

Исследование стойкости защитных материалов к ударному воздействию высокоскоростных частиц



Современные авиационная, ракетно-космическая, военная и энергетическая отрасли предъявляют высокие требования к прочностным характеристикам конструкций, работающих в условиях ударных и взрывных нагрузок. В связи с этим высокоскоростное ударное воздействие частиц на мишени из различных материалов стало одним из направлений исследования стойкости защитных покрытий и конструкций при нагрузках указанного типа [1, 2]. Круг рассматриваемых задач достаточно широк, и, в частности, к нему относится как пробитие брони поражающими элементами, так и построение эффективной и легкой экранной защиты для космических аппаратов, подверженных атаке метеорно-техногенных тел.

В общем случае динамическое взаимодействие ударника с мишенью можно представить в виде класса задач, имеющих различные решения в зависимости от ряда условий: при малых начальных скоростях соударения работы, как правило, проводятся с помощью методов теории упругости; при умеренных – рассматривается режим пластического деформирования материала мишени и ударника; при высоких – учитывается сжимаемость идеальной среды; при сверхвысоких – необходимо дополнительно учитывать испарение, ионизацию и излучение.

Теме высокоскоростного удара для разных диапазонов скоростей посвящено большое количество работ, однако их значительная часть рассматривает взаимодействие на скоростях 5–8 км/с, при которых развивающиеся напряжения многократно превосхо-

дят пределы прочности материалов, и мишень деформируется в соответствии с законами гидродинамики с учетом сжимаемости и сил инерции. Область скоростей до 3 км/с, при которых прочностные характеристики имеют серьезное значение, менее освоена, поэтому получение данных о разрушении различных веществ при соударениях в диапазоне 0,5–3 км/с является экспериментальной задачей, результаты которой востребованы на практике.

Моделирование высокоскоростных столкновений и процессов образования кратеров с использованием современных вычислительных методов представляет собой эффективный способ углубить наше понимание этих сложных явлений. Формирование численных моделей позволяет изучать основные физические параметры в условиях, которые не всегда доступны для опытных работ. Воссоздание подобных алгоритмов

связано с построением или выбором адекватных математических моделей, особенно при широком диапазоне изменений давления, температуры и деформаций [3, 4]. Подбор констант в расчетах для моделей ударника и мишени позволяет добиться наилучшего совпадения с экспериментальными результатами.

Экспериментальное оборудование

Характерной особенностью подобных исследований является сложность разгона ударника до высоких скоростей и регистрации динамики протекающих процессов на малых временных интервалах, а также определение основных параметров воздействия на мишень.

Эксперименты по взаимодействию высокоскоростных ударников с дюралюминиевыми и стальными мишенями проводились

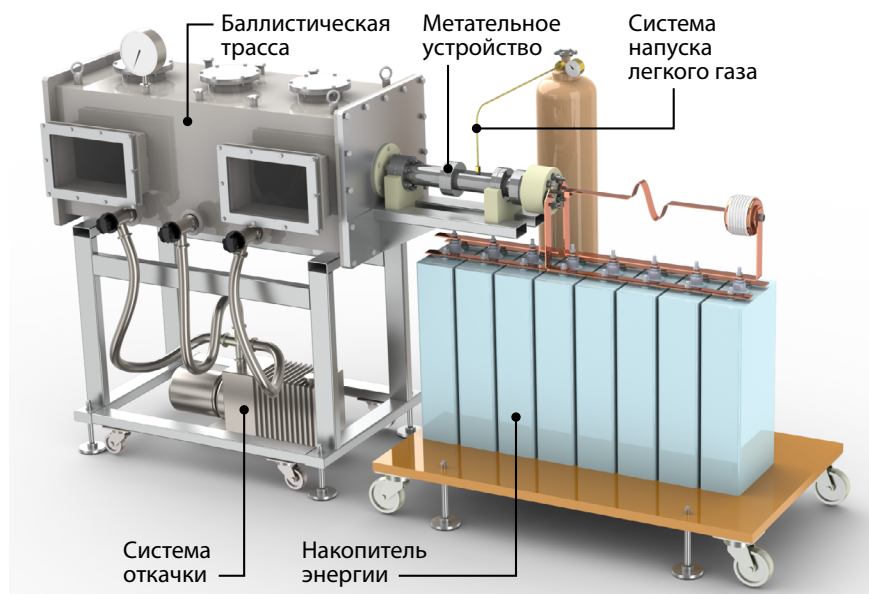


Рис. 1. Изображение экспериментального стенда с основными составляющими системами

на двухступенчатой легкогазовой магнитоплазменной баллистической установке МПК-7 (рис. 1) в Институте тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси [5, 6].

