

УДК 539.42

МОРФОЛОГИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТОЛСТОСТЕННЫХ ПЛАСТИН-СВИДЕТЕЛЕЙ ФРАГМЕНТАМИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ УДАРНИКОВ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Калмыков П.Н.¹, Лапичев Н.В.¹, Михайлов И.А.¹, Мягков Н.Н.², Пыриков М.Д.², Сальников А.В.¹, Шумихин Т.А.²

¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров, Россия

²ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Экспериментальное изучение фрагментации ударника при высокоскоростном пробитии тонких преград не отличается большим арсеналом технических средств прямого наблюдения. Одним из достоверных способов получения информации о характеристиках образующегося облака фрагментов является анализ повреждений пластин-свидетелей, устанавливаемых на некотором расстоянии за преградой на пути движущихся фрагментов. В данной работе проводится сравнительный анализ морфологических особенностей повреждений пластин-свидетелей фрагментами ударников, изготовленных из различных материалов: полиэтилена, алюминиевого сплава (Al-сплав) и капролона, охрупченного добавлением стеклянных микросфер. Эксперименты выполнены в диапазоне скоростей соударения от 2900 м/с до 7000 м/с, при этом были использованы три типа тонких преград: сплошные, сеточные и струнные.

Выявлено, что при идентичных условиях в экспериментах со струнными преградами ударник из полиэтилена демонстрирует меньшую степень фрагментации, чем охрупченный капролон. При этом существенная часть начальной кинетической энергии полиэтиленового ударника остается в его тыльной части, не перераспределяясь к другим частям ударника и не переходя в энергию разрушения. У охрупченного капролона сохраняется тенденция к образованию выбросов из фронтальной части, формирующих цепочки кратеров на свидетеле.

При фрагментации на сплошной преграде облако фрагментов полиэтиленового ударника состоит как из компактных, так и из нитевидных фрагментов. Нитевидные фрагменты могут образовывать замкнутые структуры. Подобный тип фрагментации наблюдался в экспериментах с ударниками из стекла. Примечательно, что распределение кратеров, образованных нитевидными фрагментами полиэтиленового ударника, схоже по структуре с распределением множества мелких кратеров в периферийной зоне повреждений свидетеля облаком фрагментов ударников из Al-сплава при пробитии сплошной преграды.

Глубокое морфологическое подобие выявлено между повреждениями в эксперименте по пробиванию стальной сетки полиэтиленовым ударником и вольфрамовой сетки ударником из Al-сплава. При этом параметром, контролирующим подобие этих экспериментов, по всей видимости, является отношение плотностей материала преграды и ударника.

Ключевые слова: высокоскоростной удар; фрагментация; морфология повреждений; сплошная преграда; сеточная преграда; струнная преграда

MORPHOLOGY OF DAMAGES TO THICK WITNESS-PLATES PRODUCED BY FRAGMENTS OF HIGH-VELOCITY PROJECTILES MADE OF DIFFERENT MATERIALS

Kalmykov P.N.¹, Lapichev N.V.¹, Mikhaylov I.A.¹, Myagkov N.N.², Pyrikov M.D.²,
Salnikov A.V.¹, Shumikhin T.A.²

¹*Federal State Unitary Enterprise Russian Federal Nuclear Center All-Russian
Research Institute of Experimental Physics (FSUE RFNC – VNIIEF), Sarov, Russia*

²*Institute of Applied Mechanics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The experimental study of the fragmentation of projectiles at high-velocity impact perforation of thin bumpers is not rich with technologies for in-situ observation. One of the reliable methods for the retrieving of data characterizing the fragment clouds produced by the impact is the analysis of the damage of witness plates situated in the path of the moving fragments at some distance from a bumper. In this work we performed a comparative analysis of the morphological features of the damages on the witness-plates produced by the fragments of projectiles made of different materials: polyethylene, aluminum alloy and caprolon embrittled by embedding of glass microspheres. The experiments were performed in the range of impact velocities from 2900 m/s to 7000 m/s. The tested bumpers were of three types: continuous bumpers (aluminum plates), steel meshes, and sets of steel strings (string bumpers).

The analysis showed that at similar experimental conditions in tests with string bumpers the polyethylene projectile could reveal lower degree of fragmentation than embrittled caprolon material. The sufficient part of initial kinetic energy remains in the rear part of the polyethylene projectile without transition into other projectile parts or transformation into the energy of fracture. The projectile of caprolon keeps the tendency to generate jets from the frontal part similar to the case of non-brittle polyethylene. These jets produce linear chains of craters on the witness-plate surface.

The fragmentation of a polyethylene projectile on a continuous bumper provides a formation of a fragment cloud containing chunky fragments and threadlike fragments as well. The threadlike fragments can combine into closed structure. This type of fragment clouds was observed in experiments with continuous bumpers and soda-lime glass projectiles. It is remarkable that the distribution of thread like craters formed by the fragments of the polyethylene projectile is similar to the distribution of the ensemble of small craters produced by the fragments of aluminum projectiles.

There exists significant morphological similarity between a pair of experiments: in the first one the projectile was made of polyethylene and the bumper was a steel mesh, in the second there were an aluminum projectile and a mesh bumper made of tungsten wires. It seems that the parameter that controls the similarity in these experiments is the ratio of the projectile density to the bumper density.

Keywords: high-velocity impact; fragmentation; morphology of damage; continuous bumper; mesh bumper; string bumper

ВВЕДЕНИЕ

Явление фрагментации твердого тела, вызванное его взаимодействием с относительно тонкой преградой при высоких скоростях соударения, является предметом исследования уже достаточно длительное время. Эти исследования ведутся главным образом в рамках работ, направленных на совершенствование экранной защиты космических аппаратов (КА) от ударного воздействия частиц космического мусора и метеороидов (КММ). Цель исследований связана с выявлением оптимальных режимов фрагментации, где термин «оптимальный» подразумевает максимальную вероятность непробития защищаемой стенки при

минимальном весе защитной конструкции КА. Учитываются также размеры конструкции и инженерная сложность её исполнения.

Практика проведения высокоскоростных экспериментов имеет скромный арсенал технологий для регистрации изучаемых быстропротекающих процессов. Основными источниками получения информации являются рентгеновская съемка и свидетели (в т.ч. улавливатели) различного типа, позволяющие либо “мягко” захватывать фрагменты ударника и мишени, либо оценивать интенсивность воздействия потока высокоскоростных фрагментов и даже восстанавливать некоторые параметры этих потоков по следам их воздействия на пластический свидетель. В большинстве высокоскоростных экспериментов в качестве имитатора частицы КММ используется шарик из Al-сплава, т.к. он является наиболее часто встречающимся материалом частиц космического мусора, населяющего околоземные орбиты. В экспериментах с ударниками из Al-сплава возможности восстановления данных, характеризующих облако фрагментов и процесс фрагментации, довольно ограничены и не всегда точны, а возможности набора экспериментальной статистики ограничены сложностью и высокими трудозатратами на проведение высокоскоростных экспериментов. Однако, в определённых диапазонах скоростей удара механизмы фрагментации алюминиевых ударников схожи с механизмами фрагментации в ударниках, выполненных из других материалов. Так, например, модельные эксперименты с ударниками из полиэтилена позволили прояснить некоторые аспекты фрагментации ударников из Al-сплава, связанные с влиянием на фрагментацию геометрических свойств дискретной преграды [1], а результаты экспериментов по удару капли воды о поверхность воды [2] позволили расширить выводы, сделанные по результатам экспериментов по изучению эжекции при высокоскоростном пробивании ударником из Al-сплава тонких преград. Таким образом, изучение особенностей высокоскоростной фрагментации ударников из различных материалов может иметь не только фундаментальный, но и практический интерес, особенно, если учитывать, что спектр материалов, входящих в состав космического мусора, не ограничивается одним только Al-сплавом.

В данной работе проводится анализ морфологических особенностей повреждений свидетелей фрагментами ударников, изготовленных из полиэтилена и Al-сплава. Здесь же представлены результаты эксперимента с ударником из капролона, специально охрупченного добавлением стеклянных микросфер. Эксперименты выполнены при различных скоростях соударения и с преградами разных типов.

1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на испытательных стендах ФГУП «ГосНИИАС» (г. Москва) с использованием работающей на гелии двухступенчатой легкогазовой пушки и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» (г. Саров) с использованием работающей на водороде также двухступенчатой легкогазовой пушки.

В общем случае использовались схожие схемы проведения экспериментов (рис.1, рис.2).

