

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ ЭКРАНОВ ИЗ КОМПОЗИТА КЕРАМИКА/АЛЮМИНИЙ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

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

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

Рассмотрено защитное действие тонких экранов из металлокомпозитов на основе матрицы из алюминия с дисперсными включениями  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при высокоскоростном ударе сферической частицей из стали в схеме одноэкранный защиты. Показано, что экраны из этих материалов обладают худшим защитным действием, чем экраны из гомогенного сплава алюминия.

Общепринятая система противометеоритной защиты основана на различных модификациях защиты Уиппла, основным элементом которой являются один или серия тонких экранов, расположенных на определенном расстоянии от защищаемой стенки. Назначение первого экрана — разрушение ударяющей частицы с целью уменьшения локального воздействия ее фрагментов на последующие элементы конструкции. До сих пор идет поиск материалов и конструкции первого экрана для более эффективного дробления ударяющей частицы и более интенсивного диспергирования материала экрана [1].

В одном из подходов для достижения этой цели предложено использовать металлокомпозиты на основе матрицы из алюминия с дисперсными керамическими включениями [2]. Авторы работы [2] рассмотрели удар алюминиевым ударником со скоростью  $4 \div 5$  км/с по экранам, изготовленным из композита с включением до  $20 \div 25$  % карбида кремния (по объему). Авторы полагали, что при соударении высокоскоростной частицы с экраном из материала, содержащего керамические включения с ударным импедансом и пределом текучести, отличными от импеданса и прочности материала матрицы, частица будет разрушаться лучше, чем в случае экранов из гомогенного пластичного алюминия, и сделали осторожное заключение о перспективности применения подобных материалов в системах защиты.

В [3] показано, что глубина кратера в полубесконечных мишенях из металлокомпозитов с включениями  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в матрице из алюминия существенно меньше глубины кратера в материале пластичной матрицы. В настоящей работе рассмотрено применение ме-

таллокомпозитов на основе матрицы из алюминия с дисперсными включениями  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в качестве экрана в одноэкранный схеме противометеоритной защиты. Цель работы — сравнить защитное действие экранов из дисперсных металлокомпозитов и стандартного экрана из дюралюминия при ударе стальной сферической частицей со скоростью 5,5 и 7,5 км/с.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Экраны из двухкомпонентных композитов толщиной  $t_s = 1 \div 1,3$  мм изготавливали прессованием механических смесей из мелкодисперсного алюминиевого порошка АСД-1 и порошков  $\text{SiO}_2$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при температуре 450 °С с последующим отжигом. Массовая концентрация керамики 15 и 30 %. Средний размер частиц порошка алюминия  $10 \div 20$  мкм, керамики:  $50 \div 100$  мкм для  $\text{SiO}_2$  и  $5 \div 10$  мкм для  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Пористость композитных материалов определена на основе экспериментальных значений плотности и теоретической максимальной плотности, рассчитанной по правилу смесей (таблица).

Схема постановки экспериментов стандартная. Защитный экран из исследуемого материала был установлен на расстоянии 50 мм от задней стенки (алюминиевый сплав Д16, толщина 5 мм). Масса экранов из композитов на единицу площади была примерно постоянной:  $t_s \rho_s = 0,27 \div 0,33$  г/см<sup>2</sup>. Исследовался удар по нормали к поверхности экрана стальными шариками, ускоренными при помощи взрывного трубчатого ускорителя до скорости  $v_p = 5,5$  и 7,5 км/с [4]. Диаметр ударников  $d_p = 0,9$  и 0,83 мм, удельная масса  $d_p \rho_p = 0,7$  и 0,63 г/см<sup>2</sup>

Характеристики исследуемых материалов

Материал	$\rho_{th}$ , г/см <sup>3</sup>	$\rho_{exp}$ , г/см <sup>3</sup>	П, %	$\tau_s$ , МПа	$p_{s,5.5}$ , ГПа	$p_{s,7.5}$ , ГПа
Д16Т	2,785	2,78	—	185–260	105	165
Прессованный Al	2,71	2,62	3	100–120	99	159
15 % SiO <sub>2</sub> /Al	2,67	2,66	1	50–60	100	162
30 % SiO <sub>2</sub> /Al	2,64	2,62	1	50–60	98	160
15 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	2,82	2,55	10	25–30	95	153
30 % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	2,96	2,57	13	25–30	95	153

Примечание.  $\rho_{th}$  — теоретическая плотность исследуемых материалов,  $\rho_{exp}$  — экспериментальная; П — пористость;  $\tau_s$  — прочность на сдвиг;  $p_{s,5.5}$  — давление соударения при скорости удара 5,5 км/с,  $p_{s,7.5}$  — при скорости удара 7,5 км/с.

