

На правах рукописи



Краус Александр Евгеньевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ
ГЕТЕРОГЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Специальность 1.1.8 – механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель:

Шабалин Иван Иванович, кандидат физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, старший научный сотрудник

Официальные оппоненты:

Сапожников Сергей Борисович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», главный научный сотрудник

Радченко Павел Андреевич, доктор физико-математических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, научный сотрудник

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского".

Защита состоится «16» декабря 2024 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.055.02 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН по адресу: 630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15. Тел.: (383)333-21-66, факс: (383)333-16-12, e-mail: info@hydro.nsc.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте:

<https://www.hydro.nsc.ru/education/dissertations/kraus.php>

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета. Автореферат разослан «__» ноября 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физико-математических наук



С.В. Бойко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность данной работы. Развитие аддитивных технологий позволяет разрабатывать гетерогенные материалы, свойства которых требуют дополнительного изучения. Проведение экспериментов требует значительных затрат ресурсов и времени, поэтому для предварительного анализа возникает потребность в численном моделировании поведения гетерогенного материала. Численное моделирование гетерогенного материала под динамической нагрузкой является не простой задачей, что связано со сложной волновой картиной. В процессе распространения волн напряжений в объектах ограниченных размеров эти волны многократно отражаются от граничных поверхностей тела, взаимодействуя друг с другом и создавая весьма сложную волновую картину внутри объекта. Кроме того, напряженно-деформационное состояние гетерогенных материалов усложняется пространственно-неоднородным распределением физико-механических характеристик отдельных компонентов и наличием межфазного слоя.

В задачах о динамическом нагружении гетерогенного материала решающую роль играют параметры разрушения. Точное определение параметров разрушения гетерогенного материала перед его изготовлением позволит определить пропорции составляющих гетерогенного материала для обеспечения требуемых нагрузок. В тоже время и для численного моделирования гетерогенного материала критическую важность представляют параметры разрушения материала. Современные методы моделирования гетерогенных материалов позволяют рассчитать упругие параметры из гомогенных компонентов, однако, что касается параметров разрушения, они требуют данных из экспериментов. В таком случае очевидным является то, что возможность определять параметры разрушения гетерогенного материала на основе свойств его компонент существенно упростит работу с гетерогенными материалами, экономя средства и время.

Степень разработанности темы. Развитие технологий аддитивного производства элементов конструкций активно содействует формированию новых концепций в проектировании материалов и изделий из них, что показано в работах В.М. Фомина, Т. Деброя и Ю. Кока. В этом контексте ключевой задачей, объединяющей аспекты механики, материаловедения и физики, является разработка методологии и методов проектирования изделий с уникальной

структурой материала, обеспечивающей желаемые функциональные и конструкционные характеристики.

В работах Е.И. Крауса и его сотрудниками была предложена методика прямого численного моделирования гетерогенной среды, сопровождаемая комплексными исследованиями для определения ее параметров с демонстрацией потенциальных преимуществ. В этих публикациях приведены сравнения результатов с экспериментальными данными, также представлен закон аддитивной смеси и методология работы с ним. Выявлено, что в любых средах в процессе распространения импульс эволюционирует до упругого напряженно-деформированного состояния, при котором амплитуда и длина импульса уже не зависят от пройденного расстояния. Также проведены исследования влияния размеров включений, где обнаружено, что для гетерогенных материалов с крупными включениями скорость затухания амплитуды импульса заметно выше, чем для гетерогенных материалов с мелкими включениями. Уменьшение общей концентрации керамики с 40% до 20% объемной доли в гетерогенном материале сохраняет все тенденции в поведении короткого импульса при его распространении в преграде.

Многообразие подходов к моделированию гетерогенных материалов свидетельствует о том, что пока еще не существует универсального и оптимального метода. Определение механических параметров гетерогенных материалов в наше время, безусловно, не представляет трудности, в отличие от параметров, связанных с процессами разрушения. На данный момент самым сложным аспектом является выбор методики моделирования разрушения гетерогенных материалов, поскольку для многих новых материалов может отсутствовать необходимая информация из экспериментальных данных. В таких случаях требуются общие закономерности, способные решить данную проблему.

Цель работы: провести идентификацию прочностных характеристик гетерогенных материалов при динамических воздействиях.

Для достижения поставленной цели сформулированы **задачи:**

- Определить поведение моделей гетерогенного материала, построенных различными способами, а в частности, аддитивной модели и прямого численного моделирования, при нагружении плоской ударной волной.

- Определить влияние типа границы между матрицей и включениями гетерогенного материала на распространение плоской ударной волны.

- Определить связь предельного откольного разрушения гетерогенного материала от свойств его компонент.

- Определить связь предельной деформации разрушения гетерогенного материала от свойств его компонент.

В работе рассмотрена модель твердого деформируемого тела, которая состоит из уравнений баланса массы, импульса и энергии, а также уравнений состояния и упругопластического течения. Все расчеты выполнялись программным комплексом «REACTOR 3D», где реализовано численное решение уравнений баланса, с учетом поведения материалов и выполнения граничных условий.

Научная новизна

- Впервые получено соотношение для величины предельного откольного разрушения гетерогенной среды.