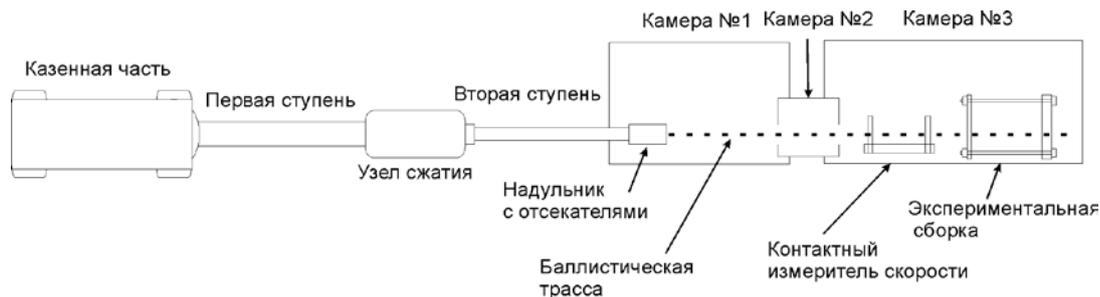


Рис.1. Схема экспериментов в ФГУП «ГосНИИАС».

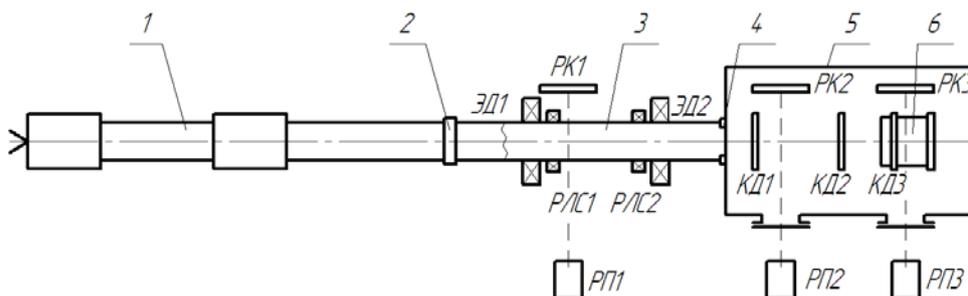


Рис.2. Схема экспериментов в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»: 1 – легкогазовая пушка, 2 – устройство отделения ударника от поддона, 3 – вакуумный тракт, 4 – устройство отсечки фрагментов поддона, 5 – вакуумная камера, 6 – мишень.

Принятые сокращения: ЭД – электромагнитный датчик, РЛС – радиолокационная станция, КД – электроконтактный датчик, РП – рентгеновский пост, РК – рентгеновская кассета).

Разгон подкалиберного ударника в стволе легкогазовой пушки осуществляется в неразрезном поддоне из полимерного материала (фенилон или капролон с наполнителем из стеклянных микросфер). Отделение ударника от поддона производится путем фрагментации последнего с использованием специального устройства, размещаемого на срезе ствола пушки или перед входом в вакуумный тракт.

Если ударник из полимерных материалов выполняется в виде цилиндра диаметром, равным диаметру ствола пушки, поддон отсутствует.

После отделения поддона ударник входит через вакуумный тракт в вакуумную камеру. Скорость ударника измеряется в вакуумной камере с помощью электроконтактных датчиков перед встречей с мишенью. Толщина пленочного материала, используемого в электроконтактных датчиках, такова, что взаимодействие с ней не приводит к повреждению ударника.

Для чистоты эксперимента требуется принятие дополнительных мер, исключающих пролет осколков ранее разрушенного поддона в вакуумную камеру. Для этого на испытательном стенде ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» отсечка осколков поддона выполняется с помощью специального устройства, устанавливаемого перед входом в вакуумную камеру. Предусмотрена рентгеновская регистрация состояния ударника и фрагментированного поддона в вакуумном тракте, а также состояния ударника до и после взаимодействия со свидетелем. Для изучения воздействия запреградного облака фрагментов ударника последние улавливаются толстой пластиной-свидетелем, выполненной

из Al-сплава. Воздействие ударника на мишень осуществляется в условиях вакуума.

Можно считать, что в ходе экспериментов с высокой степенью надежности зарегистрированы скорость ударника и его состояние перед взаимодействием с мишенью, вакуумирование исключило влияние воздушной среды на результаты эксперимента, а устройство отсечки поддона обеспечила чистоту проведения эксперимента в части реализации воздействия на мишень только ударника.

Для удобства сравнения эксперименты разбиты на три группы по трём типам преград: струнная преграда, сплошная преграда, сеточная преграда. Параметры экспериментов приведены в Таблице 1.

Таблица 1.

Параметры экспериментов.

№	Материал ударника/диаметр D ударника (мм)/вес ударника (г)	Материал преграды/параметры t или $a \times d$ (мм или мм \times мм)/удельный вес (кг/м ²)*	Материал свидетеля/дистанция от свидетеля до преграды (мм)	Скорость удара V , м/с
1. Струнная преграда				
1.1	капролон со стеклянными микросферами/15/2,1	сталь/3,5 \times 1,0/1,33	Д16Т/220	2900
1.2	полиэтилен/15/1,8	сталь/3,5 \times 1,0/1,33	Д16Т/220	2950
2. Сплошная преграда				
2.1	полиэтилен/15/1,8	титан/0,7/3,115	Д16Т/220	2800
2.2	Al-сплав (АД-1)/6,35/0,39	Al-сплав (Д16)/0,6/1,62	АМг6/150	6350
2.3	Al-сплав (АД-1)/6,35/0,39	Al-сплав (Д16)/1,4/3,78	АМг6/150	6750
3. Сеточная преграда				
3.1	полиэтилен/15/1,8	сталь/5,9 \times 0,6/0,75	Д16/235	3320
3.2	Al-сплав (В95)/15/5	вольфрам/6,0 \times 0,5/1,7	АМг6/150	6410
3.3	Al-сплав (АД-1)/6,35/0,39	сталь/2,0 \times 0,6/1,71	АМг6/150	7040
3.4	Al-сплав (АД-1)/6,35/0,39	сталь/2,0 \times 1,0/3,83	АМг6/150	6800

*В качестве параметров сплошной преграды указана её толщина t , для струнной или сеточной преград указаны размеры апертуры и диаметра струн $a \times d$.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Морфологические особенности повреждений свидетеля отражают соответствующие им особенности облака фрагментов. Этот факт оказался полезным при анализе свидетелей во время проведения модельных экспериментов с полиэтиленовыми ударниками, цель которых состояла в выявлении особенностей фрагментации на дискретных преградах [1].

Для проведения сравнительного анализа повреждений свидетелей фрагментами ударников, выполненных из различных материалов, при пробитии идентичных, либо сходных по типу преград, поверхность свидетелей сканировалась с высоким разрешением. Сканы обрабатывались специальными программными средствами. Цифровая обработка изображений позволяет визуально разделить повреждения, имеющие разные морфологические особенности. Можно предположить, что группы повреждений с различными морфологическими особенностями относятся к разным частям облака фрагментов. Механизмы фрагментации, приводящие к образованию разных частей облака фрагментов, могут иметь различную природу. Кроме этого, программная обработка делает возможным оценку глубины образованных

компактными фрагментами конусообразных кратеров, форму которых можно аппроксимировать половиной эллипсоида.

2.1. Струнные преграды.

Два эксперимента, проведенных со струнными преградами, примечательны тем, что схожи по своим параметрам. В экспериментах 1.1 и 1.2 (Таблица 1) использованы идентичные струнные преграды, выполненные из стальных проволок диаметром 1 мм с апертурой 3.5 мм и удельным весом 1.33 кг/м². Скорости ударников были близки и составили 2900 м/с для ударника из капролона, 2950 м/с – для полиэтиленового ударника. Вес, размер и форма ударников были идентичны или близки.

В качестве свидетелей использовались плиты из Al-сплава Д16Т толщиной 15 мм, установленные на расстоянии 220 мм от преграды нормально к линии выстрела. На рис.3а,б приведены изображения свидетелей, повреждённых фрагментами ударников из капролона рис.3а и полиэтилена рис.3б.