соответственно. В качестве стандартного экрана, с которым проводилось сравнение, использовали пластинку из сплава Д16Т толщиной 1 мм с удельной массой 0,28 г/см<sup>2</sup>. Опыты проводили в воздухе при нормальном атмосферном давлении.

После удара частицы по экрану за ним образуется облако вторичных осколков, состоящих из фрагментов частицы и экрана. Об эффективности защитного действия экрана можно судить по характеру разрушения задней стенки: величине прогиба, факту пробития стенки, размеру поля поражения или глубине вторичных кратеров [2, 5]. В данной работе использовали толстую заднюю стенку, максимальная глубина кратеров на ней не превышала 1 мм; поэтому 5-миллиметровую заднюю стенку можно рассматривать как полубесконечную. В качестве характеристики защитного действия экранов из различных материалов принята максимальная глубина кратеров  $P_c$  на задней стенке. Погрешность измерения глубины кратеров нормированы на диаметр ударника, который известен с точностью  $\approx 5\%$  [6].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гистограммы, характеризующие влияние материала экрана на относительную глубину кратеров  $P_c/d_p$ , приведены на рис. 1. Для каждого материала экрана приведена группа данных для 2–5 наиболее глубоких кратеров. При введении дисперсных керамических включений в материал экрана глубина кратеров увеличивается на 10 ÷ 30 % относительно значений для экрана из дюралюминия Д16Т

при обеих скоростях удара. Уменьшается эффективная площадь поражения задней стенки и площадь, на которой расположены наиболее глубокие кратеры. Это отчетливо видно на фотографиях задней стенки, приведенных на рис. 2. Влияние типа включений (SiO<sub>2</sub> или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), их концентрации и дисперсности в пределах точности определения  $P_c/d_p$  не про-

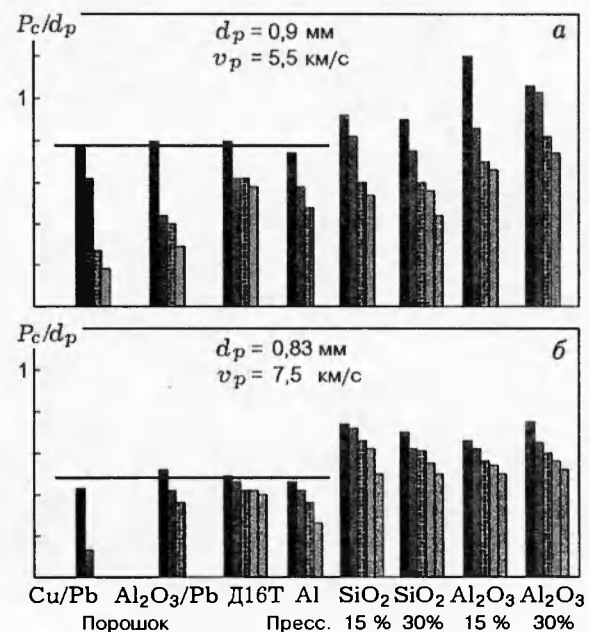


Рис. 1. Относительная глубина кратеров на задней стенке для различных материалов экрана при ударе стальным ударником:

$v_p = 5,5$  (а) и  $7,5$  км/с (б); горизонтальные линии — средняя максимальная глубина внедрения для экранов из дюралюминия, прессованного алюминия и порошков

