 4.2 представлены результаты моделирования динамики распространения и остановки трещин под действием высокоинтенсивной динамической ударной нагрузки. С использованием критерия инкубационного времени совместно с решением задачи линейной теории упругости, получаемым с использованием конечноэлементного пакета ANSYS, моделируются классические для динамики разрушения эксперименты Рави-Чандара и Кнаусса по динамическому распространению трещин в Гомалите-

100. В этих опытах пластинка с разрезом, моделирующим трещину, нагружалась интенсивным кратковременным импульсом давления, приложенным по берегам разреза. Временная форма прикладываемой нагрузки описывается двумя следующими последовательно трапецеидальными импульсами. При использовании данной экспериментальной схемы наблюдается инициализация, распространение, остановка и последующая реинициализация трещины. В экспериментах снималась временная зависимость приращения длины трещины. По результатам моделирования показано, что получаемые при помощи конечноэлементного моделирования зависимости длины трещины от времени в условиях проводимых Рави-Чандаром и Кнауссом опытов хорошо совпадают с экспериментально наблюдаемыми (рисунок 11). Результаты данной работы позволяют говорить о применимости критерия, основанного на понятии инкубационного времени, для описания распространения и остановки динамически нагружаемых трещин.

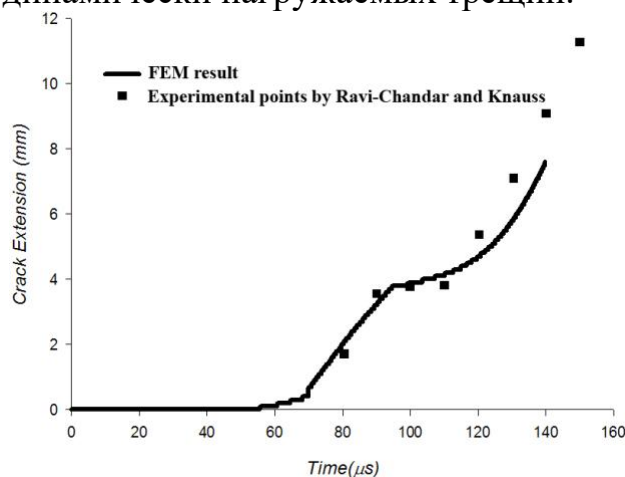


Рис. 11. История распространения трещины. Сравнение результатов численных расчетов с опытными данными.

Показано, что, используя метод конечных элементов, решающий динамическую задачу линейной теории упругости совместно с критерием (3), используемым для оценки критических условий распространения трещин, возможно корректное описание распространения динамически нагружаемых трещин в квазихрупких материалах.

В параграфе 4.3 изучается взаимосвязь коэффициента интенсивности напряжений и скорости динамической трещины. Исследуются различия в динамическом распространении трещин, вызванном медленно меняющимися квазистатическими и быстрыми динамическими приложенными нагрузками. В параграфе 4.2 было показано, что, используя разработанный численный подход,

оказывается возможным достаточно точное предсказание динамики распространения квазихрупких трещин под действием быстроменяющихся динамических нагрузок. Для такого нагружения характерно отсутствие однозначной связи между скоростью трещины и мгновенным значением коэффициента интенсивности напряжений в вершине движущейся трещины. Именно такое поведение наблюдается в экспериментах Рави-Чандара и Кнаусса и при численном моделировании этих экспериментов (см. рисунок 11) – скорость трещины в эксперименте практически постоянна, в то время как значение коэффициента интенсивности существенно меняется. В то же время в экспериментах, когда динамическое распространение трещины вызвано медленно меняющейся квазистатической нагрузкой, как правило, можно наблюдать достаточно однозначную зависимость между мгновенным значением скорости распространяющейся трещины и текущим значением коэффициента интенсивности напряжений в вершине трещины. В частности, такое поведение наблюдается в известных экспериментах Д. Файнберга, в которых пластина, изготовленная из ПММА, с разрезом медленно нагружается, что в какой-то момент вызывает инициирование и динамическое распространение трещины из вершины имеющегося разреза.

При помощи разработанной модели на основе метода конечных элементов с внедренным критерием инкубационного времени моделируются условия описанных выше экспериментов Д. Файнберга. В результате моделирования изучается зависимость между скоростью трещины и значением коэффициента интенсивности напряжения. На рисунке 12 полученная численно зависимость сравнивается с измеренной в экспериментах Д. Файнберга.

