

Сведения о выполненных работах в 2018 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

Разработан, запатентован (Патент РФ № 2610790) и введён в эксплуатацию стенд на базе легкогазовой установки и мишени для исследования взаимодействия мелких ударников с преградой. Предложенная мишень исключает засорение спутными частицами картины взаимодействия испытываемых образцов материала с мелкими ударниками (с характерными размерами меньше 1 мм). Конструкция мишени позволяет осуществлять взаимодействие с потоком ударников сразу нескольких исследуемых образцов, что позволяет добиться для них идентичности условий эксперимента и существенно сократить количество необходимых опытов.

Разработан эмпирический метод оценки скорости потока мелких ударников основанный на сравнении картин их взаимодействия с экспериментальным и эталонным образцами. В данной методике используется возможность стенда испытывать в одном опыте сразу несколько исследуемых образцов материалов. В мишень, вместо части исследуемых образцов устанавливаются эталонные образцы из различных материалов с хорошо исследованными реологическими свойствами, путём анализа картины взаимодействия ударников с этими эталонными образцами удаётся оценить скорость ударников.

Были выполнены эксперименты по воздействию высокоскоростного потока (4-5 км/с) субмикронных частиц железа на фрагмент иллюминатора космического аппарата.

При метании на легкогазовых установках ударников размерами меньше калибра ствола, традиционно используются поддоны из легких и прочных материалов (фенилон, поликарбонат и т.п.). Отделение (отсечка) поддона является достаточно сложной проблемой. Для проведения таких экспериментов отработаны два способа силового отделения поддона при метании ударников порядка 1 мм.

Еще одним способом решения проблемы с поддоном является так называемое «свободное метание», предложенное и реализованное в НИИ ПММ ТГУ. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что при определенных условиях ударник в виде шара центрируется в стволе газовым потоком и его можно ускорить в стволе без использования поддона. При этом, таким способом можно метать шарики из очень непрочного материала. В процессе экспериментальных исследований удалось ускорить шарик из силикогеля диаметром 1,2 мм. Недостатком такого способа является сложность измерения дульной скорости.

Было выполнено моделирование взаимодействия микрометеорита с запатентованным авторами защитным противометеорным экраном в виде гофрированной стальной сетки (Патент на изобретение № 2623782 «Экран для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космической среды»). Проведено сравнение эффективности нескольких вариантов экранов равной удельной массы и продемонстрировано преимущество гофрированных сеточных экранов в качестве противометеорной защиты по всем основным показателям:

- степень разрушения ударника для гофрированного сеточного экрана в два раза выше;
- для подавляющего большинства углов подлёта из наблюдаемого диапазона увеличивается вероятность существенного изменения траектории, увеличивается площадь и время контакта, соответственно, увеличивается передаваемый экрану импульс;
- способ взаимодействия ударника с наклонной сеткой аналогичен эффекту «тёрки», что приводит к усилению фрагментации и уменьшению неразрушенной части ударника;
- преимущественное направление удара под наклоном и увеличение интервала между взаимодействием с отдельными проволоками (струнами) способствует рассеиванию осколочного фронта разрушенной части, что является главной задачей защитного противометеорного экрана;
- для гофрированной сетки существенно уменьшается эффективный просвет, что, при равной приведенной удельной массе, позволяет эффективно улавливать частицы в более широком диапазоне размеров.

В целях дальнейшего сравнения вариантов динамической защиты, исследовано разрушающее воздействие на удлинённый вольфрамовый ударник пространственной конструкции, метаемой навстречу ударнику, представляющей из себя ребристую вольфрамовую пластину.

Было показано, что использование в защите ребристой пластины меняет картину её взаимодействия с ударником. Ребра деформируют ударник с образованием системы волн, с дальнейшим разрушением и рикошетом полученных фрагментов от поверхности преграды. Наблюдаемые в расчетах повреждения преграды незначительны и захватывают только поверхностный слой материала.

Добавление в метаемую конструкцию дополнительной сплошной пластины позволило не только разрушить ударник на отдельные фрагменты, но и существенно отклонить их от поверхности преграды.

Определены границы применимости бессеточных методов в задачах высокоскоростного пробития и соударения. Установлено, что в настоящее время бессеточные методы некорректно обрабатывают поведение хрупких сред в условиях динамических воздействий. Установлено, что причиной такого поведения является нарушение схемного аналога теоремы Гаусса-Остроградского и на сегодня отсутствуют методы эффективного построения функций сглаживания, для которых

бы выполнялся схемный аналог теоремы Гаусса-Остроградского в случае отсутствия трансляционной симметрии в расположении расчетных узлов.