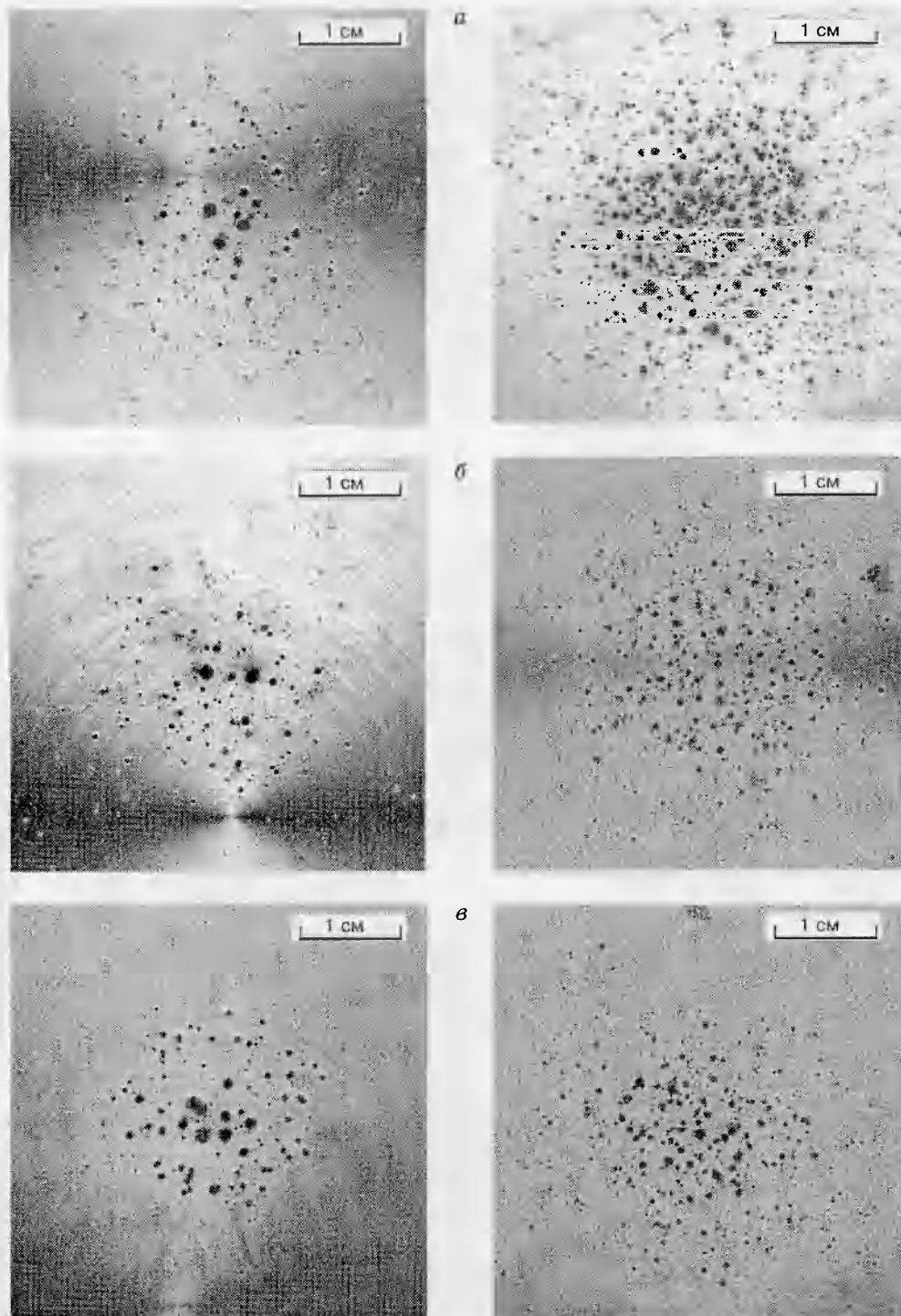


Рис. 2. Вид задней стенки со стороны удара:

левая колонка —  $v_p = 5,5$  км/с; правая —  $v_p = 7,5$  км/с; материал экрана: а — Д16Т, б — 15 %  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  (слева) и прессованный Al (справа), в — 30 %  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  (слева) и 15 %  $\text{SiO}_2/\text{Al}$  (справа)

слеживается. В случае экранов из прессованного порошка алюминия результаты практически совпадают с данными для экрана из однородного дюралюминиевого сплава.

Проанализируем возможные причины ухудшения защитного действия тонких экранов из металлокомпозитов с дисперсными керамическими включениями.

