

ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ УДАР ПО СТЕКЛОТЕКСТОЛИТУ

*В. В. Сильвестров, А. В. Пластинин, Н. Н. Горшков**Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090 Новосибирск*

Приведены результаты исследования высокоскоростного удара стальными и стеклянными частицами по преградам из стеклотекстолита при скорости удара до 11 км/с. Обсуждается ряд особенностей процесса по сравнению с ударом по упругопластическим материалам. Ряд эмпирических зависимостей, установленных ранее для металлов, хорошо описывает результаты для композита.

Применение композитных материалов в космических конструкциях постоянно расширяется. На орбите элементы из этих материалов могут быть подвергнуты удару твердых частиц, движущихся с космическими скоростями, — естественных метеоритов или частиц космического мусора. Поэтому реально возникает необходимость исследования высокоскоростного удара по композитным материалам [1]. В отечественной литературе эта задача практически не рассматривалась [2]. Разрушение конструкций из композитов при высокоскоростном ударе исследовалось, в основном, в режиме сквозного пробоя при ударе частицами из алюминия и нейлона (панели [3] и трубы из углепластика [4]; защитные свойства экрана из кевлара и углепластика [5]). Показано, что при высокоскоростном ударе на поверхности материалов возникают дополнительные области разрушения, обусловленные слоистой структурой композитов. Получены эмпирические формулы, связывающие размеры областей разрушения с энергией ударника и параметрами мишеней. Некоторые результаты для преград конечной толщины из стеклотекстолита приведены в [6].

Удар же по полубесконечным мишеням и зависимость размеров кратера в них от скорости и материала ударника не исследовались. Но, судя по опыту изучения высокоскоростного удара по упругопластическим материалам, результаты для полубесконечных преград, когда явление не осложнено влиянием волн разгрузки со стороны тыльной поверхности мишени и значительная часть энергии ударника поглощается в мишени, являются основой для понимания механики взаимодействия и построения моделей формирования кратера.

Постановка эксперимента

Материал преграды. Плоские мишени вырезались из электротехнического стеклотекстолита марок СТЭФ и СТ-1 с одинаковой структурой армирования (основа — жгутовая стеклоткань полотняного переплетения до 50 % по объему), различающихся толщиной стеклоткани и материалом матрицы: эпоксидная смола для СТЭФ и фенолформальдегидная смола резольного типа для СТ-1. За счет другого типа смолы и более тонкой армирующей ткани СТ-1 имеет в 2–3 раза меньшие прочностные характеристики, чем СТЭФ. Рассматриваемые текстолиты — это слоистые материалы с толщиной отдельных слоев $\approx 0,1 \div 0,3$ мм. Плотность композитов $\rho_0 = 1,71$ и $1,85$ г/см³, твердость по Бринеллю $H_B = 360$ и 630 МПа для СТ-1 и СТЭФ соответственно. Размеры мишеней — 10×10 см², толщина

от 10 до 30 мм. При этой толщине никаких нарушений сплошности материала на тыльной поверхности мишеней и вблизи нее не наблюдается.

Высокоскоростные частицы. Стальные ($\rho = 7,8 \text{ г/см}^3$, конечный диаметр $d = 0,53 \div 4,5 \text{ мм}$) и стеклянные (оптическое стекло, $\rho = 2,7 \text{ г/см}^3$, $d = 1,3 \div 2,3 \text{ мм}$) шарики ускорялись до скорости $v = 1 \div 11 \text{ км/с}$ для стали и $1,3 \div 7,8 \text{ км/с}$ для стекла при помощи трубчатого взрывного ускорителя [7]. Основное количество результатов получено при $d \approx 0,5 \div 2 \text{ мм}$, более крупные стальные частицы использовались при исследовании масштабного эффекта. Рассматривался удар по нормали к слоям армирующей стеклоткани.

Ввиду ряда особенностей результатов высокоскоростного удара по слоистому стеклотекстолиту (удлиненные каверны и уменьшение скорости роста глубины кратера при $v = 10 \div 11 \text{ км/с}$) кратко остановимся на состоянии метаемых частиц после ускорения. Строго говоря, форма и состояние частиц после ускорения при максимальных скоростях неизвестны. Импульсное рентгенографирование при $d \geq 1 \text{ мм}$ и $v \leq 8 \text{ км/с}$ показывает, что как стеклянные, так и стальные частицы имеют компактную, близкую к сферической форму. При более высокой скорости метания и $d < 1 \text{ мм}$ о форме частиц приходится судить по косвенным признакам.

