

ИССЛЕДОВАНИЯ ФРАГМЕНТАЦИИ СФЕРИЧЕСКИХ АЛЮМИНИЕВЫХ УДАРНИКОВ НА ТЯЖЕЛОЙ СЕТКЕ ПРИ СКОРОСТЯХ ДО 7 км/с

Н. Н. Мягков^{a}, П. Н. Калмыков^b, Н. В. Лапичев^b, А. И. Леонтьев^b,
В. Н. Номаконова^b, А. В. Пономарев^a, А. В. Сальников^b,
О. А. Соколов^b, Т. А. Шумихин^{a**}*

*^a Институт прикладной механики Российской академии наук
125040, Москва, Россия*

*^b Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
Российский федеральный ядерный центр
607188, Саров, Нижегородская обл., Россия*

Поступила в редакцию 26 марта 2020 г.,
после переработки 21 июля 2020 г.
Принята к публикации 28 августа 2020 г.

Приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования фрагментации ударников из алюминиевого сплава на вольфрамовом сеточном экране при скоростях соударения до 7 км/с. Разгон ударников производился с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки. Для регистрации состояния ударника перед соударением с сеточным экраном и процесса его фрагментации использована рентгеновская съемка. Параметры облака фрагментов ударника регистрировались также с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМгб, размещаемой за сеточным экраном. Численное моделирование было выполнено методом гладких частиц. Отмечены особенности морфологии облака фрагментов и дана оценка скоростей фрагментов в различных частях облака. Дана оценка возникающего кумулятивного эффекта. Результаты экспериментов сравниваются с численным моделированием.

DOI: 10.31857/S0044451021020024

1. 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 [1, 2]. Важное место в этих исследованиях занимает сеточный экран как элемент конструкции составного экрана, позволяющий снизить общий вес защиты КА [3, 4] при неизменной ее эффективности.

Эффективность применения сетки в составных экранах вызвала интерес к изучению фрагментации ударника на одиночных сеточных экранах. Такие исследования проводились начиная с 90-х годов (например, [5–11]). Наиболее детальные исследования были выполнены в работах [5, 6], в которых было проведено сравнительное изучение особенностей высокоскоростного разрушения ударника на сеточном и сплошном экранах, а также исследованы дисперсионные и фрагментационные свойства сеток при их взаимодействии с ударником. В работе [6] было описано наиболее яркое различие в характере распределения фрагментов ударника при пробивании сеточного экрана, а именно, присутствие групп кратеров, линейнообразно распределенных по поверхности пластины-свидетеля, которое использовалось в экспериментах для регистрации облака фрагментов. Эти группы кратеров являются следствием главной особенности разрушения ударника на сеточном

* E-mail: nn_myagkov@mail.ru

** E-mail: tshumikhin@gmail.com

Таблица 1. Эксперименты [7, 8] по взаимодействию ударника с сеточным экраном (d_w — диаметр проволоки, l_a — апертура — видимое на просвет расстояние между проволоками)

№ эксп.	Диаметр, мм/ материал ударника	$l_a \times d_w$, мм $\times$ мм/материал экрана/его удельная плотность ρ_b , кг/м ²	Скорость ударника, км/с	Скорость лидирующего фрагмента, км/с	Коэфф. усиления k_{amp}
1.1	6.35/сплав АД-1	2.0×0.6 /сталь 3/1.71	5.84	> 7.38	> 1.26
1.2	6.35/сплав АД-1	2.0×1.0 /сталь 3/3.83	6.80	9.2	1.35
1.3	6.35/сплав АД-1	2.0×0.6 /сталь 3/1.71	7.04	9.7	1.38

экране — формирования струй фрагментов, движущихся как в направлении движения ударника, так и поперечных направлениях. При этом скорость головной части струи может существенно превышать скорость ударника до начала его взаимодействия с сеткой. На основе численных расчетов была получена следующая оценка: при прицеливании ударника в центр ячейки сетки скорость головной части струи, движущейся в направлении движения ударника, может превышать скорость ударника до 1.5 раз [6]. В наших работах [7, 8] было дано прямое экспериментальное доказательство существования этого кумулятивного эффекта. Результативные эксперименты из работ [7, 8] представлены в табл. 1. Определение скорости фрагментов проводилось с помощью рентгеновской съемки. Видно, что в экспериментах было получено увеличение скорости до 1.38 раз. Наибольшая скорость, полученная в экспериментах, составила 9.7 км/с.

Все эксперименты, показанные в табл. 1, были выполнены со стальными сетками. В настоящей работе приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования фрагментации ударников из алюминиевого сплава В95 диаметром 9 мм на вольфрамовых сетках с апертурой $l_a = 3.2$ мм и диаметром проволоки $d_w = 0.5$ мм при скоростях соударения до 7 км/с. Отмечены особенности морфологии облака фрагментов посредством изучения повреждений поверхности пластины-свидетеля. Результаты экспериментов сравниваются с численным моделированием, которое было выполнено методом гладких частиц (smoothed particle hydrodynamics, SPH) с помощью пакета LS-DYNA [12].

Метод SPH является бессеточным численным методом, чрезвычайно удобным для моделирования высокоскоростных ударных явлений. Отсутствие сетки позволяет с помощью метода SPH есте-

ственно моделировать процессы, очень трудно поддающиеся описанию другими методами: 1) большие деформации и смешивание материалов; 2) интенсивную фрагментацию и движение облака осколков. Довольно полный обзор, включая историю метода SPH, можно найти в работе [13]. Нельзя не упомянуть одну из недавних работ по развитию этого метода, где был разработан высокоадаптивный алгоритм баллирования нагрузки для параллельного моделирования с использованием метода SPH [14], позволяющий проводить расчеты с десятками миллионов SPH-частиц.

В заключение отметим, что существуют другие, отличные от SPH методы, позволяющие эффективно выполнять численное моделирование процессов при высоких плотностях энергии [15].

2. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Схема проведения эксперимента приведена на рис. 1, фотографии испытательного оборудования — на рис. 2 и 3.

Разгон ударника в стволе легкогазовой пушки осуществляется в неразрезном поддоне, отделение ударника от поддона происходит путем разрушения поддона на выходе из ствола. Отсекание осколков поддона проводится на входе в вакуумную камеру с использованием устройства взрывной отсечки [16].

После отделения от поддона ударник входит через вакуумный тракт в вакуумную камеру. Скорость ударника измеряется при движении его по вакуумному тракту с использованием электромагнитных датчиков (ЭД1, ЭД2) и радиолокационных станций (РЛС1, РЛС2), в вакуумной камере перед встречей с макетом сеточного экрана — с помощью электроконтактных датчиков (КД1, КД2), выполненных из металлизированной лавсановой пленки толщиной

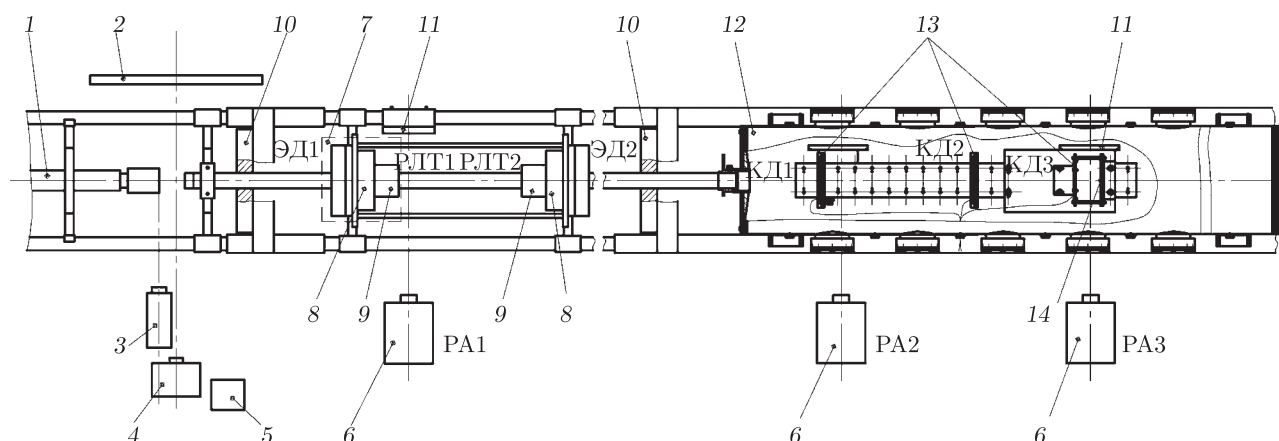


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: 1 — легкогазовая пушка; 2 — экран; 3 — фотоприемное устройство; 4 — фотокамера «ЭПОС»; 5 — импульсный источник света; 6 — рентгеновский аппарат «НОРА» (РА1–РА3); 7 — бесконтактное формирующее сечение; 8 — электромагнитный датчик (ЭД1, ЭД2); 9 — радиолокационная станция (РЛС1, РЛС2); 10 — отсекающий; 11 — кассета с рентгеновской пленкой; 12 — вакуумная камера; 13 — электроконтактный датчик (КД1–КД3); 14 — макет сеточной экранной защиты

6 мкм, не оказывающей разрушающего воздействия на ударник.

