

Сведения о выполненных работах в 2016 году
по проекту «Теоретико-экспериментальное исследование взаимодействия и
способов защиты элементов наземных объектов и космических аппаратов от
высокоскоростных ударников»,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 16-19-10264

Руководитель канд. техн. наук Пашков Сергей Владимирович

Проведено моделирование процессов деформации и повреждения модельных объемов высокопрочных нанокомпозитов на основе ZrB₂-B₄C. Показано, что разрушение нанокомпозита ZrB₂-B₄C при воздействии ударной волны происходит в результате протекания двух разных процессов имеющих существенно различающиеся характерные времена. К наиболее быстропротекающим процессам относится процесс межкристаллитного хрупкого разрушения. Более медленными являются процессы роста и слияния микроповреждений и раскрытия микротрещин. Развитие трещин сопровождается релаксацией удельной внутренней энергии. Закономерности зарождения микротрещин и разрушения на мезоскопическом уровне не зависит от шага пространственной сетки и соответствующих значений шага по времени.

Полученные в расчетах изменения во времени интенсивности эффективных напряжений были использованы для получения аппроксимационных зависимостей макроскопической прочности керамических материалов при сжатии от логарифма усредненных скоростей деформации на мезоскопическом уровне. Для построения аппроксимационных зависимостей макроскопической прочности керамических материалов при сжатии от скорости деформации использован подход, в рамках которого предложено использовать безразмерные симплексы и комплексы.

Представлены результаты исследования механического поведения новых типов высокопрочных композитов системы ZrB₂-B₄C при интенсивных динамических воздействиях. На основе разработанной вычислительной модели определены критические напряжения разрушения при сжатии в диапазоне скоростей деформации от 0.001 до 106 с⁻¹. В трехмерной постановке проведено компьютерное моделирование деформации и разрушения на мезоскопическом уровне структурированного объема ZrB₂-B₄C. Установлено, что при высокоскоростной деформации разрушение нанокомпозита носит квазихрупкий характер и обусловлено зарождением и ростом множественных микротрещин. Трещины на мезоскопическом уровне в волне сжатия формируются вблизи пор и в пространстве между упрочняющими частицами.

Показано, что зависимости нормированного предела прочности при сжатии ZrB₂ керамики и нанокомпозитов ZrB₂-B₄C, ZrB₂-SiC от логарифма нормированной скорости деформации, могут быть описаны степенной зависимостью в диапазоне скоростей деформации от 0.001 до 106 с⁻¹. Для прогнозирования динамических

пределов прочности в зависимости от скорости деформации в диапазоне температур до 0.5 Tm предложено использовать соотношение в которых нормирующие параметры определяются с учетом зависимостей от температуры модуля Юнга, параметра трещиностойкости K_{1C}, массовой плотности.

Проведены экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения многослойных композитов Ti – Al₃Ti при взаимодействии с ударниками. На баллистическом стенде испытывались образцы, полученные методом реакционного спекания под давлением.

В ходе выполнения проекта проведено численное исследование разрушения многослойных композитов титан – триалюминид титана. Предложена модель разрушения широкодиапазонного типа, описывающая процесс хрупкого разрушения материала (керамики, интерметаллиды, стекла) как при относительно низких скоростях нагружения (скорости соударения порядка нескольких сотен м/с), так и при достаточно высоких (порядка нескольких тысяч м/с). Модель учитывает возможность разрушения материала при превышении в ударной волне предела упругости Гюгонио, использует степенную зависимость прочностных характеристик материала (динамического предела текучести) от достигнутого уровня поврежденности.

При математическом описании задачи использованы модель повреждаемой среды, модель разрушения активного типа, модели поведения среды, учитывающие изменение динамического предела текучести, влияние температуры, модель эрозионного разрушения.

Тестирование модели проводилось методом сравнения с экспериментальными данными, полученными в Sandia National Laboratories [Grady D.E. and R.L. Moody. 1996. Shock compression profiles in ceramics. Sandia National Laboratories Technical Report, SAND96-0551].

