

УДК 539.42

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНИКА
С ДИСКРЕТНЫМИ ЭКРАНАМИ**

© 2011 г.

Н.Н. Мягков, Т.А. Шумихин

Институт прикладной механики РАН, Москва

NN_Myagkov@mail.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Проведено экспериментальное и численное исследование взаимодействия полиэтиленового и алюминиевого ударника со струнными и сеточными экранами при скоростях соударения $\sim 1.7\text{--}3.8$ км/с. Эксперименты были выполнены на легкогазовой баллистической установке. Численное моделирование проводилось методом SPH в программной среде Ls-Dyna. Показано, что главной особенностью разрушения ударника на дискретном экране является формирование системы струй фрагментов, выбрасываемых от фронтальной поверхности ударника в направлении его движения и в поперечных направлениях. Скорость струй зависит от геометрических параметров ячейки дискретного экрана и может превышать начальную скорость удара. Дана оценка возникающего кумулятивного эффекта.

Ключевые слова: высокоскоростной удар, сеточный экран, экранная защита, экспериментальное исследование, численное моделирование.

Введение

Практика проведения оценок надежности космических аппаратов (КА), рассчитанных на длительную работу в космосе, показывает, что защитные мероприятия, повышающие стойкость КА к ударам метеороидов и техногенных тел (МТТ), необходимы [1]. Известно, что для защиты КА от МТТ используется экранная схема построения защиты. Дискретные (в основном сеточные) экраны являются признанным перспективным конструкционным материалом для создания облегченной защиты КА. Поэтому представляет интерес изучение механики взаимодействия ударника с дискретными экранами при высоких скоростях соударения. Настоящее исследование обобщает недавние результаты [2–4], полученные авторами в этом направлении.

**Постановка эксперимента
и метод численного решения**

Были выполнены эксперименты [2] по взаимодействию сферического ударника с одиночными сеточными и струнными экранами. Все эксперименты были проведены на легкогазовой пушке, скорость ударника в экспериментах изменялась в пределах $1.7\text{--}3.8$ км/с. В экспериментах использовался 6.35 мм сферический ударник из алюминиевого сплава и 15 мм сферический по-

лиэтиленовый ударник. Полиэтилен имеет меньшее (по сравнению с алюминиевым ударником) сопротивление внедрению, поэтому эффекты, характерные для внедрения дискретного экрана в ударник, проявляются здесь более отчетливо. Сеточные и струнные экраны изготавливались, в основном, вручную. Испытуемый экран и пластина-свидетель размещались в вакуумированной испытательной камере. В качестве свидетеля использовалась пластина из алюминиевого сплава толщиной 15 мм, установленная на расстоянии 150 или 220 мм за экраном. Анализ фрагментации производился по характеру повреждений поверхности свидетеля. Были измерены объемы крупных кратеров на свидетелях. Для характеристики дискретной преграды были введены два параметра $\kappa = l_a/d_w$ и $\epsilon = d_p/(l_a + d_w)$, определяющие степень дискретности экрана и число ячеек экрана, приходящихся в среднем на диаметр ударника, где l_a – апертура ячейки (расстояние между струнами, видимое на просвет), d_w – диаметр проволоки, d_p – диаметр ударника. Эксперименты моделировались 2D и 3D численными расчетами, которые выполнялись методом SPH (smoothed particle hydrodynamics) с помощью лицензионного пакета LS-DYNA версии 971 [3]. Метод SPH [5] является сравнительно новым бессеточным лагранжеевым численным методом, чрезвычайно удобным для моделирования высокоскоростных ударных явлений.

Полученные результаты

Экспериментальное и численное исследование высокоскоростного взаимодействия полиэтиленового ударника со струнным и сеточным экраном показало [2], что:

- фрагментация ударника на сеточном экране, так же как и на струнном экране, характеризуется формированием струй, выбрасываемых с фронтальной части ударника вдоль и поперек направления его движения;

- фрагментация ударника на идентичных струнных экранах дает подобные топологические структуры повреждений на поверхности пластины-свидетеля для различных скоростей удара; число струй коррелирует с числом ячеек, попадающих на ударник;

- интенсивность струй зависит от скорости удара и значений обоих геометрических параметров κ и ε , а их действие на пластину-свидетель (оцениваемое по глубине кратеров) может превышать действие остальной массы ударника;

- таким образом, при определенных условиях применение сеточных экранов для защиты от высокоскоростного удара может производить обратный эффект, т.е. создавать дополнительную угрозу пробития защищаемой стенки;

- численное моделирование дает следующую оценку возникающего кумулятивного эффекта: при прицеливании ударника в центр ячейки скорость осколков в струях превышает начальную скорость ударника до ~ 1.5 раза.