Во-первых, по форме кратера в толстой преграде с плотностью, близкой к плотности ударника, например, для пар сталь/мягкая сталь или стекло/мягкий алюминий. Если бы формфактор ударника — отношение его длины к диаметру L/d — существенно отличался от единицы, то наблюдались бы уплощенные при $L/d \ll 1$ или удлиненные при $L/d \gg 1$ каверны.

Во-вторых, если бы форма частиц существенно отличалась от сферической или частица не была бы твердым телом, результаты измерения размеров кратеров (объем, диаметр, глубина) заметно отличались бы от данных, получаемых для сферических ударников, разгоняемых при помощи легкогазовых пушек. Однако качественное и количественное сравнение результатов, получаемых двумя указанными методами, показывает, что они хорошо соответствуют друг другу [2]: никаких особенностей ни по форме кратеров, ни по их размерам не наблюдается при $v < 11 \text{ км/с}$. Исходя из сказанного выше, можно уверенно утверждать, что во всем диапазоне скоростей метания при помощи взрывного трубчатого ускорителя формфактор частиц близок к единице, а частица является твердым телом.

Качественное описание повреждений стеклотекстолита

Поверхностные повреждения. При ударе высокоскоростной частицы по слоистому композитному материалу кроме собственно каверны, зоны сплошного выброса материала мишени, отмечаются дополнительные визуально регистрируемые зоны повреждений, обусловленные расслоением и отрывом части материала мишени со стороны удара за счет действия сдвиговых напряжений, а также малыми сдвиговой прочностью и сопротивлением на отрыв для отдельных слоев. Однако размер области расслоения зависит от структуры армирования материала и ориентации элементов слоя относительно направления удара. Для материалов с однонаправленной укладкой в отдельных слоях направление расслоения совпадает с ориентацией армирующих волокон в поверхностном слое [3]. В случае армирования плоской двунаправленной стеклотканью реализуется иная картина повреждений.

На рис. 1,а приведена фотография поверхности мишени из СТЭФ при ударе стальной частицей ($d = 0,68 \text{ мм}$, $v = 11,2 \text{ км/с}$). Кроме каверны с входным отверстием, имеющим в плане форму креста или криволиней-

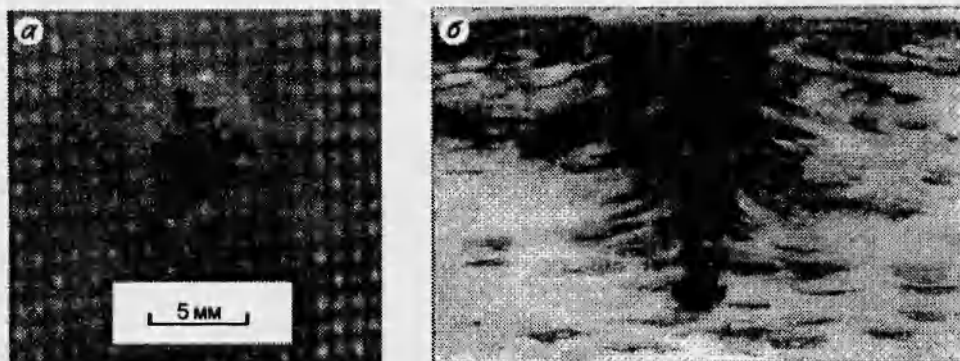


Рис. 1. Удар стальной частицей по стеклотекстолиту СТЭФ:

а — мишень со стороны удара; б — разрез кратера.

