

## РАЗРУШЕНИЕ СТАЛЬНОЙ СФЕРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЫ ПРИ СОУДАРЕНИИ С ВЫСОКОПОРИСТЫМИ ЭКРАНАМИ

П. В. Лаврухов, А. В. Пластинин, В. В. Сильвестров

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, silver@hydro.nsc.ru

Исследовано разрушение стальной частицы диаметром 2 мм при ударе по нормали со скоростью  $1,5 \div 7,3$  км/с по пластинкам-экранам толщиной 1 мм. Использовались два типа экранов: сплошные из дюралюминия и высокопористые из медного порошка. На пластине-свидетеле измерялись глубина наибольшего кратера, положение, площадь и эффективный диаметр всех кратеров. Получены значения пороговых скоростей удара для начала разрушения стальной частицы, распределения числа кратеров по размеру и радиусу от точки удара при различных скоростях удара. Показано, что вблизи порога разрушения при одинаковом давлении соударения низкоплотные высокопористые экраны дробят стальную частицу лучше, чем экран из дюралюминия. Возможная причина этого эффекта — тепловой взрыв материала экрана в области соударения и, как следствие, увеличение времени взаимодействия ударника с экраном.

### ВВЕДЕНИЕ

Результаты по разрушению сферических частиц при высокоскоростном ударе по тонким пластинкам используются для анализа моделей фрагментации материала ударника и для получения интегральных характеристик материалов при динамическом разрушении [1, 2]. В качестве параметра, определяющего порог разрушения частицы, выбирается либо скорость удара [3], либо расчетное давление соударения  $p_i$  [1, 2] при фиксированной толщине пластинки-экрана. Интенсивность взаимодействия ударника с экраном характеризуется скоростью радиального расширения запреградного облака осколков  $v_r$  [1], средним размером фрагментов в облаке [3] или максимальной глубиной кратера на пластине-свидетеле [4, 5]. При ударе сферическим диаметром 6,35 мм из девяти пластичных металлов со скоростью  $2 \div 5$  км/с по пластинкам из полиметилметакрилата и плавленного стекла толщиной 3,2 мм результаты вблизи порога разрушения укладываются на единую кривую в координатах  $(v_r/v_0, p_i/p_0)$ , где  $v_0, p_0$  — пороговая скорость расширения и пороговое давление, параметры, характеризующие материал ударника [1]; но при ударе хрупкой керамической частицей из карбида вольфрама по тем

же пластинкам подобное единое описание результатов не выполняется [2]. При том же давлении соударения наблюдаются более высокая скорость радиального расширения и более интенсивная фрагментация ударника при ударе по пластинке из стекла. Согласно [2] возможная причина заключается в неучтенных деталях взаимодействия хрупкой сферы с материалом стеклянной пластинки. Таким образом, целесообразно продолжение исследований по влиянию материала экрана и его структуры на разрушение сферического ударника.

В данной работе рассматривается разрушение стальной сферической частицы диаметром  $d_p = 2$  мм при ударе со скоростью  $v_p = 1,5 \div 7,3$  км/с по пластинкам толщиной  $t_b = 1$  мм, изготовленным из дюралюминия или мелкодисперсного порошка меди (или алюминия). Пластина-свидетель используется для наблюдения результатов фрагментации ударника, в качестве характеристики разрушения частицы принята максимальная относительная глубина  $h_{\max}/d_p$  кратера на свидетеле. Основная цель работы — исследовать влияние локальной неоднородности материала экрана на характер разрушения ударника вблизи порога разрушения и сравнить результаты с данными для гомогенного твердого экрана. Ранее было показано, что при скоростях 5,5 и 7,5 км/с, значительно превышающих пороговые значения скорости удара, экраны из дюралюминия и металлического порошка обеспечивают примерно одинаковые значения  $h_{\max}/d_p$  [6].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 00-01-00794 и 00-15-96181) и Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науки на 1997–2000 годы» (код проекта 274).

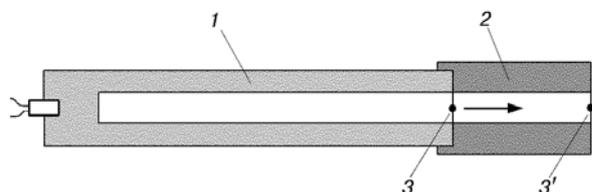


Рис. 1. Взрывной трубчатый ускоритель для метания стальных шариков:

1 — литой ТНТ/гексоген 50/50; 2 — ствол из эбонита; 3 — место установки метаемой частицы на торце ВВ или 3' — на торце ствола

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Шарики из стали диаметром 2 мм ускорялись при помощи трубчатого взрывного ускорителя [7, 8] с дополнительным стволом (рис. 1). Для варьирования скорости в диапазоне 1,5 ÷ 5,5 км/с изменялись размеры трубки взрывчатого вещества (ВВ), длина ствола и место установки метаемого шарика. При постоянном внешнем диаметре заряда  $d_2 = 24$  мм изменялись внутренний диаметр  $d_1$  — от 10 до 16 мм, длина трубки ВВ  $L_{HE}$  — от 15 до  $25d_2$  и длина ствола — от нуля до 150 мм. Метаемый шарик располагался на торце трубки ВВ или на торце ствола. Полная масса ВВ — 110 ÷ 180 г.

Для данной конструкции характерен 10-процентный разброс по скорости метания, поэтому скорость измерялась в каждом опыте при помощи двух импульсных рентгеновских трубок с точностью 3%. Дополнительно контролировались целостность шарика после ускорения и его конечный размер перед соударением. Влияние абляции при невысоких скоростях метания мало, и конечный размер ударника составлял 1,9 ÷ 1,95 мм.

Рассматривался удар по нормали к поверхности экрана. Пластина-свидетель (дюралюминий Д16, толщина 10 мм) была расположена на расстоянии  $S_0 = 150$  мм от экрана. На поверхности свидетеля образовывалось кратерное поле, обусловленное взаимодействием запреградного облака осколков с мишенью. Величина  $S_0$  выбрана достаточно большой для того, чтобы минимизировать число перекрывающихся кратеров. Пластина-экран диаметром 100 мм поддерживалась при помощи стального фланца, который защищал свидетель от действия продуктов взрыва. Выходной торец взрывного ускорителя располагался на удалении 60 см от экрана. Этого расстояния было

достаточно для того, чтобы метаемый шарик вышел из струи продуктов детонации до столкновения с пластинкой-экраном.