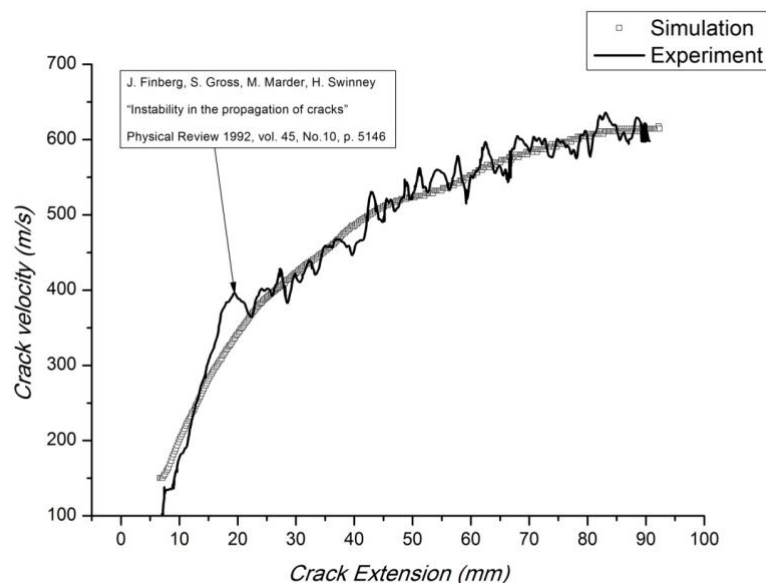


Рис. 12. Результаты моделирования распространения трещины, вызванного квазистатическим нагружением. Зависимость скорости трещины от длины трещины.

Таким образом, показано, что применение структурно-временного подхода и критерия инкубационного времени разрушения позволяет успешно предсказывать результаты экспериментов как по квазистатическому (напр., Д. Файнберг), так и по динамическому (напр., Рави-Чандар и Кнаусс) нагружению образцов с трещиной. Предложенный подход делает возможным отказ от традиционного метода, основанного на введении динамической вязкости разрушения K_{Id} , которая в действительности не является свойством материала и не может быть эффективной для описания динамического разрушения в силу ее сильной зависимости от истории нагружения. Из проведенных расчетов становится также ясно, что и зависимость скорости трещины от коэффициента интенсивности напряжений не может рассматриваться как материальный закон, так как характер данной зависимости определяется в том числе геометрией образца, историей и способом нагружения.

В главе 4 показано, что, используя метод конечных элементов с внедренным критерием разделения материала на основе критерия инкубационного времени хрупкого разрушения, возможно с достаточной точностью предсказывать все разнообразие экспериментально наблюдаемых эффектов, связанных с распространением трещин в квазихрупких материалах. Показано, что, используя подход инкубационного времени, предполагающий

введение одного дополнительного прочностного параметра, отвечающего за отклик прочностных свойств материала на быстро меняющиеся поля напряжений, оказывается возможным корректно описывать инициацию, распространение и остановку хрупких трещин в динамических условиях. Необходимость введения и экспериментального определения всего лишь одного параметра в дополнение к стандартному набору прочностных свойств выгодно отличает используемый подход от других часто используемых моделей поведения материала в динамических условиях.

В главе 5 аналогичный подход используется для моделирования возникновения, развития и остановки разрушения в изначально бездефектных средах, нагружаемых высокоскоростными ударными и взрывными воздействиями.

В параграфе 5.1 приводится обзор литературы по экспериментальному, теоретическому и численному исследованию динамики хрупкого разрушения изначально бездефектных сред.

В параграфе 5.2 при помощи метода конечных элементов с внедренным критерием разрушения на основе понятия инкубационного времени хрупкого разрушения изучается задача ударного динамического кратерообразования на примере задачи о контакте спутника SMART1 с поверхностью луны.

3 сентября 2006 года спутник Европейского Космического Агентства (ЕКА) SMART1 произвел жесткую посадку на поверхность Луны. Контакт спутника, имевшего форму, близкую к кубической, с характерным размером порядка одного метра, и массу 366 килограмм, с лунной поверхностью произошел на скорости порядка 2000 м/с. Наблюдаемые размеры дефекта (кратера), образовавшегося на поверхности Луны в результате контакта: диаметр - 6-10 метров, глубина - 3 метра. При помощи разработанной численной модели делается попытка определения размеров кратера, образовавшегося на поверхности Луны для последующего сравнения с наблюдаемыми в действительности. Свойства разрушаемого материала приняты равным типичным для земного базальта.

Традиционный способ создания новой поверхности в методе конечных элементов связан с разделением узлов. Этот наиболее удобный в большинстве случаев подход, тем не менее, связан с достаточно длительными процедурами переразбиения и пересчета перемещений, деформаций и скоростей на новые узлы. Для того, чтобы гарантировать корректное интегрирования в (3), необходимо использовать маленькие шаги по времени. В этих условиях разделение узлов представляется не лучшим решением. В использованном методе конечные элементы, представляющие Луну, изначально не имеют общих узлов. До момента разрушения степени

свободы узлов, находящиеся в одной точке, жестко связаны (рисунок 13).

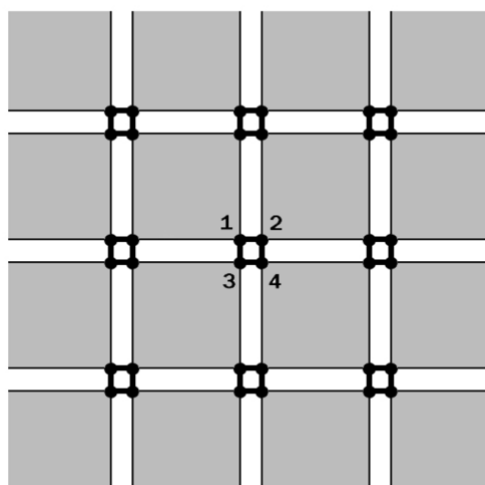


Рис. 13. Конечноэлементная модель с элементами без общих узлов

На рисунке 13 дано схематичное представление внутренних точек разрушаемого тела. Изначально степени свободы узлов, находящихся в одной точке, связаны. Условие разрушения (3) для такой точки может быть переписано:

$$\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t \sigma_{ii}(t') dt' \geq \sigma_c, \quad (5)$$

где i принимает значения 1 и 2. Пространственное интегрирование исчезает, т.к. в методе конечных элементов напряжения в данном узле и так представляют собой усредненное значение по расстоянию порядка размера элемента.