1. *Непостоянство толщины экранов.* Относительная толщина экранов  $t_s/d_p$  в опытах составляла  $1 \div 1,3$ , т. е. экраны были достаточно толстыми. Согласно [5] при соударениях сталь/алюминий со скоростью  $v_p = 5,5$  км/с при  $t_s/d_p = 0,6 \div 1,3$  достигается минимум  $P_c/d_p$ , и в указанном диапазоне  $t_s/d_p$  значение  $P_c/d_p$  практически не изменяется. При  $v_p = 7,5$  км/с минимум  $P_c/d_p$  достигается при  $t_s/d_p = 0,4 \div 0,8$ . Для более толстых экранов глубина кратера растет как  $\Delta(P_c/d_p) \approx 0,6\Delta(t_s/d_p)$ . При  $\Delta(t_s/d_p) = 0,2$  оценка увеличения  $P_c/d_p$  составляет 0,12, и не может полностью объяснить наблюдаемое увеличение глубины вторичных кратеров для экранов из композитов с керамическими включениями.

2. *Влияние давления соударения.* Плотность композитов в экспериментах ниже теоретической, рассчитанной по методу смесей. Пористость используемых материалов составляет  $1 \div 3\%$  для экранов из прессованных алюминия или смеси алюминия с кварцевым песком. Смесь алюминия с мелкодисперсным корундом прессуется гораздо хуже, и пористость материала достигает  $10 \div 13\%$ . Поэтому давление соударения  $p_s$  может значительно изменяться для экранов из различных материалов. Ударная сжимаемость двухкомпонентных механических смесей рассчитывалась как сумма сжимаемостей компонентов [7]. Ударные адиабаты отдельных компонентов взяты из [8]. Влияние пористости композитных материалов учитывалось по простейшей модели [9]. В таблице приведены начальные давления соударения, рассчитанные в одномерном приближении.

Результаты оценки давления соударения стальной частицы с пористыми экранами показывают, что давление  $p_s$  снижается не более чем на  $5 \div 10\%$  относительно реализуемого при взаимодействии частицы с экраном из дюралюминия. Прочность рассмотренных в данной работе металлокомпозитов мала, но их ударный импеданс достаточно высок для реализации высоких давлений при соударении. Однако наблюдается заметное ухудшение защитных свойств экранов из прессованных металлоком-

позитов.

3. *Влияние прочности материала экранов.* В настоящее время существует два мнения по поводу основных факторов, определяющих защитное действие тонкого экрана в схеме Уиппла. На основе результатов численных экспериментов по соударению алюминиевого ударника с тонкими слоистыми преградами в работе [10] показано, что при  $v_p = 15$  км/с в гидродинамическом приближении такие параметры заградного облака осколков, как осевой и радиальный импульсы, остаточная полная энергия ударника, определяются, в основном, удельной массой экрана и мало зависят от порядка расположения слоев, иначе, от давления соударения и соотношения ударных импедансов слоев. Но эта точка зрения подвергается критике на основе прямых экспериментов при более низких скоростях удара (до 8 км/с) [1]. Другая точка зрения заключается в том, что защитное действие экрана определяют, в основном, скорость удара  $v_p$ , от которой зависит уровень давления в материалах частицы и экрана, и относительная толщина экрана  $t_s/d_p$ , определяющая время взаимодействия частицы с экраном (см., например, [5, 11]). В обоих случаях механическая прочность материала экрана считается несущественным фактором. Последнее заключение основано на данных, полученных в опытах с экранами из металлических материалов (алюминиевые сплавы, сталь, медь, латунь и пр.), имеющих различные, но высокие значения прочности ( $\approx 100$  МПа и более).

Предположим, что ухудшение защитных свойств экранов из прессованных композитных материалов связано с уменьшением сдвиговой прочности материала экрана. При пробивании тонкого экрана высокоскоростной частицей давление соударения быстро уменьшается за счет волн разгрузки. При прохождении частицы через экран механическое напряжение на боковой периферии частицы вполне может определяться уровнем силового взаимодействия на контактной поверхности, разделяющей материалы частицы и экрана. Вдоль контактной поверхности действуют, в основном, сдвиговые напряжения, и сдвиговая прочность наименее прочного материала будет определять уровень механических напряжений на периферии частицы. Поэтому частица может разрушаться на более крупные фрагменты.