**Экраны.** Пластинки из дюралюминия Д16 толщиной 1 мм использовались в качестве стандарта, с которым проводилось сравнение. Высокопористые пластинки толщиной 1,0 ÷ 1,1 мм и диаметром 100 мм приготавливали прессованием мелкодисперсного порошка меди (в отдельных опытах — алюминия) на листе бумаги толщиной 10 мкм. Размер отдельных зерен 10 ÷ 20 мкм. Плотность пористых пластинок  $\rho_{00} = 4,0; 2,8$  и  $2,2$  г/см<sup>3</sup>. Механическая прочность пористых экранов близка к нулю. Медь выбрана потому, что ударная адиабата пористой меди при плотности 4 г/см<sup>3</sup> близка к ударной адиабате Д16 в рассматриваемом диапазоне давлений 20 ÷ 160 ГПа.

**Обработка пластины-свидетеля.** После опыта мишени слегка шлифовались, чтобы убрать венчики кратеров. Глубины наибольших кратеров составляли 0,8 ÷ 4 мм и измерялись механическим индикатором от уровня исходной поверхности с точностью ±0,02 мм. Приводимые ниже значения глубин нормированы на диаметр ударника.

Используя оптический сканер с линейным разрешением 600 точек/дюйм (42 мкм), мы получали цифровые изображения поверхности пластин-свидетелей, которые обрабатывались при помощи специальной программы. В результате были измерены площади и координаты всех кратеров. На основе этих данных были определены общее число кратеров, их эффективные диаметры в предположении кругового профиля, распределения числа кратеров в зависимости от их диаметра, координаты «точки удара» как геометрического центра тяжести координат центров всех кратеров, радиальные распределения кратеров относительно центра удара. Ввиду ограниченного линейного разрешения сканера кратеры диаметром менее 0,1 мм не анализировались.

**Давление соударения.** Для расчета давления соударения  $p_i$  в одномерном приближении использовался метод диаграмм «давление — массовая скорость». Для стального ударника принималась ударная адиабата в виде  $u_s = 4,57 + 1,49u_p$ , для экрана из дюралюминия —  $u_s = 5,25 + 1,39u_p$  [9]. Для экранов из высокопористых порошков температура ударного сжатия достигала  $10^4$  градусов и выше и использовалось уравнение состояния для пористых ме-

Таблица 1

Влияние вакуумирования на размеры наибольшего кратера на пластине-свидетеле

Номер опыта	Экран	Давление воздуха	$v_p$ , км/с	$p_i$ , ГПа	$h_{\max}/d_p$	$d_c/d_p$	$h_{\max}/d_c$	$N_0$
1	Д16	1 атм	4,0	67,2	1,22	1,5	0,8	228
2		1 Торр	3,8	63,5	1,27	0,95	1,3	993
3		1 Торр	4,1	69,6	0,93	1,35	0,7	1091
Средние значения				67	1,14	1,27	0,95	
4	Медь, 2,8 г/см <sup>3</sup>	1 атм	4,0	41,1	1,02	1,2	0,85	148
5		1 Торр	4,0	40,8	0,97	1,1	0,88	236
6		1 Торр	4,15	43,9	0,94	0,95	0,99	473
Средние значения				42	1,0	1,1	0,9	

таллов, предложенное Кормером и др. [10]. Это полуэмпирическое уравнение состояния типа Ми — Грюнайзена учитывает изменение теплоемкости вещества при ударном плавлении и тепловом возбуждении электронов при высоких температурах и очень хорошо описывает экспериментальные данные по ударному сжатию сплошных и высокопористых металлических веществ в диапазоне давлений  $10 \div 400$  ГПа. Рис. 2 показывает высокое качество описания этим уравнением ударных адиабат меди при пористости  $\mu = \rho_0/\rho_{00} \approx 2 \div 4$  [11], соответствующей условиям экспериментов. Отметим, что простейшая модель «снежного плуга» для ударного сжатия, согласно которой

$p = \rho_0/(\mu - 1)u_p^2$ , дает неплохое приближение для давлений ниже 50 ГПа, но при более высоких значениях завышает давление соударения и не позволяет рассчитать температуру ударного сжатия.

**Влияние воздуха.** Во всех опытах (кроме четырех, см. ниже) между экраном и свидетелем находился атмосферный воздух, который незначительно влияет на глубину самого глубокого кратера на пластине-свидетеле, образованного наиболее крупным фрагментом ударяющей частицы в запреградном облаке осколков. Например, уменьшение давления воздуха до 0,15 атм практически не влияет на максимальную глубину кратеров на задней стенке [12], даже в случае ударника из алюминия, материала более легкого и имеющего меньшую температуру плавления, чем сталь. Невысокие скорости удара также снижают эффекты, связанные с наличием воздуха в пространстве между экраном и свидетелем.

Для контроля влияния давления воздуха были поставлены эксперименты с вакуумированием пространства между экраном и пластиной-свидетелем при скорости удара  $3,8 \div 4,2$  км/с. Результаты в виде распределения кумулятивного числа кратеров  $N_c$  на пластине-свидетеле в зависимости от «эффективного диаметра» кратера  $d_c$  для экранов из дюралюминия и пористой меди плотностью  $2,8$  г/см<sup>3</sup> при давлении воздуха 1 атм и 1 Торр приведены на рис. 3. Здесь  $N_c$  — число кратеров диаметром  $d_c \geq d$ , где  $d$  — текущий диаметр, шаг по диаметру  $\Delta d = 0,1$  мм. Глубина и диаметр наиболее глубокого кратера в каждом из проведенных опытов и общее число кратеров  $N_0$

