

Сведения о выполненных работах в 2020 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 Пашков Сергей Владимирович, канд. техн. наук

Одной из актуальных проблем при конструировании космических аппаратов, является повышение эффективности противометеорной защиты и оптимизация ее массы, поскольку переутяжеление конструкции космического аппарата, как правило, недопустимо из-за массовых ограничений, закладываемых при его проектировании. В настоящее время для эффективного решения задачи защиты космических аппаратов от метеорно-техногенных воздействий применяются различные виды защитных экранов, в том числе, в виде металлических сеток или их комбинации с другими материалами. Концепция запатентованного авторами защитного экрана в виде гофрированной металлической сетки (Патент РФ № 2623782 «Экран для защиты космического аппарата от высокоскоростного ударного воздействия частиц космической среды»), объединяет достоинства использования сеточных экранов и наклонных поверхностей. Для исследования стойкости гофрированных сеточных экранов к воздействию высокоскоростных частиц проведено комплексное теоретико-экспериментальное исследование.

С помощью серии численных расчётов показаны повышенные (по сравнению с другими экранами равной удельной массы) защитные свойства гофрированной металлической сетки. За счёт «эффекта тёрки» процент разрушения ударника на подобном защитном экране может увеличиться в несколько раз. Наклон плоскости сетки обеспечивает существенное отклонение вектора скорости фрагментов ударника и сетки, что обеспечивает размазывание запреградного импульса и уменьшает воздействие на защищаемый объект. Чрезмерное увеличение угла гофры приводит к увеличению неразрушенной части микрометеороида, срикошетившей вдоль сетки, поэтому оптимальным является угол наклона гофры порядка 60-70°.

Экспериментально, с помощью легкогазовой двухступенчатой установки была продемонстрирована эффективность гофрированных сеточных экранов. Было подтверждено повышение защитных свойств противометеорного экрана при замене плоской металлической сетки на гофрированную сетку равной удельной массы.

Разработана и реализована численная модель высокоскоростного деформирования и ударного разрушения композитов, армированных волокнами, с учетом конечной силы адгезии волокон и матрицы и с учетом проскальзывания и локального разрушения волокон. Численное моделирование процесса пробития таких композитов показала, что их защитные свойства зависят не только от прочности армирующего волокна и количества волокон на единицу площади сечения, но и от степени адгезии армирующих волокон к матрице.

С помощью численного моделирования и экспериментально установлено, что рост адгезии армирующих волокон к полимерной матрице выше определенного уровня приводит к снижению устойчивости композита к ударному воздействию. Установлено так же, что снижение адгезии ниже определенного уровня так же приводит к снижению устойчивости композита к ударному воздействию. Определено, что для композита РА-6/арамидное волокно, полученного методами 3D-печати с непрерывным армированием, оптимальный диапазон адгезии составляет 0,07-0,3 Н/мм. Таким образом, установлено, что армированные композиты с высокой прочностью в статическом режиме (что достигается повышением адгезии) имеют более низкую стойкость к пробитию скоростными ударниками, чем композиты со средними и низкими характеристиками. Установлены механизмы такого поведения.

Для случая высокой адгезии падение прочности происходит за счет того, что при распространении в материале фронта пластической деформации жестко закрепленные волокна подвергаются большой деформации и быстро разрушаются, после чего перестают оказывать сопротивление разрушению и при ударе высокоскоростной частицы происходит пробитие по типу «пробки».

При малой адгезии падение прочности происходит за счет того, что натяжение волокон сопровождается их проскальзыванием относительно матрицы, за счет чего такие волокна не оказывают значительного сопротивления внедрению ударников. Мягкий и пластичный материал матрицы при этом растягивается и обтекает ударник, что приводит к формированию «прокола» и относительно большому количеству мелких осколков в запреградной области.

Были синтезированы новые образцы металло-интерметаллидных слоистых композиционных материалов (МИСКМ) Ti–AlTi методами реакционного спекания пакета пластин Ti и Al под давлением и сварки взрывом многослойного пакета пластин Ti и Al и последующего реакционного спекания. Дифракционными и оптическими методами исследованы микроструктура и фазовый состав образцов. Определена плотность образцов, измерена микротвердость слоев. Определена продолжительность спекания образцов для полного завершения синтеза интерметаллида. Показана возможность получения требуемой многослойной композиции рассмотренными способами. На баллистическом стенде проведены экспериментальные исследования процессов разрушения МИСКМ Ti–AlTi при взаимодействии с ударниками, получены оценки прочностных характеристик образцов.

Проведено численное исследование разрушения многослойных композитов Ti–AlTi при взаимодействии с ударником при варьировании скорости ударника в диапазоне 760–5000 м/с. Выявлено, что формирование областей макроразрушений наблюдается преимущественно в слоях интерметаллида, в то время как слои из титанового сплава эффективно препятствуют распространению макротрещин. Подобрано рациональное соотношение толщин слоев интерметаллида и титанового сплава с точки зрения баллистической стойкости при высокоскоростном ударе.

Методом численного моделирования проведено исследование закономерностей деформации и разрушения «экстремальных» механических метаматериалов, полученных методами 3D печати, при воздействии ударных импульсов с амплитудами до 1 ГПа.

Проведены исследования закономерностей поглощения энергии ударного импульса слоистыми системами с элементами из пентамодовых метаматериалов. Получены данные о деформациях и временных и энергетических параметрах разрушения титановых пентамодовых метаматериалов, при воздействии ударных импульсов в диапазоне температур от 300 К до 900 К. Получены также оценки характеристик эффективных механических и демпфирующих свойств пентамодового метаматериала с относительной массовой плотностью 3,145 % при скоростях деформации - $20,8 \cdot 10^3$ с⁻¹ и начальных температурах 300 и 900 К. Значения коэффициента диссипации энергии при одноосном динамическом сжатии пентамодового метаматериала на основе альфа титанового сплава оказались в 1,5 раза выше, чем у сплошного аналога. Коэффициент диссипации энергии при одноосном сжатии уменьшается в 1,5-2 раза при повышении начальной температуры от 300 К до 900 К.