Для проверки данного предположения проведены измерения сдвиговой прочности  $\tau_s$  использованных материалов при помощи методи-

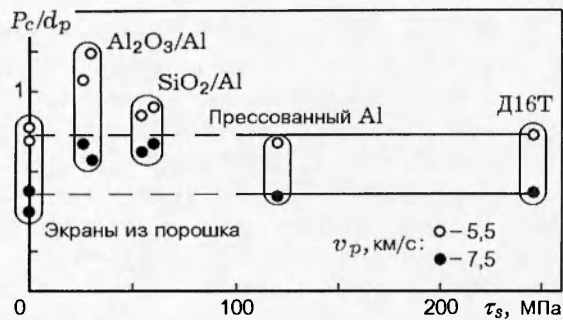


Рис. 3. Корреляция максимума относительной глубины кратеров со сдвиговой прочностью материала экрана при разной скорости удара

ки разрезного стержня Гопкинсона в варианте «испытание на сдвиг» при скорости деформирования  $\approx 100$  1/с [12]. Метод заключается в динамическом выдавливании материала пластинки из исследуемого материала при помощи цилиндрического пуансона. Толщина образцов для испытаний 2 мм, диаметр 20 мм. Диаметры пуансона и отверстия в матрице, выполненных из закаленной стали, в реализованном варианте равнялись 8 и 9 мм соответственно. Результаты измерений  $\tau_s$  для исследуемых материалов приведены в таблице при скорости деформирования  $40 \div 100$  1/с.

На рис. 3 объединены результаты измерения максимальной глубины кратеров на задней стенке и сдвиговой прочности материалов первого экрана. Видно, что защитное действие экранов из различных материалов коррелирует со сдвиговой прочностью материала: чем меньше прочность материала экрана, тем хуже его защитное действие. Этот вывод справедлив для относительно малых значений  $\tau_s$  ( $< 100$  МПа). Если предположить, что наиболее глубокие кратеры обусловлены ударом фрагментов частицы, то вывод о влиянии прочности первого экрана на степень диспергирования компактной частицы, ударяющей со скоростью более 5 км/с по тонкой пластинке, противоречит существующим представлениям. Возможно, наблюдаемая корреляция является следствием ряда не учтенных при анализе факторов.

4. *Удар по экранам из порошка.* Для проверки отмеченной выше корреляции защитного действия экранов со сдвиговой прочностью его материала были выполнены эксперименты с материалом экрана с нулевой прочностью.

Основная идея этих опытов — убрать поражение задней стенки, связанное с фрагментами экрана. С этой целью в качестве экрана использовался тонкий слой смеси порошков металлов или керамики, который был расположен на листе бумаги толщиной 0,01 мм. В этих опытах при тех же скоростях удара два параметра, определяющих характер разрушения ударяющей частицы: давление соударения  $p_s$  и толщину экрана  $t_s/d_p$ , — мы постарались сохранить неизменными.

Для получения необходимых значений  $p_s$  использовали смеси 1) порошков свинца и меди с плотностью  $\rho = 3,8$  г/см<sup>3</sup> (характерный размер частиц  $10 \div 20$  мкм, массовая концентрация второго компонента  $\mu = 40\%$ , пористость  $\Pi = 63\%$ ) и 2) порошков свинца и корунда ( $\mu = 43\%$ ,  $\rho = 3,5$  г/см<sup>3</sup>,  $\Pi = 43\%$ ). Толщина слоя 1 мм, удельная масса экрана в 1,2–1,3 раза превышала таковую в предыдущих опытах. Оценка давления соударения по той же методике дает значения  $100 \div 104$  и  $168 \div 172$  ГПа при  $v_p = 5,5$  и  $7,5$  км/с соответственно, что близко к давлению соударения стальной частицы с экраном из дюралюминия. Очевидно, что сдвиговая прочность таких материалов равна нулю.

На рис. 4 приведены картины поражения задней стенки. Наблюдается значительное уменьшение числа кратеров до 50–60 на пластине-свидетеле против 250–300 при ударе по экрану из дюралюминия, в 4–10 раз уменьшается общая площадь вторичных кратеров. Резкое изменение характера поражения на задней стенке связано с отсутствием достаточно крупных фрагментов материала экрана. Размер отдельных частиц, составляющих тело экрана, мал, и не может объяснить появление достаточно глубоких кратеров с  $P_c \approx 0,5 \div 0,8$  мм. Поэтому практически все наблюдаемые кратеры образованы осколками стальной частицы. Глубина наибольших кратеров на защищаемой стенке (см. рис. 1, 3) близка к данным для достаточно прочных экранов из дюралюминия или прессованного алюминия. Результаты этих качественных опытов дают, на первый взгляд, однозначное подтверждение существующих представлений, что давление соударения играет определяющую роль при разрушении ударяющей частицы. Интересно отметить, что экраны из порошка выполняют роль своеобразного «проявителя» характера конечного разрушения ударяющей частицы, о котором можно судить по «отпечатку» ее фрагментов на задней стенке.