На МПК-7 в рамках реализованных контрактов выполнены следующие работы:

- **проведены испытания по определению стойкости теплозащитных покрытий** и конструкций десантного модуля проекта «ЭкзоМарс» к атаке твердых частиц;
- **исследованы особенности разрушения материалов** данных покрытий и образцов многослойной теплозащиты при пониженном давлении, нормальной температуре, значениях угла встречи 90° и 45° при скоростях стального ударника диаметром 2,5 мм, имитирующих действие метеорно-техногенных тел;
- **изучены защитные свойства** отобранных ранее образцов экранов противометеоритной защиты

(трех типов) при воздействии стальных одиночных ударников диаметром 2,5 мм со скоростью $\sim 3,0$ км/с при пониженном давлении, нормальной температуре, значениях угла встречи 90° ;

- **установлена стойкость трех типов теплозащитных покрытий** (в том числе многослойных), относящихся к аэродинамическому экрану и защитному кожуху десантного модуля проекта «ЭкзоМарс» в условиях воздействия стальных одиночных ударников диаме-

тром 2,5 мм, имеющих скорость $\approx 3,0$ км/с при углах встречи с мишенью 45° и 90° ;

- **испытаны на стойкость образцы** элементов экранной противометеоритной защиты, состоящих из дюралюминиевой подложки толщиной 1,8 мм и двухслойного композиционного покрытия $\text{NiCr}+\text{Al}+\text{Y}/\text{ZrO}_2$, модифицированного плазменным потоком (НТП Союзного государства «Мониторинг-СГ»).

Ключевой модуль баллистической установки – метательное устройство. Это двухступенчатая легкогазовая пушка [7], работающая следующим образом (рис. 2): электрическая энергия, необходимая для метания и запасенная в конденсаторной батарее, высвобождается в виде разряда в разрядную камеру, функционирующую по принципу эрозионного магнитоплазменного компрессора. Образующийся при этом плазменный поток высокой плотности и температуры толкает поршень вдоль канала легкогазовой секции высокого давления. Это приводит к адиабатическому сжатию и нагреву рабочего газа (водород или гелий) перед поршнем. При достижении определенного давления разрыва сжатый газ разрушает целостность диафрагмы и толкает ударник, постепенно ускоряя его в канале разгона.

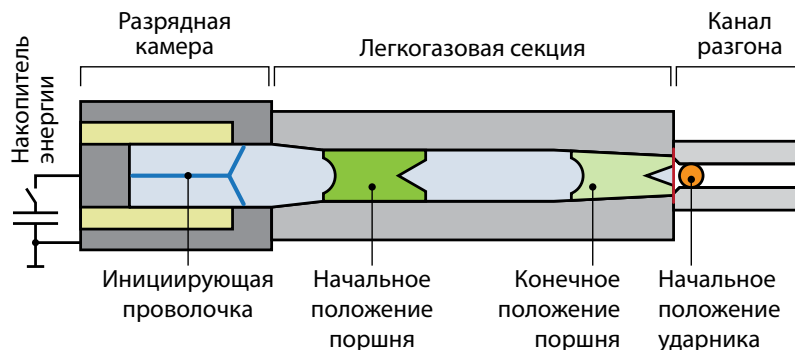


Рис. 2. Схема двухступенчатого метательного устройства

Изменять скорость вылета ударников в экспериментах можно несколькими способами: величиной первоначального напряжения заряда батареи конденсаторов, начальным давлением рабочего газа в легкогазовой секции, варьированием количества и материала диафрагм. Одиночные ударники сферической формы (диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм) служат метаемыми частицами. Их скорость измеряется при помощи высокоскоростной камеры, способной выполнять съемку с частотой до 2 100 000 кадров/с. При увеличении диаметра частицы максимально достижимая скорость метания уменьшается.