Была предусмотрена рентгеновская регистрация состояния ударника и разрушенного поддона в вакуумном тракте (рентгеновский аппарат РА1), а также состояния ударника до (рентгеновский аппарат РА2) и после (рентгеновский аппарат РА3) взаимодействия с сеточным экраном. Запуск рентгеновского аппарата РА1 осуществляется от бесконтактного формирующего сечения БФС1, а запуск рентгеновских аппаратов РА2 и РА3 — от электроконтактных датчиков соответственно КД1 и КД3.

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

Эксперименты были выполнены с ударниками сферической формы из сплава алюминия В95 диаметрами $D_{прж} = 9.0$ мм и сеточными экранами (рис. 3а) с диаметром проволоки $d_w = 0.5$ мм и апертурой $l_a = 3.2$ мм, изготовленными из вольфрамовой проволоки. Для разгона в стволе метательной установки ударник помещался в поддон из полимерного материала фенилон (рис. 3б).

Для регистрации облака фрагментов за сеточным экраном на расстоянии 165 мм размещалась однослойная (толщиной 16.5 мм) или двухслойная



Рис. 2. Панорама проведения эксперимента с легкогазовой пушкой (ЛГП)

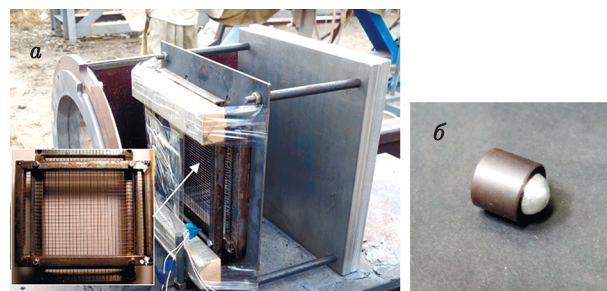


Рис. 3. а) Макет сеточного экрана с пластиной-свидетелем перед установкой в вакуумной (испытательной) камере. б) Ударник в поддоне

(толщиной 33 мм) пластина-свидетель из алюминиевого сплава АМг6 размером 300 мм × 300 мм (рис. 3а). Испытуемый экран и пластина-свидетель размещались в вакуумной (испытательной) камере.

Таблица 2. Эксперименты по взаимодействию ударника с сеточным экраном

№ эксп.	Диаметр, мм/ материал ударника	$l_a \times d_w$, мм $\times$ мм/ материал экрана/ его удельная плотность, кг/м ²	Материал свидетеля/дистанция от свидетеля до преграды, мм	Скорость ударника, км/с
2.1	9.0/ сплав В-95	3.2×0.5 / вольфрам/2.04	АМг6/165	4.53
2.2	9.0/ сплав В-95	3.2×0.5 / вольфрам/2.04	АМг6/165	7.15
2.3	9.0/ сплав В-95	3.2×0.5 / вольфрам/2.04	АМг6/165	6.79

Сеточный экран (рис. 3а) был выполнен в виде пересекающихся под углом 90° и расположенных с периодом 3.7 мм вольфрамовых проволок (99.95 % W, остальные 0.05 % — примеси Mo, K, Ca, Al, Fe) диаметром 0.5 мм, закрепленных на стальной рамке путем местного расплавления материала на рамке под проволокой.

Данные для выполненных экспериментов (№№ 1–3) представлены в табл. 2.

3. МЕТОД ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ И МОДЕЛИ МАТЕРИАЛОВ

Численное моделирование в трехмерной геометрии было выполнено на основе полной системы уравнений механики деформируемого твердого тела методом SPH с помощью лицензионного пакета LS-DYNA [12] версии 971. Он дает возможность решения трехмерных динамических нелинейных задач механики деформируемого твердого тела.

Вычисления были выполнены с ударниками сферической формы диаметрами $D_{prj} = 9.0$ мм и сеточными экранами, имеющими диаметр проволоки $d_w = 0.5$ мм и апертуру ячейки сетки $l_a = 3.2$ мм. В расчетах линия движения ударника была перпендикулярна плоскости экрана.

Число SPH-частиц в ударнике и общее число (ударник + экран) SPH-частиц, которые использовались в расчетах, были соответственно 84823 и 103093 или 393719 и 465749.

В качестве определяющих уравнений брали уравнение состояния Ми–Грюнайзена [17] и модель Джонсона–Кука [18] для предела текучести материала. В качестве модели разрушения использовалась деформационная модель Джонсона–Кука

[12]. Основные данные для вольфрама и сплава алюминия, использованные нами в расчетах, показаны в табл. 3. Данные для алюминиевого сплава в табл. 3 — это данные для сплава Al7075-T651, близкого по своим параметрам российскому сплаву В95.

Модель Джонсона–Кука [18] имеет достаточно простой вид и в то же время учитывает основные эффекты, наблюдаемые в экспериментах при высокоскоростном деформировании металлов: упрочнение за счет накопления пластических деформаций и увеличения скорости деформирования, а также разупрочнение за счет нагрева материала. Предел текучести в модели Джонсона–Кука имеет вид

$$Y = (A + B\bar{\epsilon}_p^n) (1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) (1 - T^{*m}), \quad (1)$$

где $\bar{\epsilon}_p$ — эффективная пластическая деформация, $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}_p / \dot{\epsilon}_0$ — скорость эффективной пластической деформации, $\dot{\epsilon}_0 = 1 \text{ с}^{-1}$; $T^* = (T - T_0) / (T_m - T_0)$, где T_0 — начальная температура и T_m — температура плавления. Параметры A , B , C , n , m и T_m являются параметрами материала (табл. 3). Деформация при разрушении в модели Джонсона–Кука имеет вид

$$\epsilon_f = [D_1 + D_2 \exp(D_3 \sigma^*)] (1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*) \times (1 + D_5 T^*), \quad (2)$$

где σ^* — отношение давления к эффективному напряжению, $D_1, \dots, D_5$ — константы в модели разрушения (табл. 3). Разрушение в данной SPH-частице происходит, если параметр поврежденности $D = \sum \Delta \bar{\epsilon}_p / \epsilon_f$ становится равным единице (суммирование ведется по всем шагам по времени до момента разрушения).