ного ромба, на поверхности наблюдаются еще две области разрушений. Первая — зона откола с поперечным размером $\sim (4 \div 6)d$ и толщиной в 1–2 слоя материала (аналог области «венчика» для металлических преград); вторая — примерно эллиптическая зона внутренних повреждений, проявляющаяся как область побеления («белок»). Направление осей эллипса совпадает с направлениями основы и утка армирующей ткани, а относительные размеры его осей коррелируют с коэффициентом армирования по основе и утку стеклоткани. В данном случае площадь этой зоны $S_w \approx 140 \text{ мм}^2$, что в 45 раз превышает площадь входного сечения собственно каверны ($\sim 3 \text{ мм}^2$) при площади минимального сечения ударяющей частицы $\sim 0,5 \text{ мм}^2$. Для сравнения при ударе по дюралюминию Д16 при этих же условиях площадь кратера составляет $\sim 23 \text{ мм}^2$, т. е. максимальный размер площади повреждения материала композита в 6 раз больше. В случае стеклянных частиц общая картина фронтальных повреждений аналогична рассмотренной для стальных частиц, но при меньших размерах всех зон повреждений.

При изменении кинетической энергии ударника E от 20 до 5230 Дж

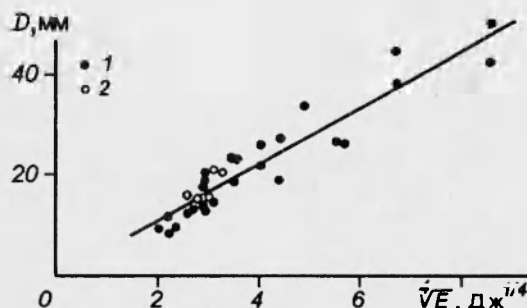


Рис. 2. Зависимость эквивалентного диаметра «белка» от энергии ударника:

1 — стальные; 2 — стеклянные частицы.

площадь «белка» для СТЭФ изменяется от $\sim 0,5$ до 18 см^2 . Размер «белка» для стальных и стеклянных частиц по результатам 36 опытов с коэффициентом корреляции 0,9 удается обобщить зависимостью $D_{eq} = (5,6 \pm 0,5) \sqrt[4]{E}$, где $D_{eq} [\text{мм}]$ — эквивалентный диаметр, $D_{eq} = \sqrt{4S_w/\pi}$ (рис. 2). Для углепластиков с однонаправленной укладкой волокон в отдельных слоях при сквозном пробое наблюдается более сильная зависимость

диаметра зоны поверхностных разрушений от энергии удара: $D_{eq} \sim \sqrt[3]{E}$ [4], что, безусловно, связано с различием в структуре армирования и с условиями постановки экспериментов: для преград конечной толщины основной вклад в D_{eq} дает нижний «белок» со стороны тыльной поверхности мишени [6], который отсутствует для полубесконечной преграды.

Форма кратера. На рис. 1,б приведен поперечный разрез кратера при тех же условиях соударения, что на рис. 1,а, а на рис. 3 дается схематическое изображение каверны и зон нарушения сплошности материала вокруг нее с определением измеряемых величин. Отметим наличие в центре кратера цилиндрической полости, каверны, зоны полного разрушения мишени с выбросом материала. Если для упругопластической преграды форма каверны близка к полусферической с характерным отношением глубины к диаметру $p/D \approx 0,5$, то в стеклопластике образуются узкие, удлиненные каверны ($p/D \sim 2 \div 4$ для более прочного СТЭФ). Внутренняя поверхность кратера неровная, что обусловлено высыпанием части материала матрицы и множественными разрывами стеклянных волокон и расслоениями прядей при разгрузке. Однако глубина каверн, измеряемая от уровня начальной поверхности мишени (см. рис. 3), определяется с точностью $\sim 0,1 d$.

Диаметр кратера D (в данном случае диаметр каверны) измерить с достаточной точностью не удастся ввиду неопределенности его границ. Как и при сквозном пробитии [6], $D \sim (1,5 \div 2) d$. Характерные размеры каверн существенно зависят от материала ударника: при ударе стальными частицами $D/d \approx 1 \div 2,5$ ($p/d = 3 \div 6$) при $v = 3 \div 11$ км/с; при ударе стеклянными частицами входной диаметр каверны $D/d \approx 2 \div 4$ ($p/d = 0,8 \div 2,5$) при $v = 1 \div 8$ км/с. Для стеклотекстолита при любой скорости удара (в диапазоне до 11 км/с) для стальной частицы сохраняется удлиненная форма кратера, что указывает на относительную компактность материала ударника в течение всего процесса внедрения и слабое радиальное течение материала мишени.

