

Сведения о выполненных работах в 2017 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 численное моделирование высокоскоростной деформации композитов с алюминиевой и магниевой матрицей, упрочненных дисперсными керамическими частицами и 3D - армированной структурой из углеродных волокон и тканых углеродных систем в диапазоне температур от 295К до 150К. Исследованы закономерности упругопластической деформации и повреждения при высокоскоростном растяжении двух типов модельных композиционных материалов – со слоистой структурой тканых углеродных систем, и объемным наполнением короткими углеродными волокнами с неупорядоченной ориентацией.

Разработаны модели представительного объема композиционных материалов с объемной концентрацией упрочняющих элементов структуры от 5 до 25 % с регулярным и стохастическим расположением армирующих элементов.

Предложена модификация физико-математической модели, учитывающей рост сопротивления пластической деформации у магниевой или алюминиевой матрицы с понижением температуры в рассмотренном диапазоне. В предположении, что в диапазоне температур ($0.16 < T/T_m < 0.32$, где T_m – температура плавления матрицы) разрушение носит вязкий характер, для описания закономерностей механического поведения в широком диапазоне скоростей деформации учтен рост повреждений структуры материала при неупругой деформации.

Показано, что при концентрации упрочняющих углеродных волокон до 15 % сдвиговая и откольная прочность стохастически армированных композиционных материалов возрастает на 20 % при понижении температуры от 295 К до 150 К в диапазоне скоростей деформации 10^{*2} - 10^{*4} с-1.

Показано, что предельная деформация до разрушения модельных объемов композитов алюминиевой матрицей с 3D-армированной углеродными волокнами структурой существенно снижается (от ~20 % до ~30 %) при понижении температуры от 295 К до 150 К. Зависимость предельной деформации до разрушения представительных объемов гетерофазных систем с металлической матрицей от температуры имеет нелинейный характер. Нелинейность указанной зависимости обусловлена одновременным протеканием в диапазоне пониженных температур процессов снижения пластичности алюминиевой матрицы и ростом повреждений межфазных границ в системе алюминиевый сплав - углеродное волокно.

Синтезированы образцы металло – интерметаллидных слоистых композиционных материалов (МИСКМ) при повышенных температурах и действии внешней нагрузки. Синтез интерметаллидных слоев реализуется непосредственно в процессе взаимодействия слоев реагирующих компонентов (алюминия и переходных металлов), непрореагировавшие слои которых образуют ударновязкие слои, обеспечивающие сопротивление разрушению интерметаллидных слоев.

Проведены экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения многослойных композитов Ti - Al₃Ti при взаимодействии с ударниками. Условия испытаний: карабин СКС, штатный патрон калибра 7,62 с бронебойным сердечником из высокопрочной стали (твердость по Роквеллу 60 HRC), расстояние до мишени ~0,5 м, $v_0 = 760 \pm 3$ м/с. Мишень – массивная алюминиевая плита, на которую наклеивается тестируемый образец.

Проведено экспериментальное исследование разрушения трехслойной преграды со слоем из высокопрочной керамики. Приведена рентгенограмма процесса пробития сердечником трехслойной конструкции, состоящей из карбида бора B₄C толщиной 5,1 мм и лицевой и тыльной пластин из титанового сплава ВТ4 толщиной 2 мм каждая. На рентгенограмме отчетливо видно, что стальной сердечник пули деформируется в виде гриба симметричной формы, что свидетельствует о сохранении осевой симметрии процесса на начальной стадии взаимодействия пули с преградой. Пластины из титанового сплава деформируются в направлении векторов скоростей разлета осколков керамической преграды от лицевой и тыльной поверхностей, при этом тыльная пластина, очевидно, деформируется в значительно большей степени. Характерной особенностью данного процесса является сохранение направления движения деформированного сердечника пули и в то же время его поворот почти на 90° вследствие асимметрии разрушения керамической преграды. Титановые пластины замедляют процесс разрушения керамической преграды и разлет осколков, что усиливает воздействие на сердечник пули и приводит к значительному повороту. Моделей, описывающих асимметричный характер разрушения высокопрочной керамики, до сих пор не создано. Одним из возможных подходов для создания таких моделей может служить вероятностный подход к описанию прочностных характеристик материалов, развиваемый в данном проекте.

