

МОРФОЛОГИЯ КРАТЕРОВ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ ПО ИЗОТРОПНЫМ КОМПОЗИТАМ С ВКЛЮЧЕНИЯМИ

УДК 629.198.624

В. В. Сильвестров, А. В. Пластинин, И. В. Яковлев, В. В. Пай

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск

Приведены результаты исследования высокоскоростного удара по модельным дисперсно-упрочненным композитам, состоящим из эпоксидной или алюминиевой матрицы с включениями частиц металла (Al, Pb) или керамики (SiO₂). Цель исследования — поиск материалов, обладающих более высоким сопротивлением к внедрению высокоскоростной частицы по сравнению с материалом отдельных компонентов. Это сопротивление характеризуется отношением глубины кратера в достаточно толстой мишени к диаметру сферического ударника. Для двух исследованных композитов показано, что при ударе стальной частицей со скоростью от 3 до 11 км/с глубина кратера примерно на величину одного диаметра ударяющей частицы меньше, чем глубина кратеров для мишеней из свинца или алюминия.

Наибольшее внимание исследователей в области высокоскоростного удара обычно уделяется изучению соударений с металлическими упругопластическими мишенями, моделирующими основные внешние элементы космических аппаратов. Однако непрерывно продолжается поиск новых материалов, обладающих более высоким сопротивлением при высокоскоростном ударе. В частности, исследуется удар по неметаллическим материалам таким, как полимерные и керамические композитные материалы, обладающим рядом интересных для этой области техники свойств [1–6].

В одном из подходов для улучшения защитных свойств конструкций космических экранов по отношению к удару высокоскоростными частицами в качестве первого экрана предложено использовать новые материалы, которые могут разрушать ударяющую частицу лучше, чем гомогенный металлический сплав. Примером таких материалов являются композиты с дисперсными включениями. Первые результаты четырех экспериментов, в которых использованы композиты, содержащие 20 и 25 % (по объему) включений карбида кремния в алюминиевой матрице, приведены в [6].

В настоящей работе представлены результаты исследования высокоскоростного удара стальными и стеклянными частицами по мишеням из модельных изотропных дисперсно-упрочненных композитов на основе матрицы из алюминия или эпоксидной смолы с включениями крупнодисперсного кварцевого песка или мелкодисперсных алюминия и свинца. Цель исследования — поиск материалов, обладающих более высоким сопротивлением к внедрению высокоскоростной частицы по сравнению с материалом компонентов. Это сопротивление характеризуется величиной P_c/d_p — отношением глубины кратера в полубесконечной мишени P_c к диаметру сферического ударника d_p .

Основная идея заключается в возможном увеличении удельной энергии разрушения

материала мишени за счет повышения степени его диспергирования при выбросе из области кратера или пробойны (в случае тонкой мишени). Эту цель можно достичь, используя материалы с мелкодисперсными включениями или скомпактированные из порошков. При динамическом нагружении подобные материалы разрушаются преимущественно по границам матрица/включение. При достаточной концентрации включений их число и размер могут определять размер фрагментов, на которые разрушается материал мишени. При измельчении разрушаемого материала удельная энергия разрушения единицы его объема может существенно увеличиваться.

Металлокерамические композиты с упругими включениями представляют интерес и по другой причине. В этих материалах за фронтом ударной волны, возможно, существует дополнительный механизм преобразования определенной части направленного движения в случайные упругие колебания, энергия которых переходит в тепло из-за пластического деформирования материала матрицы [7]. В результате при высокоскоростном ударе может происходить дополнительное поглощение энергии ударника и уменьшение объема и глубины кратера. Эти качественные соображения и являются идейной основой работы.

Кроме того, представляет интерес ответ на вопрос: как можно оценить глубину кратера для композита, являющегося смесью двух материалов, если известны глубины кратеров для этих материалов? Данные для эпоксидного стеклотекстолита [5] позволяли предположить, что достаточно хорошо выполняется формальное «правило суммирования» для относительных глубин кратеров в материалах 1 и 2:

$$(P_c/d_p)_{12} = (1 - m)(P_c/d_p)_1 + m(P_c/d_p)_2, \quad (1)$$

где m — массовая концентрация второго материала (в [5] материал 1 — эпоксидная смола, 2 — стеклоткань, $m \simeq 70\%$).

ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УДАРНИКИ

Исследованы три модельных двухфазных композита, состоящие из эпоксидной или алюминиевой матрицы с включениями алюминия, свинца и кварцевого песка. Все мишени имели диаметр 60 мм и толщину 10–12 мм и были заключены в обойму из дюралюминия толщиной 20 мм со стороны боковой и 40 мм со стороны задней поверхностей мишени. Для всех условий соударения мишени были достаточно толстыми для того, чтобы их можно было считать полубесконечными.

Однородные мишени из металлоэпоксидных композитов изготавливали из смеси порошка алюминия АСД-1 с эпоксидной смолой ЭД-20 холодного отверждения (Al/смола) и из смеси порошка свинца с эпоксидной смолой горячего отверждения (Pb/смола). Для алюминиевых включений со средним размером 10–20 мкм объемная концентрация φ составляла 0, 15, 30 и 45 %, а плотность материала ρ_t изменялась от 1,18 (для чистой смолы) до 1,89 г/см³. В случае включений из свинца со средним размером 5–10 мкм их объемное содержание составляло 48 %, плотность композита $\rho_t = 6,17$ г/см³. Изготовить композит Pb/смола с меньшим значением φ не удалось: ввиду большой разницы плотностей компонентов, частицы свинца тонут в жидкой смоле, и реализуется вышеуказанное значение концентрации.