На разрезах (см. рис. 3) кроме каверны 1 наблюдаются еще две зоны разрушения: одна вблизи контура каверны; материал матрицы в зоне 2 пронизан сетью трещин и частично разрушен. Ее диаметр D_2 в 3–4 раза превышает диаметр каверны D , а контур близок к форме кратера в пластической преграде, что отражает квазисферическую симметрию ударно-волнового течения. Появление этой зоны обусловлено диссипацией энергии внедряющегося ударника в материале мишени вблизи поверхности каверны вплоть до его полного срабатывания или остановки. При ударе по менее прочному стеклотекстолиту СТ-1 каверна 1 занимает практически весь объем зоны 2 (см. рис. 3 и 4,а), и образуются каверны с большими значениями диаметра и глубины.

Зона 3 по плоскости мишени ограничена контуром «белка» и связана с воздействием на материал мишени расходящейся от точки удара волны сжатия и конической волны разгрузки со стороны свободной фронтальной поверхности мишени. Здесь материал в целом сохраняет сплошность, но вблизи поверхности наблюдаются «побеления» и отдельные мелкие трещины, указывающие на частичное нарушение сплошности материала матрицы. По-видимому, эта зона — аналог области распространения деформации вокруг кратера в медных мишенях [8]. В случае композитов, особенно с непрозрачными волокнами, для количественного определения размеров зон частичного нарушения структуры материала необходимы иные методы исследования, например методы ультразвукового сканирования структуры [3–5].

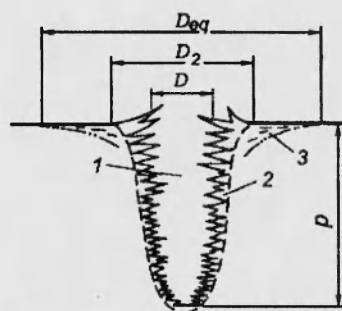


Рис. 3. Схема кратера.

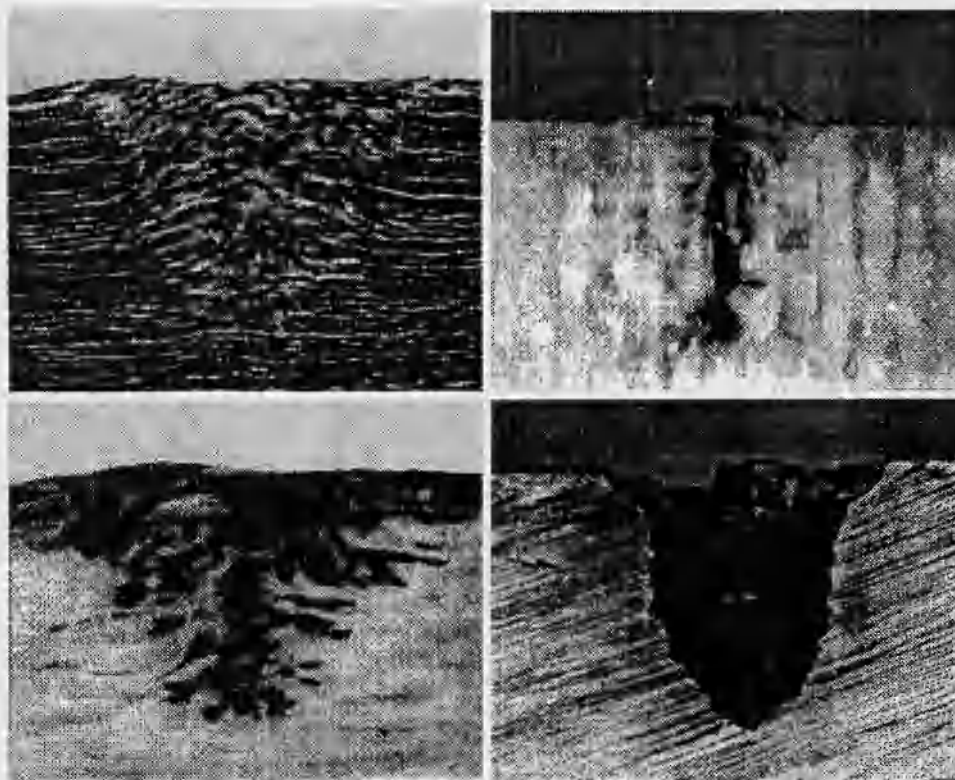


Рис. 4. Разрезы кратеров при различных условиях удара.