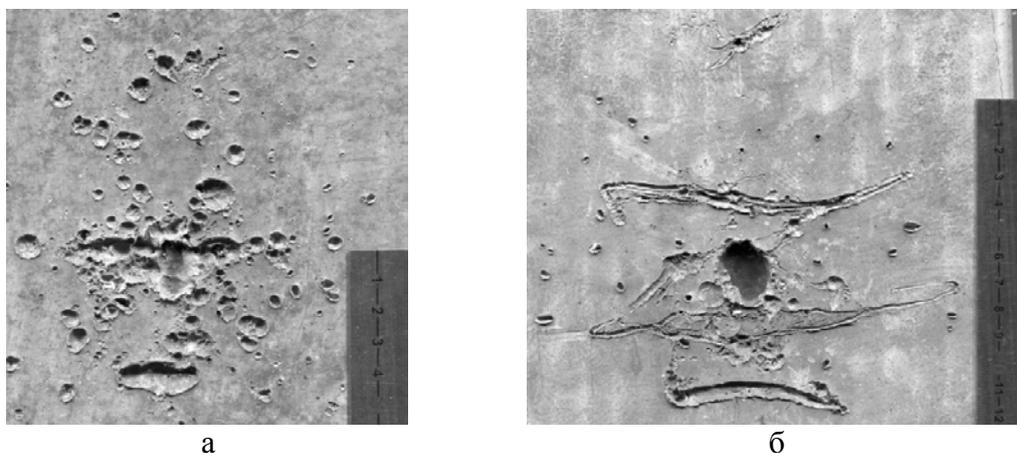


Рис.3. а) эксперимент №1.1 (Табл.1), ударник из капролона $D = 15$ мм, преграда – стальные струны $a \times d = 3,5$ мм \times 1,0 мм, $V = 2900$ м/с; б) эксперимент №1.2 (Табл.1), ударник из полиэтилена $D = 15$ мм, преграда – стальные струны $a \times d = 3,5$ мм \times 1,0 мм, $V = 2950$ м/с.

Как можно заметить, повреждения фрагментами ударника из капролона в эксперименте 1.1 (Таблица 1) характеризуются большим количеством достаточно крупных конусообразных кратеров. Общий размер повреждений (максимальный разлёт фрагментов) в эксперименте №1.1 составил 129 мм \times 103 мм, а в эксперименте №1.2 – 161 мм \times 151 мм (рис.4а,б).

В обоих экспериментах присутствуют нитеобразные кратеры. Контуры кратеров с некоторыми характеристическими размерами представлены на рис.5а,б. В эксперименте №1.1 длина центрального нитеобразного кратера 77.4 мм, ширина 14 мм. В эксперименте №1.2 центральный нитеобразный кратер почти в два раза длиннее (142 мм) и значительно тоньше (со средней толщиной около 3 мм). Глубина нитевидных кратеров в эксперименте №1.1 имеет величину от 3 мм до 5 мм, в то время как в эксперименте №1.2 их глубина не превышает 1-2 мм. Также, нитевидные кратеры из разных экспериментов отличаются по структуре дна. В эксперименте с капролоном дно кратеров выглядит так, будто бы кратер сформировался в результате слияния нескольких отдельных кратеров,

вытянутых в цепочку. Такая форма обусловлена началом деления на отдельные фрагменты фронта плоского выброса, образующегося в результате движения материала ударника сквозь соседние струны преграды. В экспериментах с полиэтиленом дно нитевидных кратеров в основном имеет либо гладкую, либо однородную микроструктуру.

Схема конусообразных кратеров для рассматриваемой пары экспериментов представлена на рис.6а,б. Количество зафиксированных конусообразных кратеров в эксперименте №1.1 (рис.3а) составляет порядка тысячи, их размеры варьируются от 0,1 мм до 11 мм, суммарная площадь повреждений, занятая конусообразными кратерами, составляет примерно 3000 мм². При этом количество относительно крупных кратеров с размерами 3 мм и более порядка сотни.

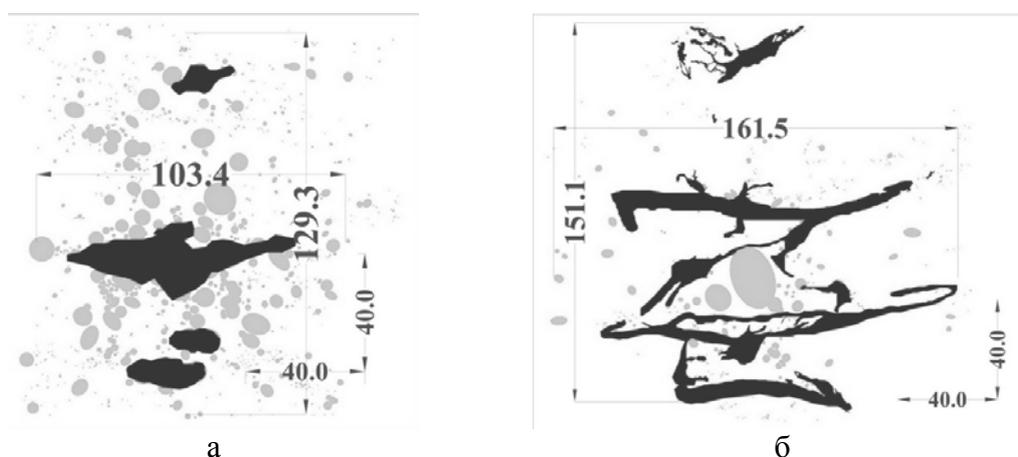


Рис.4. Схема и размеры повреждений в эксперименте: а) №1.1 (Табл.1); б) №1.2 (Табл.1).

В эксперименте №1.2 зафиксировано 540 конусообразных кратеров, покрывающих суммарно площадь порядка 1000 мм². Размер кратеров варьируется от 0,6 мм до 6 мм. При этом количество кратеров с характерным размером более 3 мм не больше 30 штук. Имеется также центральный кратер, характерный размер которого 20 мм при глубине около 7 мм.

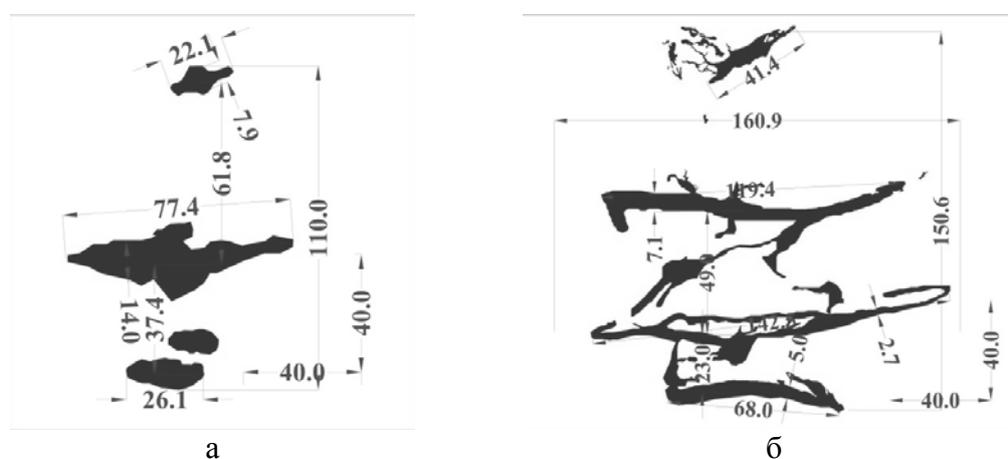


Рис.5. Контуры и размеры нитевидных кратеров в эксперименте: а) №1.1 (Табл.1); б) №1.2 (Табл.1).

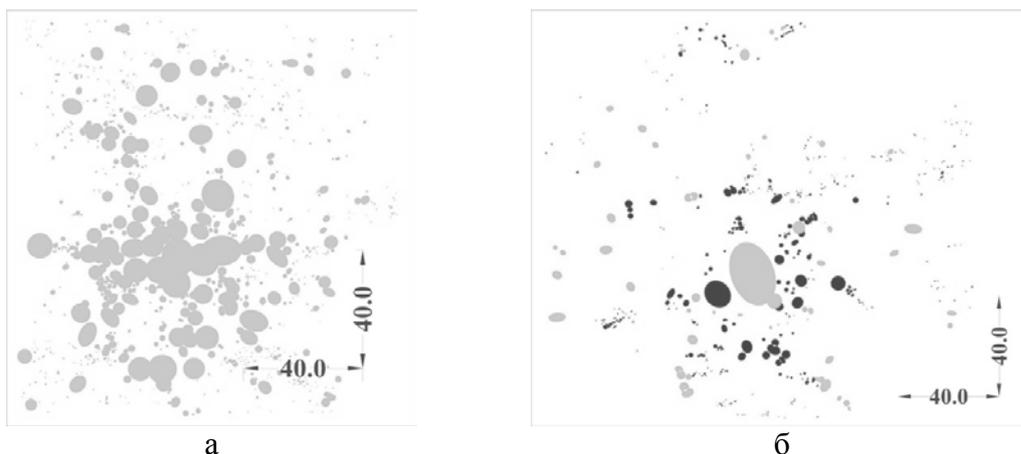


Рис.6. Контуры конусообразных кратеров в эксперименте: а) №1.1 (Табл.1); б) №1.2 (Табл.1).