В рамках договора со сторонней организацией (Томский научный центр СО РАН, г. Томск) № 2-НИР от 15 июля 2016 г. «Синтез многослойных металло-интерметаллидных композитов различными методами с определением их элементного и фазового состава» выполнены следующие работы; получены результаты экспериментальных исследований процессов синтеза многослойных металло-интерметаллидных композитов различными методами с определением их элементного и фазового состава. Рассмотрено четыре метода получения слоистого композиционного материала системы Ti-Al₃Ti: тепловой взрыв, реакционное спекание, реакционное прессование, сварка взрывом + спекание. Исследована микроструктура и фазовый состав образцов рентгенофазовым, микрорентгеноспектральным и металлографическим методами. Показана возможность получения требуемой многослойной композиции всеми четырьмя способами.

Доработан программный комплекс PS300, используемый для численного моделирования динамического разрушения. Объектная модель материала,

используемая для описания его реологии, уравнения состояния, эволюции поврежденности и прочностных характеристик, дополнена новым метаклассом, описывающим модель Джонсона-Холмквиста-2 (JH2) повреждаемого хрупкого тела. Поскольку в классическом виде модель JH2 описывает исключительно дробление в волне сжатия, в тестовых расчётах были проанализированы все ситуации, в которых классическая модель теряет смысл (отрицательные значения под знаком степени и т.д.). Для данных ситуаций, уравнения, входящие в модель JH2, были скорректированы исходя из условия непрерывности.

На базе нового метакласса объектной модели материала, созданы классы, описывающие с помощью модели JH2 такие материалы, как стекло и керамика. Материалы, настроенные на модель JH2, были использованы при численном моделировании задач высокоскоростного соударения (1,5-3 км/с) алюминиевого шарика о хрупкую преграду. Расчёты подтвердили, что наличие в модели JH2 кинетики роста поврежденности даёт более адекватный характер дробления (по сравнению с классической моделью хрупкого тела с мгновенным разрушением по деформационному критерию).

Проведена разработка многомасштабного SPH-метода для расчета упруго-пластических течений. Ожидаемый результат - повышение пространственного разрешения SPH в трехмерных задачах в 2-3 раза по сравнению с известными вариантами метода при равных затратах памяти и времени счета. Разработан и реализован вариант метода SPH, использующий тензорный параметр сглаживания. При задании функции сглаживания в оригинальном SPH она обладает сферической симметрией. Очевидно, что ее область поддержки и распределение значений не учитывают деформацию среды. Так же не учитывается возможность того, что вдоль какого-либо из направлений расчетные точки будут расположены плотнее, чем вдоль других направлений. В ходе разработки многомасштабного SPH-метода для расчета функции сглаживания предложено использовать локальную деформируемую систему координат, задаваемую тремя векторами, формирующими матрицу коэффициентов. При таком подходе функция сглаживания принимает специальный вид. Эволюция параметра сглаживания определяется деформацией и поворотами среды. Начальные значения векторов определяются соотношением, где скалярный параметр, определяется таким образом, чтобы среднее количество соседей у узлов лежало в пределах 12-20. При таком количестве соседей процедура восстановления узловой согласованности позволяет обеспечить аппроксимацию пространственных производных первого порядка точности, при этом сохраняя время расчета в разумных пределах.

При высокоскоростном соударении взаимодействующие тела подвергаются сжимающим деформациям в одном направлении и растягивающим в другом, при этом плотность распределения частиц вдоль направления сжатия растет, а в направлении растяжения падает. Это приводит к схемному нарушению сплошности среды (эффект численного разрушения). Использование тензорного параметра сглаживания позволяет проводить расчеты с малыми эквивалентными

соотношениями, даже для случаев больших деформаций (сотни процентов), без схемного разрушения. Побочным эффектом такого подхода является менее выраженная неустойчивость при растяжении (*tensile instability*). В целом, использование тензорного параметра сглаживания, явно учитывающего изменение линейных масштабов по направлениям, позволило снизить в несколько раз количество соседних узлов, необходимое для устойчивого расчета больших деформаций методом SPH, что привело к соответствующему повышению скорости расчетов при сравнимой точности.