- Впервые получено в динамическом численном эксперименте соотношение для величины предельной деформации разрушения гетерогенной среды.

- Впервые проведено моделирование динамического нагружения объемно-армированного металломатричного композита с учетом разрушения и показано повышение баллистического предела в сравнении со слоистой преградой с аналогичной поверхностной плотностью.

Практическая и теоретическая значимость

- Получено соотношение для величины предельного откольного разрушения гетерогенной среды

- Показано, что у объемно-армированного металломатричного композита, выше баллистический предел на 60% в сравнении с двуслойной преградой с аналогичной поверхностной плотностью.

- Показано, что применение гетерогенных пластин в защитных пакетах позволяет существенно снизить давление, приходящее в модель человеческого тела по сравнению с пакетом из слоистой пластины.

Методология и методы исследования. При выполнении данной работы исследовалась конечно-разностная математическая модель напряжённого состояния деформируемого упругопластического гетерогенного тела в трехмерной постановке.

В данной работе численные эксперименты включали в себя: нагружение гетерогенного материала плоской ударной волной, нагружение ударной волной гетерогенного образца для воспроизведения откольного эксперимента, высокоскоростное

нагружение гетерогенных образцов и объемно-армированного металломатричного композита с полной реализацией его геометрической структуры включений с учетом разрушения.

Положения, выносимые на защиту:

- Соотношение для величины предельного откольного разрушения гетерогенной среды.
- Соотношение для величины предельной деформации разрушения гетерогенной среды, полученное в численном эксперименте.
- Результаты моделирования динамического нагружения объемно-армированного металломатричного композита с учетом разрушения.

Достоверность результатов, полученных в работе, подтверждается корректностью математической постановки задачи, соответствием расчетных результатов экспериментальным данным.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих международных и всероссийских конференциях и семинарах:

Кафедральная научно-техническая конференция «Студенческая наука НГТУ- 2017» (Новосибирск, 2017 г.); Факультетская научная конференция (Новосибирск, 2017 г.); 57-я международная научная студенческая конференция, (Новосибирск, 2017 г.); Кафедральная научно-техническая конференция «Студенческая наука НГТУ-2018», (Новосибирск, 2018 г.); XIX Международная конференция по методам аэрофизических исследований (ICMAR 2018), (Новосибирск, 2018г.); Кафедральная научно-техническая конференция «Студенческая наука НГТУ-2019», (Новосибирск, 2019 г.); VIII International Graduate and Postgraduate Students Conference «Progress through Innovations», (Новосибирск, 2019 г.); 26-ая Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности, (Томск, 2019 г.); 27-ая Всероссийская конференция с участием зарубежных учёных по численным методам решения задач теории упругости и пластичности, посвященная 100-летию со дня рождения Николая Николаевича Яненко, (Красноярск, 2021 г.); Мини-симпозиум «Платформа», (Новосибирск, 2021 г.); Международная конференция «Физическая мезомеханика материалов», (Томск, 2022 г.); Мини-симпозиум «Платформа», (Новосибирская область, Морозово, 2022 г.); XXVIII Всероссийская конференция по численным методам решения задач теории упругости и пластичности (Красноярск, 2023 г.); XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Санкт-Петербург, 2023 г.); XXVII Всероссийская научно-практическая

конференция «Актуальные проблемы защиты и безопасности» (Санкт-Петербург, 2024 г.).

Публикации. Основное содержание работы изложено в 18 научных публикациях, включая 6 статей в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК, 12 статей в журналах, включенных в библиографическую базу цитирования Web of Science и Scopus.

Личный вклад в работу:

- Моделирование армированной гетерогенной структуры в виде объёмно-центрированного металлометричного композита.
- Проведение расчетов и обработка полученных результатов, описанных в главах данной работы.
- Аппроксимация зависимости предельного отклонного напряжения и предельных деформаций разрушения гетерогенных материалов от концентрации компонент гетерогенного материала.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 183 наименований. Всего 156 страниц машинописного текста, в том числе 79 рисунков и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении проведен литературный обзор работ в области динамического нагружения, работ посвященных исследованиями гетерогенных материалов, как вычислительными, так и экспериментальными методами. Обоснована актуальность исследования, сформирована цель и задачи работы, сформулирована научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Первая глава посвящена определению свойств гетерогенного материала за фронтом ударной волны без учета разрушения. Глава демонстрирует соответствие прямого численного моделирования «классической» аддитивной модели смеси и результатам экспериментов. В главе описана математическая постановка задачи, используемая во всех главах:

1. Уравнение движения лагранжевых частиц

$$\dot{x}_i = u_i ;$$

2. Уравнение неразрывности среды

$$V_0 \rho_0 = V \rho ;$$

3. Закон изменения импульса материальной частицы

$$\rho \dot{u}_i = \sigma_{ij,j} ;$$

4. Изменение внутренней энергии частицы

$$\rho \dot{e} = \sigma_{ij} \dot{\varepsilon}_{ij};$$

5. Тензор скоростей деформаций имеет вид

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i});$$

6. Тензор напряжений

$$\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + s_{ij};$$

где s_{ij} – девиатор тензора напряжений, отвечающий за реакцию на сдвиговое формоизменение материальной частицы; δ_{ij} – символ Кронекера; P – функция давления в форме Ми – Грюнайзена.