В рамках задачи, решаемой численно, цилиндр диаметром в 1 метр и высотой в 1 метр падает на полупространство на скорости 2000 м/сек. Плотность материала цилиндра подобрана таким образом, чтобы его общая масса равнялась 366 кг. Для решения задачи линейной теории упругости использовался конечноэлементный пакет ANSYS. Выполнение условия (5) во всех узлах образца контролировалось при помощи отдельной подпрограммы на языке ANSYS ADPL. На рисунке 14 на недеформированной сетке отмечены узлы, в которых произошло разделение материала. Таким образом, можно оценить размер отпечатка (кратера), образовавшегося в результате удара спутника о поверхность Луны. Как видно из представленных результатов, поврежденная зона имеет диаметр порядка 10 метров и распространена вглубь примерно на 3 метра. Зону, где материал полностью фрагментирован, можно оценить как

имеющую 7-10 метров в диаметре и 3 метра в глубину. Эти результаты очень хорошо совпадают с оценками размера образовавшегося кратера, проведенными Европейским Космическим Агентством.

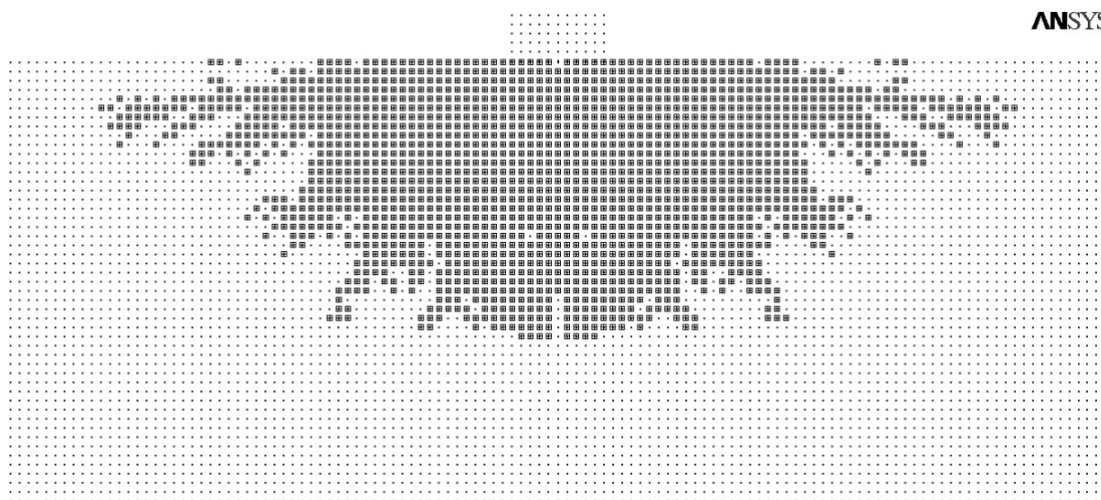


Рис. 14. Узлы, в которых произошло разрушение.

В параграфе 5.3 изучается еще одна задача, связанная с ударным кратерообразованием - моделируется разрушение асфальтобетонного покрытия шипами противоскольжения. Часто считается, что основной вклад в разрушение и деформацию покрытых асфальтом дорожных покрытий вносит тяжелый транспорт. Действительно, при низкоскоростном движении тяжелые транспортные средства (грузовики, автобусы и т.д.) создают нагрузки на дорожное покрытие, которые значительно превышают нагрузки, создаваемые гораздо более легкими автомобилями. В этом случае дорожное покрытие нагружается квазистатически. Процесс деформации и разрушения дорожного покрытия в этом случае хорошо изучен. Ситуация может существенно измениться, если учесть высокоскоростной трафик. При движении по российским скоростным автомагистралям можно заметить, что основной ущерб дорожному покрытию приходится на левые (высокоскоростные) полосы движения. Также видно, что эти повреждения вызваны эрозионным разрушением поверхности асфальта (износ, связанный с выносом материала). В то же время тяжелые грузовики крайне редко передвигаются по этим полосам. Очевидно, это повреждение вызывают быстро движущиеся легковые автомобили. Для автомобиля, движущегося со скоростью 110 км/ч, время взаимодействия шины с дорогой составляет около 5 миллисекунд. Удар шипа шины о поверхность дороги длится 2-3 микросекунды, и энергия этого удара увеличивается пропорционально квадрату

скорости транспортного средства. Логично предположить, что основная причина эрозионного повреждения левых полос движения на высокоскоростных дорогах - это результат ударов шипами шин транспортных средств, движущихся с большой скоростью.

Изучаются условия, которые могут приводить к образованию разрушения в асфальтобетонном покрытии при ударе со стороны автомобильного шипа противоскольжения. По постановке решаемая задача очень близка задаче, описанной в **параграфе 5.2**. Разница состоит в других свойствах разрушаемого материала и других параметрах ударника и его начальной скорости. На рисунке 15 для примера представлено численное решение, получаемое для поля горизонтальных напряжений в процессе контакта автомобильного шипа с асфальтобетонным покрытием.