Таблица 3. Константы моделей пластичности и разрушения Джонсона–Кука и константы уравнения Ми–Грюнайзена

Параметры	Модель	
	Экран: вольфрам [19–21]	Ударник: сплав алюминия [22, 23]
<i>Уравнение состояния</i>		
ρ_0 , кг/м ³	18200	2810
c_b , м/с	4030	5240
k	1.237	1.40
γ_0	1.67	1.97
a	0.38	0
T_0 , К	293	293
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	129	960
<i>Модель пластичности Джонсона–Кука</i>		
A , ГПа	2.2	0.527
B , ГПа	2.92	0.575
n	0.19	0.72
C	0.025	0.017
m	1.09	1.61
G , ГПа	160	27
T_m , К	3695	793
<i>Модель разрушения</i>		
$D1$	0.0	0.110
$D2$	0.33	0.572
$D3$	–1.5	–3.446
$D4$	0.0	0.016
$D5$	0.0	1.099

Примечание. G — модуль сдвига, c_b и k — параметры на ударной адиабате $S = c_b + kU$, где S и U — соответственно скорость ударной волны и массовая скорость, $K_s = \rho_0 c_b^2$ — адиабатический модуль объемного сжатия, $\gamma = \gamma_0 + a(\rho/\rho_0 - 1)$ — коэффициент Грюнайзена, a — константа.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

4.1. Эксперимент № 2.1

Эксперимент № 2.1 (см. табл. 2) заметно отличается по величине скорости ударника от остальных

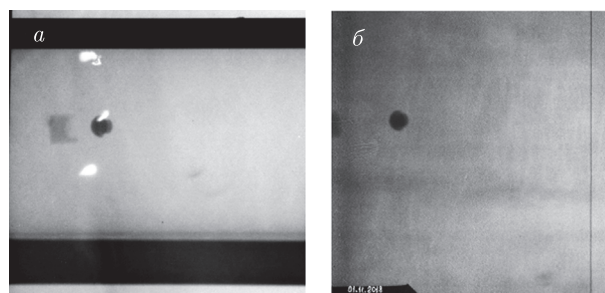


Рис. 4. Рентгеновские снимки, характеризующие состояние ударника *а)* в вакуумном тракте (РА1), *б)* в вакуумной камере перед встречей с экраном (РА2)

экспериментов, поэтому мы его рассмотрим отдельно. Кроме того, в этом эксперименте рентгеновская съемка позволила получить снимки хорошего качества, которые дают возможность оценить скорости фрагментов в различных частях облака фрагментов.

На рис. 4 приведены снимки, полученные рентгеновскими аппаратами РА1 и РА2, регистрирующими состояние ударника и поддона до встречи с сеточным экраном. На снимке, полученном в вакуумном тракте рентгеновским аппаратом РА1 на расстоянии 3460 мм от экрана, наблюдаются ударник и летящий следом за ним на удалении 9 мм поддон (рис. 4*а*). На снимке, полученном в вакуумной камере на расстоянии 1150 мм от экрана, летит только ударник, что свидетельствует о срабатывании отсечного устройства (рис. 4*б*).

На рис. 5 приведены схема рентгеновской регистрации облака фрагментов ударника, разрушенного на сетке, и рентгеновский снимок, полученный через 13.1 мкс после взаимодействия ударника с сеткой. Для контроля ориентации использовался отвес, вывешенный непосредственно перед кассетой с рентгеновской пленкой (рис. 5*а*). Проекция отвеса на рентгеновском снимке (рис. 5*б*) видна как темная вертикальная линия. Проекция ближнего к кассете края сетки (обозначена как точка 4 на рис. 5*а*) экспонируется через зазор рамки крепления и видна как светлая вертикальная полоса с точкой 4' на рис. 5*б*. Вертикальное положение проекции сетки подтверждает соосное расположение рентгеновского аппарата РА3 и отвеса. На рис. 5*а* также схематично изображено облако фрагментов, образованное при разрушении ударника и восстановленное по изображению на рентгеновском снимке (рис. 5*б*). Видимая на рентгеновском снимке проекция облака частиц отражает упомянутую выше особенность разрушения ударника на сеточном экране — формирование

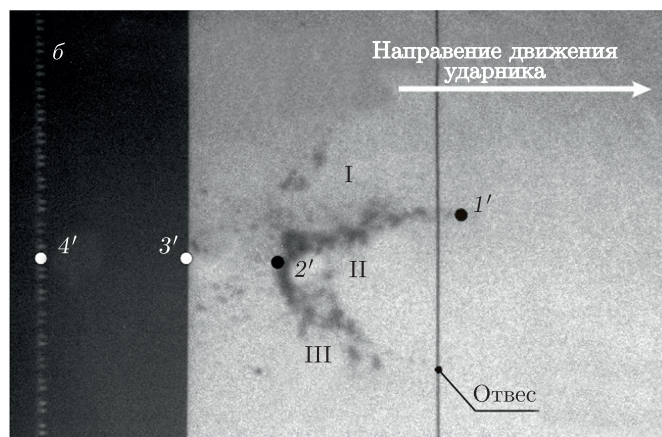
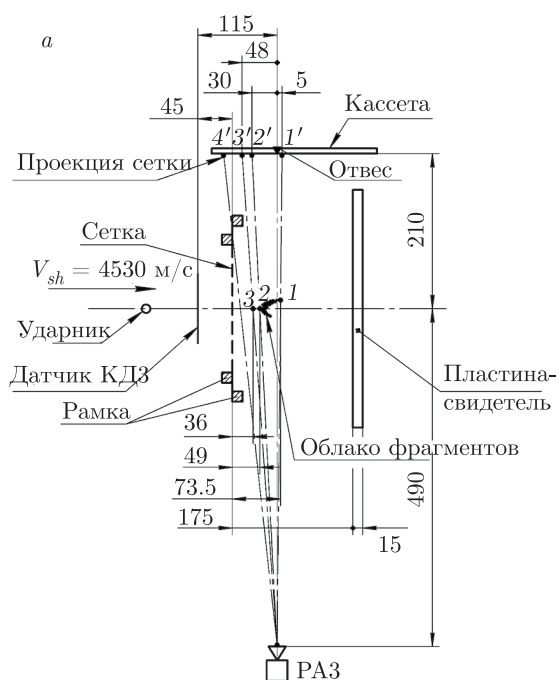


Рис. 5. Схема рентгеновской регистрации облака фрагментов ударника в эксперименте № 2.1 (а) и снимок, полученный рентгеновским аппаратом (РАЗ) (б)

струй фрагментов, движущихся как в направлении начального движения ударника, так и в поперечных направлениях. Струи формируются в результате перемещения материала фронтальной части ударника сквозь ячейки сетки. На рис. 5б три видимых на проекции струи отмечены римскими цифрами: две боковые струи I и III и центральная струя II. Проекция наиболее удаленной от мишени на момент регистрации точки облака фрагментов — головная часть струи II — обозначена на рис. 5б точкой 1'. На схематичном изображении облака фрагментов на рис. 5а ей соответствует точка 1. Проекция тыльной части облака на рентгеновском снимке (рис. 5б) обозначена точкой 2'. На схеме рис. 5а ей соответствует точка 2. По всей видимости, эта область сформирована фрагментами тыльной части ударника. На рис. 5а также изображены линии этих проекций. Кроме того, следует отметить указанную на схеме точку 3, соответствующую границе визуализируемой области, которой соответствует точка 3' на рентгеновском снимке, обозначающая границу видимой области слева и затемнение справа.

Известное расстояние от проекции сетки на рентгеновскую пленку до отвеса и известная задержка времени срабатывания рентгеновского аппарата относительно момента взаимодействия ударника с сет-

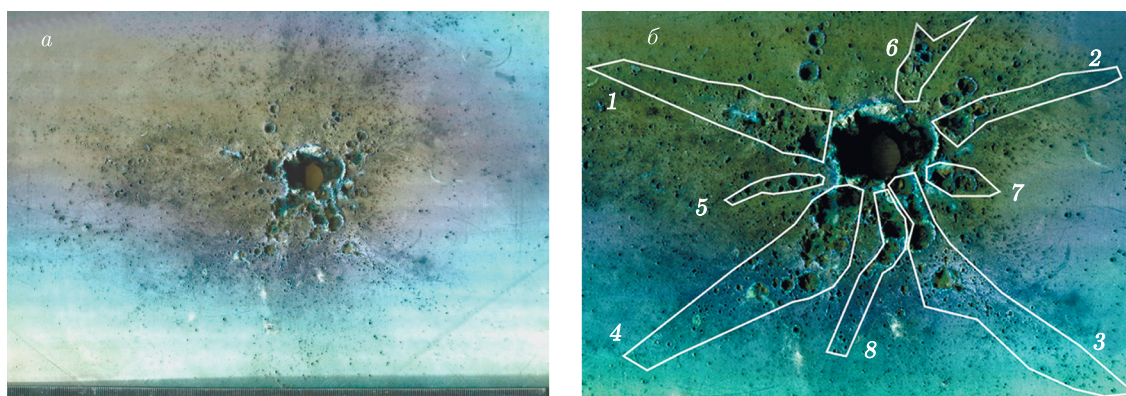
кой, с учетом геометрии схемы рентгеновской регистрации, позволяют определить скорости фрагментов. Результат показан в табл. 4. Скорость лидирующего фрагмента имеет величину 5726 м/с, что в 1.26 раз превышает начальную скорость ударника. Данный эксперимент подтверждает результаты ранее проведенных нами экспериментов по фрагментации алюминиевого ударника на стальных сетках (см. табл. 1), в которых скорость лидирующего фрагмента существенно превышала исходную скорость ударника.