7. Уравнение состояния на основе соотношений Ренкина-Гюгоньо

$$D = c_0 + S_1 u; \quad P = \rho Du;$$

8. Уравнения процесса принимаем в форме Прандтля – Рейсса

$$\hat{s}_{ij} + d\lambda' s_{ij} = 2G\dot{\varepsilon}'_{ij}, \quad \dot{\varepsilon}'_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}\delta_{ij} / 3;$$

9. Условия пластичности Губера – Мизеса

$$s_{ij}s_{ij} \leq 2Y_0^2 / 3,$$

где Y_0 – динамический предел текучести, для определения скалярного множителя $d\lambda'$ используется известная процедура приведения к кругу текучести. Материальная частица, двигаясь вдоль своей траектории, может вращаться как жесткое целое, что учитывается производной Яумана:

$$\hat{s}_{ij} = \dot{s}_{ij} - \omega_{ik}s_{kj} - \omega_{jk}s_{ki}, \quad \omega_{ij} = 0.5(u_{i,j} - u_{j,i}).$$

В приведенных выше уравнениях использованы общепринятые обозначения: каждый из индексов (i, j) пробегает значения 1,2,3; по повторяющимся индексам проводится суммирование; точка над символом – производная по времени; индекс после запятой – производная по соответствующей координате; x_i, u_i – компоненты векторов положения и скорости материальной частицы соответственно; ρ – текущая плотность; G – модуль сдвига.

Система уравнений дополняется предельными параметрами разрушения, если в постановке учитывается разрушение материала:

1. Критерий максимальной деформации растяжения $|\varepsilon_1| > \varepsilon_1^*$;

2. Критерий максимальной деформации сдвига $(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)/2 > \varepsilon_\tau^*$;
3. Критерий максимального касательного напряжения $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 > \sigma_\tau^*$;
4. Модифицированный критерий разрушения Тулера–Бучера $\sigma_t = \int (\sigma_1 - \sigma_1^*) dt > \sigma_t^*$.

Описаны модели гетерогенного материала, а именно аддитивная модель смеси (АДМ) и прямое численное моделирование (ПЧМ).

В главе рассмотрены смеси из Ni+Ti с объемной долей никеля 50% и металломатричный композит из A356 и 316L с объемной долей стали 38%. На основе задачи о нагружении гетерогенного образца из смеси плоской ударной волной с начальной скоростью от 300 до 1400 м/с, проведено сравнение результатов моделирования распространения плоской ударной волны в гетерогенном материале с «микро» и «макро» включениями с результатами экспериментов. АДМ является классической и проверенной на большом количестве экспериментов, поэтому ПЧМ, проходило сравнение как с результатами эксперимента, так и с результатами аддитивной модели смеси. Показано, что упругие модули гетерогенного материала, построенного прямым численным моделированием в условиях нагружения плоской ударной волной без учета разрушения, соответствуют с погрешностью менее 5% данным эксперимента и результатам аддитивной модели смеси, как для «микро», так и для «макро» включений, что показано на примере скорости ударной волны в гетерогенной среде Ni+Ti, показанной на рисунке 1, на рисунке D – скорость ударной волны, u_p – массовая скорость.

Поскольку граничные условия между матрицей и включением могут играть решающую роль при моделировании процесса нагружения, рассмотрены несколько вариантов граничных условий между матрицей и включениями для прямого численного моделирования нагружения гетерогенного материала с макровключениями и показано, что параметры за фронтом плоской ударной волны в гетерогенном материале, построенном прямым численным моделированием при всех рассмотренных типах граничных условий между матрицей и включениями, отличаются от результатов аддитивной модели смеси не более чем на 2%, без учета разрушения.

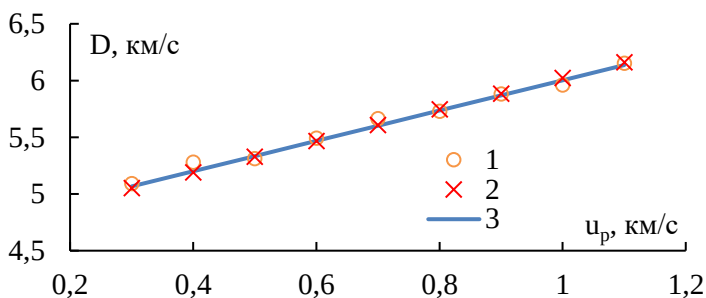


Рисунок 1 – Зависимость скорости ударной волны в гетерогенной среде Ni+Ti от массовой скорости частиц при объемной концентрации 50%: 1 – ПЧМ, 2 – экспериментальные данные, 3 – АДМ

Вторая глава посвящена определению свойств гетерогенного материала за фронтом ударной волны с учетом разрушения. Поскольку «классические» модели гетерогенного материала, такие как АДМ смеси, требуют экспериментальные параметры разрушения, возникает потребность в моделях, не требующих предварительных экспериментов с исследуемыми гетерогенными образцами. Для решения этого вопроса в главе рассмотрена идентификация динамических параметров гетерогенных материалов, на основе откольного нагружения. В отличие от других динамических экспериментов, где определение механизма разрушения затруднено, данный эксперимент позволяет точно выделить предельное откольное напряжение. Успешное моделирование подобного эксперимента позволит определять предельное откольное напряжение гетерогенного материала, если есть результаты экспериментов по нагружению гомогенных составляющих гетерогенного материала.