Материалы и образцы

Из повседневных практических наблюдений понятно, что при фиксированной скорости ударника результат взаимодействия с металлической мишенью должен существенно зависеть от толщины образца. Для тонких действительно наблюдается пробитие мишени и появляется отверстие; для мишеней средней толщины этого не происходит, а в месте удара материал сильно деформируется и появляется выпуклость с обратной стороны; для толстых – видно углубление, по форме и признакам напоминающее классический кратер, при этом с обратной стороны искривление не визуализируется. Последний тип представляет собой приближение к так называемым «полубесконечным» массивным мишеням и наиболее прост для исследований как экспериментального, так и численного характера. Это связано с тем, что линейные размеры толстого образца намного больше диаметра ударника, и при расчетах можно пренебречь влиянием

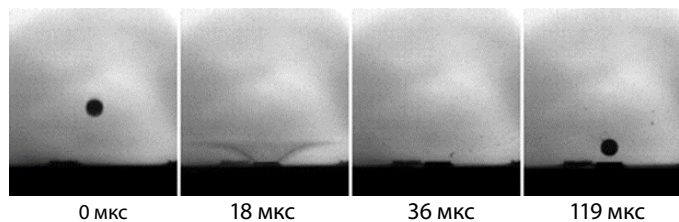


Рис. 3. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 0,9 км/с

краевых эффектов на величину получающегося кратера.

В ходе экспериментов изучались мишени из широко применяемого авиационного конструкционного материала – алюминиевого сплава Д16Т. В качестве ударников использовались шарики, изготовленные из конструкционной подшипниковой стали ШХ15. Данная марка выбиралась так, чтобы, с одной стороны, твердость ударника превышала соответствующую величину у мишеней, с другой – еще большее увеличение твердости неоправданно, так как в этом случае образец становится более хрупким, что будет способствовать преждевременному раскалыванию шариков при ударе. Во всех случаях высокоскоростного взаимодействия рассматривался прямой удар под углом 90° в пределах погрешности установки мишени перпендикулярно оси канала разгона.

Результаты наблюдений и моделирования

Рассмотрим типично наблюдаемую картину внешнего проявления взаимодействия ударника диаметром 4,0 мм с мишенями из сплава Д16Т при последовательном увеличении скорости, полученную при помощи высокоскоростной видеосъемки (336 тыс. кадров/с, время экспозиции кадров – 0,16 мкс). На рис. 3 представлены кадры взаимодействия на скорости 0,9 км/с. Нуле-

вая отметка времени на первом снимке выбрана условно для оценки времени между показанными кадрами.

Видно, что при ударе происходит выброс частиц в расширяющемся конусе с углом разлета около 110° при вершине. Это свидетельствует о том, что глубина проникания примерно равна диаметру ударника, который отскакивает от мишени через 80 мкс после столкновения со скоростью около 75 м/с.

Картина соударения при 1,52 км/с меняется (рис. 4): из мишени происходит выброс вещества, который можно разделить на два этапа: эмиссия небольшого количества мелких частиц с углом разлета 90° сразу после столкновения; извержение плотного потока вещества мишени, состоящего из более крупных частиц с углом разлета около 40° через ~50 мкс. Примерно через 240 мкс после столкновения ударник вылетает из мишени в обратном направлении со скоростью 45 м/с. Уменьшение угла разлета частиц указывает на большую глубину кратера, которая в данном эксперименте превысила диаметр ударника в 2,5 раза. Увеличение глубины кратера также подтверждается уменьшением скорости отскока по сравнению с предыдущим случаем.

При еще большем увеличении скорости взаимодействия наблюдается дальнейший рост глубины кратера, о чем свидетельствует