В табл. 4 для сравнения показаны результаты измерения скорости фрагментов в эксперименте № 1.1 со стальной сеткой (см. табл. 1). Коэффициент ослабления k_{att} , см. в таблице, определяется отношением скорости тыльной части облака фрагментов к начальной скорости ударника, а коэффициент усиления k_{amp} — отношением скорости фрагментов в головной части струи к начальной скорости ударника. Из табл. 4 видно, что k_{att} и k_{amp} хорошо согласуются для двух экспериментов.

На рис. 6 приведена фотография лицевой поверхности пластины-свидетеля с повреждениями. В геометрическом центре повреждений пластины-свидетеля толщиной 16,5 мм имеется сквозное отверстие с рваными краями. Область, примы-

Таблица 4. Результаты экспериментального измерения скоростей фрагментов ударника в экспериментах №2.1 и 1.1

№ эксп.	Диаметр, мм/ материал ударника	$l_a \times d_w$, мм $\times$ мм/ материал сетевого экрана	Скорость ударника, км/с	Скорости фрагментов в тыльной части облака, км/с	k_{att}	Скорости фрагментов в головной части струи, км/с	k_{amp}
2.1	9.0/ сплав В95	3.2×0.5 / вольфрам	4.53	3.74	0.83	5.72	1.26
1.1	6.35/ АД-1	2.0×0.6 / сталь	5.84	4.69	0.80	7.38	1.26

Рис. 6. а) Общий вид пластины-свидетеля (размер 300 мм $\times$ 300 мм) эксперимента №2.1 с повреждениями (вид лицевой стороны). б) Увеличенное изображение центральной области с цепочками кратеров (1–8)

кающая к отверстию в центре повреждений на пластине-свидетеле (рис. 6), сформирована воздействием плотно летящих фрагментов центральной части облака и имеет повреждения в виде кратеров глубиной до 12 мм.

От геометрического центра повреждений (рис. 6б) идут четыре явно выраженные цепочки кратеров, имеющие длины от 60 до 75 мм. Кратеры, формирующие цепочки, лежащие вблизи центрального отверстия, имеют диаметры до 6 мм и глубины до 7 мм, наиболее удаленные — диаметры до 0.5 мм и глубины до 0.2 мм. Практически вся поверхность пластины-свидетеля в области диаметром 250 мм покрыта мелкими кратерами диаметрами от 0.5 до 2.0 мм. Из них можно выделить также несколько менее длинных цепочек из более мелких кратеров (например, цепочки 5, 6, 7 и 8 на рис. 6б), причем размеры кратеров уменьшаются по мере удаления

от геометрического центра повреждений. Цепочки кратеров имеют тенденцию располагаться вертикально и горизонтально под углами, близкими к 45° , что отражает вертикально-горизонтальное расположение проволок, из которых сплетена сетка. Механизм пространственного распределения струй фрагментов и, соответственно, цепочек кратеров обсуждался ранее [6].

Было проведено численное моделирование эксперимента №2.1. Общее число SPH-частиц в моделировании составляло 465749, из них 393719 частицами моделировался ударник. Данные, использованные для моделирования, показаны в табл. 2 и 3. Результаты моделирования представлены на рис. 7, 8 и в табл. 5.

На рис. 7 показано облако фрагментов в различные моменты времени, полученное численным моделированием при прицеливании ударника в центр

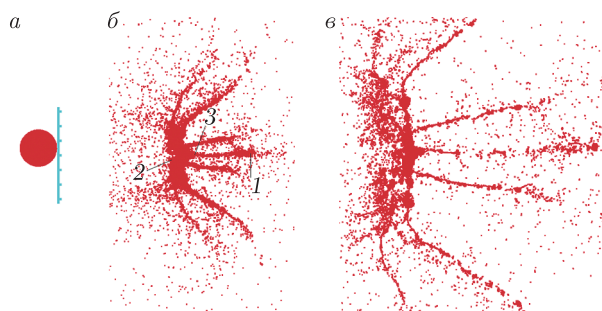


Рис. 7. Фрагментация алюминиевого ударника на вольфрамовой сетке (вид сбоку): а) $t = 0$ мкс; б) $t = 13$ мкс (цифрами отмечены точки, где определялась массовая скорость, см. рис. 8); в) $t = 36$ мкс. Скорость удара 4.53 км/с. На рис. б и в отображены только частицы ударника

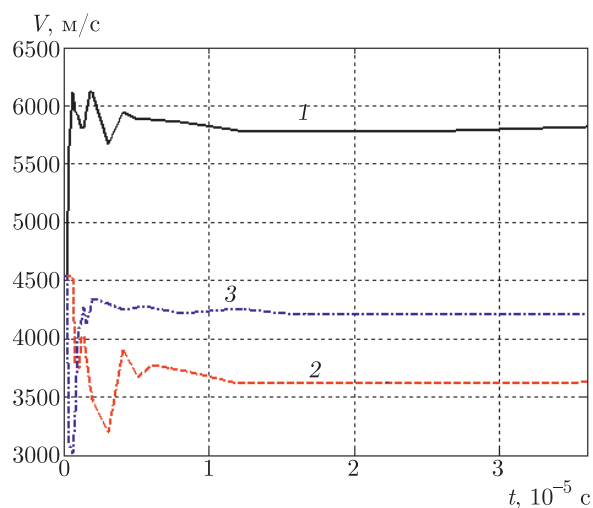


Рис. 8. Скорости головной 1 и хвостовой 3 частей центральной струи, а также скорость тыльной 2 части облака фрагментов в зависимости от времени

ячейки сетки. В этом случае образуется одна центральная и четыре основные боковые струи фрагментов, которые хорошо видны на рис. 7б и 7в. Кроме того, образуются четыре боковые струи более мелких фрагментов, они отчетливо видны на рис. 7б. Общая картина фрагментации, показанная на рис. 7, находится в качественном согласии с экспериментом (рис. 6): восемь боковых струй производят четыре цепочки «крупных» и четыре цепочки «мелких» кратеров, расходящиеся от центра повреждений на пластине-свидетеле (рис. 6б). Центральная струя с фрагментами центральной части облака фрагментов (рис. 7б,в) образует в эксперименте сквозное отверстие в пластине-свидетеле (рис. 6).

Таблица 5. Результаты расчета скорости фрагментов ударника в численном моделировании (рис. 8)

Положение фрагмента	Скорость ударника, км/с	Скорость фрагмента, км/с	Отношение скорости фрагмента к скорости ударника
В головной части центральной струи 1	4.53	5.82	1.28
В хвостовой части центральной струи 3		4.21	0.93
В тыльной части облака фрагментов 2		3.63	0.80

Момент времени $t = 13$ мкс (рис. 7б) соответствует регистрации фрагментов в эксперименте (рис. 5), где определялись скорости фрагментов в различных частях облака. Момент времени $t = 36$ мкс (рис. 7в) приблизительно соответствует времени встречи облака фрагментов с пластиной-свидетелем. На снимке (рис. 5) видны одна центральная и две боковые струи, так как направление съемки было соосно одному из направлений проволок в сеточном экране. Чтобы на рис. 7б,в были видны все боковые струи, картинка была повернута примерно на 45° относительно оси, совпадающей с направлением движения ударника, и отключен показ частиц сетки. В эксперименте (рис. 5) центральная струя несколько смещена относительно этой оси, по-видимому, из-за того, что точка пересечения траектории ударника с сеткой была смещена относительно центра ячейки сетки.