Мишени из композита SiO₂/Al изготавливали горячим прессованием смеси порошков алюминия АСД-1 и керамики при температуре ~ 450 °С с последующим отжигом. Массовая концентрация порошка SiO₂ в матрице из мягкого алюминия составляла $m = 0$ (прессованный чистый алюминиевый порошок), 15, 30 и 50 %; при этом плотность ма-

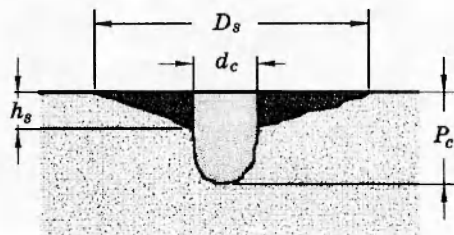


Рис. 1. Схематический рисунок кратера, образующегося при ударе по исследованным композитам

териалов изменялась от 2,61 до 2,53 г/см³; пористость образцов 3–5 %; средний размер частиц песка 50–100 мкм.

Стальные (плотность $\rho_p = 7,8$ г/см³, конечный диаметр $d_p = 0,7$ – $1,9$ мм) и стеклянные ($\rho_p = 2,5$ г/см³, $d_p = 1,3$ и $2,3$ мм) шарики ускорялись до скорости $v = 11,2$ и $7,8$ км/с соответственно при помощи взрывного трубчатого ускорителя [8, 9]. Для всех использованных конструкций ускорителя скорость и конечный размер ударников были предварительно определены с точностью 3–5 % [10]. При скоростях удара в диапазоне 3–11 км/с по пластичным металлам (таким, как алюминиевые сплавы, медь, различные стали и т. д.) разброс в значениях размеров кратера (по глубине, диаметру и объему) не превышает 5–10 %. Используемый метод ускорения не позволяет варьировать скорость частицы при ее постоянном размере, и разным скоростям соответствуют частицы разных диаметров. Поэтому приводимые ниже размеры кратеров нормированы на конечный диаметр ударника. Все результаты получены при ударе по нормали к поверхности мишени.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для двух исследованных композитов — Al/эпоксидная смола и SiO₂/Al — морфология кратера подобна той, которая наблюдается при высокоскоростном ударе по хрупким материалам таким, как стекла [11, 12]. Со стороны удара на поверхности мишени наблюдаются центральное углубление — каверна, формируемая непосредственно ударяющей частицей — и примерно круговая зона фронтального откола, окружающая каверну (рис. 1). Появление зоны откола в композитах с дисперсными включениями, безусловно, связано с уменьшением их пластичности и откольной прочности [7]. Во многих случаях материал в откольной зоне отделяется от тела мишени и выбрасывается из кратера только частично. Внутренняя поверхность кратера неровная, поэтому точность измерений диаметра d_c и глубины каверны P_c составляла $\pm(0,1$ – $0,2)$ мм, а диаметра D_s и глубины зоны откола h_s — $\pm 0,5$ мм.

Объем центральной каверны V_c (выделенная область с диаметром d_c на рис. 1), профиль которой дополнен до уровня фронтальной поверхности цилиндром с диаметром d_c , а донная часть считалась полусферой, оценивался по формуле $V_c = (\pi/12)d_c^3(1 + 3(P_c/d_c - 0,5))$ по данным табл. 1–3. Здесь m_p , V_p , E_p — масса, объем и кинетическая энергия ударника; ΔM — измеренная потеря массы мишени. Для пластичных материалов мишени, у которых форма кратера близка к указанной, эта оценка соответствует полному объему кратера и согласуется с результатами прямых измерений объема. Для хрупких материалов появление откольной зоны приводит к увеличению полного объема кратера, который мо-

Таблица 1

Влияние массовой концентрации алюминия на размеры кратера
для композита Al/эпоксидная смола

Материал ударника	m , %	φ , %	ρ_t , г/см ³	P_c/d_p	d_c/d_p	P_c/d_c	D_s/d_p	h_s/d_p	$\Delta M/m_p$	M_c/m_p	V_c/V_p
Сталь	0	0	1,18	5,4	2,0	2,8	7	0,9	12	4,7	31
	29	15	1,42	5,3	2,7	2,0	10	1,7	21	7,1	43
	50	30	1,65	4,7	2,6	1,8	8	1,5	18	12	57
	66	45	1,89	4,9	3,6	1,4	9	1,6	22	18	74
	100	100	2,61	4,1	4,0	1,0	6	0,9	12	27	81
Стекло	0	0	—	2,7	2,0	1,4	5	0,9	10	6,8	14
	50	30	—	2,9	3,1	0,9	8	0,9	35	18	27
	66	45	—	2,6	3,2	0,8	7	0,8	34	24	30
	100	100	—	2,25	3,5	0,66	5	0,5	10	32	31

Примечание. Стальной ударник: $d_p = 0,9$ мм, $v = 5,5$ км/с, $m_p = 3$ мг, $E_p = 45$ Дж, $V_p = 0,38$ мм³; стеклянный ударник: $d_p = 1,45$ мм, $v = 5,4$ км/с, $m_p = 4$ мг, $E_p = 58$ Дж, $V_p = 1,6$ мм³.

Таблица 2

Влияние массовой концентрации SiO₂ на размеры кратера
для композита SiO₂/Al

Материал ударника	m , %	ρ_t , г/см ³	P_c/d_p	d_c/d_p	P_c/d_c	D_s/d_p	h_s/d_p	$\Delta M/m_p$	M_c/m_p	V_c/V_p
Сталь	0	2,61	4,34	4,2	1,0	6	0,9	12	32	97
	15	2,59	4,2	3,8	1,1	8	0,9	11	25	77
	30	2,54	4,0	3,3	1,2	9	1,3	33	20	61
	50	2,53	3,5	3,4	1,0	10	1,8	34	16	50
Стекло	0	—	2,25	3,5	0,66	5	0,5	10	32	31
	15	—	2,1	3,2	0,67	6	0,6	14	27	26
	30	—	2,1	3,1	0,66	6,5	0,8	19	23	23
	50	—	1,8	3,1	0,59	7	1,0	31	19	19

Примечание. Характеристики ударников те же, что в табл. 1.