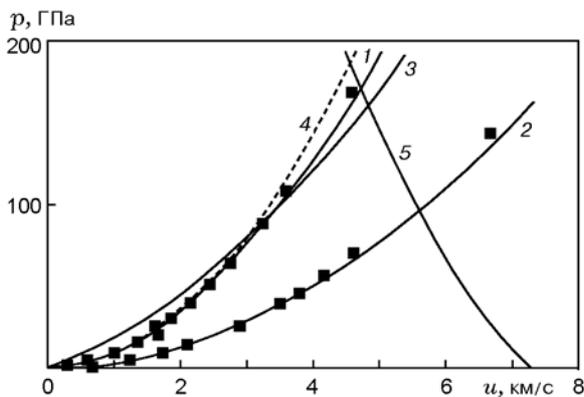


Рис. 2. Расчетные ударные адиабаты для пористой меди:

1, 2 — медь плотностью 4,465 и 2,232 г/см<sup>3</sup> соответственно, 3 — Д16, 4 — модель «снежного плуга», 5 — ударная адиабата ударника при скорости 7,3 км/с; квадраты — экспериментальные данные из [11]

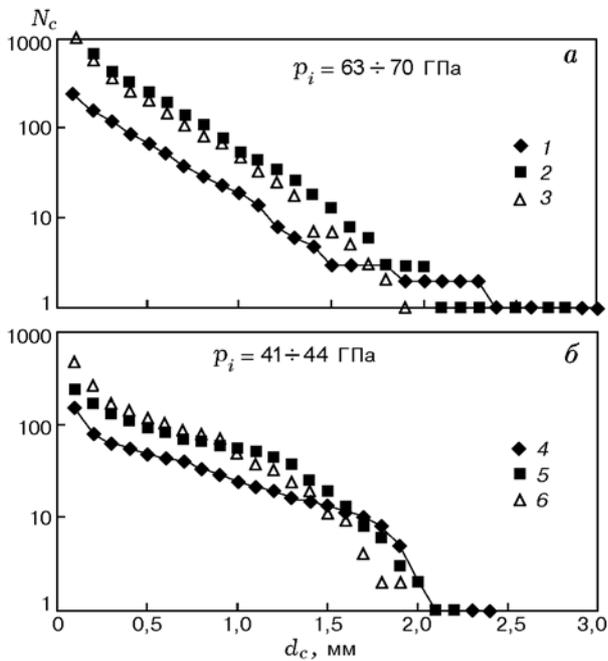


Рис. 3. Зависимость кумулятивного числа кратеров от их диаметра при ударе стальной частицы по экранам из Д16 (а) и пористой меди (б) в воздухе (опыты 1, 4) и вакууме (опыты 2, 3, 5, 6)

приведены в табл. 1.

В опытах с вакуумированием и без него наибольшие кратеры имеют близкие глубину и диаметр, т. е. вакуумирование практически не влияет на размер максимального фрагмента в запреградном облаке осколков. Отношение глубины кратера к диаметру близко к 1, что однозначно указывает на то, что наиболее глубокий кратер образован в результате удара фрагментом стальной частицы: при ударе алюминий/алюминий  $h_{\max}/d_c \leq 0,5$ , при ударе сталь/алюминий это отношение проходит через максимум около 1,3 при скорости удара 2 км/с и затем уменьшается, оставаясь более 0,6 при скорости до 7 км/с [13]. При вакуумировании существенно, в 2–4 раза, увеличивается общее число кратеров за счет роста числа мелких кратеров диаметром менее 1 ÷ 1,5 мм. Эти результаты обосновывают возможность опытов в атмосферном воздухе по исследованию фрагментации стальной частицы вблизи порога разрушения; кроме того, возможно использование максимальной глубины кратера на пластине-свидетеле в качестве характеристики степени фрагментации ударника при ударе по тонкой пластинке.

**Захваченная ударная энергия.** При разруше-

нии ударника существенно не только давление соударения, но и время взаимодействия ударника с материалом экрана. Мы попытались учесть это, используя понятие захваченной ударной энергии  $E_{cap}$  в сферическом ударнике [1]. Согласно этой модели в теле сферического ударника при его столкновении с плоской поверхностью достаточно толстой пластинки за счет волн разгрузки, распространяющихся со скоростью звука  $c$  со стороны линии контакта ударник/мишень, формируется зона с давлением  $p_i$ , так называемый «ударный эллипсоид». Вне этой зоны давление существенно ниже  $p_i$  и в первом приближении его можно не учитывать. Тогда для энергии внутри ударного эллипсоида получается следующая оценка (детали вывода см. в [1]):

$$E_{cap} = \frac{\pi}{12} \frac{p_i^2}{\rho_p u_{s,p}^2} d_p^3 (\eta A^2 \tau), \quad (1)$$

где

$$A = \frac{\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + 1}}$$

— безразмерный радиус «ударного диска» — зоны контакта шарика и мишени,

$$\tau = \frac{1}{\alpha} \left( 1 + \frac{\alpha^2 - 1}{\sqrt{\alpha^2 + 1}} \right)$$

— безразмерное время взаимодействия шарика и мишени,  $\alpha = v_p/u_{s,p}$ ;  $\eta = u_{s,p}/u_{s,b}$ , если  $u_{s,p} < u_{s,b}$ , и  $\eta = 1$  в противном случае;  $u_{s,p}$ ,  $u_{s,b}$  — начальные скорости ударных волн для материалов ударника и экрана соответственно. В качестве безразмеривающих величин используются радиус ударника  $d_p/2$  и время пробега волны разгрузки  $d_p/2c$ . В этой простой модели учитываются геометрическое ограничение объема зоны высокого давления внутри ударника и конечное время существования этой зоны, ограниченное приходом на ось боковой волны разгрузки с линии контакта ударник/экран. Согласно [1] удельная на единицу массы величина этой энергии, возможно, и определяет степень фрагментации материала ударника. Целесообразность введения этого понятия для интегральной характеристики разрушения ударника из конкретного материала заключается в том, что используется только одна характеристика материала ударника вместо, например, скорости удара, размера ударника, давления соударения.

Таблица 2

Пороговые значения параметров удара, приводящие к разрушению стальной частицы

Материал экрана	$v_0$ , км/с	$p_0$ , ГПа	$E_0$ , Дж/г*	$T$ , $10^3$ К
Д16	$3,15 \pm 0,15$	$49 \pm 4$	$55 \pm 10$	0,9
Сц, 4,0 г/см <sup>3</sup>	$2,56 \pm 0,29$	$27 \pm 5$	$24 \pm 12$	5,5
Сц, 2,8 г/см <sup>3</sup>	$3,18 \pm 0,22$	$28 \pm 4$	$37 \pm 11$	9,4

Примечание. \* Энергия  $E_0$  рассчитана при массе частицы  $m_p \approx 30$  мг.