Проведена модернизация экспериментального стенда для обеспечения мобильного монтажа любой из, имеющихся многоступенчатых легкогазовых установок в соответствии с задачей эксперимента. В нашем случае имеется возможность воспользоваться преимуществами диафрагменной установки (высокий рост энтропии рабочего газа, отсутствие поршня и др.) и исключить недостаток – нестабильность раскрытия диафрагмы с помощью рассекателя. Наиболее рациональной схемой метания в рамках условий данного проекта представляется диафрагменная установка со свободным метанием элемента. Для моделирования в лабораторных условиях высокоскоростных взаимодействий мелких частиц различной природы с образцами конструкционных материалов космической техники был создан стенд, на котором проводились исследования по разработке средств защиты стеклянных деталей космических аппаратов – иллюминаторов, линз оптических приборов и т.п. от воздействия микрометеоритов и космической пыли. В отличие от классической схемы в разгонный ствол данной установки поменяется сразу много мелких ударников объединённых в тонкостенный легкоразрушаемый контейнер из тонкой бумаги. При выстреле, после прорыва диафрагмы поток метаемого газа разрушает стенки контейнера и увлекает за собой ударники, разгоняя их вдоль ствола.

Результаты исследования процессов взаимодействия преград из стекла со сферическими ударниками. Исследование воздействия космической пыли на иллюминаторы космических аппаратов проводились на трехступенчатой пневмо-легкогазовой (пневмо-ЛГУ) баллистической установке. Для реализации на экспериментальном стенде НИИ ПММТГУ выбрана схема трехступенчатой ЛГУ с использованием сжатого газа. В трехмерной лагранжевой постановке рассматривался процесс высокоскоростного соударения элементов из стекла космических аппаратов со сферическими ударниками, моделирующими осколки космических тел и искусственных объектов. Задача решалась с учетом вероятностного характера дробления материала взаимодействующих тел. Предложенный в работе подход к решению задач фрагментации позволяет в наиболее полной, с физической точки зрения, трехмерной постановке воспроизводить процессы пробития преград высокоскоростными элементами.

Предложенные подходы к численному моделированию взаимодействия частиц космического мусора и элементов космических аппаратов позволяют рассчитывать разрушение и фрагментацию стеклянных космических аппаратов в трехмерной постановке при высокоинтенсивном нагружении.

Рассматривалось взаимодействие ударников с метаемыми взрывом группами пластин. При контакте с ними деформация и разрушение ударников снижает их проникающую способность и уменьшает вероятность поражения бронеобъекта. Результаты расчетов показали, что воздействие группы пластин приводит к снижению вероятности поражения защищаемой преграды. Наиболее эффективно метание пластин с вектором скорости, направленным под углом 45° к поверхности последних.

В трехмерной лагранжевой постановке рассматривался процесс высокоскоростного соударения дискретно-сплошных элементов защиты космических аппаратов со сферическими ударниками, моделирующими осколки космических тел и искусственных объектов. Задача решалась с учетом вероятностного характера дробления материала взаимодействующих тел. Проведена оценка эффективности различных комбинаций сплошных и сеточных пластин в конструкции противометеоритной защиты космических аппаратов, а также защиты от техногенного мусора.

Проведенные расчеты показали различный характер взаимодействия преграды, состоящей из стальной сетки - алюминиевой пластины и преграды из алюминиевой пластины - стальной сетки. В первом случае происходит интенсивное дробление алюминиевого ударника на стальной сетке и движение сформировавшегося осколочного потока и неразрушенной части ударника в направлении сплошной алюминиевой пластины. При взаимодействии фрагментов ударника с алюминиевой пластиной происходит деформирование последней с образованием значительной выпучены в центре, но пробития пластины не наблюдается. Во втором случае происходит пробитие пластины и сильное деформирование ударника без значительного его разрушения.