Диаметр (мм) и скорость ударника (км/с): а, б — 1,1 и 4,8, в — 1,3 и 7,8, г — 0,68 и 11,2; материал ударника: а, б, г — сталь, в — стекло; материал мишени: а — СТ-1, б, в — СТЭФ, г — ЭД-20.

Отдельные слои ниже дна каверны практически не деформированы, что указывает на отсутствие стадии пластического послетечения, характерной для металлических преград и дающей основной вклад в окончательные размеры каверн. Движение материала мишени останавливается сразу же после срабатывания или остановки материала ударника.

Удар вдоль слоев армирующей ткани. С целью определения влияния взаимной ориентации направлений удара и армирования выполнены эксперименты по удару стальной частицей ($d = 1,1$ мм, $v = 4,8$ км/с) по торцу мишеней из СТЭФ, т. е. вдоль слоев армирующей стеклоткани. При этом резко изменяется характер разрушения материала преграды (рис. 4,б): 1) практически полностью отсутствует область побеления на фронтальной поверхности; 2) глубина проникновения p/d увеличивается на ~ 1 калибр по сравнению с $p/d = 3,4 \pm 0,2$ при ударе по нормали, $D \approx d$; 3) зоны 2 и 3 нарушения сплошности материала, о которых шла речь выше, выражены очень слабо. Эти особенности связаны с тем, что при ударе вдоль направления укладки слоев армирующей ткани последствие растягивающих напряжений, возникающих из-за разгрузки со стороны фронтальной поверхности мишени и свободной поверхности каверны, ограничивается высокой прочностью стеклянных волокон и большой деформативностью материала матрицы, переходящего в вязкотекучее состояние при высокой скорости деформирования. Радиальное течение вблизи стенок каверны сдерживается в большей степени, чем при ударе по нормали, и как бы ограничивается на поперечном размере пучков армирующих волокон, расположенных параллельно направлению удара.

Удар стеклом. Кроме естественного уменьшения относительной глубины внедрения, отметим особенности морфологии кратеров (рис. 4, в) при ударе стеклянными частицами: 1) профиль зоны 2 вокруг каверны в большей степени близок к полусфере; 2) входной диаметр относительно больше, $D/d \approx 2 \div 4$ при $v = 1,3 \div 7,8$ км/с. Без сомнения, это связано с интенсивным разрушением стеклянного ударника уже на начальной стадии внедрения. Частица из стекла разрушается уже при самых низких скоростях $v \approx 1$ км/с. В результате глубина каверны существенно меньше: $p/D \approx 0,7 \div 2,5$. Никаких особенностей в изменении формы каверны и в зависимости ее глубины от скорости удара в диапазоне $v = 1 \div 8$ км/с не отмечается.

Захват стальных частиц. В случае низкой скорости удара (до ~ 2 км/с) стальная частица практически не деформируется и застревает, улавливается в преграде. С увеличением скорости удара глубина кратера растет существенно быстрее, чем при $v > 3$ км/с, как и для металлических преград [9]. Каверна имеет характерную удлиненную грушевидную форму, профиль нижней части которой обусловлен захваченной частицей. Далее с увеличением скорости до ~ 3 км/с стальной ударник начинает деформироваться, но вплоть до 5,5 км/с в отдельных опытах в каверне остается до 30–35 % исходной массы частицы. При ударе вдоль слоев армирующей ткани при $v \leq 5,5$ км/с всегда наблюдается частичный захват, и часть частицы в виде серповидного фрагмента остается на дне каверны.