Таблица 3

Влияние скорости стального ударника на размеры кратера

Материал мишени	v , км/с	d_p , мм	P_c/d_p	d_c/d_p	P_c/d_c	D_s/d_p	h_s/d_p	$\Delta M/m_p$	V_c/m_p , см ³ /г	V_c/V_p
Прессованный порошок алюминия АСД-1	3,0	1,9	3,8	3,8	1,01	7	0,5	42	8,8	68
	5,5	0,9	4,3	4,2	1,04	6	0,9	12	12	95
	7,5	0,83	5,0	5,0	1,03	8	0,8	25	20	157
	10,1	0,75	6,0	6,1	0,99	10	0,6	38	36	278
Композит Al/SiO ₂ $m = 50$ %	3,0	1,9	3,4	2,2	1,25	11	1,2	36	2,8	22
	5,5	0,9	3,5	3,4	1,03	10	1,8	34	6,3	50
	7,5	0,83	4,1	4,2	0,99	14	1,8	84	12	90
	11,2	0,68	5,6	5,6	1,0	11	2,4	112	28	218

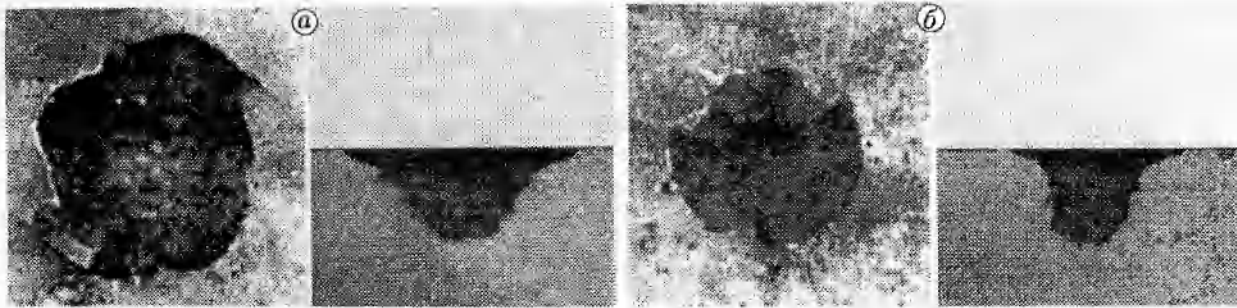


Рис. 2. Вид сверху и разрезы кратеров, образованных в композите Al/эпоксидная смола ($\varphi = 45\%$) при ударе стеклянной (а) и стальной частицами (б):

а — $d_p = 1,45$ мм, $v = 5,4$ км/с; б — $d_p = 0,9$ мм, $v = 5,5$ км/с

жет существенно превышать объем центральной каверны. Например, при ударе по горным породам вообще не удается выделить центральную каверну, а масса материала, выбрасываемого из откольной зоны, достигает 4/5 всей выброшенной массы [13]. Отмечено также, что скорость этой части материала мишени, выбрасываемого на последней стадии образования кратера, мала [13]. Для исследуемых композитов объем откольной зоны меньше или примерно равен объему каверны при $\varphi = 50\%$. Тот факт, что часть материала из откольной зоны не выбрасывается из кратера, указывает на малую скорость выброса материала и в рассматриваемом случае. Поэтому энергия, необходимая для образования откольной зоны, по-видимому, мала и не вносит существенного вклада в перераспределение энергии ударника, которая расходуется, в основном, на разрушение и выброс материала из объема собственно каверны, на деформирование и нагрев неразрушенной части материала мишени. Эти соображения дают качественное обоснование для рассмотрения зависимости объема каверны для исследуемых композитов от параметров соударения.

Композит Al/смола. Влияние включений алюминия в матрицу из смолы на морфологию и размеры кратера исследовалось при скорости удара 5,5 км/с. На рис. 2 приведены типичные формы кратеров, образующихся при ударе стеклянными и стальными частицами. Отметим более удлиненную форму центрального углубления при соударении сталь/композит по сравнению с ударом стекло/композит, что связано с различием в плот-

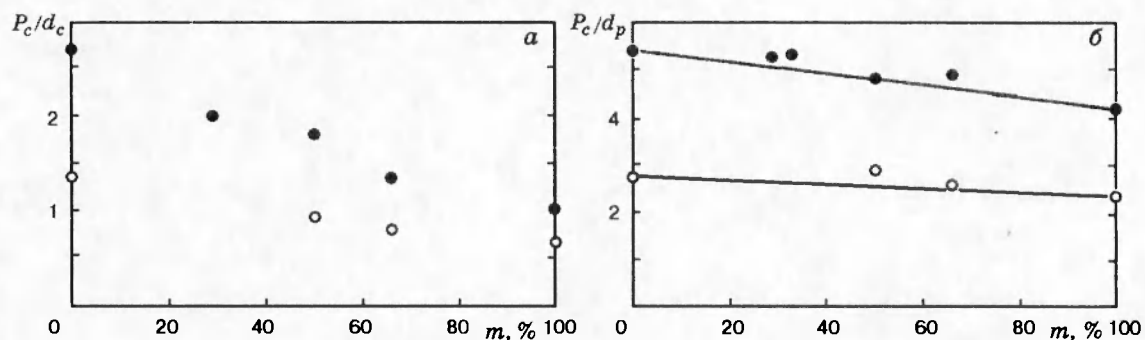


Рис. 3. Зависимость размеров кратера: формфактора (а) и относительной глубины (б) — от массовой концентрации алюминия в эпоксидной матрице:

ударники: \circ — из стекла, \bullet — из стали

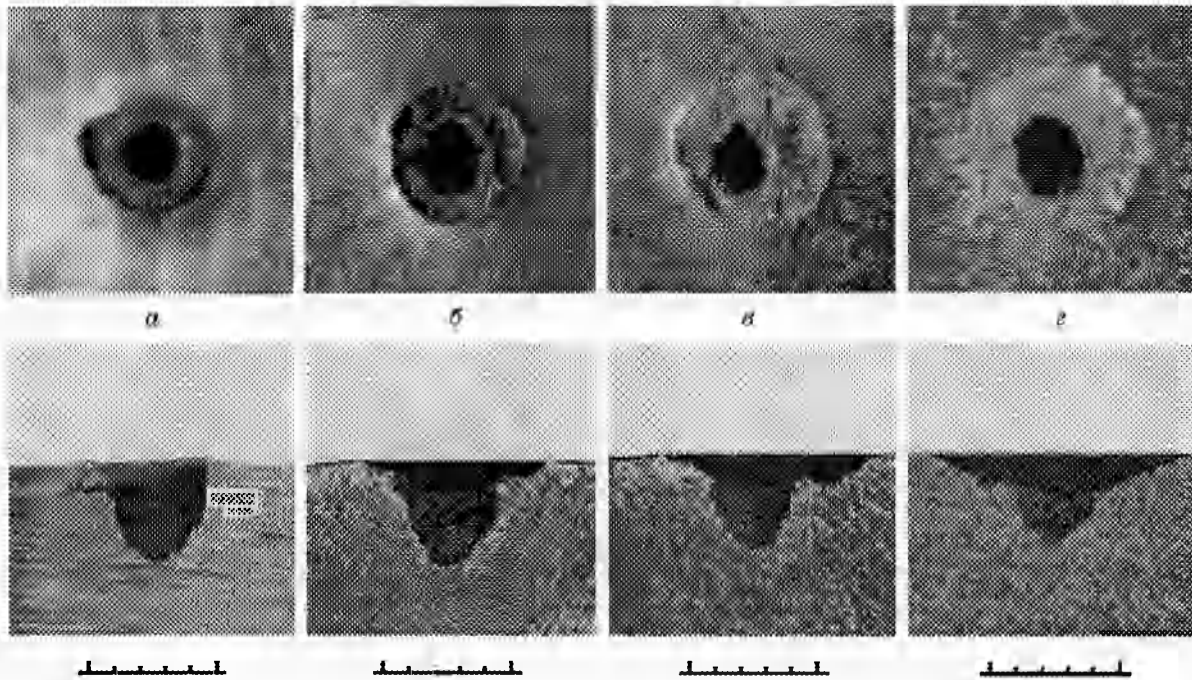


Рис. 4. Вид со стороны удара и разрезы кратеров при ударе стальной частицей со скоростью 5,5 км/с по композиту SiO_2/Al :

масштабные метки — 1 мм; а — прессованный порошок алюминия, б — 15% SiO_2/Al , в — 30% SiO_2/Al , г — 50% SiO_2/Al

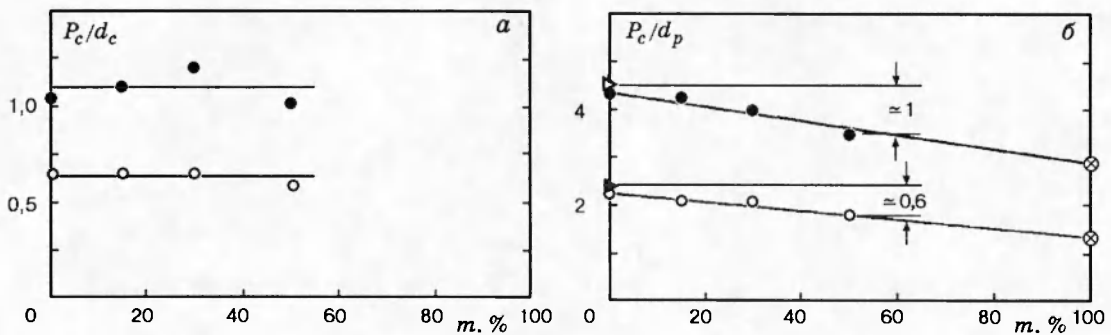


Рис. 5. Зависимость размеров кратера: формфактора (а) и относительной глубины (б) — от массового содержания SiO_2 в алюминиевой матрице:

● — сталь/ (SiO_2/Al) , ○ — стекло/ (SiO_2/Al) , ▷ — сталь/АД1М, ► — стекло/АД1М, ⊗ — сталь/оптический крон, ⊕ — стекло/оптический крон

ностях ударников и характером их разрушения. Количественные данные по размерам кратеров приведены в табл. 1 и на рис. 3.

Диаметр зоны откола для композита составляет 7–10 мм при ударе стальной частицей с энергией $E_p = 45$ Дж и 10–12 мм при ударе частицей из стекла с $E_p = 58$ Дж и не зависит от концентрации наполнителя. Толщина откола h_s также практически не зависит от содержания наполнителя и равна 1,2–1,5 мм.

Диаметр центральной каверны увеличивается с ростом объемного содержания алюминия (см. табл. 1). Для характеристики формы каверны можно ввести формфактор, равный отношению глубины кратера к диаметру каверны (P_c/d_c). С увеличением содержания алюминия наблюдается монотонное уменьшение P_c/d_c (см. рис. 3, а) от 1,5 и 2,5, характерных для эпоксидной смолы, до значений 0,66 и 1, близких к результатам для алюминиевых сплавов [14, 15].

В пределах точности определения величины P_c/d_p , которая составляет 5–10 %, данные по относительной глубине кратера для композита лежат между результатами для смолы и прессованного алюминиевого порошка и описываются соотношением (1) (прямые линии на рис. 3, б), хотя диапазон изменения глубины кратера невелик. Влияние плотности ударника удовлетворительно описывается степенной функцией вида $P_c/d_p \sim \rho_p^{2/3}$, которая следует из соотношения Чартерса — Саммерса [16], установленного ранее для металлических мишеней.

Отметим, что плотность преграды в этих экспериментах изменяется примерно в 2,3 раза. Изменяются также способность материала к пластическому деформированию и морфология кратеров, но относительная глубина P_c/d_p изменяется незначительно.

Композит SiO_2/Al . Влияние включений SiO_2 в матрицу из алюминия на структуру кратера и его размеры исследовали при ударе стальными и стеклянными частицами при скорости 5,5 км/с. Условия соударения и результаты приведены в табл. 2. Вид кратеров со стороны удара и поперечные разрезы мишеней показаны на рис. 4. Качественно картина разрушений на фронтальной поверхности подобна той, которая наблюдается для композита $\text{Al}/\text{смола}$. Диаметр откола вокруг центральной каверны увеличивается от 6 до 10 мм при возрастании содержания кварцевых частиц, но диаметр каверны уменьшается от 4,2 до 3 мм. Формфактор каверны P_c/d_c практически не зависит от содержания SiO_2 и равен $1,1 \pm 0,1$ и $0,64 \pm 0,03$ при ударе стальными и стеклянными частицами соответственно (рис. 5, а).