Геометрическая модель задачи об откольном нагружении имеет следующий вид: налетающая пластина из алюминия с заданным диаметром и толщиной, налетает с начальной скоростью на образец гетерогенного или гомогенного материала с заданным диаметром и толщиной, перед которым может быть установлена дополнительная алюминиевая экранирующая пластина с геометрическими параметрами аналогичными налетающей пластине.

Поскольку для достоверного исследования гетерогенного материала необходимо верифицировать параметры составляющих гетерогенного материала, в данной главе проведено сравнение результатов моделирования откольного нагружения гомогенных

составляющих (WC, Co, Ti, Ni), показанное на рисунке 2. Результаты моделирования соответствуют результатам экспериментов в пределах погрешности до 10%.

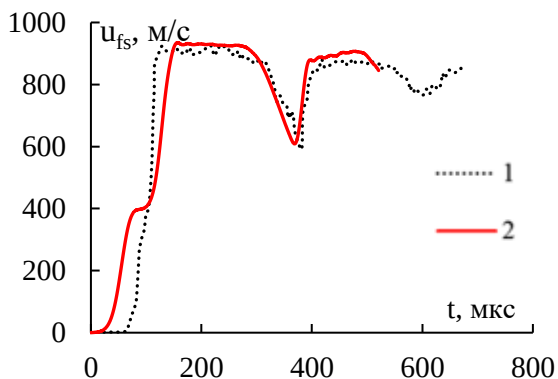


Рисунок 2 – Сравнение экспериментальных данных с расчетом:
Титан (Ti) скорость налетающего диска $u_p = 660$ м/с.
1 – экспериментальные данные; 2 – результаты расчета

Предполагая, что модель гомогенного материала неплохо описывает откольные разрушения, рассмотрены модели гетерогенных материалов из смеси WC+Co с объемным содержанием кобальта от 2% до 12% и смеси Ni+Ti с объемной долей 50% никеля. Рассмотрены смеси построенные при помощи прямого численного моделирования и аддитивной модели смеси с параметрами разрушения из экспериментов Г.И. Канеля с соавторами. Для более глубокого сравнения, проведены расчеты не только с математическими моделями гетерогенного материала, но и с параметрами гетерогенного материала из эксперимента. Эта модель в дальнейшем обозначена как «модель сплава». Сплав в нашей задаче – это, модель с заданными эффективными физико-механическими параметрами, как гомогенного материала. То есть с применением полученного из эксперимента уравнения состояния и механическими параметрами.

Сравнение результатов прямого численного моделирования, аддитивной модели смеси и модели сплава показало, что ПЧМ воспроизводит профиль скорости свободной поверхности с результатами, отклоняющимися от экспериментальных данных менее 10% , как показано на рисунке 3.

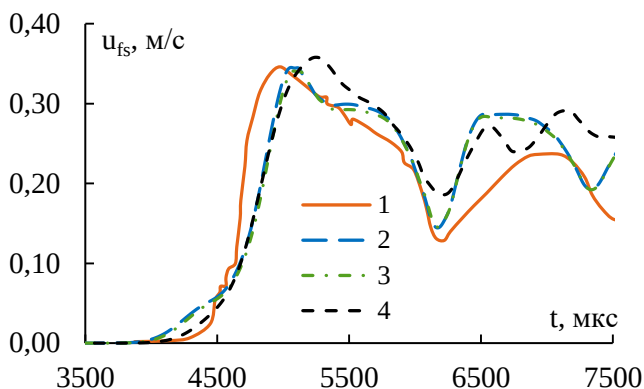


Рисунок 3 – Сравнение различных моделей с экспериментальными данными для смеси Ni+Ti (объемная концентрация 50%):

1 – экспериментальные данные; 2 – модель сплава; 3 – АДМ;
4 – ПЧМ

На основе полученных результатов прямого численного моделирования проведена аппроксимация предельного откольного разрушения гетерогенного материала, а именно смеси WC+Co с объемным содержанием кобальта от 2% до 12% и Ni+Ti с объемным содержанием титана 50%. В результате аппроксимации впервые получена зависимость предельного откольного напряжения гетерогенного материала от объемной концентрации его компонент:

$$\sigma_{sp_mix} = \frac{\sum_{i=1}^k \rho_{0i} \beta_i \sigma_{sp_i}}{\rho_{0mix}} . \quad (1)$$

Полученное соотношение (1) проверено на результатах экспериментов со смесями WC+Co, показанное на рисунке 4, Ni+Ti и (95%) INCONEL 625 + (5%) NiTi+TiB₂. Среднее отклонение от результатов экспериментов составило 14%. Наибольшее отклонение от результатов эксперимента было получено при нагружении WC+12%Co составившее 18%. Полученное соотношение позволяет получить предельное откольное напряжение гетерогенного материала, если имеются предельные откольные напряжения для компонент этого гетерогенного материала.