Помимо скорости удара, расчетные значения давления соударения  $p_i$  и захваченной ударной энергии  $E_{сар}$  являются дополнительными физическими параметрами, которые мы использовали для поиска корреляционных связей между наблюдаемыми значениями  $h_{\max}/d_p$  и параметром удара для различных материалов экранов.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 приведена зависимость относительной глубины внедрения на пластине-свидетеле от скорости удара для различных материалов экранов. Для трех материалов экрана: Д16, медный порошок при плотности 4,0 и 2,8 г/см<sup>3</sup> — был пройден диапазон скоростей от неразрушения до развитой фрагментации стальной частицы. Несмотря на значительный разброс данных по глубине, характерный для экспериментов этого типа, можно с достаточной для анализа точностью получить значения пороговых скоростей удара  $v_0$ , приводящих к разрушению частицы, которые

определяются как средние скорости для опытов без разрушения и с разрушением частицы (табл. 2). В таблице указаны не погрешности измерения или расчета величин, а максимальные отклонения их средних значений от данных для опытов без разрушения и с разрушением частицы. Ввиду значительной разницы в плотностях экранов и высокой пористости экранов из порошка пороговые скорости различны.

На рис. 5, 6 приведены характерные картинки повреждения пластины-свидетеля вблизи порога разрушения стального сферического ударника. При давлении соударения менее 50 ГПа экран из дюралюминия не разрушает частицу (рис. 5, а), но все пористые экраны разрушают частицу: картинки на рис. 5, б–д отчетливо иллюстрируют тот факт, что пороговое давление разрушения стальной частицы уменьшается в 1,5 раза при использовании высокопористых экранов даже с меньшей массой на единицу площади.

При давлении соударения  $52 \div 56$  ГПа вблизи, но выше порога разрушения стальной частицы экраном из дюралюминия пористые экраны также существенно сильнее разрушают стальную частицу (см. рис. 6). Для пористых экранов характерен более широкий, примерно в два раза, радиальный разброс фрагментов. В опытах в воздухе, так же как и в вакууме (см. рис. 3), сохраняется превышение числа кратеров диаметром менее 1 мм в опытах с пористыми экранами по сравнению с опытами, в которых экран из дюралюминия.

При увеличении пористости материала экрана появляется большее число более мелких кратеров, что указывает на более интенсивное дробление материала стального ударника. Диаметр наибольшего кратера составляет  $2,5 \div 3$  мм. Принимая во внимание, что при скорости удара  $2,5 \div 3$  км/с отношение диа-

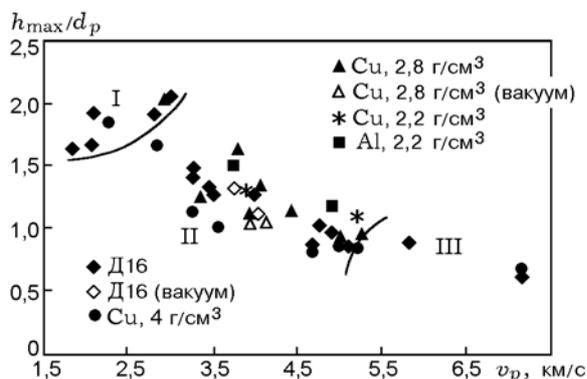


Рис. 4. Влияние скорости удара на максимальную глубину внедрения на пластине-свидетеле для различных экранов