Для прессованного чистого алюминия глубина кратера равна $P_c/d_p = 4,1$ – $4,3$ и $2,2$ – $2,3$ и близка к глубине для гомогенного мягкого алюминиевого сплава АД1М ($P_c/d_p = 4,5$ и $2,4$) при ударе частицами из стали и стекла соответственно. В отличие от алюминиевого сплава на мишени из прессованного алюминиевого порошка вокруг центральной каверны вместо венчика наблюдается узкая зона откола. Глубина кратера уменьшается с увеличением содержания SiO_2 (рис. 5, б). При 50 %-м содержании кварцевых включений в композите глубина кратера по сравнению с мягкими алюминиевыми сплавами уменьшается на величину одного диаметра ударяющей частицы при ударе сталь/композит и на половину диаметра при ударе стекло/композит. В обоих случаях рассчитанный объем центральной каверны уменьшается примерно в 2 раза по сравнению с прессованным алюминиевым порошком.

Для проверки соотношения (1) в качестве крайних точек для сравнения при $m = 0$ и 100 % использовали данные для прессованного алюминия и оптического стекла «крон», состоящего в основном из SiO_2 (как оценку глубины кратера для «чистого гомогенного» SiO_2). При этом в случае удара сталь/оптический крон использовали эксперименталь-

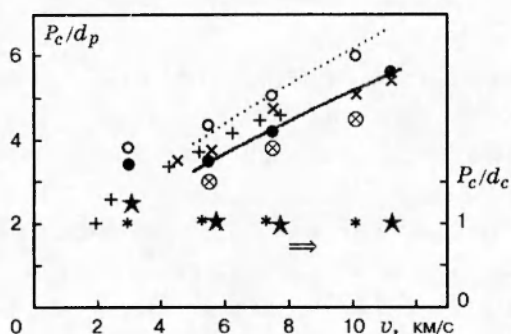


Рис. 6. Глубина кратера и формфактор в зависимости от скорости стальной частицы ($d_p = 0,68-1,9$ мм):

параметры кратера: *, * — формфактор, остальные обозначения — глубина кратера; материал мишени: о, * — прессованный алюминиевый порошок; •, * — композит SiO_2/Al , $m = 50\%$; ⊗ — оптический крон [11]; сплавы алюминия: + — 6061-T6 [15], × — Д16Т [17]

ные результаты из [11]; для удара стекло/оптический крон значение P_c/d_p оценивали по зависимости $P_c/d_p \sim \rho_p^{2/3}$. Оказалось, что «правило суммирования» достаточно хорошо выполняется и для композита SiO_2/Al (прямые линии на рис. 5,6).

Следует отметить, что в уравнении (1) и на рис. 3,б и 5,б по оси абсцисс можно использовать и значение объемной концентрации φ вместо m . Вывод об удовлетворительном соответствии «правила суммирования» экспериментальным данным не изменится, но примерно в 2 раза вырастает среднеквадратичная ошибка аппроксимации.

На рис. 6 и в табл. 3 приведены данные по влиянию скорости удара стальной частицы на размеры кратера для композита SiO_2/Al при $m = 50\%$. При изменении скорости от 3 до 11 км/с результаты по глубине кратера лежат между данными для отдельных компонентов. Зависимость глубины кратера от скорости удара хорошо описывается степенной функцией с показателем $2/3$ (пунктирная и сплошная линии на рис. 6). Точки при $v = 3$ км/с не учтены при анализе. Так, при $v < 5$ км/с наблюдается хорошо известное немонотонное изменение P_c при уменьшении скорости прочного стального ударника. При $v > 5$ км/с отношение P_c/d_c остается практически постоянным. На рис. 6 приведены также данные для удара стальными шариками по прочным сплавам из алюминия 6061-T6 [15] и Д16Т [17]. Результаты для композита кварцевый песок/алюминий близки к ним.

Композит Рв/смола. В экспериментах с этим композитом обнаружено качественно иное поведение двухфазного композита при высокоскоростном ударе. Ввиду большой разницы в плотностях исходных компонентов массовая концентрация свинца (материала с высокой плотностью и пластичностью и малой теплотой плавления) достигает 90%. Эти обстоятельства, по-видимому, и определяют ряд наблюдаемых особенностей.

На рис. 7 приведены разрезы кратеров, полученных при ударе частицами из стали при скорости 11,2 км/с по композиту и его отдельным компонентам. На рис. 7,б хорошо видны следующие характерные особенности структуры кратера для композита:

- близкая к полусферической форма кратера,
- выпучивание поверхности мишени вокруг центрального углубления, которое можно интерпретировать как появление венчика (основная часть которого, правда, в конечном итоге отрывается),
- отсутствие развитой зоны откола на фронтальной поверхности.

Эти детали, характерные для удара по пластичным материалам, отчетливо указывают на то, что в условиях высокоскоростного удара рассматриваемый композит проявляет достаточно высокую пластичность.

На рис. 8 приведена зависимость глубины кратера P_c/d_p от скорости стального ударника при ударе по мишеням из эпоксидной смолы, композита Рв/смола и литого свинца.