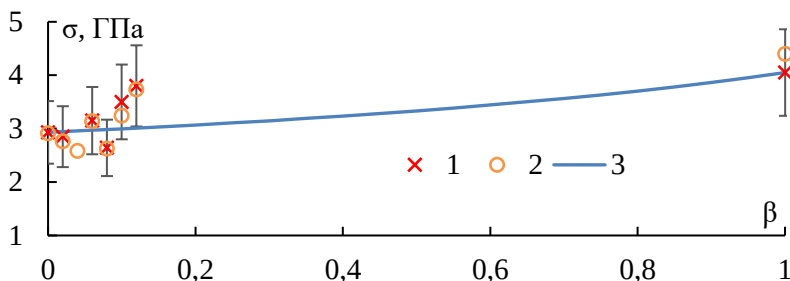


Рисунок 4 – Зависимость предельного откольного напряжения от объемной концентрации для смеси WC-Co: 1 – экспериментальные данные, 2 – ПЧМ, 3 – Расчетная формула (1)

Проведен анализ предельных деформаций разрушения гетерогенного материала. Получено соотношение для определения предельных деформаций разрушения гетерогенного материала на основе концентрации его компонент из определения аддитивной модели смеси:

$$\varepsilon_{mix} = \sum_{i=1}^k \alpha_i \varepsilon_i . \quad (2)$$

Для оценки достоверности соотношения рассмотрена задача о пробитии высокотвердым стержнем гетерогенной преграды конечной толщины. Преграда выполнена из смеси стали 10 и сплава Al7075. Концентрация алюминия менялась от 10% до 90%. Поведение нагруженного гетерогенного материала описано прямым численным моделированием и аддитивной моделью смеси с параметрами разрушения рассчитанными из соотношений (1) и (2). Результаты взаимодействия стрержня с пластиной показаны на рисунке 5 в виде баллистических кривых, построенных по аппроксимации Ламберта-Джонасана.

Таким образом показано, что результаты аддитивной модели смеси с определенными из соотношений параметрами разрушения повторяют результаты прямого численного моделирования в интервалах погрешностей 5%. Этот вывод свидетельствует о возможности описания предельных деформаций соотношением (2).

В главе показано, что результаты моделирования нагружения металлической сферой гетерогенного материала при использовании прямого численного моделирования и аддитивной модели смеси имеют результаты, отличающиеся между собой не более 15% для всех

рассмотренных концентраций. Также показано, что результаты моделирования соответствуют единой моделирующей кривой Н.А. Златина, построенной для отношения объемов кратера к налетающей сфере, показанное на рисунке 6:

$$E_k = \frac{V_c}{V_s} Y_t. \quad (3)$$

Таким образом показано, что при помощи соотношения (3) и задачи о нагружении металлической сферой гетерогенного материала можно определить динамический предел текучести гетерогенного материала.

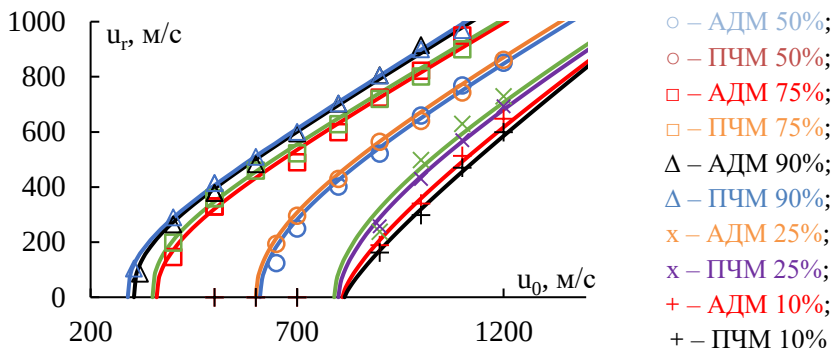


Рисунок 5 – Баллистические кривые для преграды из стали с разной концентрацией Al7075;

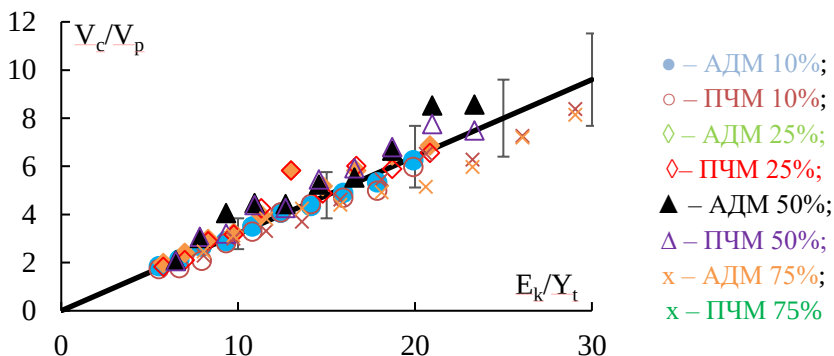


Рисунок 6 – Зависимость работы напряжений на пластических деформациях от кинетической энергии налетающей сферы для рассмотренных концентраций Al7075 в гетерогенной преграде