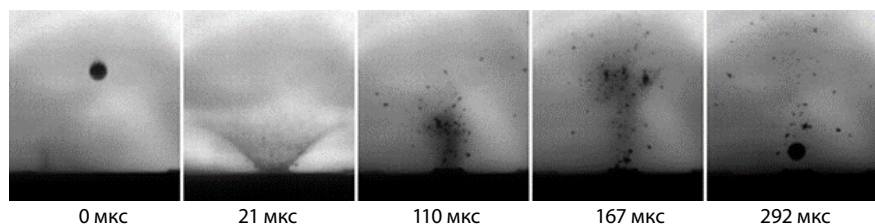


Рис. 4. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 1,52 км/с

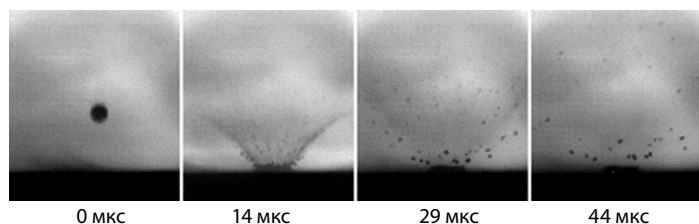


Рис. 5. Высокоскоростная съемка процесса соударения стального шарика диаметром 4 мм с мишенью из Д16Т на скорости 1,68 км/с

более узкий конус разлета частиц – около 75° . Это заметно на приведенной на рис. 5 последовательности кадров, полученных для скорости 1,68 км/с. Из последних кадров видно, что произошло заклинивание ударника в канале кратера. Дальнейшее увеличение скорости не приводит к заметному изменению регистрируемой картины соударения.

Застревание ударника в канале кратера может быть связано с изменением сферичности первого при деформации (рис. 6). При скоростях, превышающих 1,4 км/с,

на его поверхности наблюдаются трещины, однако при этом ударник сохраняет свою целостность и форму, близкую к сферической. При скоростях менее 1,7–1,8 км/с возникает кратер приблизительно цилиндрической формы с полусферическим дном. Для больших скоростей начинается растрескивание ударника, приводящее к его разрушению на отдельные части, что приводит к образованию сложной формы дна кратера.

Глубина кратера служит одним из характерных показателей степени разрушения «толстой»

(массивной) мишени. На рис. 7а представлены графики зависимостей глубины проникания металлической частицы в мишень из Д16Т от скорости взаимодействия для различных диаметров ударников, задействованных в экспериментах. При сравнении кратеров, полученных при примерно одинаковой скорости соударения, видно, что с увеличением диаметра ударника глубина кратера возрастает. Это связано с возрастанием энергии ударника за счет большей массы. Для ударников диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм зависимость глубины от скорости в диапазоне 0,5–1,8 км/с имеет линейный характер.

Значения глубин для ударников разных размеров удобно сравнивать в приведенном виде, то есть в виде отношения глубины кратера к диаметру ударника (рис. 7б). Видно, что в этих переменных все результаты приблизительно следуют одной и той же экспериментальной зависимости. Таким образом, моделирование соударения достаточно проводить только для ударников одного размера.

При численном моделировании высокоскоростного удара важную роль играет корректное описание свойств материала

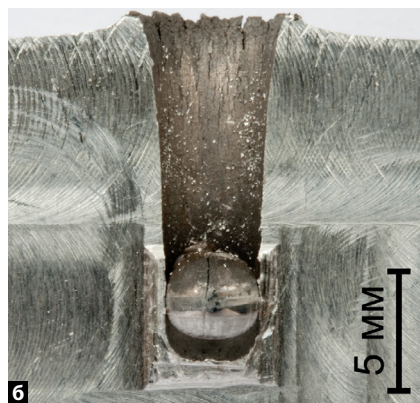


Рис. 6. Фотография среза кратера, образовавшегося после удара в мишенях из алюминиевого сплава Д16Т:

а – диаметр ударника 4 мм, скорость 1,44 км/с; б – 4 мм и 1,68 км/с; в – 2,5 мм и 1,98 км/с

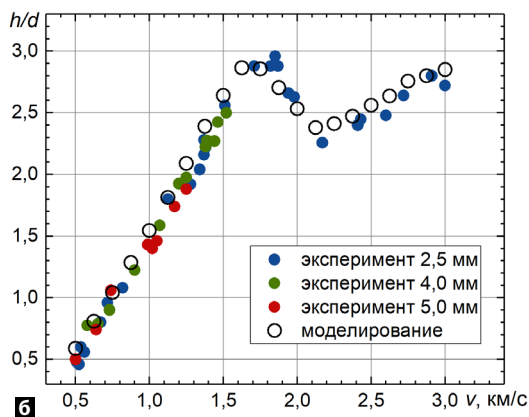
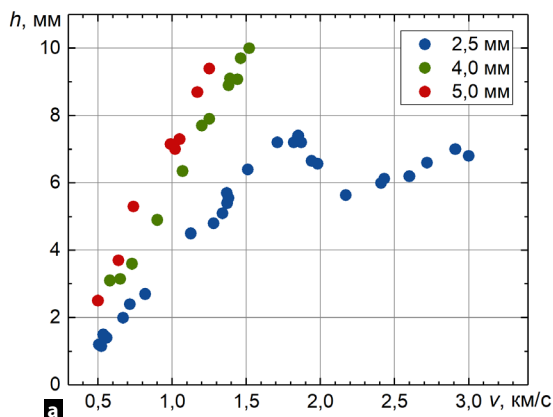