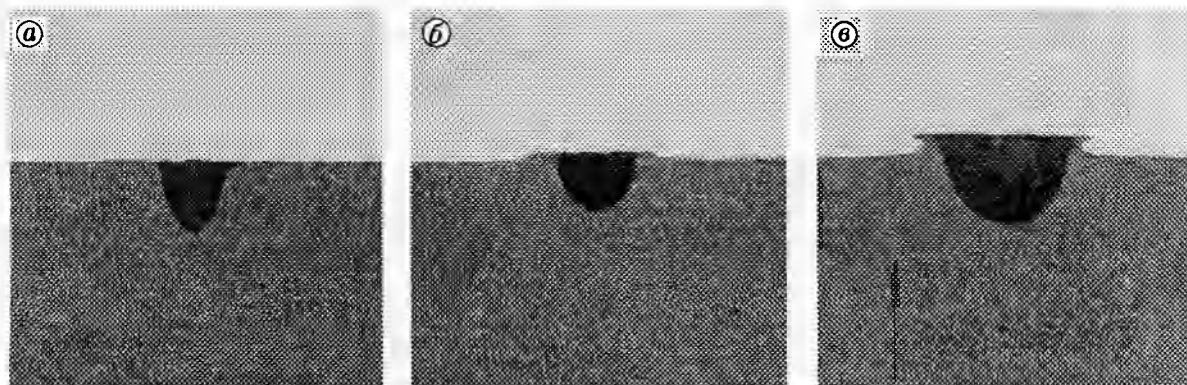


Рис. 7. Разрезы кратеров при ударе стальной частицей по композиту Рb/смола ($d_p = 0,68$ мм, $v = 11,2$ км/с):

a — эпоксидная смола, б — композит Рb/эпоксидная смола, в — литой свинец

На основе приведенных выше результатов для композита Al/смола и изменения прочности композитной мишени по отношению к прочности исходных компонентов следовало бы ожидать, что для исследуемого композита значения P_c/d_p будут лежать между данными по глубине кратера для смолы и однородного металла. Однако аналогичные данные для композита лежат значительно ниже, чем для свинца во всем диапазоне скоростей удара от 3 до 11 км/с, т. е. композит Рb/смола при внедрении высокоскоростной частицы оказывает более высокое сопротивление, чем его исходные компоненты. С ростом скорости удара разница между глубинами кратера для однородного свинца и композита возрастает на величину от одного до полутора диаметров сферического ударника. Зависимость P_c/d_p от скорости удара для композита хорошо описывается функцией $P_c/d_p \sim v^{2/3}$ (сплошная кривая на рис. 8, а).

Формфактор P_c/d_c для этого композита практически постоянен и равен $0,59 \pm 0,02$ при ударе стальной частицей со скоростью от 3 до 11 км/с, для свинца $P_c/d_c = 0,54 \pm 0,02$ (см.

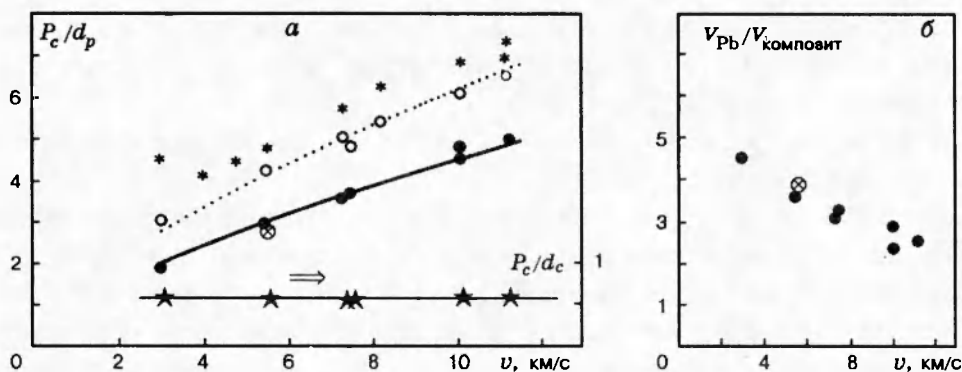


Рис. 8. Глубина, формфактор (а) и объем (б) кратера для композита Рb/эпоксидная смола в зависимости от скорости удара стальной частицей:

* — эпоксидная смола ЭД-20; о — свинец; ●, ★ — композит Рb/смола; ⊗ — композит Al₂O₃/свинец

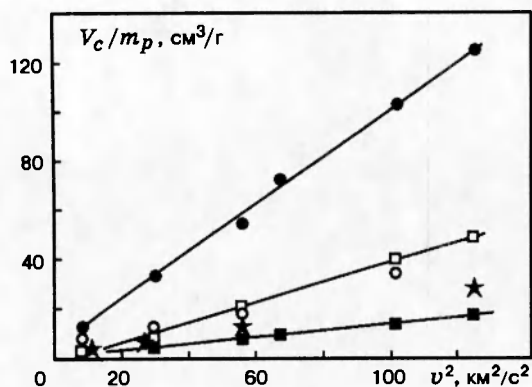


Рис. 9

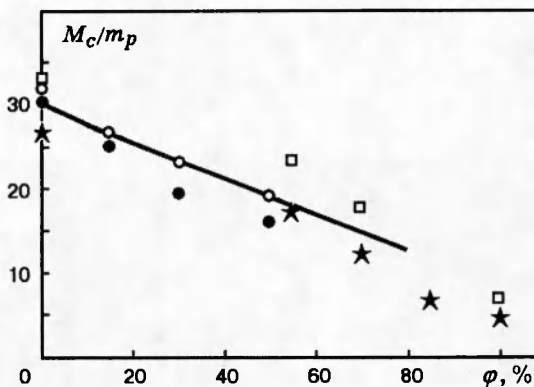


Рис. 10

Рис. 9. Зависимость отношения объема каверны к массе ударника от квадрата скорости частицы из стали при скорости удара до 11 км/с:

● — свинец, □ — Pb/смола, ■ — эпоксидная смола, ○ — прессованный Al, ★ — SiO₂/Al, $m = 50\%$

Рис. 10. Зависимость отношения массы материала мишени, заполняющей объем каверны, к массе ударника от объемной концентрации кварцевого песка или смолы при скорости удара 5,4–5,5 км/с:

мишень: ★, □ — Al/смола; ●, ○ — Al/SiO₂; ударник: ●, ★ — из стали; ○, □ — из стекла