Третья глава посвящена применению гетерогенных материалов в защитных конструкциях. Рассмотрены прикладные задачи, посвященные динамической нагрузке гетерогенного материала:

Первой задачей рассмотрено влияние компоновки пакета индивидуальной защиты на снижение ударного воздействия. В качестве объекта исследования была рассмотрена многослойная преграда: первый и последний слой выполнены из кевлара, а между ними располагались слой керамики и слой стали (керамика была спереди слоя стали) или гетерогенная преграда с заданным распределением керамики в стальной матрице. Во всех рассмотренных случаях объемная концентрация керамики составила 50%. За слоем из преграды устанавливался слой, моделирующий тело человека с элементами костной ткани. Нагружение производилось при помощи высокотвердого стержня с носиком в виде усеченного конуса с начальной скоростью 400 м/с. Результаты моделирования показали, что применение гетерогенных пластин в защитных пакетах позволяет снизить давление, приходящее в имитатор тела человека вдвое по сравнению с пакетом из слоеной пластины при скоростях до 400 м/с.

В последующей задаче исследовано влияние скорости сноса на критические углы рикошетирующего удлинённого стержня от гетерогенной преграды. Рассмотрено нагружение металлокерамической преграды (Al5083 + Al2O3) удлинённым стальным стержнем. Для этой задачи объемная концентрация керамики составила 40%. Поскольку для оценки критического угла рикошетирующего существуют соотношения, предложенные в работах Тейта и Розенберга для однородных материалов, возникает вопрос их применимости в случае нагружения гетерогенного материала. Результаты моделирования показали, что скорость сноса влияет на критический угол рикошетирующего, а именно при сносе в направлении преграды – повышается критический угол, а при сносе от преграды – снижается. А также показано, что соотношения, определяющие критический угол рикошетирующего для однородных материалов применимы для гетерогенных материалов.

Последние задачи посвящены повышению стойкости защитных элементов космических аппаратов при взаимодействии с микрочастицами космического мусора. Рассмотрена модификация защиты Уипла путем добавления стального армирования в алюминиевые пластины при помощи технологии PrintCast. В частности, впервые решена задача о моделировании объемно армированного металломатричного композита с учетом разрушения. Геометрическая модель представляла собой пластину конечной толщины из алюминия

A356 и объемного армирования в виде перекрестия цилиндрических включений из стали 316L, показанная на рисунке 7. Объемная доля стали составила 38%. Сферическая частица была выполнена Al2017-T4 и обладала массой 10 мг. Скорость взаимодействия частицы и преграды 6 км/с.

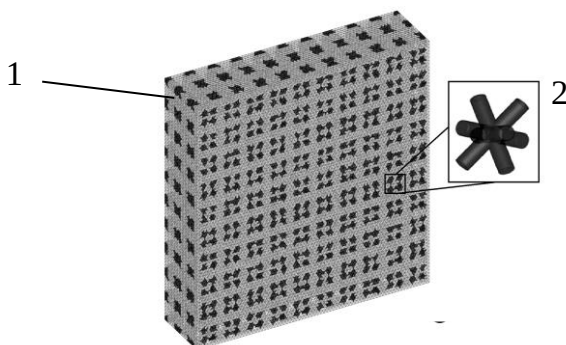


Рисунок 7 – Геометрическая модель армированной преграды:
1 – матрица из А356; 2 – включения из 316L;

На основе экспериментальных результатов, полученных другими авторами, проведена валидация параметров разрушения требуемых материалов. Проведено сравнение нагружения гомогенных пластин из стали и алюминия, слоенных пластин и объемно армированного металлматричного композита. Результаты прямого численного моделирования сходились с результатами эксперимента в пределах 10% погрешности. Результаты моделирования и экспериментов показали, что характерной чертой данного экрана является расслоение между стальными включениями и алюминиевой матрицей. Но что чрезвычайно важно - макрооткол на тыльной стороне армированного экрана отсутствует, как показано на рисунке 8.

Убедившись в успешном использовании объемно армированного металлматричного композита, необходимо оценить применения других гетерогенных структур при условии сохранения массогабаритных характеристик. Для полноты обзора конфигураций защитных экранов рассмотрены дополнительно следующие варианты гетерогенных экранов, которые возможно создать на основе существующих аддитивных технологий:

- экран с равномерным распределением стали по всему объему экрана;

- экран с прямым градиентом распределения стали по объему экрана;
- экран с обратным градиентом распределения стали по объему экрана.