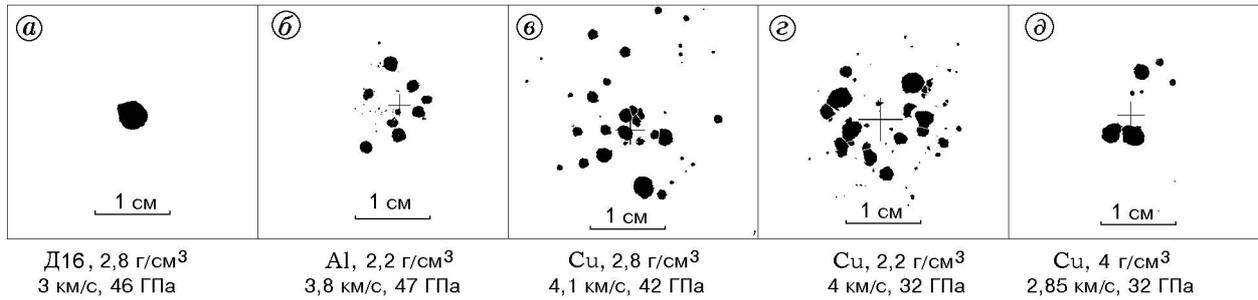


Рис. 5. Картинки кратерных полей при давлении соударения менее 50 ГПа

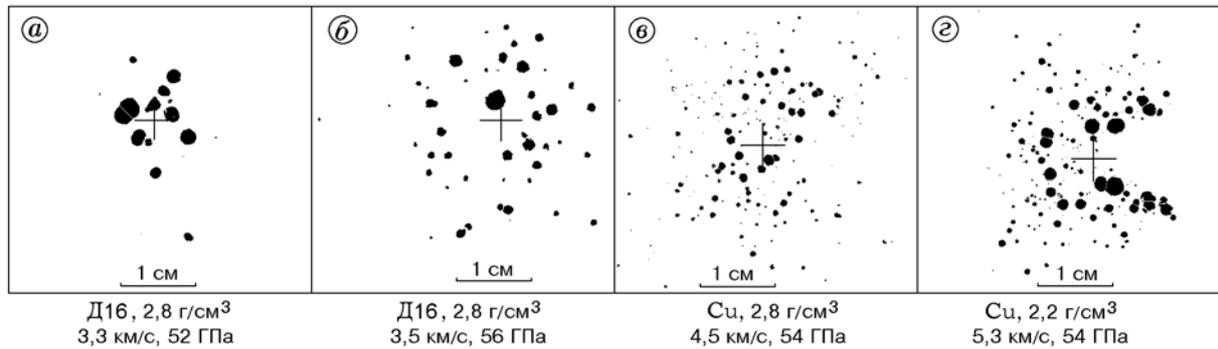


Рис. 6. Картинки кратерных полей при давлении соударения 52 ÷ 56 ГПа

метра кратера к диаметру сферического фрагмента  $\approx 3$  [14], получим оценку размера наиболее крупного фрагмента  $s_f \approx 0,8 \div 1$  мм. Характерный диаметр кратерного поля составляет  $D_f = 2 \div 3$  см. Скорость радиального разлета фрагментов частицы, оцениваемая как  $v_r \approx D_f v_p / 2S_0$ , составляет  $200 \div 400$  м/с, т. е. скорость деформирования материала ударника  $\dot{\epsilon} \approx 2v_r / d_p \approx 3 \cdot 10^5$  1/с. Оценим характерный размер фрагмента стальной частицы  $s_f$  по формуле  $s_f^{3/2} \approx (\sqrt{24} K_f) / \rho \dot{\epsilon}$ , где  $\rho$ ,  $K_f$  — плотность и динамическая вязкость материала ударника [1]. При  $K_f = 25 \div 100$  МПа·м<sup>1/2</sup> [1] получим теоретическую оценку размера фрагмента  $s_f \approx 0,5 \div 1,2$  мм, хорошо совпадающую с оценкой из эксперимента.

Анализ кратерного поля на пластинесвидетеле дает основания разделить все данные на три группы (отмечены цифрами I, II, III на рис. 4, 7, 8). Область I: скорости удара ниже  $2,6 \div 3$  км/с, частица остается целой, на мишени наблюдался только один кратер со значением  $h_{\max} / d_p \approx 2 \div 2,2$  (см. рис. 5, a). В области II при превышении пороговой скорости  $v_0$  частица начинает разрушаться (см. рис. 6, a, б), глубина внедрения быстро умень-

шается до  $h_{\max} / d_p \approx 0,6 \div 0,8$  при увеличении скорости удара до  $5 \div 5,5$  км/с. В области II наблюдается значительный разброс данных для экранов из различных материалов. При  $v_p > 5$  км/с скорость уменьшения глубины кратеров заметно падает, на мишени наблюдается более однородное распределение кратеров по размерам (область III).

Оценка средней осевой скорости осколков в запреградном облаке по закону сохранения импульса [15] показывает, что учет относительного изменения скорости фрагментов для опытов с экранами различной плотности не может объяснить наблюдаемое различие в значениях  $h_{\max} / d_p$  для сплошных и пористых экранов. Опыты с пористой медью при плотности  $2,8$  г/см<sup>3</sup> ( $\mu \approx 3,2$ ), равной плотности дюралюминия, также подтверждают это заключение.

**Зависимость глубины внедрения от ударного давления и захваченной энергии.** Согласно существующим представлениям наиболее важным фактором для разрушения ударника является давление соударения, значения которого при одинаковых скоростях удара для рассматриваемых экранов значительно отличаются из-за разницы в ударной сжимаемости материалов пластинок. На рис. 7, a приведена зави-

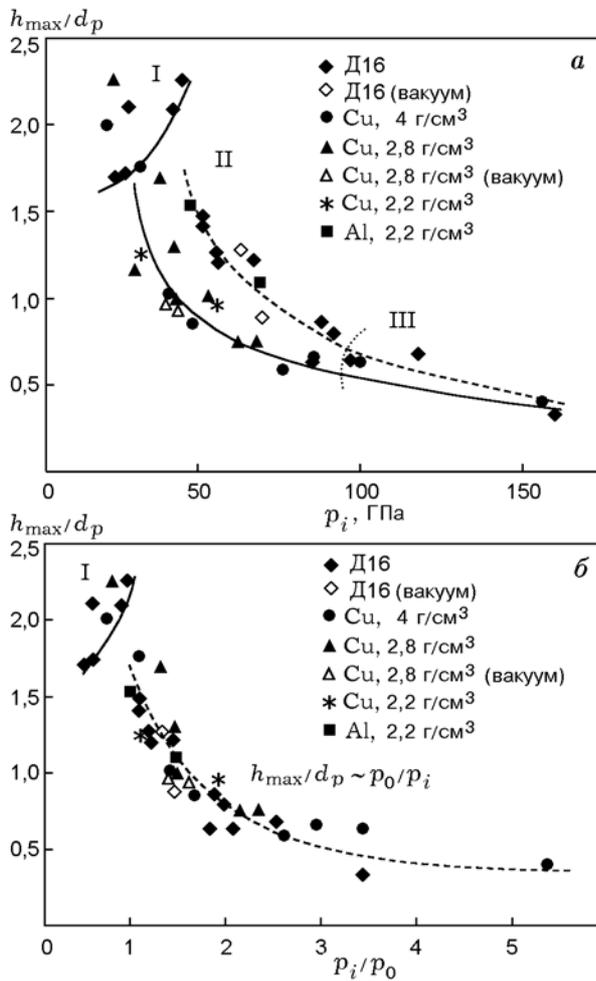


Рис. 7. Зависимость максимальной глубины внедрения от давления удара (а) и от относительного давления удара (б)

симость глубины внедрения от давления соударения. Видно, что в области II при давлениях 30 ÷ 100 ГПа все точки для экранов из высокопористой меди лежат ниже данных для экранов из дюралюминия. Пороговые значения давления, которые определялись как средние значения давлений, при которых наблюдается неразрушение и разрушение частицы, составляют 27 ÷ 28 ГПа для пористой меди и 49 ГПа для экранов из дюралюминия (см. табл. 2). Эти результаты указывают на то, что экраны из высокопористой меди вблизи порога разрушения, в области II, разрушают стальную частицу лучше, чем экран из сплошного дюралюминия. Например, при давлении удара 50 ГПа глубина внедрения для экранов из пористой меди в 1,5 раза меньше, чем для экранов из дюралюминия. В относительных координатах  $h_{\max}/d_p$ ,

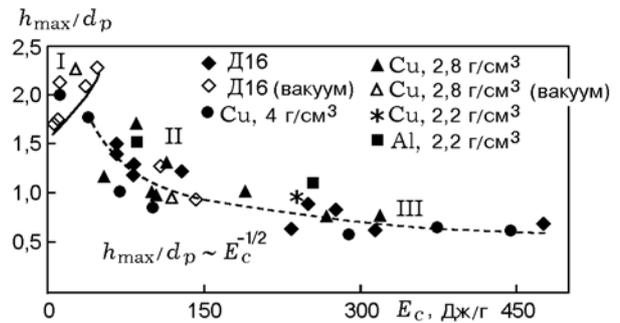


Рис. 8. Зависимость максимальной глубины внедрения от захваченной ударной энергии

$p_i/p_0$  данные для всех экранов ложатся на одну кривую  $h_{\max}/d_p \approx 1,6(p_i/p_0)^{-1}$  с точностью до разброса экспериментальных данных (рис. 7, б), но пороговые значения давления  $p_0$  различны для твердых и пористых экранов.