При расчетах в соответствующих частях облака фрагментов (рис. 7б) были выбраны определенные SPH-частицы, что позволило оценить скорости движения этих частей. На рис. 8 показаны скорости головной 1 и хвостовой 3 частей центральной струи, а также скорость тыльной 2 части облака фрагментов в зависимости от времени. Обозначения на рис. 8 соответствуют обозначениям на рис. 7б. Видно, что эти скорости через 10 мкс после удара практически не меняются со временем. Их значения

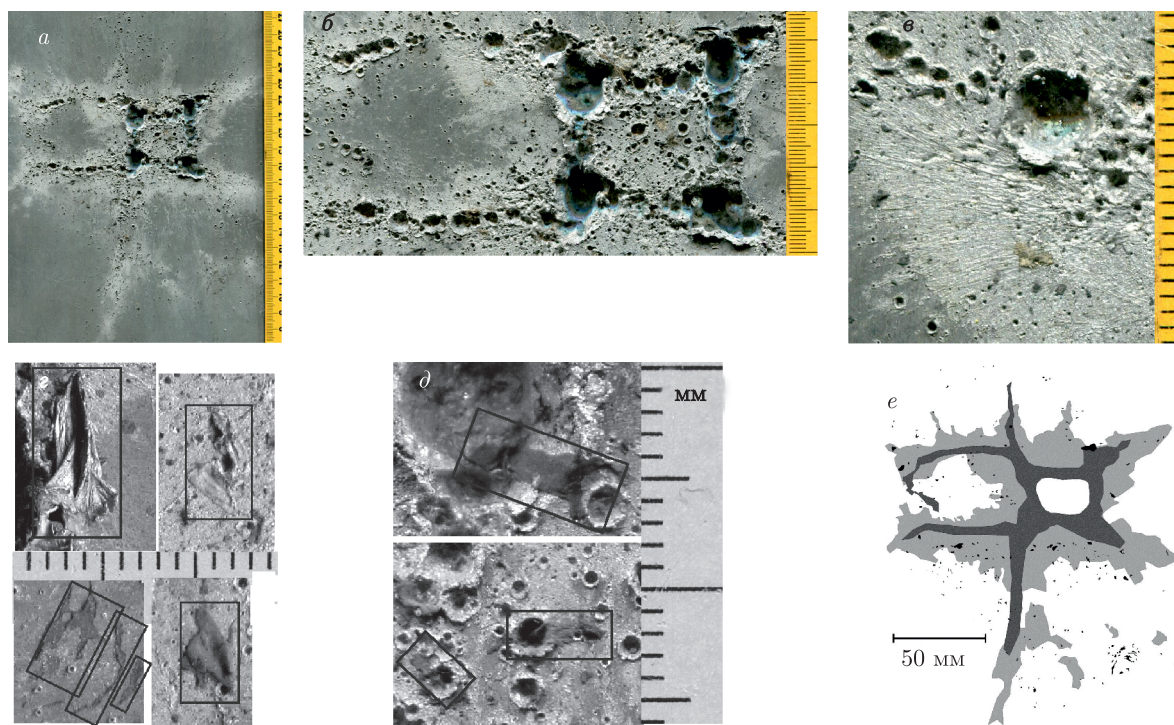


Рис. 9. Фотографии пластины-свидетеля с повреждениями в эксперименте № 2.2 (табл. 2): *а* — вид с лицевой стороны; *б* — геометрический центр повреждений; *в* — расплав алюминия на свидетеле; *г* — некоторые металлические чешуйки на свидетеле; *д* — металлические чешуйки, упавшие на кратеры; *е* — зоны цепочек кратеров (темно-серый цвет), зоны, покрытые расплавом (светло-серый цвет), отдельные металлические чешуйки (черный цвет)

представлены в табл. 5, где также показано отношение скоростей к исходной скорости ударника. Видно, что вычисленная скорость головной части струи (5.82 км/с) и коэффициент усиления ($k_{amp} = 1.28$) хорошо согласуются с найденными экспериментально (табл. 4, эксп. № 2.1). Скорость хвостовой части струи существенно меньше, что приводит к растягиванию струи в пространстве (ср. рис. 7б и 7в). Вычисленные значения скорости тыльной части облака фрагментов (3.63 км/с) и коэффициента ослабления ($k_{att} = 0.8$) также удовлетворительно согласуются со значениями 3.74 км/с и 0.83, найденными в эксперименте (табл. 4, эксп. № 2.1).

4.2. Эксперименты №№ 2.2, 2.3

В экспериментах №№ 2.2, 2.3 скорости взаимодействия ударника с сеточным экраном были соответственно 7.15 км/с и 6.79 км/с. В данных экспериментах наибольший интерес представляет картина повреждений пластины-свидетеля.

На рис. 9 приведены фотографии лицевой поверхности пластины-свидетеля с повреждениями в эксперименте № 2.2. В этом эксперименте

в вакуумной камере была установлена двухслойная пластина-свидетель (две плиты толщиной по 16.5 мм). Однако по результатам эксперимента № 2.2 пробивание даже первого слоя отсутствовало. Геометрический центр повреждений (рис. 9) представляет собой квадрат со стороной 30 мм, в углах которого расположены четыре крупных кратера диаметрами от 8 до 10 мм и глубинами от 11 до 13 мм. Такое расположение кратеров обусловлено, как мы увидим из численного моделирования (см. ниже рис. 14а,б), попаданием линии движения ударника в ребро вблизи узла сетки, что приводит к формированию четырех относительно крупных фрагментов и несимметричной картине морфологии повреждений (рис. 9).

От кратеров, расположенных в вершинах квадрата, идут цепочки кратеров. Справа от квадрата цепочки расположены под углом примерно 45°. Лежащие слева от геометрического центра повреждений цепочки кратеров идут почти параллельно сторонам квадрата, затем загибаются, образуя незамкнутую область в виде прямоугольника со сторонами 40 мм и 65 мм. Кратеры, цепочки которых образуют длинные стороны прямоугольника, имеют прак-