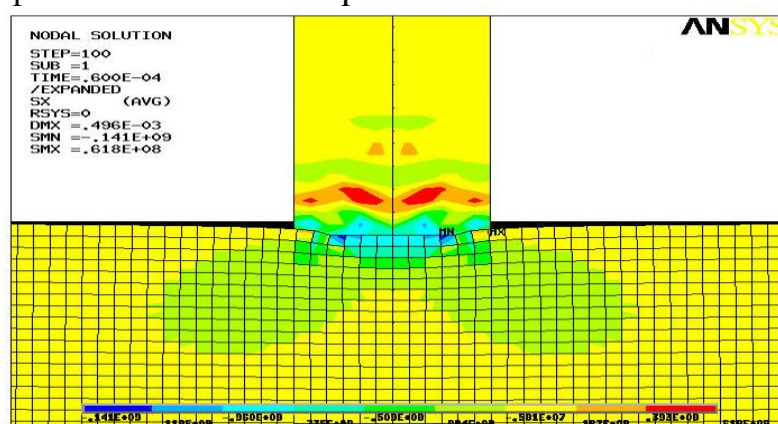


Рис. 15. Поле горизонтальных напряжений в процессе контакта шипа с асфальтобетонным покрытием

По результатам моделирования строится зависимость критической скорости автомобиля, при достижении которой следует ожидать начала микрорастрескивания асфальтобетонного покрытия от модуля упругости асфальтобетона (Рисунок 16).

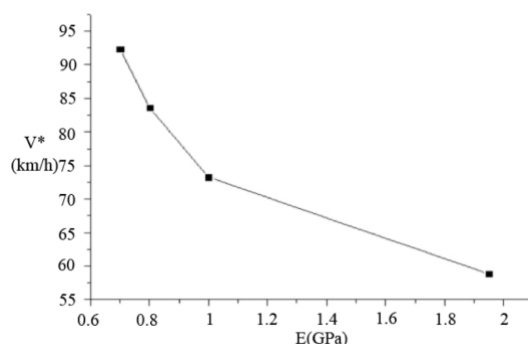


Рис. 16. Зависимость критической скорости автомобиля, при достижении которой следует ожидать начала микрорастрескивания асфальтобетонного покрытия, от модуля упругости асфальтобетона

Показано, что для стандартного асфальтобетона критическая скорость автомобиля (стандартные шины, идеально сбалансированное колесо, оптимальное давление в шине) составляет 74 км/ч. Эти расчеты хорошо коррелируются с данными дорожных служб Финляндии, где в период применения шипов ограничивается скорость движения транспорта (80 км/ч) и разрешены к применению шины меньшей массы. Показано влияние модуля упругости на пороговые скоростные характеристики транспорта. Из приведенных расчетов следует, что уменьшение модуля упругости слоя износа позволяет значительно увеличить критические скорости автомобилей, влекущие за собой эрозионное разрушение дорожного полотна, что дает возможность управления процессами появления износа.

В **параграфе 5.4** численно исследуется задача высокоскоростного пробивания преград, изготовленных из ПММА высокоскоростными металлическими ударниками. Изучение эффектов и моделирование в задачах пробивания материалов и конструкций при динамических высокоскоростных воздействиях имеет большое практическое значение для инженерных приложений. Области, для которых важны эффекты динамического пробивания, достаточно широко распространены на практике: проектирование систем военной защиты (пуленепробиваемые жилеты, броня транспортных средств и т. д.), автомобилестроение (безопасность при авариях), авиация и космонавтика (удары птиц, угроза со стороны космического мусора, эрозия лопаток турбины твердыми частицами), террористическая угроза, электроника (падение портативных устройств на твердые поверхности) и т. д. Экспериментальное изучение эффектов ударного разрушения материалов требует значительных временных и финансовых затрат. Это в первую очередь связано с требованиями к нагружающим устройствам, безопасности, наличию высокоскоростных систем регистрации и точной синхронизации оборудования. Кроме того, эти эксперименты могут быть довольно дорогостоящими. В этой связи, численное моделирование в задачах пробивания приобретает особую ценность, так как может служить инструментом для оптимизации экспериментальных исследований и проектирования изделий благодаря постоянно растущим возможностям современных вычислительных систем. В работе показана применимость критерия инкубационного времени для моделирования разрушения в такого рода задачах.

Группой экспериментаторов Нижегородского государственного университета (проф. А.М. Брагов и др.) были

проведены экспериментальные исследования, в которых квадратные пластины из ПММА с размерами 100мм на 100мм и толщинами 4мм, 6мм и 10мм зажимались в специальном фиксирующем устройстве. Нагружение производилось при помощи высокоскоростных ударников, нормально ударяющих в центр пластины. Ударники представляли собой стальные цилиндры с диаметром 6 мм, длиной 20 мм и массой 8.3 грамма. Оборудование на основе газовой пушки позволяло разгонять данные ударники до произвольной скорости в пределах от 40 м/с до 350 м/с. Начальная (до соударения с пластиной из ПММА) скорость ударника с высокой точностью фиксировалась при помощи электромагнитных датчиков. Разрушение пластины при ударе, а также скорость ударника после пробивания пластины фиксировались при помощи высокоскоростной видеосъемки. В проведенных экспериментах для трех разных толщин пластин из ПММА исследовалась зависимость скорости ударника после пробивания пластины от начальной скорости ударника. Особое внимание в исследованиях уделялось скоростям, близким к баллистическому пределу – критической скорости ударника, при которой происходит пробивание цели.