На рис. 8 показана зависимость глубины внедрения  $h_{\max}/d_p$  от захваченной удельной ударной энергии  $E_c = E_{cap}/m_p$ . В случае экранов из дюралюминия время взаимодействия ударника с экраном ограничивается разгрузкой со свободной поверхности экрана, а для пористых экранов — разгрузкой с боковой поверхности ударника, что учитывается множителем  $\eta = u_{s,p}/u_{s,b}$  в уравнении (1). Видно, что данные для рассмотренных материалов «перемешиваются», и нет оснований разделять результаты для разных пластинок. В пределах разброса все данные ложатся на единую кривую  $h_{\max}/d_p \sim (E_{cap}/E_0)^{-1/2}$  с величиной пороговой энергии для частицы из стали  $E_0 \approx (39 \pm 15)$  Дж/г в диапазоне от 40 до 500 Дж/г. Отметим, что пороговая энергия для сферических частиц из пяти сталей составляет 12 ÷ 66 Дж/г [1], и полученное нами значение соответствует этому диапазону энергий.

Для проверки влияния неоднородностей структуры материала экрана на характер разрушения частицы мы поставили два опыта с экраном из пористого алюминия при плотности 2,2 г/см<sup>3</sup> ( $\mu \approx 1,3$ ) и давлении соударения в области II (см. рис. 7, а). Обе точки в координатах «глубина внедрения — давление соударения» прекрасно легли на кривую для сплошного дюралюминия. То есть небольшая пористость материала экрана не приводит к заметному изменению глубины внедрения. С точки зрения этого результата представляло бы интерес исследование взаимодействия ударника с пластинками из пороалюминия, производимо-

го стандартным металлургическим способом. При меньшей плотности этот материал, возможно, разрушал бы ударник практически так же, как пластинка из сплошного дюралюминия.

При давлениях  $p_i > 80 \div 100$  ГПа, в два раза превышающих пороговые значения (при  $v_p > 5$  км/с и  $E_c > 200$  Дж/г), максимальная глубина внедрения не зависит от материала экрана. В этой области параметров столкновения, по нашему мнению, возможно прямое сравнение результатов фрагментации ударяющей частицы для сплошного и пористого экранов с целью исследования вклада фрагментов материала экрана в суммарное повреждение пластины-свидетеля.

**Кольцевые структуры.** Использование пористых экранов позволило однозначно ответить на вопрос, ответ на который не очевиден при использовании экранов из твердого материала. При ударе стальным шариком по тонкому экрану с  $d_p/t_b \geq 2$  при скорости  $v_p \geq 7$  км/с на пластине-свидетеле образуется так называемая кольцевая структура кратерного поля [5, 15]. Ранее было непонятно, удар чем: фрагментами ударника или осколками материала экрана, образующимися из периферийной зоны пробойины, — приводит к формированию этой структуры, для которой наиболее глубокие кратеры расположены не в центре кратерного поля, а в кольцевой зоне вокруг центра.

На рис. 9 приведены картинки кратерных полей для опытов с экраном из дюралюминия и пористой меди при плотности  $4 \text{ г/см}^3$  и  $v_p = 7,3$  км/с,  $d_p = 1,7$  мм,  $t_b = 1$  мм,  $S_0 = 150$  мм. Для ускорения стального шарика до  $7,3$  км/с использовался трубчатый заряд с размерами  $d_1 = 20$  мм,  $d_2 = 48$  мм,  $L_{HE} = 500$  мм, шарик был заглублен на  $100$  мм от торца ВВ [7].

В обоих случаях отчетливо видны практически одинаковые структуры, в которых наиболее глубокие кратеры расположены в кольцевой зоне с характерным диаметром  $60 \div 70$  мм. Диаметр и глубина наиболее глубоких кратеров:  $d_c = 1 \div 1,2$  мм,  $h_c = 0,5 \div 0,67$  мм,  $h_c/d_c \approx 0,5$ . Если не предполагать совершенно невероятного в условиях высокоскоростного удара увеличения размеров осколков экрана за счет процессов типа сварки или паковки, то отдельные частички пористого экрана имеют характерный размер не более исходного:  $10 \div 20$  мкм. При ударе сталь/алюминий, близком по плотности ударника к удару медь/алюминий, ти-