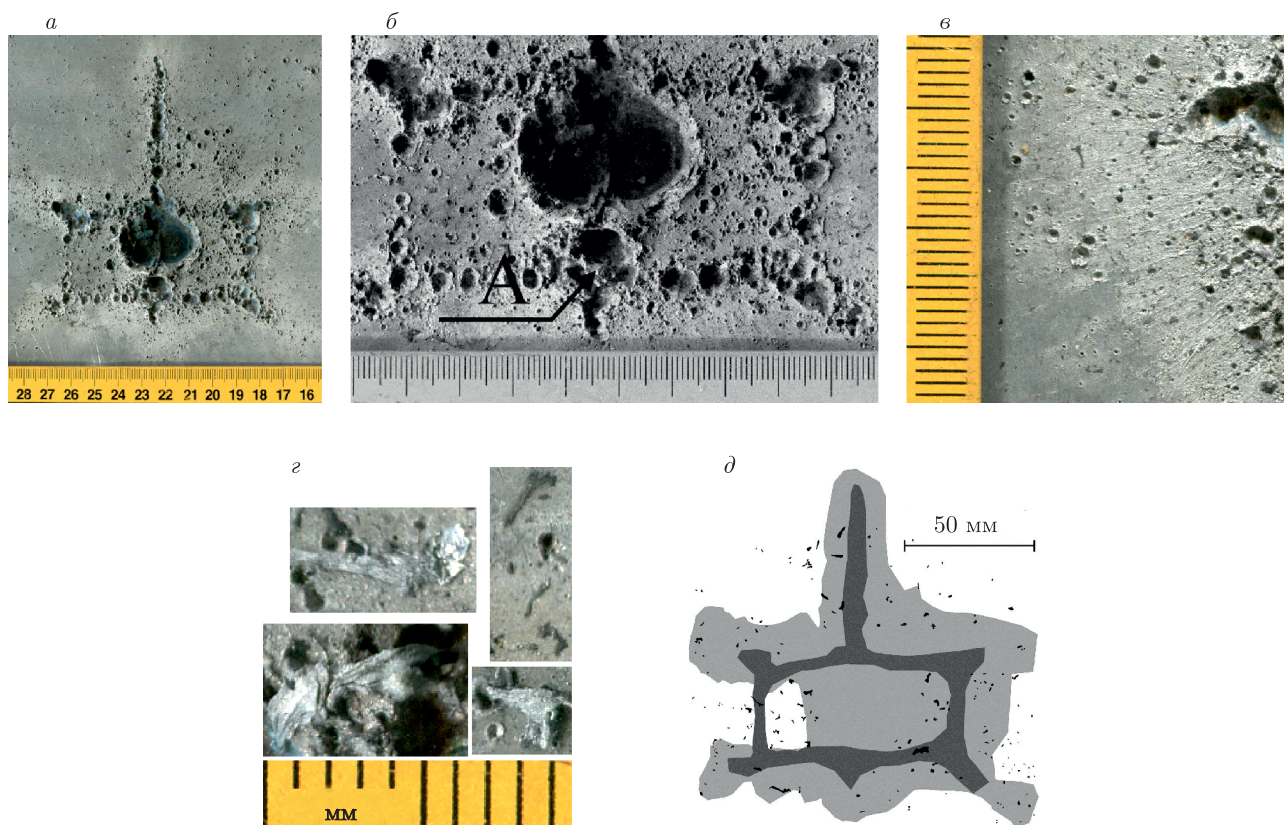


Рис. 10. Фотографии пластины-свидетеля с повреждениями в эксперименте № 2.2 (табл. 2): *а* — вид с лицевой стороны; *б* — геометрический центр повреждений; *в* — образец расплава алюминия на поверхности свидетеля; *г* — образцы некоторых металлических чешуек на свидетеле; *д* — зоны цепочек кратеров (темно-серый цвет), зоны, покрытые расплавом (светло-серый цвет), отдельные металлические чешуйки (черный цвет)

тически одинаковые размеры — диаметры 3 мм и глубины от 2 до 3 мм. Кроме того, вдоль цепочек кратеров наблюдаются ярко выраженные зоны эрозии.

Также на поверхности свидетеля наблюдается налет расплава алюминия. Расплав на свидетеле выглядит как тонкая пленка серебристого цвета с характерным рельефом поверхности (рис. 9в). Зона, покрытая расплавом, обрамляет зону цепочек кратеров. Толщина пленки расплава уменьшается с удалением от цепочек.

Кроме того, на поверхности свидетеля наблюдается большое количество частиц алюминия в виде чешуек серебристого или темного цвета. Образцы некоторых чешуек представлены на рис. 9г. Размеры чешуек лежат в диапазоне от субмиллиметровых до нескольких миллиметров. Можно предположить, что чешуйки имеют достаточно низкую скорость при контакте с поверхностью свидетеля, поскольку не образуют на поверхности заметных следов ударного воздействия. Кроме того, можно предпо-

ложить, что они достигают поверхности свидетеля позже, чем фрагменты ударника. На рис. 9д изображена пара образцов чешуек, упавших на уже сформировавшиеся кратеры, образованные фрагментами ударника. При падении на кратер часть чешуек припечатывается к дну кратера, повторяя его рельеф. Распределение чешуек по поверхности свидетеля коррелирует с распределением основных повреждений, что дает повод считать, что их происхождение также связано с процессами внедрения элементов сеточного экрана в ударник и с разрушением ударника.

На рис. 9е представлена схема распределения по свидетелю зон, покрытых расплавом, зон с цепочками кратеров и отдельных чешуек (черный цвет). Площадь зон расплава 92 см², площадь зон с повреждениями в виде цепочек кратеров 26 см², суммарная площадь всех чешуек 173 мм².

На рис. 10 приведены фотографии лицевой поверхности пластины-свидетеля с повреждениями в эксперименте № 2.3. В этом эксперименте также ис-

пользовали двухслойный свидетель (две плиты толщиной по 16,5 мм) и пробивание первого слоя также отсутствовало. Картина повреждений пластины-свидетеля по своему виду весьма близка к картине, полученной в эксперименте № 2.2, и напоминает два соприкасающихся квадрата со сторонами 35 мм. В углах квадратов нет явно выраженных крупных кратеров в отличие от эксперимента № 2.2. Они имеют диаметры и глубины примерно 6 мм. Исключение составляет кратер А (рис. 10б), имеющий глубину 12 мм. Кратеры, цепочки которых образуют стороны квадратов, имеют практически одинаковые размеры — диаметры от 2 до 4 мм и глубины от 2 до 3 мм. Вдоль цепочек кратеров наблюдаются зоны эрозии. Из вершин квадратов тянутся короткие цепочки кратеров длиной от 10 до 20 мм. Посередине расположена длинная вытянутая перпендикулярно к квадрату цепочка длиной 62 мм.

Как и в эксперименте № 2.2, в рассматриваемом эксперименте № 2.3 на поверхности свидетеля наблюдается пленка алюминиевого расплава, окаймляющая цепочки кратеров. Все сказанное о расплаве в эксперименте № 2.2 относится также и эксперименту № 2.3. Однако, в отличие от эксперимента № 2.2, расплав распределен менее однородно относительно цепочек. Одна из зон свидетеля эксперимента № 2.3, покрытая расплавом, представлена на рис. 10в.

Так же как и в эксперименте № 2.2, на поверхности свидетеля наблюдается большое количество частиц алюминия в виде чешуек серебристого или темного цвета. Образцы некоторых чешуек показаны на рис. 10г.

На рис. 10д представлена схема распределения по свидетелю зон, покрытых расплавом, зон с цепочками кратеров и отдельных чешуек. Площадь зон расплава 91 см², площадь зон с повреждениями в виде цепочек кратеров 22 см², суммарная площадь всех чешуек 157 мм².

Повреждения на поверхности свидетеля образованы летящими фрагментами ударника (рис. 11). В геометрическом центре повреждений имеется большой кратер диаметром около 25 мм, образованный ударом неотсеченных осколков поддона. Это подтверждает видимый на рентгеновском снимке (рис. 11а) летящий между цепочками частиц низкоплотный большой осколок, образовавший крупный кратер (рис. 11б).

Как отмечалось выше, в экспериментах №№ 2.2, 2.3 на поверхности свидетеля наблюдается пленка алюминиевого расплава, окаймляющая цепочки кратеров. Численное моделирование, выполненное нами, показывает, что частичное плавление удар-

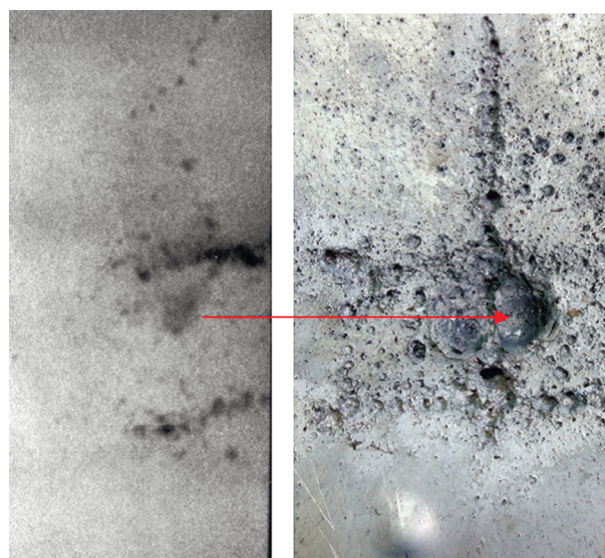


Рис. 11. Совмещенные рентгеновский снимок (а) и фотография (б) повреждений на лицевой поверхности пластины-свидетеля в эксперименте № 2.3