Проведены вычислительные эксперименты по исследованию закономерностей высокоскоростной деформации и развития повреждений композитов с матрицами из магниевых сплавов Mg-Al-Zn и алюминиевого Al-Mg-Si упрочненных углеродными волокнами и частицами карбида кремния, карбида бора, оксида алюминия при интенсивных динамических воздействиях в диапазоне гомологических температур T/T_m от 0.2 до 0.9 ($T_m = \sim 933\text{K}$ – температура плавления матрицы из алюминиевого сплава, и $T_m = 923\text{K}$ для магниевых сплавов). Исследованы закономерности упругопластической деформации и повреждения при высокоскоростном растяжении двух типов модельных композиционных материалов – со слоистой структурой и объемным наполнением короткими углеродными волокнами с неупорядоченной ориентацией либо субмикронными частицами легких керамических соединений из карбида бора, карбида кремния, оксида алюминия. Моделировались процессы деформации и развития повреждений в модельных объемах с концентрацией упрочняющих элементов структуры от 5 до 25 % при воздействии ударных импульсов с амплитудами от 1 до 3 пределов упругости Гюгонио (0.2, 1, 2, 10 ГПа) и начальных температурах 77 К, 295 К, 475 К, 675 К, 875 К.

Разработана модель процесса эволюции повреждений исследованных композитов при интенсивных динамических воздействиях с амплитудами до 10 ГПа.

Развита физико-математическая модель, позволяющая описывать механическое поведение композитов с матрицей из легких сплавов при интенсивных динамических воздействиях в диапазоне гомологических температур от 0.2 до 0.5. В модели учтены механизмы релаксации сдвиговых напряжений, обусловленные развитием пластических деформаций матрицы, зарождением и ростом пор.

Показана устойчивость и сходимость численных результатов моделирования процессов высокоскоростной деформации и динамического разрушения модельных объемов композиционных материалов на мезоскопическом уровне, при соответствующем выборе шага пространственной дискретизации пространственной 3D области и шага интегрирования по времени.

Получены оценки характеристик динамической прочности (пределов упругости Гюгонио, величин откольной прочности) с использованием результатов моделирования отклика структурированных модельных объемов композитов на импульсные нагрузки. Получены зависимости сдвиговой и откольной прочности модельных композиционных материалов с магниевой и алюминиевой матрицей от концентрации и параметров структуры композитов при амплитудах импульсных воздействий от 1 до 3 пределов упругости Гюгонио.

Получены закономерности релаксации упругих предвестников от расстояния при повышенных температурах в композитах с матрицами из сплавов магния и алюминия в зависимости от объемной концентрации упрочняющих элементов. Показано, что

скорость релаксации слабо зависит от температуры. Определены закономерности изменения пределов текучести композитов в диапазоне от 100 до 10000 [1/с] при сжатии, сдвиге и растяжении. Показано, что в указанном диапазоне скоростей деформации зависимости предела текучести от десятичного логарифма от эквивалентной скорости деформации являются нелинейными в диапазоне гомологических температур от 0.2 до 0.5.

Синтезированы образцы металло–интерметаллидных слоистых композиционных материалов (МИСКМ) Ti-Al₃Ti различными методами: тепловой взрыв, реакционное спекание, реакционное прессование (при повышенных температурах и действии внешней нагрузки) и сварка взрывом в комбинации со спеканием. 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, расстояние до мишени ~0,5 м, $V_0 = 760 \pm 3$ м/с. Получены оценки прочностных характеристик образцов МИСКМ Ti-Al₃Ti.

Разработаны математические модели поведения материалов при ударных нагрузках, включающих кинетическую модель зарождения и роста микротрещин активного типа, модель хрупкого разрушения, формирование сети микротрещин, образование поверхностей скольжения, развитие магистральных трещин и фрагментацию материала.

Численно рассмотрена задача взаимодействия цилиндрического ударника с многослойной преградой общей толщиной около 7 мм, состоящей из шести композитных слоев титан - триалюминид титана. Отношение толщины слоя интерметаллида к толщине слоя титанового сплава в композиционном слое составляет ~4/1. Осредненная плотность преграды в данном случае составила 3513,3 кг/м³. Материал ударника – высокопрочная сталь, начальная скорость соударения 2000 м/с. Результаты численного моделирования деформирования и разрушения МИСКМ Ti-Al₃Ti показывают, что с ростом начальной скорости удара возрастает роль ударно-волновых процессов в характере разрушения преграды. В отличие от более низких скоростей удара, при которых больший вклад в характер разрушения многослойной преграды вносит деформационный фактор, действующий в области внедрения ударника, при более высоких скоростях происходит расслоение преграды, вызванное действием волн разгрузки. Формирование областей макроразрушений наблюдается в слоях интерметаллида, в то время как слои из титанового сплава эффективно препятствуют распространению макротрещин.