Условия, соответствующие произведенным экспериментам, моделируются с использованием численной схемы на основе метода конечных элементов с внедренным критерием разрушения инкубационного времени. Особая сложность численной реализации в данном случае состояла в том, что постановка задачи является сугубо трехмерной и нет возможности использования упрощенной двумерной задачи. Был разработан подход, позволяющий реализовать критерий разрушения инкубационного времени для полных трехмерных численных моделей.

На рисунке 17 приводится сравнение внешнего вида испытанных пластин из ПММА при различных начальных скоростях ударника.

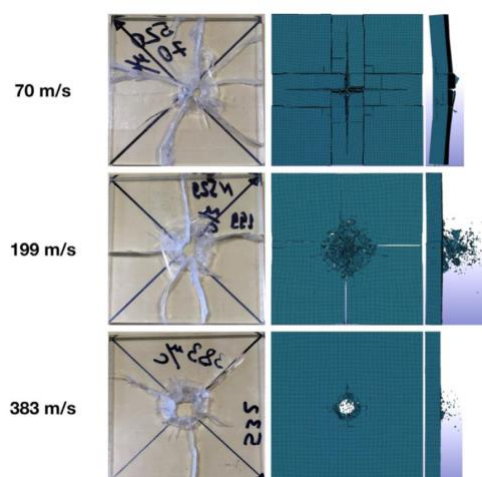


Рис. 17. Сравнение внешнего вида испытанных пластинок из ПММА при различных начальных скоростях ударника. Слева – результаты натурных экспериментов, справа – результаты численного моделирования.

Также приведем сравнение зависимости скорости ударника после пробивания мишени от начальной скорости, наблюдаемые в эксперименте, с аналогичными зависимостями, получаемыми в результате моделирования. Результаты представлены на рисунке 18.

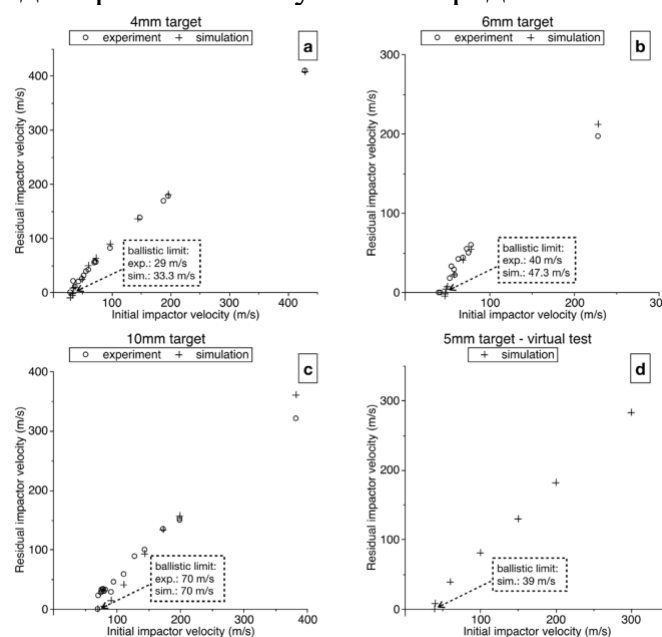


Рис. 18. Зависимость скорости ударника после пробивания мишени от начальной скорости ударника.

Как видно из представленных данных, для всех трех исследованных экспериментально толщин преград экспериментально наблюдаемые зависимости очень хорошо совпадают с результатами численного моделирования.

В параграфе 5.5 с использованием аналогичной модели изучается фрагментация преград, изготовленных из керамик ZrO_2 (Y_2O_3) и Al_2O_3 , при высокоскоростном ударе. Изучено влияние различных параметров материала на баллистические характеристики керамических материалов и характеристики процесса динамической фрагментации (дробления). Распределение размеров осколков было оценено для различных скоростей ударника. Во всех случаях распределение для мелких фрагментов подчиняется степенному закону (прямая линия в логарифмических координатах), а для более крупных фрагментов наблюдаются расхождения. Такое поведение характерно для динамического дробления хрупких материалов.

В параграфе 5.6 сформулированы основные результаты, представленные в главе 5.

В главах 4 и 5 показано, что критерий инкубационного времени, позволяет предсказывать широчайший диапазон экспериментально наблюдаемых эффектов, связанных с динамикой разрушения квазихрупких сред. Следует отметить, что используемый подход не содержит подгоночных параметров. Все использованные параметры материала взяты из паспорта материала либо из более ранних работ. Используемый подход предполагает один дополнительный прочностной параметр по сравнению со стандартными параметрами материала. Результаты моделирования очень хорошо совпадают с экспериментальными наблюдениями. Таким образом, можно заключить, что разработанный численный подход может применяться для прогнозирования динамики разрушения для широкого класса квазихрупких материалов в широчайшем диапазоне скоростей нагружения.