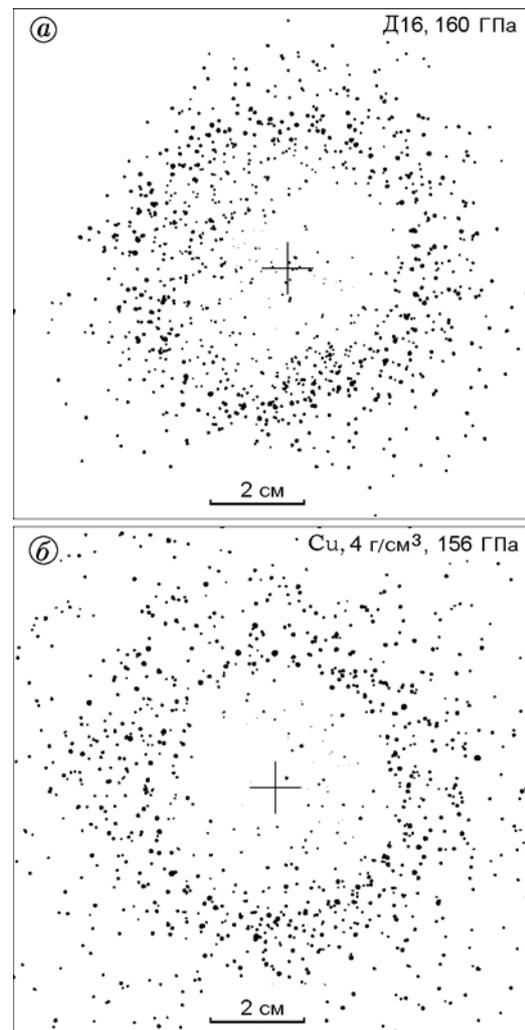


Рис. 9. Кольцевая структура кратерных полей при скорости удара  $7,3$  км/с

пичные размеры кратеров таковы:  $h_c/d_p \approx 4$ ,  $d_c/d_p \approx 5$  при  $v_p \approx 7$  км/с [14]. Поэтому фрагменты экрана не способны привести к образованию кратеров с размером более  $0,1$  мм. Следствием этой оценки является утверждение, что кольцевая зона в опытах с экранами из дюралюминия и пористой меди формируется осколками стальной частицы с характерным размером  $s_f \approx 0,1 \div 0,2$  мм. Существование кольцевой структуры подтверждается не только при визуальном осмотре мишеней, но и сдвигом максимума радиального распределения плотности  $n_c$  кратеров (рис. 10, а). Здесь  $n_c$  — число кратеров, центры которых попадают в кольцо шириной  $2$  мм с внутренним радиусом  $R$ , отсчитываемым от центра кратерного поля. Отметим, что подобная кольцевая структура наблюдается при удалении пластины-свидетеля

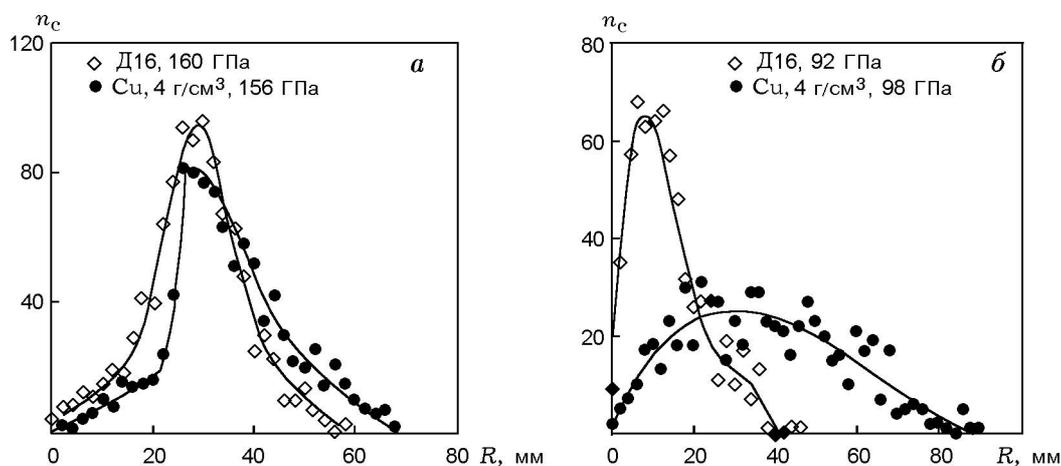


Рис. 10. Распределение плотности числа кратеров в зависимости от расстояния от «точки удара» при скорости удара 7,3 км/с, давлении соударения 156 и 160 ГПа (а), а также при скорости удара 5 ÷ 5,4 км/с, давлении соударения 92 и 98 ГПа (б)

от экрана на расстояние  $S_0 = 75 \div 150$  мм и характерный диаметр структуры пропорционален  $S_0$ , но на маленьком расстоянии кратеры перекрываются и измерить их размеры практически невозможно. Интенсивный радиальный разброс наиболее крупных фрагментов ударника, образующихся, по-видимому, из боковой и тыльной частей ударника, обусловлен взаимодействием фрагментов с эллипсоидальной областью высокого давления, существующей в теле ударника вблизи поверхности соударения.

**Возможная причина лучшего дробящего действия высокопористых экранов.** Безусловно, при сравнительном анализе защитных свойств того или иного материала, используемого в качестве экрана для высокоскоростной частицы, важно его защитное действие при заданной скорости удара и ограниченной массе экрана на единицу площади. При использовании высокопористых экранов требуется более высокая скорость соударения, примерно на  $0,5 \div 1$  км/с больше, чем для экрана из дюралюминия, для достижения одинаковых давлений. Причины, по которым высокопористые экраны при одинаковых давлениях соударения дробят стальной ударник заметно лучше, чем сплошной экран, пока неясны. Опыты с алюминием при плотности  $2,2$  г/см<sup>3</sup> показывают, что неоднородность материала экрана сама по себе не приводит к лучшему дробящему действию экрана. Единственное, что существенно отличает высокопористые экраны от сплошных, это чрезвычайно

высокая температура ударного разогрева материала экрана в области взаимодействия частицы с экраном.

Согласно расчетам по уравнению состояния Кормера, температура ударного разогрева достигает  $5 \div 10$  тысяч градусов вблизи порога разрушения (см. табл. 2) и 50 тысяч градусов при максимальных скоростях удара, что на порядок и более превышает температуру разогрева материала экрана из дюралюминия. При разгрузке происходит диспергирование и, возможно, испарение материала экрана, своеобразный тепловой взрыв в области контакта ударник/экран. В результате материал экрана со стороны свободной поверхности разлетается не только по касательной к плоскости контакта, но и во все стороны, в том числе и в сторону ударника, дополнительно с ним взаимодействуя. Как следствие, увеличиваются эффективные время взаимодействия ударника с материалом экрана, ударная энергия, поглощаемая в теле ударника, и происходит более интенсивная фрагментация материала ударника. Косвенным подтверждением гипотезы является то, что пороговое значение захваченной энергии, рассчитанной без учета возможного увеличения времени взаимодействия ударника с экраном, примерно в 1,5 раза ниже, чем для экрана из дюралюминия. Хотя ясно, что на пороге разрушения величина удельной энергии для одной и той же частицы не должна зависеть от материала экрана.