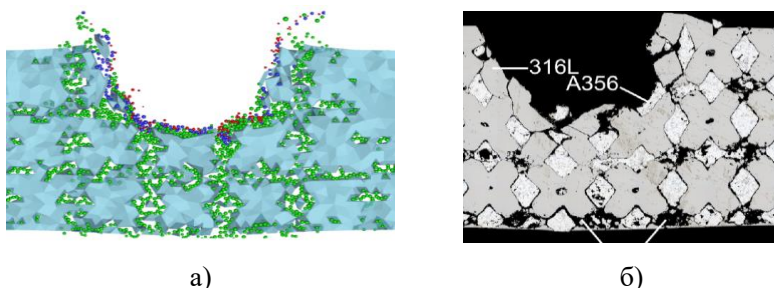


Рисунок 8 – Сравнение формы кратеров в армированной пластине: а) трехмерный расчет; б) Оптическая микрофотография ударной плоскости в поперечном сечении

Показано, что гетерогенные экраны ведут себя, практически, аналогично двуслойным экранам. Гетерогенные экраны с градиентным распределением стали являются аналогами слоеных преград, но с непрерывным переходом от одного материала к другому без явно выделенных границ раздела. Равномерное распределение стали по алюминиевой матрице повышает эффективный предел текучести, что положительно сказывается на уменьшении объема кратера, но присутствие зерен алюминиевой матрицы на тыльной стороне экрана приводит к формированию потока мелких частиц. В результате показано, что градиентная преграда, объемно-армированный металлматричный композит демонстрирует стойкость к воздействию микрочастиц, не допуская образования запреградного облака осколков.

Результаты нагружения объемно армированного металлматричного композита натолкнули на вопрос стойкости данного материала при нагружении артиллерийскими скоростями около 1 км/с. Для сравнения баллистической стойкости рассмотрена задача о нагружении удлинённым стержнем описанных выше гетерогенных преград и преград с несколькими формами стальных включений. Рассмотренные формы включений, помимо объемного армирования перекрестием цилиндров: цилиндрические, сферические и полукресты. В результате нагружения удлинённым стержнем описанных

гетерогенных и слоенных преград показано, что при взаимодействии объемно-армированного металломатричного композита с высокоплотным удлиненным стержнем при скоростях 0.8-1.6 км/с, повышается баллистический предел на 60% в сравнении с двуслойной преградой, как показано на рисунке 9.

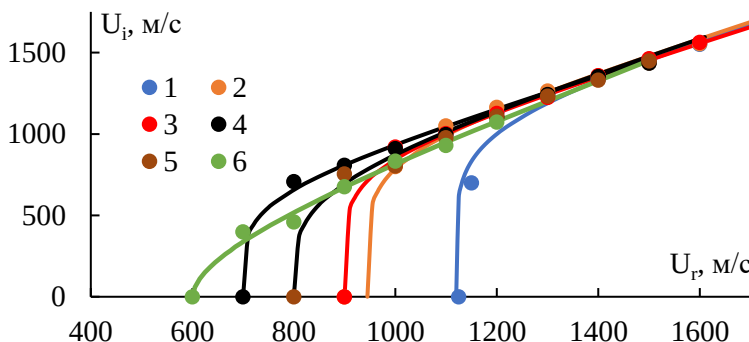


Рисунок 9 – Баллистические кривые для композита, армированного включениями: 1 – объемное армирование; 2 – обратное перекрестие; 3 – прямое перекрестие; 4 – сферические включения; 5 – цилиндрические включения; 6 – слоенная преграда

Заключение

В диссертации проведено исследование реакции гетерогенных материалов на различные типы динамического нагружения. Рассмотрены как металлокерамические материалы, так и металломатричные композиты. На основании проделанной работы сделаны следующие обобщения и выводы:

1. Показано, что упругие модули гетерогенного материала, построенного прямым численным моделированием в условиях нагружения плоской ударной волной без учета разрушения, соответствуют с погрешностью менее 5% данным эксперимента и результатам аддитивной модели смеси.

2. Граничные условия между границей основы и включениями не оказывает существенного влияния на ударно-волновые процессы при взаимодействии с плоской волной.

3. Показано, что параметры за фронтом плоской ударной волны в гетерогенном материале, построенном прямым численным моделированием при всех рассмотренных типах граничных условий между

матрицей и включениями, сходятся с результатами аддитивной модели смеси в пределах погрешности 2%, без учета разрушения.

4. Показано, что скорость и величина затухания ударного импульса зависит от размера включений. Малые включения, сравнимые с толщиной фронта волны сжатия, не рассеивают импульс.

5. Показано, что керамические включения, с размерами сильно превышающими толщину фронта ударной волны, оказывают существенное влияние на увеличение длины импульса в силу многократного отражения волн от границ материалов с разными свойствами.

6. Показано, что параметры за фронтом плоской ударной волны в неразрушающемся гетерогенном материале, построенном прямым численным моделированием при всех рассмотренных типах граничных условий между матрицей и включениями, отличаются от результатов аддитивной модели смеси не более чем на 2%.

7. Впервые получено соотношение для величины предельного откольного разрушения гетерогенной среды на основе предельных напряжений откола и концентрации ее компонент, позволяющее предсказать величину предельного откольного разрушения гетерогенной среды с погрешностью не более 20%.

8. Впервые получено в численном эксперименте соотношение для величины предельной деформации разрушения гетерогенной среды на основе предельных деформаций разрушения и концентрации ее компонент.

9. Показано, что применение гетерогенных пластин в защитных пакетах позволяет снизить давление, приходящее в имитатор тела человека вдвое по сравнению с пакетом из слоеной пластины при скоростях до 400 м/с.

10. Впервые проведено прямое численное моделирование высокоскоростного нагружения объемно-армированного металломатричного композита из комбинации 316L+A356 с учетом разрушения. Результаты моделирования отклоняются от экспериментальных данных менее 10%.