Рис. 7. Зависимость глубины кратера от скорости соударения для ударника диаметром 2,5, 4,0 и 5,0 мм: а – в мм; б – в приведенном виде

в широком диапазоне пластических деформаций, скоростей деформаций и температур. При импульсных нагружениях мишень имеет довольно сложный отклик на динамическое воздействие, в результате чего возникает необходимость задания параметров для моделирования таких явлений, как деформационное и скоростное упрочнение, температурное разупрочнение, разрушение и т.д. Все это разнообразие физических процессов, происходящих при динамическом нагружении, может быть описано схемой, которая в общем случае состоит из уравнения состояния и модели пластичности.

Для задания модели материалов мишени и ударника использовалось уравнение состояния в форме Ми – Грюнайзена, а для модели пластичности выбрано уравнение Джонсона – Кука [3, 4]. В работах по определению материальных констант, входящих в эти выражения, встречаются различные наборы параметров, значительно отличающиеся друг от друга. Поэтому в программе явного динамического анализа ANSYS Autodyn было проведено численное моделирование проникновения ударников диаметром 2,5 мм в мишени из алюминиевого сплава Д16Т с применением параметров моделей,

найденных в литературе [8–10], и определены константы, позволяющие получить наилучшее совпадение с опытными результатами (рис. 7б).

Таким образом, на примере одного наименования широко распространенного в технике конструкционного сплава Д16Т разработан и реализован способ исследования стойкости защитных материалов к ударному взаимодействию с высокоскоростными частицами.

Комбинирование экспериментов и численного моделирования – наиболее перспективный подход в изучении высокоскоростного удара, поскольку полученные величины можно в дальнейшем задействовать при описании поведения материалов мишеней без трудоемких и дорогостоящих испытаний. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Высокоскоростные ударные явления / под ред. Р. Кинслоу. – М., 1973.
2. Динамика удара / Дж. Зукас и др. – М., 1985.
3. Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск, 1999.
4. Орленко Л.П. Физика взрыва и удара / Л.П. Орленко. – М., 2008.
5. Khramtsov P.P. Physical Principles of Operation of a Two-Stage Light Gas Magnetoplasma Launcher for High-Vacuum Ballistic Tests / P.P. Khramtsov [et al.] // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2015. Vol. 88, №5. P. 1118–1126.

6. Khramtsov P.P. Diagnostics of Density Fields in Hypersonic Flows around a Cone in a Light-Gas Gun by the Shadow Photometric Method / P.P. Khramtsov [et al.] // Technical Physics. 2019. Vol. 64, №10. P. 1424–1429.
7. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. – Томск, 2007.
8. Ivetic G. Three-dimensional FEM analysis of laser shock peening of aluminum alloy 2024-T351 thin sheets // Surface Engineering. 2011. Vol. 27, №6. P. 445–453.
9. Daoud M. Effect of rake angle on Johnson-Cook material constants and their impact on cutting process parameters of Al2024-T3 alloy machining simulation / M. Daoud // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 81, №9. P. 1987–1997.
10. Winzer R., Glinicka A. The static and dynamic compressive behaviour of selected aluminium alloys / R. Winzer, A. Glinicka // Engineering transactions. 2011. Vol. 59, №2. С. 85–100.

Владимир Васецкий,
старший научный сотрудник
лаборатории физико-химической
гидродинамики Института
тепло- и массообмена
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Владимир Грищенко,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Михаил Дорошко,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Анастасия Махнач,
научный сотрудник лаборатории
физико-химической гидродинамики
ИТМО им. А.В. Лыкова НАН Беларуси

Олег Пенязьков,
доктор физико-математических наук,
академик, директор ИТМО
им. А.В. Лыкова НАН Беларуси