Таким образом, суммируя вышесказанное, можно сделать вывод, что при идентичных начальных условиях ударник из полиэтилена демонстрирует значительно меньшую степень фрагментации, чем ударник из специально охрупченного капролона. Для охрупченного материала сохраняется тенденция к образованию выбросов от фронтальной части ударника, инициируемая процессом внедрения проволоки в материал ударника, что приводит к образованию линейно-распределенных цепочек кратеров. При этом существенная часть начальной кинетической энергии ударника остаётся в его неразрушенной тыльной части, которая образует центральный кратер большого объема.

2.2. Сплошные преграды.

Параметры экспериментов, выбранных для сравнительного анализа фрагментации ударников из полиэтилена и Al-сплава, отличаются следующим: диаметр полиэтиленового ударника 15 мм, диаметр ударника из Al-сплава 6,35 мм. При этом, в эксперименте №2.1 с полиэтиленовым ударником использовалась преграда из титановой пластины толщиной 0,7 мм с удельным весом $3,115 \text{ кг/м}^2$ (Таблица 1), а в экспериментах №2.2 и №2.3 с ударниками из Al-сплава использовались пластины из Al-сплава толщиной 0,6 мм и 1,4 мм с удельными весами $1,62 \text{ кг/м}^2$ и $3,78 \text{ кг/м}^2$, соответственно (Таблица 1). Диапазон скоростей соударения для двух групп экспериментов существенно различался.

В эксперименте №2.1 с полиэтиленовым ударником на свидетеле совмещены ансамбли повреждений двух различных типов. Первый тип – это единая система нитевидных кратеров, второй – группа конусообразных (обычных) кратеров (рис.7а). На рис.7б,в приведены свидетели экспериментов с ударником из Al-сплава. Эксперименты выполнены при разных толщинах сплошной преграды также из Al-сплава. В обоих случаях повреждения имеют схожую морфологию, представляя собой центральную зону интенсивных повреждений и периферийную менее повреждённую зону.

В эксперименте №2.1 система нитевидных кратеров занимает область $114 \text{ мм} \times 148 \text{ мм}$. Эта область по периметру охватывается также нитевидным кратером, образующим почти замкнутое кольцо. Изучение повреждений в зонах пересечения нитевидных кратеров позволяет предположить, что нитеобразные объекты, образующие нитевидные кратеры, были разнесены в пространстве в направлении движения.

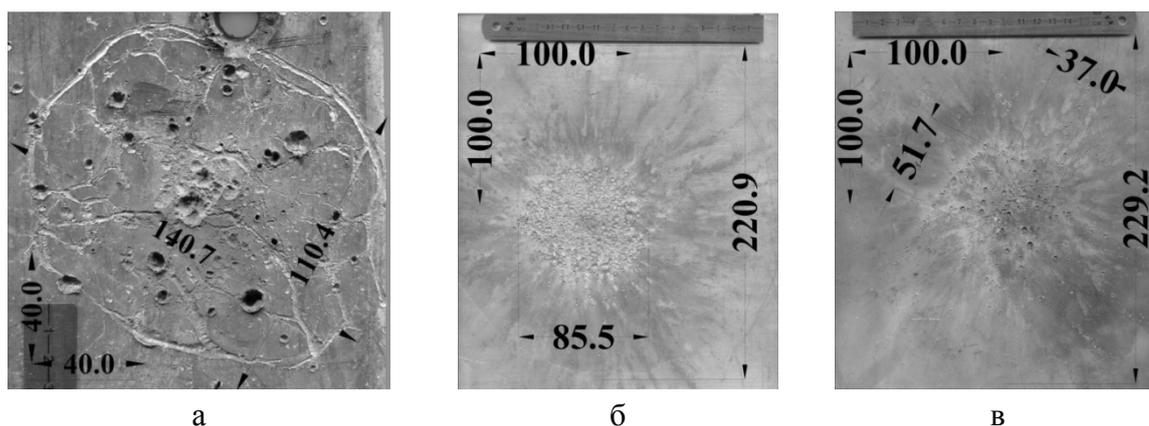


Рис.7. а) эксперимент №2.1 (Табл.1), ударник из полиэтилена $D = 15$ мм, преграда – титановая пластина $t = 0,7$ мм, $V = 2800$ м/с; б) эксперимент №2.2 (Табл.1), ударник из алюминия $D = 6,35$ мм, преграда – алюминиевая пластина $t = 0,6$ мм, $V = 6350$ м/с; в) эксперимент №2.3 (Табл.1), ударник из алюминия $D = 6,35$ мм, преграда – алюминиевая пластина $t = 1,4$ мм, $V = 6750$ м/с.

Возможно, множество этих объектов занимало объем близкий по форме к сфере, ограниченной по внешнему периметру замкнутым нитевидным фрагментом в виде кольца. Схема нитевидных кратеров приведена на рис.8а. Толщина нитевидных кратеров от 1 мм до 3 мм, глубина до 1 мм. Дно имеет, в основном, однородную структуру, характерную для такого вида повреждений. Распределение по поверхности свидетеля конусовидных кратеров, образованных компактными фрагментами, также приведено на рис.8а. Диаметры кратеров лежат в диапазоне от 6 мм до 11 мм. Область распределения конусообразных кратеров совпадает с областью распределения нитевидных кратеров. По характеру процессов кратерообразования в местах пересечения конусообразных кратеров с нитеобразными кратерами можно предположить, что часть компактных фрагментов достигла поверхности свидетеля раньше нитеобразных фрагментов – это предположительно фрагменты преграды. Наиболее крупные кратеры образованы компактными фрагментами, достигшими поверхности свидетеля позже нитеобразных объектов. Это фрагменты тыльной части ударника.

Центральная зона интенсивных повреждений в эксперименте №2.2 с ударником из Al-сплава (рис.8б) эродирована сливающимися друг с другом кратерами, характерные размеры которых 0,8 мм – 6 мм. Периферийная зона повреждена мелкими кратерами с характерными размерами 0,2 мм – 0,6 мм. Пространственная плотность распределения кратеров здесь ниже. Кратеры имеют тенденцию к локализации вдоль радиально расходящихся линий, образуя дорожки. Стоит отметить, что некоторые дорожки раздваиваются на концах, образуя структуру, описанную в экспериментах по эжекции [2,4]. Центральная зона имеет размер порядка 70 мм.

В эксперименте №2.3, который был выполнен также с ударником из Al-сплава, но с более толстой преградой, размер центральной зоны интенсивных повреждений уменьшается по сравнению с экспериментом №2.2 до размера 33 мм×49 мм (зона обозначена серым цветом на рис.8в). При этом вокруг этой зоны имеется зона 37 мм×52 мм, покрытая то ли расплавом, то ли веществом, находящимся в мелкодисперсном состоянии (обозначена чёрным

цветом на рис.8в). При этом характерный размер кратеров также уменьшается до 0,4 мм – 3,0 мм, а характерный размер кратеров в периферийной зоне увеличивается до 0,3 мм – 1,0 мм, и их плотность выше, по сравнению с экспериментом №2.2 с более тонкой преградой. Наблюдаемая динамика повреждений характерна для увеличения толщины преграды.

Описание морфологических особенностей повреждений свидетелей в экспериментах №2.2 и №2.3 дано в [3].

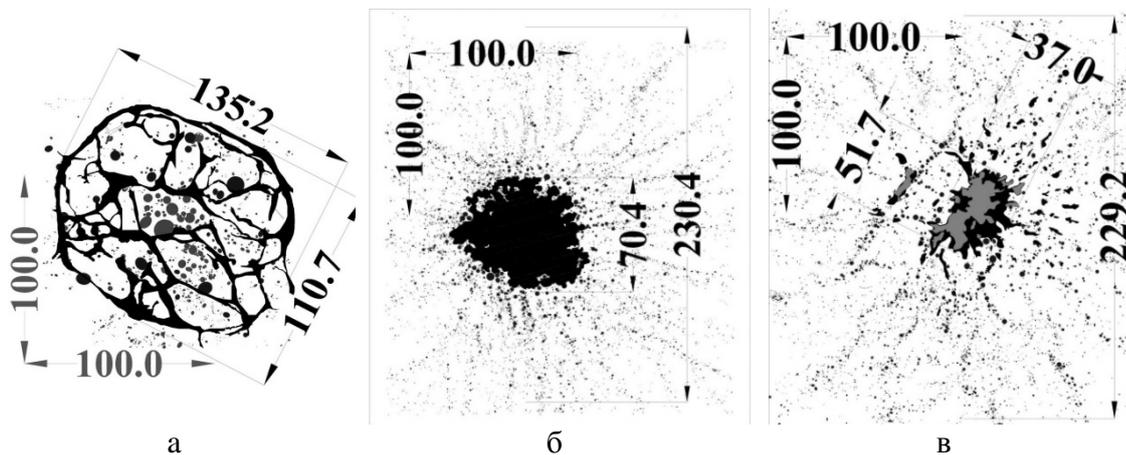


Рис.8. а) конусообразные и нитевидные кратеры в эксперименте №2.1 (Табл.1); б) схема центральной и периферийной зон свидетеля в эксперименте №2.2 (Табл.1); в) схема центральной и периферийной зон свидетеля в эксперименте №2.3 (Табл.1).