В заключении сформулированы основные результаты работы, выносимые на защиту.

Публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК и индексируемых базами Web of Science и Scopus

Статьи по теме диссертации:

1. V. Bratov (2021) NUMERICAL SIMULATIONS OF DYNAMIC FRACTURE. CRACK PROPAGATION AND FRACTURE OF INITIALLY INTACT MEDIA. Materials Physics and Mechanics, 47 :455-474
DOI:http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4732021_7
2. M.K. Khan, M.A. Iqbal, V. Bratov, N.F. Morozov, N.K. Gupta (2021) BALLISTIC RESISTANCE OF CERAMIC METALLIC TARGET FOR VARYING LAYER THICKNESSES. Materials Physics and Mechanics, 47 :159-169
DOI:http://dx.doi.org/10.18149/MPM.4722021_1
3. S.I. Kuznetsov, N.F. Morozov, V. Bratov and A. Ilyashenko (2021) Seismic barriers filled with granular metamaterials: Mathematical models for granular metamaterials. Journal of Physics: Conference Series, 1787 (1) :12041
DOI:10.1088/1742-6596/1787/1/012041
4. N.F. Morozov, V.A. Bratov and S.V. Kuznetsov (2021) Seismic Barriers for Protection Against Surface and Headwaves: Multiple Scatters and Metamaterials. Mechanics of Solids, 56 (6) :911-921
DOI:<http://dx.doi.org/10.3103/S0025654421060133>
5. M.K. Khan, M.A. Iqbal, V. Bratov, N.F. Morozov, N.K. Gupta (2020) An investigation of the ballistic performance of independent ceramic target. Thin-Walled Structures, 154 :106784
DOI:10.1016/j.tws.2020.106784
6. N.A.Kazarinov, V.A.Bratov, N.F.Morozov, Y.V.Petrov, V.V.Balandin, M.A.Iqbal, N.K.Gupta (2020) Experimental and numerical analysis of PMMA impact fracture. International Journal of Impact Engineering, 143 :103597
DOI:10.1016/j.ijimpeng.2020.103597
7. V.A. Bratov, A.V. Ilyashenko, S.V. Kuznetsov, T.-K. Lin, N.F. Morozov (2020) Homogeneous Horizontal and Vertical Seismic Barriers: Mathematical Foundations and Dimensional Analysis . Materials Physics and Mechanics, 44 :61-65
DOI:10.18720/MPM.4412020_7
8. Ilyashenko, A.V., Morozov, N.F., Rashidov, T.R., Bratov, V.A., Mardonov, B.M. (2020) The interaction of high intensity seismic Rayleigh and Rayleigh-Lamb waves with structures. IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, 913 (2) :022026
DOI:10.1088/1757-899X/913/2/022026
9. M.K. Khan, M.A. Iqbal, V. Bratov, N.K. Gupta, N.F. Morozov (2019) A Numerical Study of Ballistic Behaviour of Ceramic Metallic Bi-Layer Armor Under Impact Load. Materials Physics and Mechanics, 42 :699-710
DOI:10.18720/MPM.4262019_2
 10. Vladimir Bratov, Nikita Kazarinov (2019) Dynamic fracture of ceramic plates due to impact loading. Numerical investigation. Materials Physics and Mechanics, 42 (4) :389-395
DOI:10.18720/MPM.4242019_3
 11. V. Bratov, A. Krivtsov (2019) Analysis of energy required for initiation of inclined crack under uniaxial compression and mixed loading. Engineering Fracture Mechanics, 216 :106518
DOI:10.1016/j.engfracmech.2019.106518
 12. Vladimir Bratov, Alla Ilyashenko, Nikita Morozov and Tursunbai Rashidov (2019) Seismic barriers: theory and numerical simulations. E3S Web of Conferences, 97 :03005
DOI:10.1051/e3sconf/20199703005
 13. Vladimir Bratov (2018) Numerical models for hydraulic refracturing on vertical oil wells. International Journal of Engineering & Technology, 7 (436) :1110-1115
DOI:10.14419/ijet.v7i4.26.27937
 14. J. Venkatesana, , M.A. Iqbala, N.K. Gupta, V. Bratov, N. Kazarinov, F. Morozov (2017) Ballistic Characteristics of Bi-layered Armour with Various Aluminium Backing against Ogive Nose Projectile. Procedia Structural Integrity, 6 :40–47
DOI:10.1016/j.prostr.2017.11.007
 15. N.A. Kazarinov, Y.V. Petrov, V.A. Bratov, V.Yu. Slesarenko (2016) NUMERICAL INVESTIGATION OF STRESS INTENSITY FACTOR – CRACK VELOCITY RELATION FOR A DYNAMICALLY PROPAGATING CRACK. Materials Physics and Mechanics, 29 :39-42
 16. Yuri Petrov, Nikita Kazarinov, Vladimir Bratov (2016) Dynamic crack propagation: quasistatic and impact loading. Procedia Structural Integrity, 2 :389-394
DOI:10.1016/j.prostr.2016.06.050
 17. N.A. Kazarinov, V.A. Bratov and Y.V. Petrov (2015) Simulation of ceramics fracture due to high rate dynamic impact. Journal of Physics: Conference Series, 653 (12050) :
DOI:10.1088/1742-6596/653/1/012050