Более интенсивное взаимодействие удар-

ника с материалом пористого экрана находит отражение в более значительном радиальном рассеянии фрагментов в запреградном облаке осколков по сравнению с экранами из дюралюминия. На рис. 10 приведено число кратеров, координаты центров которых попадают в кольцевую область шириной 2 мм и средним радиусом  $R$ , отсчитываемым от «точки удара». Видно, что увеличение давления соударения от 90 до 160 ГПа существенно влияет на угловой разброс фрагментов при столкновении стальной частицы с экраном из дюралюминия, но мало влияет на радиальное рассеяние фрагментов в случае пористых экранов, так как для них угловое рассеяние велико и вблизи порога разрушения (см. рис. 5, 6).

Отметим, что существует дополнительное доказательство того, что фрагменты высокопористого экрана вносят незначительный вклад в формирование кратерного поля на пластине-свидетеле. В опытах с пористыми экранами при скоростях соударения, при которых ударник не разрушается (см. табл. 2), на мишени наблюдается только один большой кратер диаметром  $\approx 4$  мм. Но при этом из материала экрана выбивается «пробка», осколки которой могли бы привести к образованию на мишени более мелких кратеров. Но дополнительных кратеров размером более 40 мкм (предел линейного разрешения используемого сканера) обнаружено не было. По-видимому, высокая температура ударного сжатия материала пористого экрана даже вблизи порога разрушения частицы (см. табл. 2) приводит к плавлению материала экрана в области пробоины и диспергированию его на мельчайшие фрагменты, неспособные вызвать заметного повреждения пластины-свидетеля. Воздух при атмосферном давлении в зазоре между экраном и мишенью дополнительно способствует «обрезанию» мелкодисперсного хвоста в распределении фрагментов по размеру: мелкие фрагменты просто сгорают. Таким образом, при использовании высокопористых экранов кратерное поле на пластине-свидетеле формируется практически только фрагментами ударника.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты показывают, что при одинаковых давлениях соударения в интервале  $30 \div 100$  ГПа высокопористые экраны разрушают стальной сферический ударник лучше, чем пластинка из дюралюминия той

же толщины. Пороговое значение давления соударения для двухмиллиметровой стальной частицы понижается с 49 до 28 ГПа даже при меньшей массе экрана на единицу площади. При давлении соударения 50 ГПа для пористых экранов с  $t_b/d_p = 0,5$  максимальная глубина внедрения на пластине-свидетеле в 1,5 раза меньше, чем для экранов из дюралюминия, и наблюдается больший радиальный разброс фрагментов в запреградном облаке осколков. Возможно, в области неполного разрушения частицы лучшее дробление ударника обусловлено эффектами, связанными с гетерогенной структурой вещества высокопористого экрана, в частности, с высокой температурой материала экрана в области соударения.

Сплошные и пористые экраны одинаковой толщины разрушают стальной ударник практически одинаково при давлении соударения более  $90 \div 100$  ГПа, когда имеет место полная фрагментация материала ударника. При увеличении давления соударения от 30 до 160 ГПа происходит изменение характера фрагментации стального ударника: от нерегулярного при низких давлениях до более однородного разрушения при максимальных давлениях соударения.

Показано, что кольцевая структура кратерного поля на пластине-свидетеле, возникающая при определенных условиях высокоскоростного удара, однозначно обусловлена фрагментами стального ударника.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Grady D. E., Kipp M. E. Fragmentation properties of metals // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 20, N 1–5. P. 293–308.
2. Grady D. E. Impact failure and fragmentation properties of tungsten carbide // Intern. J. Impact Engng. 1999. V. 23, N 1. P. 307–317.
3. Piekutowski A. J. Fragmentation of a sphere initiated by hypervelocity impact with a thin sheet // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 17, N 1–6. P. 627–638.
4. Мержиевский Л. А. О распределении по размерам кратеров, образованных запреградным осколочным полем // Динамика сплошной среды. Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1970. Вып. 5. С. 33–37.
5. Мержиевский Л. А., Титов В. М. Защитные свойства тонкой пластины при высокоскоростном ударе // ПМТФ. 1977. № 2. С. 135–139.
6. Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Пай В. В., Яковлев И. В. Исследование защитных свойств экранов из композита керамика/алюминий при высокоскоростном ударе //

- Физика горения и взрыва. 1999. Т. 23, № 1. С. 126–132.
7. **Титов В. М., Швецов Г. А.** Лабораторные методы высокоскоростного взрывного метания твердых тел // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 401–404.
  8. **Урушкин В. П., Горшков Н. Н., Титов В. М.** Лабораторный метод моделирования удара каменных метеоритов // Физика горения и взрыва. 1977. Т. 13, № 3. С. 371–374.
  9. **Compendium of shock wave data** / M. van Thiel (Ed.) NLLL, UCRL-50108. 1977.
  10. **Кормер С. Б., Фунтиков А. И., Урлин В. Д., Колесникова А. Н.** Динамическое сжатие пористых металлов и уравнение состояния с переменной теплоемкостью при высоких температурах // ЖЭТФ. 1962. Т. 42, № 3. С. 686–702.
  11. **Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Сутулов Ю. Н., Медведев А. Б.** Сжимаемость пористых металлов в ударных волнах // Исследование свойств веществ в экстремальных условиях / Под ред. В. Е. Фортова и Е. А. Кузьменкова. М.: Ин-т высоких температур РАН, 1990. С. 59–74.
  12. **Schäfer F., Schneider E., Lambert M., and Maysel M.** Propagation of hypervelocity impact fragment clouds in pressure gas // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 20, N 6–10. P. 697–710.
  13. **Свифт Х. Ф.** Механика соударения со сверхвысокими скоростями // Динамика удара / Пер. с англ. под ред. С. С. Григоряна. М.: Мир, 1985. С. 173–197.
  14. **Harrison W., Loupiaz C., Outrebon P., and Turland D.** Experimental data and hydrocode calculations for hypervelocity impacts of stainless steel into aluminum in the 2-8 km/s range // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 17, N 1–6. P. 363–374.
  15. **Мержиевский Л. А., Титов В. М.** Высоко-скоростной удар // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 92–108.

*Поступила в редакцию 14/XI 2000 г.*

---