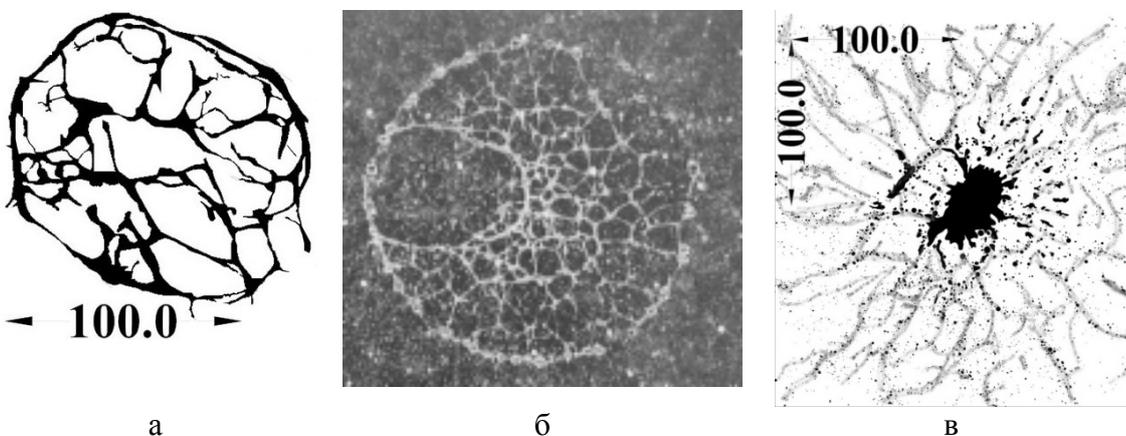


Рис.9. а) нитевидные кратеры на свидетеле в эксперименте №2.1 (Табл.1); б) нитевидные кратеры, образованные фрагментами ударника из известкового стекла, $D = 1$ мм, $V = 6$ км/с, мишень – алюминиевая пластина $t = 0.25$ мм (взято из [5]); в) схема центральной и периферийной зон свидетеля в эксперименте №2.3 (Табл.1).

Возвращаясь к эксперименту №2.1 с полиэтиленовым ударником (рис.9а), следует отметить, что облако фрагментов, состоящее из нитевидных образований, наблюдалось также в экспериментах с ударниками из известкового стекла (soda lime glass) (рис.9б) в экспериментах Хёрца, проведенных в 90-х годах. Эволюция структуры облака из нитевидных образований, наблюдавшаяся в этих экспериментах и связанная с увеличением толщины преграды, заключалась в уменьшении количества компактных фрагментов и увеличении количества

нитевидных фрагментов до состояния, представленного на рис.9б, соответствующего достаточно толстой преграде. В эксперименте №2.3 с ударником из Al-сплава и более толстой преградой дорожки кратеров, образованные компактными фрагментами в периферийной зоне (рис.9в), образуют на свидетеле структуры, близкие по топологии к структурам нитевидных кратеров в эксперименте №2.1 (рис.9а) и в экспериментах Хёрца с ударниками из известкового стекла [5] (рис.9б). Возможно, что в начальный момент времени механизм фрагментации ударника из Al-сплава аналогичен механизму фрагментации ударника из полиэтилена или известкового стекла, что приводит к образованию топологически подобного распределения вещества в конечном облаке фрагментов.

2.3. Сеточные преграды.

Для сравнительного анализа фрагментации ударников из разных материалов при пробитии сеточных преград удобно сопоставить эксперименты №3.1 и №3.2 (Табл.1). В эксперименте №3.1 с полиэтиленовым ударником и стальной сеткой, проведенном ранее в рамках серии экспериментов с дискретными преградами [6], было зафиксировано явление образования интенсивных кумулятивных выбросов, образующих тонкие глубокие кратеры на свидетеле – при диаметре кратера 4 мм глубина составила до 14 мм. Эксперимент №3.2 был проведен с ударником из Al-сплава и вольфрамовой сеткой таких же размеров, как в эксперименте №3.1. Отношение плотности полиэтилена к плотности стали составляет 0,12, а отношение плотности алюминия к плотности вольфрама 0,15. Таким образом, в этих экспериментах отношения плотностей материала ударника к материалу преграды близки по значению. Фотографии свидетелей из экспериментов №3.1 и №3.2 представлены на рис.10а,б.

Эксперименты №3.3 (рис.10в) и №3.4 (рис.10г), отличаются друг от друга применением в сеточной преграде стальной проволоки различного диаметра. Отношение плотности ударника из Al-сплава, использованного в этих экспериментах, к материалу преграды (сталь) составляет величину 0,36, что более чем в два раза превышает это отношение для экспериментов №3.1 и 3.2.

При этом для этих экспериментов отношение геометрических параметров $D/(a+d)$ составляет:

- 2,30 для экспериментов №3.1 и №3.2,
- 2,44 для эксперимента №3.3,
- 2,11 для эксперимента №3.4,

и можно считать, что они достаточно близки по величине.

Особенности повреждений свидетеля в эксперименте №3.1 можно условно описать как ансамбль из четырех морфологически идентичных друг другу лепестковообразных кратеров, сформированных воздействием четырех интенсивных выбросов, звездообразно расходящихся от центра. Эти кратеры морфологически схожи с нитевидными кратерами в других экспериментах, но отличаются большей шириной. На рис.11а зоны этих повреждений обозначены буквами А, Б, В и Г. В вершинах этих кратеров, удаленных от центра, воздействие выбросов максимально локализовано и образует узкие глубокие кратеры. В центре повреждений находится большой круглый кратер диаметром 31 мм, образованный неразрушенной, но сильно деформированной тыльной частью ударника. Длина повреждений А, Б, В и Г от центра центрального круглого кратера варьируется от 30 мм до 44 мм.

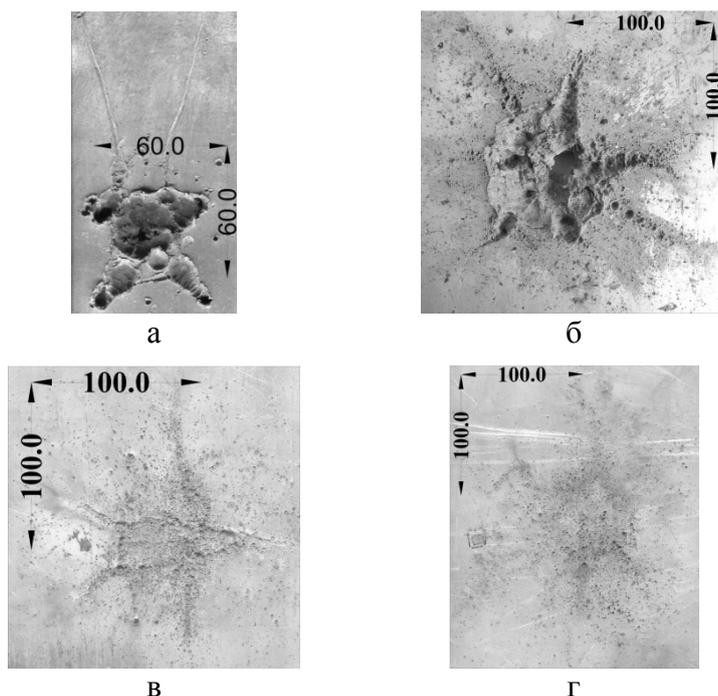


Рис.10. а) эксперимент №3.1 (Табл.1), ударник из полиэтилена $D=15$ мм, преграда – стальная сетка $a \times d = 5,9$ мм \times 0,6 мм, $V = 3320$ м/с; б) эксперимент №3.2 (Табл.1), ударник из Al-сплава $D = 15$ мм, преграда – сетка из вольфрама $a \times d = 6,0$ мм \times 0,5 мм, $V = 6410$ м/с; в) эксперимент №3.3 (Табл.1), ударник из Al-сплава $D = 6,35$ мм, преграда – стальная сетка $a \times d = 2,0$ мм \times 0,6 мм, $V = 7040$ м/с; г) эксперимент №3.4 (Табл.1), ударник из Al-сплава $D = 6,35$ мм, преграда – стальная сетка $a \times d = 2,0$ мм \times 1,0 мм, $V = 6800$ м/с.

Размер центральной области повреждений от крайней внешней точки области Б до крайней внешней точки области В составляет 72 мм. Кроме этого, присутствует пара тонких нитевидных кратеров с расстоянием 102 мм от внешних точек Д и Е до центра центрального круглого кратера (рис.11а). Таким образом, основные повреждения свидетеля в эксперименте №3.1 образованы шестью расположенными под разными углами к свидетелю выбросами различной интенсивности и деформированной тыльной частью полиэтиленового ударника.