рис. 8,а). Рассчитанный объем кратера в композите меньше объема кратера для свинца примерно в 5 и в 2,5 раза при $v = 3$ и 11,2 км/с соответственно (см. рис. 8,б).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для проверки гипотезы о пропорциональности объема кратера кинетической энергии ударника [18] на рис. 9 приведена зависимость отношения рассчитанного объема каверны к массе ударника от квадрата скорости стального ударника для двух композитов и трех исходных компонентов при скорости удара до 10–11 км/с. Для всех материалов наблюдается линейная зависимость, свидетельствующая о справедливости этой гипотезы не только для пластичных металлов [18], но и для хрупких (композиты) и для вязкоупругого (эпоксидная смола) материалов. Отметим, что

— наши результаты для свинца практически совпадают с прямыми измерениями объема кратера, приведенными на рис. 4,а из [18];

— при скорости $v = 5,5$ км/с отношение V_c/m_p приблизительно равно 6 см³/г для композита SiO₂/Al 50/50 и близко к значениям 7–8 см³/г для прочного Al-2024-T4 [18];

— в координатах объем каверны — энергия ударника результаты для композита Pb/смола лежат между данными для компонентов, т. е. аномальное поведение композита в координатах глубина внедрения — скорость удара (см. рис. 8,а) формально не проявляется из-за увеличения объема кратера при увеличении его диаметра по мере приближения формы кратера к полусферической.

Изменение отношения массы материала мишени, выброшенной из объема каверны, $M_c = V_c \rho_t$, к массе ударника в зависимости от объемного содержания компонентов композитов SiO₂/Al и Al/смола при $v \approx 5,5$ км/с приведено на рис. 10. Содержание кварцевого

песка или эпоксидной смолы увеличивается от нуля до 0,5 и 1 соответственно. Использование отношения M_c/m_p позволяет учесть влияние изменения плотности мишени (для композита Al/смола) и плотности ударника (стального и стеклянного). Погрешность расчета M_c/m_p составляет $\approx 10\%$ и проиллюстрирована данными двух опытов для прессованного алюминиевого порошка ($\varphi = 0$). В пределах погрешности оценки величины M_c/m_p наблюдается линейное уменьшение выброшенной из каверны массы при увеличении содержания второго компонента: песка или смолы. Возможно, это уменьшение действительно связано с увеличением примерно в 1,5 раза удельной (на единицу массы) энергии разрушения ε_m материала мишени для двухкомпонентных композитов.

Данные для композита Pb/смола при скорости стального ударника 5,5 км/с ($M_c/m_p \approx 330$ и $60 \text{ см}^3/\text{г}$ при $\varphi = 0$ и 50% соответственно) лежат намного выше, т. е. в этом случае из кратера выбрасывается существенно большая масса материала мишени.

Согласно [19] для металлических мишеней только 10–30 % энергии ударника расходуется непосредственно на разрушение и выброс вещества из кратера. Примем, что эта часть составляет 20 %. Тогда из соотношения $V_c \rho_t \varepsilon_m \approx 0,2 \cdot m_p v^2 / 2$ на основе данных рис. 9 оценим значения ε_m для рассматриваемых материалов: $\varepsilon_m \approx 180 \text{ Дж/г}$ для композитов Al/смола и SiO_2/Al , 40 Дж/г для композита Pb/смола, а для исходных веществ — 630, 130 и 10 Дж/г для эпоксидной смолы, прессованного алюминия и свинца соответственно.

Общая причина наблюдаемого уменьшения глубины и объема кратера для рассмотренных двухфазных металлокомпозитов связана с существенно меньшей их способностью к пластическому течению. Хорошо известно, что основной вклад в образование кратера в пластичных материалах вносит стадия инерциального послетечения, реализующаяся после полного срабатывания ударника [16, 18]. Вклад этой стадии в конечные размеры кратера тем больше, чем меньше предел текучести материала мишени. Введение дисперсных включений способствует снижению пластичности и увеличению предела текучести и хрупкости композита и, в конечном итоге, меньшему вкладу стадии послетечения в конечные размеры кратера для композита.

Наблюдаемое уменьшение глубины кратера для композита Pb/смола по сравнению со свинцом связано, возможно, с дополнительным поглощением энергии ударника за счет плавления существенной части свинца в области кратера на стадии внедрения ударяющей частицы в преграду. Значения давления, необходимого для начала и полного плавления алюминия за фронтом ударной волны, составляют ≈ 60 и 150 ГПа соответственно. Для свинца эти параметры существенно ниже: 27 и 35 ГПа . Нижние значения давления, необходимые для начала и полного испарения свинца при разгрузке, составляют 84 и 230 ГПа . Оценка давления при ударе в экспериментах с композитами Al/смола, SiO_2/Al показывает, что максимальное давление лежит в диапазоне 20–130 ГПа, т. е. давление, необходимое для полного плавления алюминия, не достигается. В опытах с композитом Pb/смола пиковое давление составляет 110–370 ГПа, что значительно превосходит критическое давление, необходимое как для полного плавления свинца за фронтом ударной волны, так и для полного его испарения при разгрузке. Конечно, давление в расходящейся от точки удара волне быстро уменьшается, но часть материала преграды плавится и, возможно, испаряется. Для этого необходима энергия, которая в конечном итоге отбирается у ударника.

Но еще более высокое давление достигается при ударе частицы по мишени из свинца, и заведомо большая часть материала преграды претерпевает фазовый переход. Но размеры кратеров для свинца больше, чем для композита, ввиду значительного вклада последующего течения. Охрупчивание материала за счет введения дисперсных включений позволяет уменьшить вклад послетечения и выявить возможное влияние фазовых превращений

части материала мишени на размеры ударных кратеров.

Приведенное качественное объяснение уменьшения глубины кратера для композита Pb/смола по сравнению со свинцом не бесспорно. Представляет интерес дальнейшее исследование этого эффекта. В частности, приведем результаты одного эксперимента с композитом Al_2O_3/Pb ($\varphi = 50\%$) при скорости удара стальной частицы 5,5 км/с. Замена эпоксидной смолы керамикой привела к полному изменению морфологии кратера: от приведенной на рис. 7,б до характерной для хрупкого материала (см. рис. 1). Но глубина кратера практически не изменилась: $P_c/d_p = 2,75$ (см. соответствующую точку на рис. 8), т. е. наблюдаемое уменьшение P_c/d_p для композитов Pb/смола и Pb/ Al_2O_3 связано с физическими свойствами свинца и/или характером деформирования двухфазного композита.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы показывают, что введение как пластичных, так и упругих дисперсных включений в эпоксидную или алюминиевую матрицу изменяет характер кратерообразования при высокоскоростном ударе и приводит к существенному изменению размеров ударных кратеров. На примере трех модельных двухкомпонентных композитов с включениями SiO_2 /алюминий, Al/эпоксидная смола и Pb/смола показано, что глубина кратера существенно уменьшается по сравнению с наблюдаемой для пластичного компонента (Al или Pb) или для материала эпоксидной матрицы.