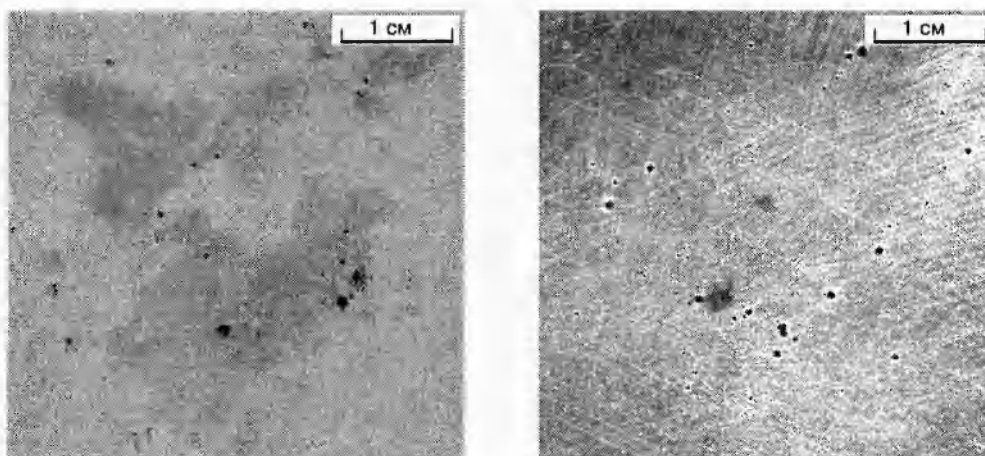


Рис. 4. Вид задней стенки со стороны удара в случае экранов из порошка:  
слева — порошок свинец/медь,  $v_p = 5,5$  км/с; справа — порошок свинец/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $v_p = 7,5$  км/с

Но прочность материала экрана, если она не нулевая и не более 100 МПа, влияет на степень диспергирования материала экрана. Невысокая прочность способствует появлению в спектре запреградного поля осколков достаточно крупных фрагментов материала экрана, которыми и обусловлено снижение защитного действия экранов из рассмотренных выше пресованных дисперсных металлокомпозигов. Безусловно, границы диапазона прочности, в пределах которого наблюдается корреляция защитного действия экранов со сдвиговой прочностью его материала, определены условно и, возможно, зависят от технологии изготовления материала экрана, а также от материала и прочности ударяющей частицы.

5. *Роль удельной массы экрана.* Качественно понятно, что не только толщина экрана, но и его удельная масса влияет на физическое время взаимодействия частицы с экраном. Большая масса способствует увеличению времени взаимодействия, увеличению доли энергии, теряемой ударником при пробивании преграды (как в расчетах [10] при  $v_p = 15$  км/с и изменении массы экрана в 5–6 раз), и, возможно, лучшему диспергированию ударяющей частицы при более низких скоростях. В настоящих опытах удельная масса экрана изменялась не более чем в 1,3 раза. Вероятно, поэтому и не было замечено ее влияние на результаты опытов. Это мнение качественно подтверждается результатами двух экспериментов, в которых при сохранении давления соударения удельная масса экранов из порошка была изменена в два

раза за счет увеличения или уменьшения плотности материала экрана. Это позволило при меньшей скорости удара имитировать удар с более высокой скоростью за счет увеличения давления соударения, обусловленного увеличением ударного импеданса материала экрана, и наоборот.