Экспериментальное и численное исследование высокоскоростного взаимодействия алюминиевого ударника со струнным и сеточным экраном показало [2], что:

- в отличие от полиэтиленового ударника, где наблюдалось четкое соответствие количества нитеобразных кратеров параметру ε , в экспериментах по взаимодействию алюминиевого ударника со струнными экранами такое соответствие установить в ряде случаев не представляется возможным, т.к. возникают трудности с идентификацией принадлежности кратеров определенным группам повреждений;

- фрагментация алюминиевого ударника, так же как и полиэтиленового ударника, на сеточном экране характеризуется формированием струй, выбрасываемых от фронтальной части ударника;

- масса струй в случае алюминиевого ударника значительно меньше, что объясняется более высоким для алюминия сопротивлением внедрению;

- формирование струй осколков при фронтальной фрагментации алюминиевого ударника

может объяснить механизм формирования групп кратеров, распределенных по поверхности свидетеля линейным образом, т.е. вытянутых в расходящиеся от центра цепочки, наблюдаемые в эксперименте.

Струны сетки, внедряющиеся в массивный ударник, взаимодействуют друг с другом через течение, формирующееся при внедрении [4]. Дана теоретическая оценка минимального расстояния между струнами (апертуры), при котором струны еще не взаимодействуют друг с другом. При уменьшении апертуры струнного экрана струны начинают взаимодействовать и сопротивление внедрению струн возрастает.

Эксперименты и расчеты показывают [2], что разрушение и фрагментация ударника на струнном и сеточном экране характеризуется не только формированием фронтальных струй, но ударно-волновым разрушением тыльной части ударника, которое свойственно разрушению на сплошном экране. Какой из этих механизмов является преимущественным, зависит значений параметров κ и ε . При больших апертурах ячейки дискретного экрана преобладает фронтальная фрагментация, но при уменьшении апертуры доля массы ударника, фрагментируемого за счет струеобразования, существенно уменьшается и преобладает ударно-волновой механизм разрушения ударника.

Была изучена фрагментация 6.35 мм алюминиевого ударника на двойном струнном экране, имеющем апертуру ячейки экрана больше, чем радиус ударника [2]. Эксперименты показывают, что этот тип экранов с низкой удельной массой может эффективно разрушать ударник при скоростях, меньших чем 3 км/с, т.е. в области скоростей, где сплошной экран, имеющий равную удельную массу, неэффективен. Численное моделирование объясняет механизм взаимодействия ударника с двумя струнными экранами большой апертуры: после взаимодействия с первым струнным экраном поперечный размер ударника увеличивается, последующее взаимодействие «раскрытого» ударника со вторым экраном приводит к его дроблению на несколько больших фрагментов.

Работа поддержана РФФИ (грант №06-08-00127) и МНТЦ (грант 3412).

Список литературы

1. Schafer F. et al. The inter-agency space debris coordination committee protection manual // Proc. 4th European Conference on Space Debris, 18–20 April 2005. Darmstadt, Germany, 2005. P. 39–46.
2. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N.

// Int. J. Impact Eng. 2010. V. 37. P. 980–994.

3. Мягков Н.Н., Сулимов А.В., Шумихин Т.А. // Механика композиционных материалов и конструкций. 2008. Т. 14, №4. С. 532–546.

4. Myagkov N.N., Goloveshkin V.A., Shumikhin T.A.,

Sulimov A.V. // Int. J. Impact Eng. 2009. V. 36. P. 468–475.

5. Monaghan J.J. // Rep. Prog. Phys. 2005. V. 68. P. 1703–1759.

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF PECULIARITIES OF HIGH-VELOCITY INTERACTION BETWEEN A PROJECTILE AND DISCRETE BUMPERS

N.N. Myagkov, T.A. Shumikhin

A high-velocity impact interaction of a polyethylene projectile and aluminium projectile with string and mesh bumpers was investigated experimentally and numerically with the projectile velocity varying in the range of ~1.7–3.8 km/s. Experiments were carried out using the two-stage light-gas gun. The numerical modelling was carried out by SPH method with the aid of the Ls-Dyna code of version 971. The study was aimed at detecting the peculiarities of projectile fragmentation during its interaction with discrete bumpers. It was shown that the projectile fragmentation on the string and mesh bumper is characterized by forming jets of fragments ejected from the front part of the projectile along and across its movement direction. The jets intensity depends on the geometrical parameters of the cell of the discrete bumper; velocities of the jets can exceed the initial projectile velocity. The numerical modelling evaluates the revealed cumulative effect as follows: the velocity of the fragments in the jets exceeds the original projectile velocity up to the factor of ~1.5 in case when the projectile is aimed towards the cell centre.

Keywords: high-velocity impact, mesh bumper, shield protection, experimental and numerical study.