11. Показано, что градиентная преграда, объемно-армированный металломатричный композит демонстрирует стойкость к воздействию микрочастиц, не допуская образования запреградного облака осколков.

12. Показано, что при взаимодействии объемно-армированного металломатричного композита с высокоплотным удлиненным стержнем при скоростях 0.8-1.6 км/с, повышается баллистический предел на 60% в сравнении с двуслойной преградой.

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях, рекомендованных ВАК при МОиН РФ

1. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И. Стойкость керамик к удару в численном эксперименте // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61. № 5 (363). С. 190-198.
2. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И., Бузюркин А.Е. Эволюция ударного импульса в гетерогенной упругопластической среде // Прикладная механика и техническая физика. 2021. Т. 62. № 3 (367). С. 147-157.
3. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И. Моделирование процессов группового удара по гетерогенной преграде конечной толщины // Журнал СФУ. Математика и физика. 2021. Т. 14. № 6. С. 700-711.
4. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И., Бузюркин А.Е. Определение эффективного динамического предела текучести гетерогенных материалов // Прикладная механика и техническая физика. 2024.
5. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И., Бузюркин А.Е. Идентификация свойств и величины предельного откольного разрушения гетерогенных материалов в динамических процессах // Физическая мезомеханика, 2024, т. 27, № 1. С. 64-80.
6. **Краус А.Е.**, Краус Е.И., Шабалин И.И., Бузюркин А.Е. Сравнение реакции гомогенной среды на динамическое воздействие одиночного и сегментированного стержней // Журнал СФУ. Математика и физика. 2024. Т. 17. №1. С. 115-125.

В изданиях, индексируемых в базах данных WoS/Scopus

1. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I., A Heterogeneous Medium Model and Its Application in a Target Perforation Problems // Multiscale Solid Mechanics, 2021, Vol 141, pp. 289-304. (Q4)
2. Fomin V.M., **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I., Buzyurkin A.E. Accounting for functions of distribution of mechanical properties of metals in dynamic processes of deformation and destruction of barriers // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. –2022. –Vol. 95 No. 7. –P. 1625–1633. DOI: 10.1007/s10891-022-02631-7 (Q2)
3. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I. Reactor 3D software performance on penetration and perforation problems // Advanced Structured Materials. –2023. –Vol. 176. –P. 83-101. DOI: 10.1007/978-3-031-17073-7_6 (Q4)
4. **Kraus, A.**; Buzyurkin, A.; Shabalin, I.; Kraus, E. Numerical Modelling of High-Speed Loading of Periodic Interpenetrating Heterogeneous Media with Adapted Mesostructure. // Appl. Sci. 2023, 13, 7187. DOI: 10.3390/app13127187 (Q2)
5. **Kraus A.E.** and Shabalin I.I. Comparative Analysis of Wave Distribution in Layered and Heterogeneous Continuous Media // AIP Conference Proceedings. Vol. 2017, AIP Publishing, 2018. 030166p. DOI: 10.1063/1.5065260.;

6. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., and Shabalin I.I. Simulation of the interaction of hardened steel core with heterogeneous elements of body armor // AIP Conference Proceedings. Vol. 2125, AIP Publishing, 2019. 030067p. DOI: 10.1063/1.5117449.;
7. **Kraus A.**, Kraus E., Shabalin I. Modelling of the processes of impact of a projectile with elements of individual defense //EPJ Web of Conferences. – EDP Sciences, 2019. – T. 221. – C. 01021.
8. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I. Modelling the destruction process of a thermal reactor by man-made space debris impact //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1404. – №. 1. – C. 012027.
9. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I. Numerical simulation of the high-speed interaction of a spherical impactor with a system of spaced heterogeneous plates //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2019. – T. 1404. – №. 1. – C. 012026.
10. **Kraus A.E.**, Kraus E.I., Shabalin I.I. Perforation of the cermet plates with various forms of ceramic grains by a steel projectile // AIP Conference Proceedings: High-Energy Processes in Condensed Matter (HEPCM–2020): Proceedings of the XXVII Conference on High-Energy Processes in Condensed Matter, dedicated to the 90th anniversary of the birth of R.I. Soloukhin (Novosibirsk, 29 Jun. – 3 Jul. 2020). –S.I.: AIP Publishing, 2020. –Vol. 2288. –P. 030017(8).
11. **Kraus, A.**; Buzyurkin, A.; Shabalin, I.; Kraus, E., Kravchenko A.K. Comparison of heterogeneous material models for solving impact spall fracture problems //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – T. 2899. – №. 1.
12. **Kraus, A.**; Buzyurkin, A.; Shabalin, I.; Kraus, E., Kravchenko A.K. Influence of sliding vector of long rod on ricochet from heterogeneous plates //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2023. – T. 2899. – №. 1.

Ответственный за выпуск
КРАУС Александр Евгеньевич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ
МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Подписано к печати 23.09.2024 г. Печать цифровая
Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16
Тираж 100 экз. Заказ №6020

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, г. Новосибирск, ул. Институтская 4/1
Тел.: 8 (383) 330-26-98