Поскольку эксперимент №3.2 не представлялся ранее, его подробное описание дано в Приложении 1. Показано, что основным повреждением свидетеля в эксперименте №3.2 является ансамбль из семи лепестков А, Б, В, Г, Д, Е и Ж (рис.11б), длиной от 67 до 126 мм, образующих звездообразный контур. Часть этих лепестков состоит только из цепочек кратеров, а часть также включает протяженные лепестковообразные кратеры, обозначенные на рис.11б цифрами 1, 2 и 3, образованные плоскими сплошными выбросами вещества ударника длиной от 28 до 66 мм. Это тот же тип повреждений, как повреждения А, Б, В и Г на рис.11а в эксперименте №3.1. Вдобавок к звездообразному контуру в ансамбль основных повреждений входит расположенная в геометрическом центре всех повреждений круглая углублённая область диаметром 70 мм с неоднородной структурой дна. Дно области представляет собой группу отдельных кратеров.

По всей видимости эта область является результатом воздействия не до конца фрагментированной и сильно деформированной тыльной части алюминиевого ударника. Эта область видна на рис.11б.

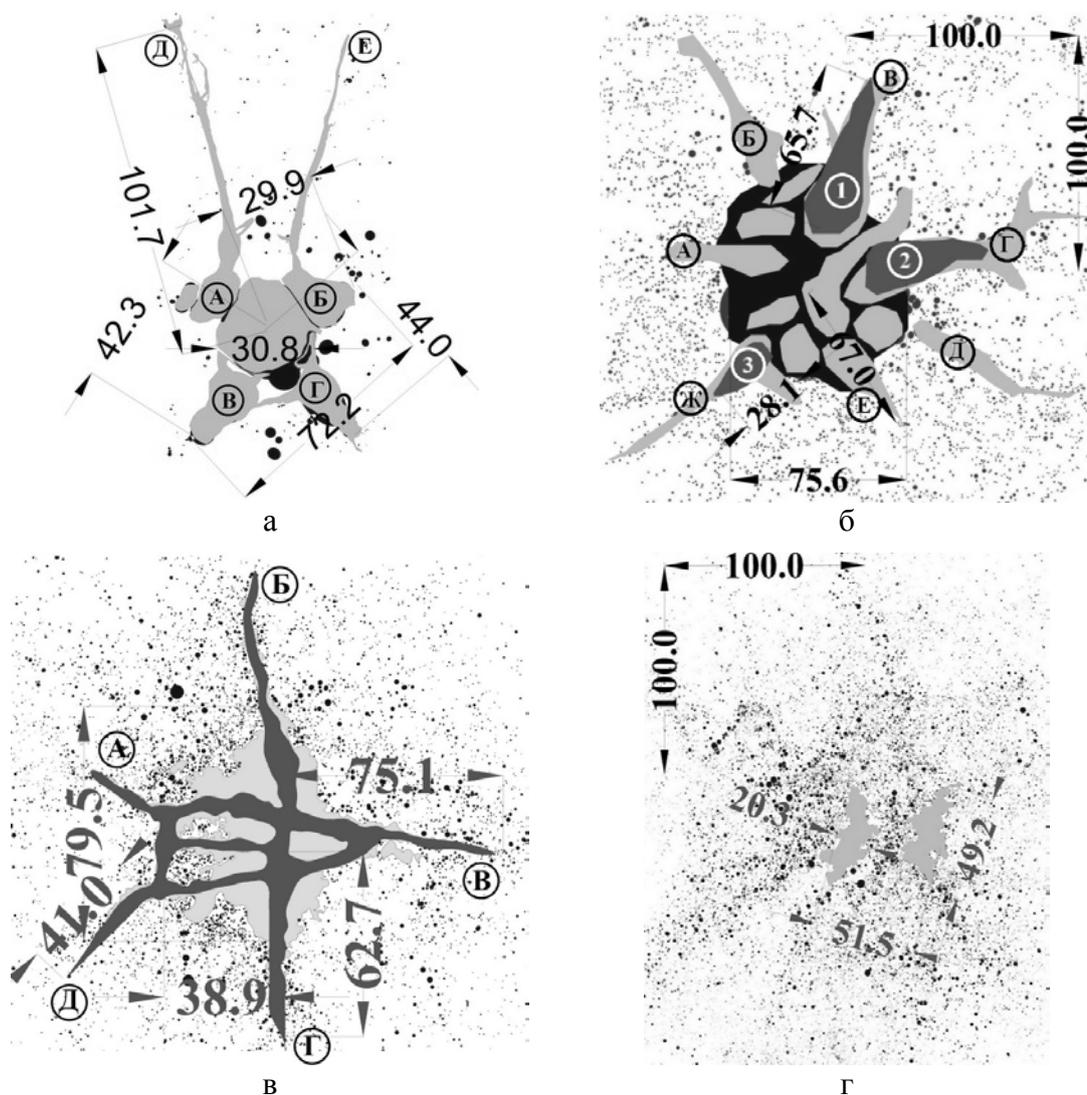


Рис.11. а) кратеры, образованные выбросами, и конусообразные кратеры. Размеры. Эксперимент №3.1 (Табл.1); б) кратеры, образованные выбросами, и конусообразные кратеры. Размеры. Эксперимент №3.2 (Табл.1); в) схема повреждений свидетеля в эксперименте №3.3; г) схема повреждений свидетеля в эксперименте №3.4.

Таким образом, сравнивая результаты экспериментов №3.1 и №3.2, можно говорить о морфологическом подобии повреждений «на макроуровне», которое является отражением морфологических особенностей структуры облака фрагментов, состоящего из близких по форме, количеству и пространственному расположению выбросов и недоразрушенной, сильно деформированной тыльной части ударника. На более «тонком уровне» морфологического подобия внутренняя структура выбросов полиэтилена и алюминия отличается и обусловлена свойствами этих материалов, проявляемыми при динамических нагрузках. В связи с этим в морфологически подобных звездообразных контурах двух экспериментов полную морфологическую идентичность имеют повреждения

в виде вытянутых лепестковообразных кратеров с однородным дном, которые обозначены на рис.11б цифрами 1, 2 и 3 и буквами А, Б, В и Г на рис.11а. Также можно считать относительно идентичными центральные круглые области в экспериментах №3.1 и №3.2, образованные недоразрушенной тыльной стороной полиэтиленового ударника и ударника из Al-сплава.

Повреждения в эксперименте №3.3 с ударником из Al-сплава и стальной сеткой отличаются отсутствием в них повреждений подобных нитевидным кратерам. Схема повреждений в этом эксперименте приведена на рис.11в. Повреждения характеризуются наличием линейно распределенных цепочек кратеров, расходящихся радиально от центральной зоны и обозначенных на рис.11в буквами А, Б, В, Г и Д, длиной от 40 мм до 75 мм. Центральная зона также характеризуется наличием линейных цепочек кратеров, образующих замкнутые контуры. Такие замкнутые цепочки кратеров образуются фрагментами тыльной части ударника. В целом можно говорить, что морфология повреждений, связанных с выбросами в эксперименте №3.3, подобна морфологии повреждений в эксперименте №3.1 с полиэтиленовым ударником в части наличия звёздообразного контура из линейно распределённых кратеров. В то же время существенно отличается характер повреждений, образованных материалом из тыльной части ударника. В целом, на основании имеющегося экспериментального материала, пока нельзя сделать однозначного вывода о том, что является критическим параметром для изменения характера фрагментации тыльной части ударника: больший удельный вес сеточной преграды, меньшее отношение плотности материала ударника к плотности материала преграды, существенно меньшее значение геометрического параметра, равного отношению апертуры преграды к диаметру проволоки ($a/d = 12,0$ и $9,8$ для экспериментов №3.1 и №3.2, против $a/d = 3,3$ для эксперимента №3.3).

Морфология повреждений свидетеля в эксперименте №3.4 определяется, по всей видимости, низким значением геометрического параметра $a/d = 2,0$. Скорее всего, в данном диапазоне скоростей и при таком значении отношения a/d фрагментация на дискретной преграде становится по своим характеристикам аналогичной фрагментации на сплошной преграде. Структура повреждений свидетеля практически не отражает структурные особенности дискретной преграды, представляя из себя достаточно однородно распределенные мелкие кратеры, плотность которых равномерно уменьшается с удалением от центра к периферийным областям (рис.11г). Это поведение отчасти схоже с экспериментами с полиэтиленовым ударником, проводившимися со струнными экранами, где повреждения свидетеля с нитевидными или линейно распределенными кратерами, образуемыми фронтальными выбросами материала ударника, отсутствовали при значениях a/d равных 1.8 и 0.8 [1].