Проведено численное исследование разрушения многослойных композитов. Предложена модель хрупкого разрушения материала (керамики, интерметаллиды, стекла). В отличие от металлов, разрушение в которых возникает при растягивающих нагрузках, при моделировании хрупкого разрушения требуется рассматривать оба этапа нагружения: сжатие и растяжение. В данной модели зависимость динамического предела текучести при моделировании хрупкого разрушения материалов в процессе высокоскоростного нагружения учитывает возможность разрушения (частичного или полного) в ударной волне при превышении предела упругости Гюгонио.

Численно рассматривается задача взаимодействия цилиндрического ударника с многослойной преградой, состоящей из семнадцати композитных слоев титан - триалюминид титана. Материал ударника - вольфрамовый сплав, начальная скорость соударения 900 м/с.

Проведены сравнения многослойных композитов с монолитными преградами из интерметаллида и титанового сплава. Для исследованных условий взаимодействия наиболее эффективной к высокоскоростному удару (отсутствие пробития) является композиционная преграда с отношением слоев триалюминид титана/титановый сплав ≈ 4 .

Исследованы различные критерии разрушения и подходы к описанию поврежденности твёрдых тел, позволяющих моделировать процессы высокоскоростной фрагментации. При численном моделировании задач динамического разрушения часто возникает проблема, что используемые критерии и модели разрушения твёрдых тел не приспособлены для расчета фрагментации и локализации поврежденности.

Рассмотрено дробление хрупких материалов в ударной волне сжатия при высокоскоростном соударении или проникании ударника. Формальное применение скалярных критериев разрушения приводит к чрезмерному дроблению. Введение большого количества трещин в полностью раздробленный материал вносит существенную погрешность и с точки зрения контактного взаимодействия, и с точки зрения устойчивости, и с точки зрения корректного расчета давления в раздробленной зоне.

Предложен подход, основанный на том, что модель накопления поврежденности (критерий потери прочности и разрушения) не связана с критерием образования трещины (поверхности разрушения). Критерий разрушения материала (достижение поврежденностью D в ячейке критического значения) и критерий образования трещин становятся независимыми. При разрушении (например, дроблении) происходит смена «фазы». Разрушенный материал на сжатие работает, как и раньше, на растяжение – давление нулевое. Материал в раздробленной «фазе» считается упруго-пластичным (с минимальным пределом текучести). При «отрицательном» (нулевом) давлении упругих напряжений нет, только вязкостный член. Непосредственно трещины вводятся лишь после существенной локализации деформации, сравнимой с предельной деформацией условно пластичных материалов (порядка 10 %).

Показано, что данная схема хорошо работает не только для дробления в волне сжатия, но и для обычной, локализованной сдвиговой или отрывной трещины. В последнем случае материал также считается разрушенным при достижении поврежденностью критического значения $D > D_{кр}$ и, за счет резкого уменьшения предела текучести, деформации локализуются в трещину.

Реализован вариант метода SPH, основанный на слабой вариационной постановке для динамической задачи соударения упругопластических тел, в котором для повышения

точности интегрирования уравнений движения по времени использовались схемы Рунге-Кутты 2 и 4 порядка. Данный подход позволил снизить колебания энергии системы соударяющихся тел с 4-5 %, характерных для вариационного SPH, до 0,1-0,3 %. Закон сохранения импульса при этом выполнялся строго.

Установлено, что для наиболее распространенных вариантов SPH характерна общая особенность - любая асимметрия в распределении расчетных точек приводит к потере точности в каком-либо виде. Асимметрия может быть связана с наличием градиента плотности для геометрически симметричного расположения частиц (например, в вершинах прямоугольной сетки), может быть связана с наличием SPH-узлов с различной массой, а также отсутствием трансляционной симметрии расположения узлов.