В первом опыте в качестве экрана использовался одномиллиметровый слой порошка свинца с насыпной плотностью  $6,67$  г/см<sup>3</sup> и удельной массой  $t_s \rho_s = 0,67$  г/см<sup>2</sup>, примерно равной удельной массе ударника. При ударе частицей из стали с  $v_p = 5,5$  км/с согласно расчетной оценке реализуется давление 172 ГПа, что соответствует удару частицей с  $v_p = 7,5$  км/с по рассмотренным выше экранам. Глубина наиболее глубокого кратера на задней стенке ( $P_c/d_p \leq 0,4$ ) не превышала уровня 0,5, характерного для ударов с  $v_p = 7,5$  км/с (см. рис. 1, 3). Во втором опыте частица с  $v_p = 7,5$  км/с ударяла по одномиллиметровому слою порошка из меди насыпной плотности  $1,61$  г/см<sup>3</sup>,  $t_s \rho_s = 0,16$  г/см<sup>2</sup>. Давление соударения достигало значения 105 ГПа, соответствующего удару частицей с  $v_p = 5,5$  км/с по экранам из алюминия с  $t_s \rho_s \approx 0,3$  г/см<sup>2</sup>. Резко возрастала глубина внедрения — до  $P_c/d_p \approx 1$ , что на 25 % выше уровня 0,8, характерного для  $v_p = 5,5$  км/с (см. рис. 1, 3), и диаметр площади поражения на задней стенке уменьшался до 20 мм против  $40 \div 60$  мм в случае экранов с большей плотностью.

Эти результаты однозначно показывают, что наряду с давлением соударения важную

роль в разрушении ударяющей частицы играет не только толщина экрана, но и его удельная масса. Влияние последней проявляется, по видимому, через изменение эффективного времени взаимодействия частицы с экраном и остаточной энергии фрагментов ударника.

### ВЫВОДЫ

Рассмотрено защитное действие тонких экранов из металлокомпозитов на основе матрицы из алюминия с дисперсными включениями из  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (при массовой концентрации 15 и 30 %) при ударе сферической стальной частицы со скоростью 5,5 и 7,5 км/с в схеме одноэкранный защиты Уиппла. Показано, что защитное действие экранов из этих материалов слабее, чем экранов из дюралюминиевого сплава. На основании полученных результатов ясно, что использовать рассмотренные металлокомпозиты (матрица из алюминия плюс дисперсные керамические включения) в качестве первых защитных экранов для построения схем противометеоритной защиты нецелесообразно. Реальной альтернативы первому экрану из однородного сплава алюминия пока нет.

Показано, что при ударе высокоскоростной стальной частицы прочность материала экрана, если она достаточно мала, но не нулевая, может за счет образования крупных фрагментов материала экрана существенно влиять на характер поражения задней стенки, несмотря на высокий уровень реализуемых ударных давлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-01-01951) и Федеральной целевой программы «Государственная поддержка интеграции высшего образования и фундаментальной науке на 1997–2000 годы» (код проекта 274).

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Stilp A. J., Weber K.** Debris clouds behind double-layer targets // Intern. J. Impact Engng. 1997. V. 20, N 6–10. P. 765–778.
2. **Robinson J. H., Nolen A. M.** An investigation of metal matrix composites as shields for hypervelocity orbital debris impact // Intern. J. Impact Engng. 1995. V. 17, N 1–6. P. 685–696.
3. **Сильвестров В. В., Пластинин А. В., Пай В. В., Яковлев И. В.** Морфология кратеров при высокоскоростном ударе по изотропным композитам с включениями // Физика горения и взрыва. 1997. Т. 33, № 3. С. 139–151.
4. **Титов В. М., Фадеенко И. И., Титова Н. С.** Ускорение твердых частиц кумулятивным взрывом // Докл. АН СССР. 1968. Т. 180, № 5. С. 1051–1052.
5. **Мержиевский Л. А., Титов В. М.** Защитные свойства тонкого экрана при высокоскоростном ударе // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1977. № 2. С. 135–139.
6. **Titov V. M., Silvestrov V. V.** Acceleration of solid spherical projectiles by cumulative explosion of tubular charge of high explosive // Report of Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, 1994.
7. **Дремин А. П., Карпухин И. А.** Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1960. № 3. С. 184–188.
8. **Compendium of Shock Wave Data / M. van Thiel (Ed.).** Lawrence Livermore Laboratory, University of California, 1977. V. 1–2.
9. **Thouvenin J.** Effect of a shock wave on a porous solid // Proc. Fourth Symp. (Intern.) on Detonation. 1965. P. 258–265.
10. **Рини Т.** Численное моделирование явлений при высокоскоростном ударе // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. С. 164–219.
11. **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.
12. **Mazeau C., Beylat L., Longère P., and Louvigné P. F.** On the quantitative evaluation of adiabatic shear banding sensitivity of various titanium alloys // J. de Physique IV. 1997. V. 7. P. 429–434.

Поступила в редакцию 1/VII 1998 г.