ВЫВОДЫ

1. Приведены результаты экспериментальных исследований фрагментации сферических ударников из полиэтилена, охрупченного капролона и Al-сплава диаметрами 6.35 мм и 15 мм, возникающей при пробитии сплошных, струнных и сеточных преград на скоростях от 3 км/с до 7 км/с. По результатам анализа особенностей повреждений поверхности свидетелей выявлены различия

в морфологических особенностях образующихся облаков фрагментов при пробитии преград одинакового типа ударниками из различных материалов.

2. Сравнение ударников из полиэтилена и охрупченного стеклянными микросферами капролона показало, что при идентичных начальных условиях полиэтилен демонстрирует значительно меньшую степень фрагментации при пробитии струнной преграды. При этом существенная часть начальной кинетической энергии ударника остаётся в его неразрушенной тыльной части, которая образует центральный кратер большого объема на свидетеле. У более хрупкого материала сохраняется тенденция к образованию выбросов от фронтальной части ударника, образующих линейно-распределенные цепочки кратеров на поверхности свидетеля.

3. Эксперимент со сплошной преградой и полиэтиленовым ударником показал, что облако образовавшихся при пробитии преграды фрагментов состоит из компактных фрагментов и нитевидных объектов. Нитевидные объекты заполняют объем, близкий по форме к сферическому и замкнутый по внешнему периметру тонким кольцом. Вероятно, наиболее крупные из компактных фрагментов принадлежат к тыльной части полиэтиленового ударника. При этом, пространственное распределение кратеров от нитевидных фрагментов схоже с распределением мелких кратеров в периферийной зоне в аналогичном эксперименте с ударником из Al-сплава и сплошной преградой также из Al-сплава при соотношении $t/D = 0,22$. В этой же группе экспериментов фрагментация ударника из Al-сплава при $t/D = 0,1$ даёт распределение кратеров в периферийной зоне более похожее по структуре на распределение фрагментов эжекционных выбросов при пробитии сплошных преград. Такая структура периферийной зоны могла бы появиться, например, при фрагментации кольцевидного образования, подобного тому, повреждения от которого зафиксированы в эксперименте с полиэтиленовым ударником.

4. Эксперименты с идентичными по геометрическим параметрам сеточным преградам из стали и вольфрама с одинаковыми по размеру ударниками из полиэтилена и алюминия выявили глубокое морфологическое подобие повреждений свидетеля. При этом в экспериментах в два раза отличались скорости удара, но были идентичны отношения плотностей материала ударника и преграды.

Приложение 1.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА №3.2

Эксперимент №3.2 проведен в редакции ранее выполненных экспериментов [3] при следующих условиях:

- ударник – шарик из алюминиевого сплава В95 диаметром 15 мм и массой 5 г, имеющий после термической обработки твердость $HV \geq 125$ (рис.П1);
- испытываемый макет сеточной экранной защиты – закреплённая на каркасе сетка 6.0 мм×0.5 мм (рис.П2) из вольфрамовой проволоки с отстоящей на расстоянии 150 мм пластиной-свидетелем из алюминиевого сплава АМг6 с размерами 300×300×21 мм);
- на тыльной стороне пластины-свидетеля вплотную к ней была закреплена пластина-подложка из алюминиевого сплава АМг6 толщиной 21 мм, общая толщина свидетеля составила 42 мм;

- среда, в которой осуществлялся полет ударника и располагался макет сеточной экранной защиты – разреженная воздушная среда с остаточным давлением 0,021 МПа,
- в эксперименте была реализована скорость 6,41 км/с.



Рис.П1. Внешний вид ударника в ведущем поддоне.



Рис.П2. Сетка $a \times d = 6.0 \text{ мм} \times 0.5 \text{ мм}$ из вольфрамовой проволоки.

На снимке, полученном на рентгеновском посту №1 (см. рис.2 и рис.П3а), наблюдаются летящие ударник и фрагменты разрушенного поддона. На снимке, полученном на рентгеновском посту №2 (см. рис.2 и рис.П3б), наблюдается летящий ударник без каких-либо повреждений, а также отсутствуют осколки поддона, что подтверждает эффективное срабатывание отсечного устройства.



а



б

Рис.П3. а) рентгеновский снимок летящего по вакуумному тракту ударника; б) рентгеновский снимок ударника при подлете к сетке (в вакуумной камере).

Что касается третьего рентгеновского поста, то рентгеновский аппарат был запущен преждевременно, в связи с чем, картина фрагментации ударника не получена.

Фотографии макета сеточной защиты после нагружения ударником приведены на рис.П4.

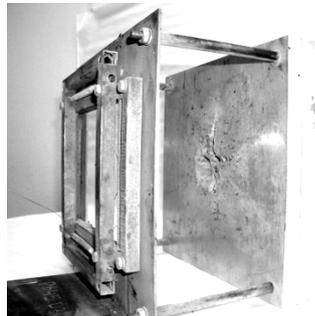
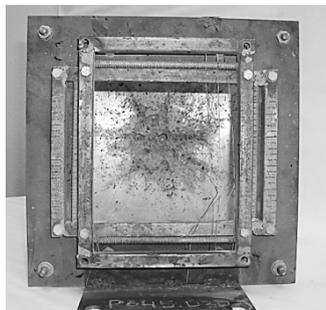


Рис.П4. Макет сеточной защиты после нагружения ударником.

Сетка сорвана с рамки и разрушена на отдельные проволоки. На лицевой стороне пластины-свидетеля отчетливо просматриваются семь цепочек кратеров длиной от 67 до 126 мм (рис.П5).

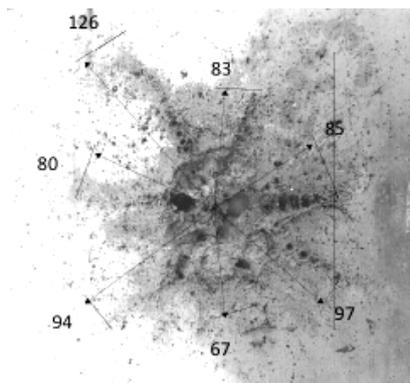


Рис.П5. Повреждения лицевой поверхности пластины-свидетеля. Длины лучей кратеров.

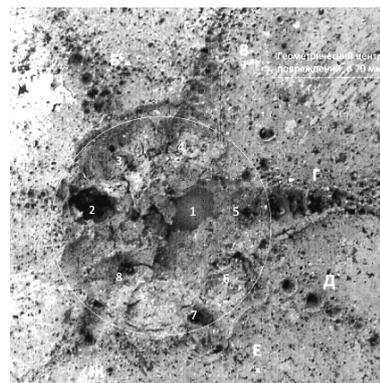


Рис.П6. Геометрический центр повреждений пластины-свидетеля.

В геометрическом центре повреждений (ГЦП) диаметром ~ 70 мм (рис.П6) располагается сквозное отверстие 1 эллиптической формы, вокруг которого расположены семь явно выраженных кратеров 2 – 8. Меньший размер отверстия 1 по отношению к размерам отверстия, полученного в опыте 1, можно объяснить наличием подпора, организованного расположенной на тыльной стороне пластины-свидетеля пластины-подложки. За геометрическим центром расположена кольцевая область со звездообразным наружным контуром, подверженная эрозионному воздействию потока высокоскоростных мелкодисперсных частиц. Расстояния между противоположно расположенными вершинами звездообразного контура составляют от 150 до 200 мм. От ГЦП тянутся в радиальных направлениях цепочки постепенно уменьшающихся в размерах по мере удаления от ГЦП кратеров. Асимметрия ГЦП, а также различие длин цепочек кратеров и их размеров могут быть объяснены смещением ударника относительно центра ячейки сетки в точке удара. Описание характера повреждений лицевой стороны пластины-свидетеля приведено в Таблице П1.

Таблица П1.

Характеристики повреждений лицевой поверхности пластины-свидетеля.