18. V.A. Bratov, N.A. Kazarinov and Y.V. Petrov (2015) Numerical implementation of the incubation time fracture criterion. *Journal of Physics: Conference Series*, 653 (12049) :
DOI:10.1088/1742-6596/653/1/012049
19. V. Bratov, N. Kazarinov, Y. Petrov (2015) Numerical simulation of ZrO₂(Y₂O₃) ceramic plate penetration by cylindrical plunger. *EPJ Web of Conferences*, 94 (4056) :
DOI:10.1051/epjconf/20159404056
20. Vladimir Bratov, Yuri Petrov, Boris Semenov, Irina Darienko (2015) Modelling the high-speed train induced dynamic response of railway embankment. *Materials Physics and Mechanics*, 22 (1) :69-77
21. N. Kazarinov, V. Bratov, Y. Petrov (2014) SIMULATION OF DYNAMIC CRACK PROPAGATION UNDER QUASISTATIC LOADING. *Applied Mechanics and Materials*, 532 :337-341
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.532.337
22. N.A. Kazarinov, V.A. Bratov, Yu.V. Petrov, G.D. Fedorovsky (2014) EVALUATION OF FRACTURE INCUBATION TIME FROM QUASISTATIC TENSILE STRENGTH EXPERIMENT . *Materials Physics and Mechanics*, 19 :16-24
23. Братов В. А., Смирнов И. В., Петров Ю. В., Майданова Н. В., Широкова Т. С. (2014) О моделировании динамического разрушения асфальтобетонных покрытий и некоторых типовых решениях дорожных конструкций для Санкт-Петербурга. *Дорожная техника* :26-29
24. Vladimir Bratov, Yuri Petrov (2014) Erosion of asphalt as a result of automobile tire studs impacts. *Materials Physics and Mechanics*, 21 (3) :222-229
25. N. Kazarinov, V. Bratov, Y. Petrov (2014) Modelling dynamic propagation of a crack at quasistatic loading. *Doklady Physics*, 59 (2) :99-102
DOI:10.1134/S1028335814020116
26. V. BRATOV, Y.V. PETROV, G. VOLKOV (2012) Existence of Optimal Energy Saving Parameters for Different Industrial Processes. *JOURNAL OF NINGBO UNIVERSITY (NSEE)*, 25 (1) :48-52
27. Yurii V. Petrov, A. A. Gruzdkov, V. A. Bratov (2012) Structural-temporal theory of fracture as a multiscale process. *Physical Mesomechanics*, 15 (3) :232-237
DOI:10.1134/S1029959912020117
28. Y.V. Petrov, B.L. Karihaloo, V.A. Bratov (2012) Multi-scale dynamic fracture model for quasi-brittle materials. *International Journal of Engineering Science*, 61 :3-9

- DOI:10.1016/j.ijengsci.2012.06.004
29. V. Smirnov, Yuri V. Petrov, V. Bratov (2012) Incubation time approach in rock fracture dynamics. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 55 (1) :78-85
DOI:10.1007/s11433-011-4579-3
 30. Y.V. PETROV, V. BRATOV (2012) Spatio-temporal Model of Multiscale Fracture in Brittle Solids. *JOURNAL OF NINGBO UNIVERSITY (NSEE)*, 25 (1) :35-40
 31. V. Bratov (2011) Incubation time fracture criterion for FEM simulations. *Acta Mechanica Sinica*, 27 (4) :541-549
DOI:10.1007/s10409-011-0484-2
 32. V. Bratov, Y. Petrov, A. Utkin (2011) Transient near tip fields in crack dynamics. *Science China Physics Mechanics and Astronomy*, 54 (7) :1309–1318
DOI:10.1007/s11433-011-4362-5
 33. Y.V. Petrov, V. Bratov (2011) Multiscale fracture model for quasi-brittle materials. *Applied Mechanics and Materials*, 82 :160-165
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.82.160
 34. V. Bratov, Y. Petrov, G. Volkov (2011) Existence of optimal energy saving parameters for different industrial processes. *Applied Mechanics and Materials*, 82 :208-213
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.82.208
 35. Петров Ю.Ю., Братов В.А. (2011) О МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗРУШЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ ШИПАМИ ПРОТИВОСКОЛЬЖЕНИЯ. *Морские интеллектуальные технологии*, 3 :113-119
 36. V. Bratov, Y. Petrov (2008) Evaluation of energy saving operational modes for industrial fracture connected processes on the basis of incubation time fracture criterion. *Transactions of Tianjin University*, 14 (1) :476-482
DOI:10.1007/s12209-008-0081-z
 37. V. A. Bratov, N. F. Morozov, Yu. V. Petrov (2008) Simulating the SMART1 orbiter impact on the Moon's surface. *Doklady Physics*, 53 (3) :152-155
DOI:10.1134/S1028335808030099
 38. V. A. Bratov, Yu. V. Petrov (2007) Application of the incubation time criterion to the description of dynamic crack propagation. *Doklady Physics*, 52 (10) :565-567
DOI:10.1134/S1028335807100138
 39. V. Bratov, Y. Petrov (2007) Optimizing energy input for fracture by analysis of the energy required to initiate dynamic mode I crack growth. *International Journal of Solids and Structures*, 44 :2371-2380