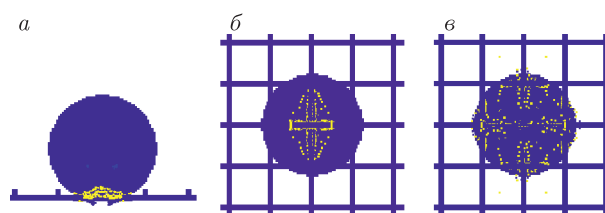


Рис. 12. (В цвете онлайн) Области давления при попадании ударника в узел сетки со скоростью 7.15 км/с (расчет). Область давления до 100 ГПа показана синим цветом, а выше 100 ГПа — желтым цветом. а) Сечение по плоскости симметрии — вид сбоку в момент времени 0.2 мкс после контакта ударника с сеткой; б и в) вид снизу (со стороны сетки) в моменты соответственно 0.2 и 0.4 мкс

ника с образованием жидкой фазы происходит уже в области контакта ударника с сеткой (рис. 12). В качестве критерия для оценки плавления алюминиевого ударника было выбрано давление за фронтом ударной волны, которое при плавлении, как было показано в работе [24], должно превышать 100 ГПа. Как видно на рис. 12, в первые моменты времени после внедрении ударника в сетку образуются расходящиеся ударные волны с амплитудами, достаточными для плавления алюминия, которые «замегают» площадь в четырех ячейках сетки, накрываемых ударником. Однако в последующие моменты относительная скорость ударника и сетки уменьшается, а давление в области их контакта быстро па-

Таблица 6. Оценки объемы кратеров на свидетелях в экспериментах №№ 2.2, 2.3

№ эксп.	Объем всех кратеров, мм ³	Объем замкнутых цепочек, мм ³	Объем расходящихся цепочек, мм ³	Объем остальных кратеров, мм ³	Объем самого крупного кратера, мм ³	Количество кратеров
2.2	2917	1813	951	153	524	17726
2.3	2569	1618	559	393	299	11777

дает. Поэтому, как показывают расчеты, происходит только частичное плавление ударника в его фронтальной части.

Для экспериментов №№ 2.2, 2.3 была проведена оценка объемов кратеров. Объем кратера является мерой кинетической энергии образовавшего его фрагмента [25]. Объем кратеров оценивался как половина объема эллипсоида с малой и большой полуосями эллипса, вписанного в контур кратера, видимый на отсканированном изображении поверхности пластины-свидетеля. При этом не учитывался объем кратера, образованного ударом остатка поддона и обозначенного на рис. 11. Разрешение цифрового изображения позволило получить данные для кратеров с видимыми размерами от 0.03 мм и выше. Как отмечалось выше, фрагментация ударника на сеточной преграде сопровождается формированием струй из фронтальной части. Струи образуют на свидетеле расходящиеся цепочки кратеров. Замкнутые цепочки кратеров образуются из тыльной части ударника. В табл. 6 представлены результаты оценки объемов кратеров.

Кумулятивное распределение кратеров по объемам определяется как

$$N(v) = \int_v^{\infty} n(v) dv, \quad (3)$$

где $n(v)$ — функция распределения объемов кратеров. Кумулятивное распределение объемов всех кратеров в экспериментах №№ 2.2, 2.3 изображено на рис. 13. Как видно на рисунке, распределения хорошо согласуются за исключением области малых объемов (менее $8.8 \cdot 10^{-4}$ мм³).

Было проведено численное моделирование экспериментов №№ 2.2, 2.3. Общее число SPH-частиц в моделировании составляло 103093 (в ударнике было 84823 SPH-частиц). Данные, использованные для моделирования, показаны в табл. 3.

Чтобы выяснить происхождение картин повреждений на свидетелях, показанных на рис. 9 и 10,

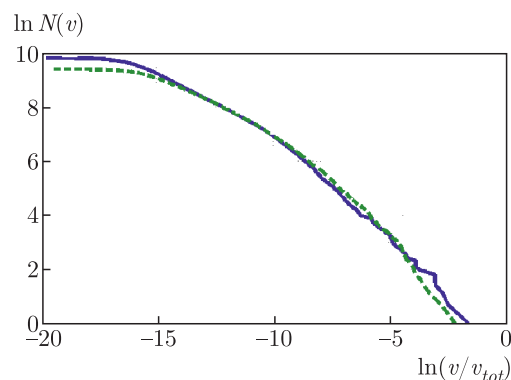


Рис. 13. Кумулятивное распределение объемов кратеров на свидетелях в экспериментах № 2.2 (сплошная линия) и № 2.3 (штриховая линия). По оси абсцисс отложен логарифм объема кратера, нормированного на v_{tot} — суммарный объем всех кратеров на свидетеле для данного эксперимента

моделирование было проведено для различных точек пересечения линии движения ударника с сеткой при скоростях столкновения соответственно 7.15 и 6.79 км/с. В экспериментах пластина-свидетель располагалась на расстоянии 165 мм от сеточного экрана. Отсюда легко оценить время, за которое облако фрагментов достигает поверхности свидетеля после столкновения ударника с сеткой. Оно составляет приблизительно 26 и 27 мкс для экспериментов соответственно № 2.2 и № 2.3.

Результаты моделирования представлены на рис. 14 в виде двух картин фрагментации ударника, которые, на наш взгляд, наиболее близки к картинам повреждений свидетелей, показанных на рис. 9 и 10. В первом случае точка пересечения линии движения ударника с сеткой находится на ребре, на расстоянии $(1/4)(l_a + d_w)$ от узла, во втором — на середине ребра ячейки сетки, на расстоянии $(1/2)(l_a + d_w)$ от любого из узлов, примыкающего к этому ребру (узел — место пересечения проволок).

На рис. 14а,б в облаке фрагментов можно различить «квадрат», сторона которого равна 28 мм,

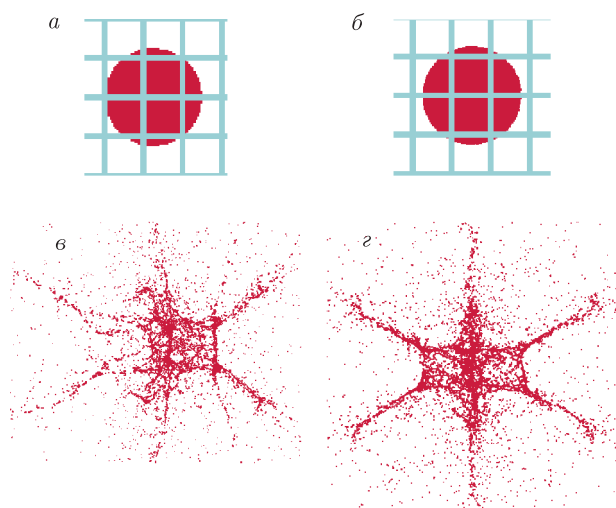


Рис. 14. Картины фрагментации ударника в зависимости от точки пересечения линии движения ударника с сеткой: точка пересечения находится на ребре, на расстоянии $(1/4)(l_a + d_w)$ от узла сетки (а, в), и на середине ребра ячейки сетки (б, г). Показаны два варианта взаимного положения ударника и сетки перед их столкновением (а, б) и картины фрагментации через 26 и 27 мкс после столкновения со скоростями соответственно 7.15 и 6.79 км/с

что приблизительно совпадает со стороной квадрата, видимого на фоне повреждений пластины-свидетеля в эксперименте № 2.2 (рис. 9). От правой стороны «квадрата» на рис. 14а,в отходят под разными углами две пары цепочек фрагментов, различающиеся по массе. Две пары цепочек кратеров правее квадрата повреждений можно также различить на рис. 9. Левее «квадрата» на рис. 14а,в различимы три пары цепочек фрагментов, в то время как на рис. 9 отчетливо видны только две пары цепочек кратеров.