Установлено, для построения функций сглаживания, используемых в SPH, должны использоваться две группы условий: известная из литературы группа условий, необходимых для аппроксимации, и группа условий, необходимых для выполнения схемного аналога теоремы Гаусса-Остроградского.

Разработана процедура, позволяющая из пробной функции сглаживания построить скорректированную функцию, удовлетворяющую дискретному аналогу теоремы Гаусса-Остроградского, которая, однако, не удовлетворяет условиям аппроксимации. Проводится построение алгоритма генерации функций сглаживания, удовлетворяющих обеим группам условий.

Проведена модернизация стенда для исследования процесса деформации и разрушения стержней при ударе в неподвижную стенку, а также установки для исследования процессов углового прессования. Проведена серия экспериментов для алюминиевых стержней при различных скоростях.

Проведена экспериментальная отработка предложенной авторами конструкции стенда для испытания образцов ансамблем высокоскоростных частиц. Продолжены исследования стойкости стекол иллюминаторов космических аппаратов с защитными покрытиями в сравнении с исходными стеклами.

Проведена модернизация стенда для исследования воздействия ансамбля высокоскоростных наночастиц на тонкие фольги. Проведена серия экспериментов по воздействию высокоскоростных наночастиц люминофора на основе европия на тонкие фольги из вольфрама никеля и др.

Проведена экспериментальная отработка оригинального метода разгона мелких ударников и порошков без поддона. Экспериментально подтверждено, что при движении вдоль канала ствола в потоке газа метаемый элемент центруется газодинамическими силами. Для стальных шариков диаметром 4-5 мм получены скорости 2,9...3,1 км/с. Оценки показывают, что для шариков из алюминия скорости превышают 5 км/с, что будет проверено при дальнейших исследованиях.

Конечно-разностный метод и метод SPH использовались для моделирования соударения группы из семи сферических стальных частиц с поверхностью стекла. Показано, что сеточный метод, использующий вероятностный подход к описанию процесса разрушения соударяющихся тел, позволяет более точно рассчитывать области поврежденного и разрушенного при соударении материала по сравнению с методом SPH. Он также более точен при расчете формирования фрагментов разрушенной преграды и учета взаимодействия последних между собой.

Взаимодействие стеклянной пластины со стальным шариком характеризуется интенсивным дроблением материала пластины в кратере и откольными эффектами со стороны тыльной поверхности преграды. Результаты расчетов соударения ледяного шарика со стеклянной пластиной показали, что здесь формируется широкий кратер с умеренной глубиной и также образуется мощный выброс раздробленного материала шарика. На тыльной стороне наблюдаются незначительные откольные повреждения.

Соударение групп из 7 ударников из вольфрамового сплава диаметром 5 мм со скоростью 1000 м/с с двухслойной преградой из стекла и керамики показало, что при ударном взаимодействии происходит интенсивное дробление материала первого слоя из стекла, с частичным его выбросом с лицевой поверхности преграды, и выбивание «пробки» из материала второго, керамического слоя, обладающей остаточной скоростью 520 м/с.

В настоящее время ведутся поиски покрытий из керамики для защиты элементов космических аппаратов из стекла. Приведены расчеты системы керамика - стекло, подверженной ударному нагружению алюминиевым ударником. Приведенные результаты позволяют качественно оценить характер деформирования системы керамика – стекло и провести количественный анализ размеров защитных слоев для различных скоростей соударения и размеров ударников.

Получено, что в случае метания пространственной конфигурации стержней происходит интенсивная фрагментация стержней и ударника. Результаты расчетов, показывают несомненное преимущество этого подхода по сравнению с метанием группы пластин для снижения проникающей способности ударника. Полученные результаты подтвердили, что предлагаемый подход и разработанная численная методика позволяют моделировать процессы защиты преград от пробития высокоскоростными длинными ударниками в широком диапазоне скоростей и углов соударения, исследовать фрагментацию ударников и преград, характер образующихся полей фрагментов.