DOI:10.1016/j.ijstr.2006.07.013

40. V. Bratov, Y. Petrov (2007) Application of incubation time approach to simulate dynamic crack propagation. International Journal of Fracture, 146 :53-60 DOI:10.1007/s10704-007-9135-9
41. В.А. Братов (2009) Численные модели динамики разрушения. Вычислительная механика сплошных сред, 2 (3) :5-16

Монографии :

42. V. Bratov, N. Morozov, Y. Petrov (2009) Dynamic Strength of Continuum. St.-Petersburg University Press.

Другие публикации:

1. G.A. Volkov, V.A. Bratov, E.N. Borodin, A.D. Evstifeev and N.V. Mikhailova (2020) Numerical simulations of impact Taylor tests. Journal of Physics: Conference Series, 1556 :012059
DOI:10.1088/1742-6596/1556/1/012059
2. Saad Althobaiti, Vladimir Bratov, Ali Mubarak, and Danila Prikazchikov (2020) MOVING LOAD ON AN ELASTIC HALF-SPACE COATED WITH A THIN VERTICALLY INHOMOGENEOUS LAYER. EURO DYN 2020 XI International Conference on Structural Dynamics M. Papadrakakis, M. Fragiadakis, C. Papadimitriou (Eds.), 1 :2601-2611
3. Borodin E.N., Morozova A., Bratov V., Belyakov A., Jivkov A.P. (2019) Experimental and numerical analyses of microstructure evolution of Cu-Cr-Zr alloys during severe plastic deformation. Materials Characterization, 156 :109849
DOI:10.1016/j.matchar.2019.109849
4. Andrey Martemyanov, Egor Shel, Vladimir Bratov, Igor Chebyshev, Grigory Paderin, Ildar Bazyrov (2019) Conditions of Secondary Fracture Reorientation for Cases of Vertical and Horizontal Wells. Society of Petroleum Engineers, :
DOI:10.2118/196966-MS
5. E.N. Borodin, V. Bratov (2018) Non-equilibrium approach to prediction of microstructure evolution for metals undergoing severe plastic deformation. Materials Characterization, 141 :267-278
DOI:10.1016/j.matchar.2018.05.002
6. Grigori Volkov, Elijah Borodin, Vladimir Bratov (2017) Numerical simulations of Taylor anvil-on-rod impact tests using classical and new approaches. Procedia Structural Integrity, 6 :330–335
DOI:10.1016/j.prostr.2017.11.050

7. Anna Morozova, Elijah Borodin, Vladimir Bratov, Sergey Zherebtsov, Andrey Belyakov and Rustam Kaibyshev (2017) Grain Refinement Kinetics in a Low Alloyed Cu–Cr–Zr Alloy Subjected to Large Strain Deformation. *Materials*, 10 (1394) :1-13
DOI:10.3390/ma10121394
8. V. Bratov, J. Kaplunov, D.A. Prikazchikov (2016) On steady-state moving load problems for an elastic half-space. *IEEE Xplore, Proceedings of the International Conference DAYS on DIFFRACTION 2016*, :84-88
DOI:10.1109/DD.2016.7756819
9. V. Bratov, E.N. Borodin (2016) NON-EQUILIBRIUM FEATURES OF CONTINUOUS RECRYSTALLIZATION PROCESS AT SEVERE PLASTIC DEFORMATION OF COPPER. *Materials Physics and Mechanics*, 26 :38-41
10. V. Bratov, E.N. Borodin (2015) Comparison of dislocation density based approaches for prediction of defect structure evolution in aluminium and copper processed by ECAP. *Materials Science and Engineering: A*, 631 :10-17
DOI:10.1016/j.msea.2015.02.019
11. Yu. Petrov, V. Smirnov, A. Utkin, V. Bratov (2014) Energy of a solid sphere under nonstationary oscillations. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 57 (3) :469-476
DOI:10.1007/s11433-013-5370-4
12. G.A. Volkov, V.A. Bratov, A.A. Gruzdkov, V. Babitsky, Yu.V. Petrov, V. Silberschmidt (2011) Energy-based analysis of ultrasonically assisted turning. *Shock and Vibration*, 18 (1) :333-341
DOI:10.3233/SAV-2010-0606
13. G. A. Volkov, V. V. Silberschmidt, V. I. Babitskii, A. A. Gruzdkov, V. A. Bratov, Yu. V. Petrov (2010) Energy aspects of ultrasonic intensification of treatment of metals. *Doklady Physics*, 55 (4) :184-185
DOI:10.1134/S1028335810040075
14. G. A. Volkov, V. V. Silberschmidt, A. V. Mitrofanov, A. A. Gruzdkov, V. A. Bratov, Yu. V. Petrov (2009) Minimization of fracture-pulse energy under contact interaction. *Doklady Physics*, 54 (7) :322-324
DOI:10.1134/S1028335809070040
15. V. A. Bratov, L. M. Isakov, Yu. V. Petrov (2008) A criterion for detonation initiation in gas mixtures. *Doklady Physics*, 53 (10) :507-509
DOI:10.1134/S1028335808100017