На рис. 14б,г в облаке фрагментов можно различить два соприкасающихся «квадрата» со сторонами 32 мм, что приблизительно совпадает со стороной квадратов, видимых на фоне повреждений пластины-свидетеля в эксперименте № 2.3 (рис. 10). Из вершин квадратов тянутся цепочки фрагментов; всего на рис. 14б,г шесть таких цепочек. Четыре цепочки слева и справа от соприкасающихся квадратов имеют длину около 60 мм, что значительно превышает длину цепочек кратеров (от 10 до 20 мм) на рис. 10. Две цепочки фрагментов, расположенные по центру симметрии рис. 14б,г, имеют длину, превышающую 60 мм. На рис. 10 мы видим только одну цепочку кратеров, направленную вверх снимка и имеющую длину 62 мм. Такое различие между мо-

делированием и экспериментом может быть связано с тем, что в эксперименте точка пересечения линии движения ударника с сеткой находилась выше середины ребра ячейки сетки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведены результаты экспериментальных исследований и численного моделирования фрагментации ударников диаметром 9.0 мм из алюминиевого сплава В95 на вольфрамовых сетках с апертурой 3.2 мм и диаметром проволоки 0.5 мм в условиях вакуумирования испытательной камеры при скоростях соударения до 7 км/с (эксперименты №№ 2.1–2.3 в табл. 2), моделирующих воздействие частиц космического «мусора» на сеточную экранную защиту космического аппарата. Разгон ударников проводился с использованием двухступенчатой легкогазовой пушки. Для регистрации состояния ударника перед соударением с сеточным экраном и процесса его фрагментации использовалась рентгеновская съемка. Параметры облака фрагментов ударника регистрировались также с помощью толстой пластины-свидетеля из сплава АМгб, размещаемой за сеточным экраном.

Численное моделирование в трехмерной геометрии было выполнено на основе полной системы уравнений механики деформируемого твердого тела методом гладких частиц с помощью пакета LS-DYNA [12] версии 971. В качестве определяющих уравнений брали уравнение состояния Ми – Грюнайзена и модель пластичности Джонсона – Кука [18]. В качестве модели разрушения использовалась деформационная модель Джонсона – Кука. Во всех расчетах линия движения ударника была перпендикулярна плоскости экрана.

По результатам рентгеновской съемки, анализа повреждений поверхности свидетелей и численного моделирования выявлены морфологические особенности образующихся облаков фрагментов и распределение скоростей фрагментов в облаке при пробитии сеточных экранов, изготовленных из вольфрамовой проволоки.

В эксперименте № 2.1 с помощью рентгеновской съемки найдены скорости различных частей облака фрагментов. Показано, что скорость лидирующего фрагмента центральной струи в 1.26 раз превышает начальную скорость ударника, в то время как тыльная часть облака фрагментов движется со скоростью, составляющей всего 0.83 начальной скорости.

ти ударника. Эти результаты хорошо согласуются с аналогичным экспериментом со стальной сеткой из работы [7] (см. табл. 4). Численное моделирование также дало хорошее согласие с экспериментом (см. табл. 5). Таким образом, эксперимент №2.1, наряду с работами [7, 8], дает еще одно прямое экспериментальное доказательство кумулятивного эффекта при фрагментации ударника на сетке, который был предсказан нами в работе [6].

Изучение следов воздействия облака фрагментов на пластину-свидетель показало, что вещество ударника в облаке фрагментов находится как в твердом фазовом состоянии в виде фрагментов, образующих на свидетеле характерные кратеры ударного типа, так и в виде расплава, который при выпадении на поверхность свидетеля покрывает его пленкой серебристого цвета с характерным рельефом. Также вероятно, что часть материала ударника образует мелкие частицы в виде чешуек, имеющие низкую скорость, которые не образуют на свидетеле видимых следов ударного воздействия.

Отличительной особенностью экспериментов №№2.2, 2.3 является необычный вид картины повреждений на поверхности пластины-свидетеля, которую кратко можно охарактеризовать как квадрат или прямоугольник с отходящими от него цепочками кратеров. Такая картина повреждений не свойственна экспериментам со скоростями 3–4 км/с [6] и отличается от экспериментов со стальными сетками со скоростями удара до 7 км/с [26]. Было проведено численное моделирование экспериментов №№2.2, 2.3. Чтобы выяснить происхождение картин повреждений на свидетелях, показанных на рис. 9 и 10, моделирование было проведено для различных точек пересечения линии движения ударника с сеткой при скоростях столкновения 7.15 и 6.79 км/с, соответствующих скоростям ударника в этих экспериментах. Результаты моделирования представлены на рис. 14 в виде двух картин фрагментации ударника, которые, на наш взгляд, наиболее близки к картинам повреждений свидетелей, показанных на рис. 9 и 10.

ЛИТЕРАТУРА

1. The Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, *Protection Manual*, IADC-04-03, Version 7.1, Prepared by the IADC WG3 members, 2018, Retrieved from https://www.iadc-home.org/documents_public/view/page/5/id/81#u.
2. С. И. Анисимов, В. В. Жаховский, Н. А. Иногамов и др., ЖЭТФ **156**, 806 (2019).
3. E. L. Christiansen and J. H. Kerr, *Int. J. Impact Eng.* **14**, 169 (1993).
4. Л. Н. Безруков, И. М. Гадасин, А. И. Киселев и др., *Космонавтика и ракетостроение* **18** (2000).
5. F. Horz, M. J. Cintala, R. P. Bernhard et al., *Int. J. Impact Eng.* **17**, 431 (1995).
6. N. N. Myagkov, T. A. Shumikhin, and L. N. Bezrukov, *Int. J. Impact Eng.* **37**, 980 (2010).
7. П. Н. Калмыков, С. В. Колчев, Н. В. Лапичев и др., *Мех. комп. матер. и констр.* **21**(1), 3 (2015).
8. П. Н. Калмыков, Н. В. Лапичев, И. А. Михайлов и др., *Мех. комп. матер. и констр.* **24**(1), 46 (2018).
9. A. V. Gerasimov, D. B. Dobritsa, S. V. Pashkov et al., *Cosmic Res.* **54**, 118 (2016).
10. A. Cherniaev and I. Telichev, *Adv. Mater. Sci. and Eng.* **2017**, ID 7218482 (2017).
11. N. Myagkov and T. Shumikhin, *AIMS Mater. Sci.* **6**, 685 (2019).
12. J. O. Hallquist, *LS-DYNA Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation (2006).
13. J. J. Monaghan, *Rep. Progr. Phys.* **68**, 1703 (2005).
14. M. S. Egorova, S. A. Dyachkov, A. N. Parshikov, and V. Zhakhovsky, *Computer Phys. Comm.* **234**, 112 (2019).
15. V. E. Fortov, V. V. Kim, I. V. Lomonosov et al., *Int. J. Impact Eng.* **33**, 244 (2006).
16. П. Н. Калмыков, Н. В. Лапичев, Г. П. Шляпников, Патент РФ № 2238503 (2003).
17. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*, Физматлит, Москва (2008).
18. G. R. Johnson and W. H. Cook, *A Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strains, High Strain Rates and High Temperatures*, Proc. 7th Intern. Symp. Ballistics (1983).
19. I. Rohr, H. Nahme, K. Thoma, and C. E. Anderson, Jr., *Int. J. Impact Eng.* **35**, 811 (2008).
20. T. J. Holmquist, D. W. Templeton, and K. D. Bishnoi, *Int. J. Impact Eng.* **25**, 211 (2001).

21. R. Vignjevic, J. C. Campbell, N. K. Bourne, and N. Djordjevic, *J. Appl. Phys.* **104**, 044904 (2008).
22. <http://www.matweb.com>: Online Materials Information Resource.
23. N. S. Brar, V. S. Joshi, and B. W. Harris, *AIP Conf. Proc.* **1195**(1), 945 (2009).
24. M. M. Budzevich, V. V. Zhakhovsky, C. T. White, and I. I. Oleynik, *Phys. Rev. Lett.* **109**, 125505 (2012).
25. J. A. Zukas, T. Nicholas, H. F. Swift et al., *Impact Dynamics*, John Wiley and Sons, New York (1982).
26. П. Н. Калмыков, Н. В. Лапичев, И. А. Михайлов и др., *Мех. комп. матер. и констр.* **25**(1), 37 (2019).