Этот вывод далеко не очевиден. Отметим, например, что при ударе стержнеподобными ударниками при скорости ≈ 100 м/с по тонким пластинкам из эпоксидного стеклотекстолита [20] введение керамических включений (Al_2O_3 или смеси $Al_2O_3+SiO_2$, $m \leq 50\%$) в композит не приводит к увеличению критической скорости пробивания, на основе чего авторы работы [20] пришли к выводу, что введение керамических включений в состав трехкомпонентного композита не сопровождается повышением его сопротивления к внедрению ударника.

Наблюдаемое уменьшение глубины кратера составляет примерно величину одного диаметра сферического ударника при $\varphi \approx 50\%$. Влияние основных параметров ударника (его плотности и скорости) удовлетворительно описывается степенной функцией с показателем 2/3. Для двух композитов (Al/эпоксидная смола, SiO_2 /алюминий) данные по глубине кратера P_c/d_p лежат между результатами для отдельных компонентов. Результаты для композита Pb/эпоксидная смола лежат существенно ниже данных для отдельных компонентов.

Предполагаемыми причинами уменьшения глубины кратера в твердых двухкомпонентных композитах с включениями являются:

- уменьшение способности композитных материалов к пластическому течению за счет введения дисперсных включений;
- возможное увеличение удельной энергии разрушения материала мишени за счет более высокой степени его фрагментации при выбросе из области кратера;
- в случае композита Pb/эпоксидная смола — дополнительное поглощение энергии ударника, связанное с фазовыми превращениями части материала преграды, плавлением и частичным испарением свинца.

Авторы признательны Н. Н. Горшкову, при участии которого данное исследование было начато. Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01951).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Cour-Palais B. G.** Hypervelocity impact in metals, glass and composites // *Int. J. Impact Eng.* 1987. V. 5, N 1-4. P. 221-237.
2. **Yew C. H., Kendrick R. B.** A study of damage in composite panels produced by hypervelocity impact // *Ibid.* P. 729-738.
3. **Christiansen E. L.** Investigation of hypervelocity impact damage to space station truss tubes // *Int. J. Impact Eng.* 1990. V. 10, N 1-4. P. 125-133.
4. **Schonberg W. P.** Hypervelocity impact response of spaced composite material structures // *Ibid.* P. 509-523.
5. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Горшков Н. Н.** Высокоскоростной удар по стеклотекстолиту // *Физика горения и взрыва.* 1995. Т. 31, № 3. С. 92-103.
6. **Robinson J. H., Nolen A. M.** An investigation of metal matrix composites as shields for hypervelocity orbital debris impact // *Int. J. Impact Eng.* 1995. V. 17, N 1-6. P. 685-696.
7. **Johnson J. N., Hixson R. S., Gray III, G. T.** Shock-wave compression and release of aluminum/ceramic composites // *J. Appl. Phys.* 1994. V. 76, N 10. P. 5706-5718.
8. **Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Титова Н. С.** Ускорение твердых частиц кумулятивным взрывом // *Докл. АН СССР.* 1968. Т. 180, № 5. С. 1051-1052.
9. **Урушкин В. П., Горшков Н. Н., Титов В. М.** Лабораторные методы моделирования удара каменными метеоритами // *Физика горения и взрыва.* 1977. Т. 13, № 3. С. 371-374.
10. **Titov V. M., Silvestrov V. V.** Acceleration of solid spherical projectiles by cumulative explosion of tubular charge of high explosive // *Report of LIH. Novosibirsk,* 1994.
11. **Титов В. М.** Разрушение стекла при метеоритном ударе // *Журн. прикл. механики и техн. физики.* 1976. Т. 17, № 4. С. 557-560.
12. **Schneider E., Stilp A. J., Kagerbauer G.** Meteoroid/debris simulation experiments on MIR viewpoint samples // *Int. J. Impact Eng.* 1995. V. 17, N 1-6. P. 731-737.
13. **Титов В. М., Фадеенко Ю. И., Швецов Г. А.** Удар тела с высокой скоростью по горным породам // *Докл. АН СССР.* 1970. Т. 191, № 2. С. 298-300.
14. **Bernhard R. P. and Hörz F.** Craters in aluminum 1100 by soda-lime glass spheres at 1 to 7 km/s // *Int. J. Impact Eng.* 1995. V. 17, N 1-6. P. 69-80.
15. **Harrison W., Loupiaz C., Outrebon P., Turland D.** Experimental data and hydrocode calculations for hypervelocity impacts of stainless steel into aluminium in the 2-8 km/s range // *Ibid.* P. 363-374.
16. **Геринг Дж.** Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // *Высокоскоростные ударные явления.* М.: Мир, 1970. С. 468-516.
17. **Титов В. М., Фадеенко Ю. И.** Сквозное пробивание при метеоритном ударе // *Косм. исследования.* 1972. Т. 10, № 4. С. 589-595.
18. **Эйчельбергер Р., Кайнике Дж.** Высокоскоростной удар // *Физика быстропротекающих процессов.* М.: Мир, 1971. С. 204-246.
19. **Понд Р., Гласс К.** Металлофизические исследования и распределение энергии // *Высокоскоростные ударные явления.* М.: Мир, 1970. С. 428-467.
20. **Ross C. A., Sierakowski R. L.** Studies on the impact resistance of composite plates // *Composites.* 1973. P. 157-161.

*Поступила в редакцию 9/XII 1996 г.,
в окончательном варианте — 8/I 1997 г.*