Обозначение повреждения	Характеристика повреждения
Отверстие 1(ГЦП)	Отверстие эллиптической формы с размерами 12×18 мм.
Кратер 2 (ГЦП)	Кратер диаметром 16 мм и глубиной 18 мм.
Кратер 3 (ГЦП)	Кратер диаметром 18 мм и глубиной 11 мм.
Кратер 4 (ГЦП)	Кратер диаметром 15 мм и глубиной 8 мм.
Кратер 5 (ГЦП)	Кратер диаметром 12 мм и глубиной 7 мм.
Кратер 6 (ГЦП)	Кратер диаметром 15 мм и глубиной 4 мм.
Кратер 7 (ГЦП)	Кратер диаметром 15 мм и глубиной 12 мм.
Зона кратеров 8 (ГЦП)	Наложение трех кратеров с длиной зоны 42 мм и глубиной 15 мм.
Цепочка А	Цепочка мелких кратеров диаметром от 0,5 до 1,5 мм и глубиной до 0,5 мм.
Цепочка Б	Цепочка из трех наложенных и трех одиночных кратеров диаметром 3 мм и глубиной 3 мм и множества мелких кратеров диаметром до 0,5 мм и глубиной до 0,3 мм.
Цепочка В	Кратер продолговатой формы, уменьшающийся

	по ширине с 10 до 5 мм и по глубине с 8 до 2 мм по мере удаления от ГЦП. Образован множеством наложенных кратеров.
Цепочка Г	Кратер продолговатой формы, уменьшающийся по ширине с 11 до 5 мм и по глубине с 7 до 2 мм по мере удаления от ГЦП. Образован четырьмя наложенными кратерами.
Цепочка Д	Цепочка из пяти кратеров диаметров от 5 до 2 мм и глубиной от 3,5 до 1 мм. Уменьшаются по мере удаления от ГЦП.
Цепочка Е	Цепочка из одиночного кратера диаметром 10 мм и глубиной 8 мм и нескольких малых кратеров диаметром до 0,5 мм и глубиной до 0,3 мм.
Цепочка Ж	Цепочка из двух кратеров диаметром 7 мм и глубиной 7 мм и нескольких наложенных мелких кратеров диаметром до 0,5 мм и глубиной до 0,3 мм.

На тыльной стороне пластины-свидетеля (рис.П7) в зоне с размерами 90 мм×100 мм образовался пологий выступ высотой 5 мм с отверстием в центре. От отверстия идут три трещины длиной от 12 мм до 20 мм.

Высокоэнергетический поток частиц из Al-сплава, выбитых из пластины-свидетеля при пробитии ее ударником и воздействующих на пластину-подложку, привел к прогибу последней (см. рис.П8). В центре прогиба пластины-подложки образовался кратер с отверстием вытянутой формы 4 мм×3 мм (рис.П9). Обращает на себя внимание то, что поверхность кратера подвержена сильной эрозии. Кроме того, как на тыльной поверхности пластины-свидетеля, так и на лицевой поверхности пластины-подложки наблюдаются царапины в окружности диаметром ~ 130 мм, распространяющиеся в радиальных направлениях от центра повреждения. Царапины получены выбитыми из пластины-свидетеля и движущимися в радиальных направлениях в образовавшемся зазоре между пластиной-свидетелем и пластиной-подложкой частицами алюминия. На тыльной стороне пластины-подложки имеет место зона откола диаметром ~ 90 мм с рваными отогнутыми наружу краями высотой до 16 мм (рис.П9).

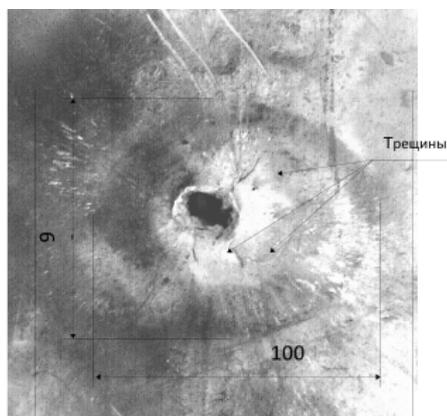


Рис.П7. Тыльная сторона пластины-свидетеля.

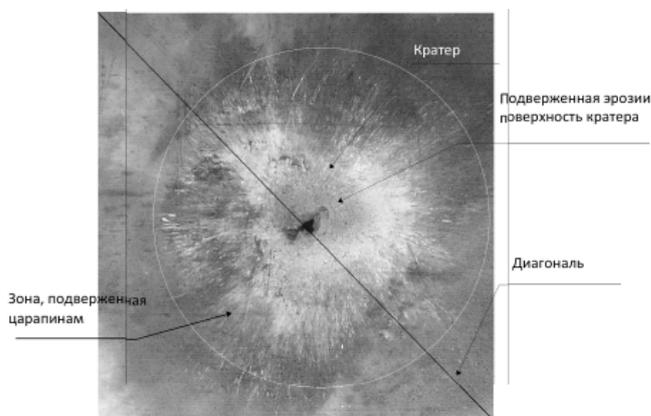


Рис.П8. Лицевая сторона пластины-подложки.

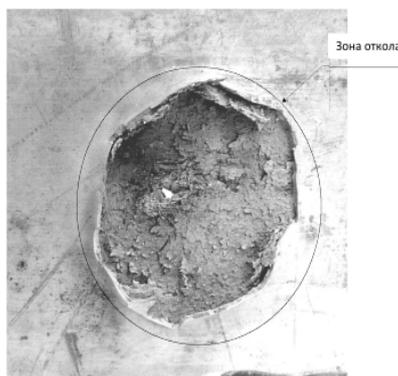


Рис.П9. Зона откола.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шумихин Т.А., Безруков Л.Н., Мягков Н.Н. *Модельный эксперимент, проясняющий механизм фрагментации высокоскоростного ударника на дискретных экранах* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2007. – Т.13. – №3. – С.341-355.
2. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface* // Acta Mechanica. – 2016. – Vol.227. – Pp.2911-2924.
3. Калмыков П.Н., Лапичев Н.В., Михайлов И.А., Мягков Н.Н., Сальников А.В., Шумихин Т.А. *Экспериментальные исследования фрагментации сферических алюминиевых ударников на сплошных и сеточных экранах при скоростях удара до 7 км/сек* // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2018. – Т.24. – №1. – С.46-69.
4. Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N. *Properties of ejecta generated at high-velocity perforation of thin bumpers made from different constructional materials* // International Journal of Impact Engineering. – 2012. – Vol.50. – Pp.90-98.
5. Horz F. et.al. *Penetration Experiments in Aluminum 1100 Targets Using Soda-Lime Glass Projectiles*. – NASA TM104813, June 1995.
6. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers* // International Journal of Impact Engineering. – 2010. – Vol.37. – Pp.980-994.

REFERENCES

1. Shumikhin T.A., Bezrukov L.N., Myagkov N.N. *Model'nyj ehksperiment, proyasnyayushhij mekhanizm fragmentatsii vysokoskorostnogo udarnika na diskretnykh ehkranakh [Modeling experiment that reveals mechanics of fragmentation of high-velocity projectile on discrete bumpers]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2007, Vol.13, No.3, Pp.341-355.
2. Myagkov N.N., Shumikhin T.A. *Modeling of high-velocity impact ejecta by experiments with a water drop impacting on a water surface*. Acta Mechanica, 2016, Vol.227, Pp.2911-2924.

3. Kalmykov P.N., Lapichev N.V., Mikhaylov I.A. et al. *Ehksperimental'nye issledovaniya fragmentatsii sfericheskikh alyuminievykh udarnikov na sploshnykh i setochnykh ehkranakh pri skorostyakh udara do 7 km/sek [Experimental study of fragmentation of spherical aluminum projectiles on continuous and mesh bumpers at velocities up to 7 km/s]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2018, Vol.24, No.1, Pp.46-69.
4. Shumikhin T.A., Myagkov N.N., Bezrukov L.N. *Properties of ejecta generated at high-velocity perforation of thin bumpers made from different constructional materials*. International Journal of Impact Engineering, 2012, Vol.50, Pp.90-98.
5. Horz F. et.al. *Penetration Experiments in Aluminum 1100 Targets Using Soda-Lime Glass Projectiles*. NASA TM104813, June 1995.
6. Myagkov N.N., Shumikhin T.A., Bezrukov L.N. *Experimental and Numerical Study of Peculiarities at High-Velocity Interaction between a Projectile and Discrete Bumpers*. International Journal of Impact Engineering, 2010, Vol.37, Pp.980-994.

Поступила в редакцию 25 сентября 2018 года.

Сведения об авторах:

Калмыков Петр Николаевич – зам.глав.конструктора, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики – Российский федеральный ядерный центр», г. Саров, Россия

Лапичев Николай Викторович – к.т.н., в.н.с., ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики – Российский федеральный ядерный центр», г. Саров, Россия

Михайлов Иван Анатольевич – инж.-исслед. 1 категории, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики – Российский федеральный ядерный центр», г. Саров, Россия

Мягков Николай Николаевич – д.ф.-м.н., зав.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: nn_myagkov@mail.ru

Пыриков Матвей Дмитриевич – ст.лаб., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия

Сальников Александр Викторович – нач.отдела, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики – Российский федеральный ядерный центр», г. Саров, Россия

Шумихин Тимофей Александрович – к.т.н., с.н.с., ФГБУН Институт прикладной механики РАН, г. Москва, Россия; e-mail: shumikhin@iam.ras.ru