Количественные зависимости

Удельная энергия кратерообразования. Определялся дефект массы мишени Δm , характеризующий часть энергии ударника (стального и стеклянного), расходуемую на разрушение материала мишени. Как и для металлов [8], результаты описываются линейной зависимостью $\Delta m/m_0 \sim kv^2$ (рис. 5) с $k = 0,53$ для СТЭФ и 1,7 для СТ-1 в диапазоне $v = 1 \div 11$ км/с (m_0 — масса ударника). Предположим, что объем разрушенного материала $V \sim \Delta m/\rho_0$, тогда удельную энергию кратерообразования E/V , характеризующую количество энергии, необходимое для сплошного разрушения единицы объема мишени с выбросом материала, можно оценить как $E/V \sim \rho_0/(2k)$: для СТЭФ и СТ-1 $E/V = 1,7$ и $0,5$ кДж/см³ соответственно. В случае удара в торец при полном отсутствии откольных явлений с фронтальной поверхности и твердости материала в этом направлении $H_B = 560$ МПа для СТЭФ имеем $E/V = 1,4$ кДж/см³. Для дюралюминиевых сплавов Al-2024 и Al-1100F, аналогичных отечественным Д16Т и АД-1М, $E/V \approx 2,1$ и $0,4 \div 0,8$ кДж/см³ соответственно [8].

Для широкого класса металлических преград зависимость E/V от H_B описывается универсальной зависимостью Фельдмана [8]: $E/V = 2,6 \cdot 10^{-2} H_B$, где H_B — в 10^7 Па. Данные для стеклотекстолитов находятся в удивительно хорошем согласии с этой зависимостью, что, возможно, отражает единство механизма поглощения энергии ударника в материале мишени при высокоскоростном ударе независимо от его структу-

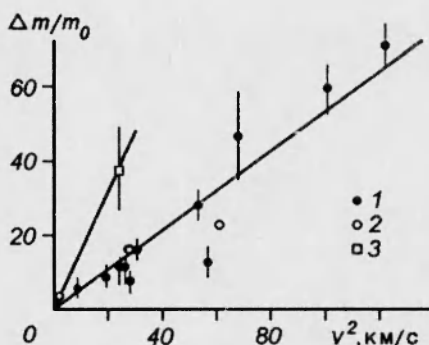


Рис. 5. Дефект массы мишени из стеклотекстолита.

1, 2 — СТЭФ; 3 — СТ-1; частицы: 1, 3 — сталь, 2 — стекло.

ры и свойств. Этот факт весьма интересен, так как морфология образующихся каверн значительно различается для металлов и рассматриваемых композитов.

Масштабный эффект. На рис. 6 приведены значения p/d для преград из СТЭФ при изменении диаметра стальной частицы от 4,5 до 0,9 мм при постоянной скорости удара. При уменьшении размера частицы наблюдается снижение глубины каверны на ~ 1 калибр. Обработка результатов измерений методом наименьших квадратов дает зависимость $p/d = 3,5 d^{0,13}$ (d — в мм). Значение показателя степени — промежуточное среди найденных ранее для других материалов (от 0,056 для пластичных дюралюминиевых сплавов до 0,2 для хрупких горных пород и стекол [1]).

Обычно масштабный эффект связывается с зависимостью прочности

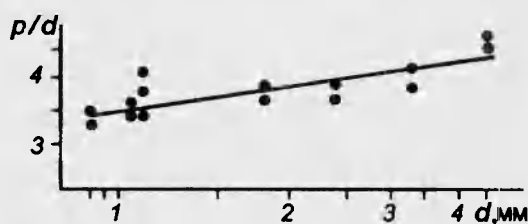


Рис. 6. Зависимость глубины внедрения от диаметра стального ударника для мишеней из СТЭФ при скорости удара $5 \div 5,5$ км/с.

материала мишени от скорости деформирования и с плавлением [1, 2]. С этой точки зрения стеклопластик с эпоксидной матрицей — хороший кандидат на наличие масштабного эффекта: во-первых, из-за значительной зависимости предела прочности на сжатие от скорости деформирования [10] и, во-вторых, ввиду невысокой температуры плавления материала матрицы. Но

нельзя исключать и влияния структурной макронеоднородности материала по плотности, так как в опытах размер ударника близок к характерным размерам структурных элементов композитной мишени: толщине слоя ткани ($\sim 0,3$ мм), ширине отдельных прядей и шагу между ними ($\sim 0,5$ –1 мм).

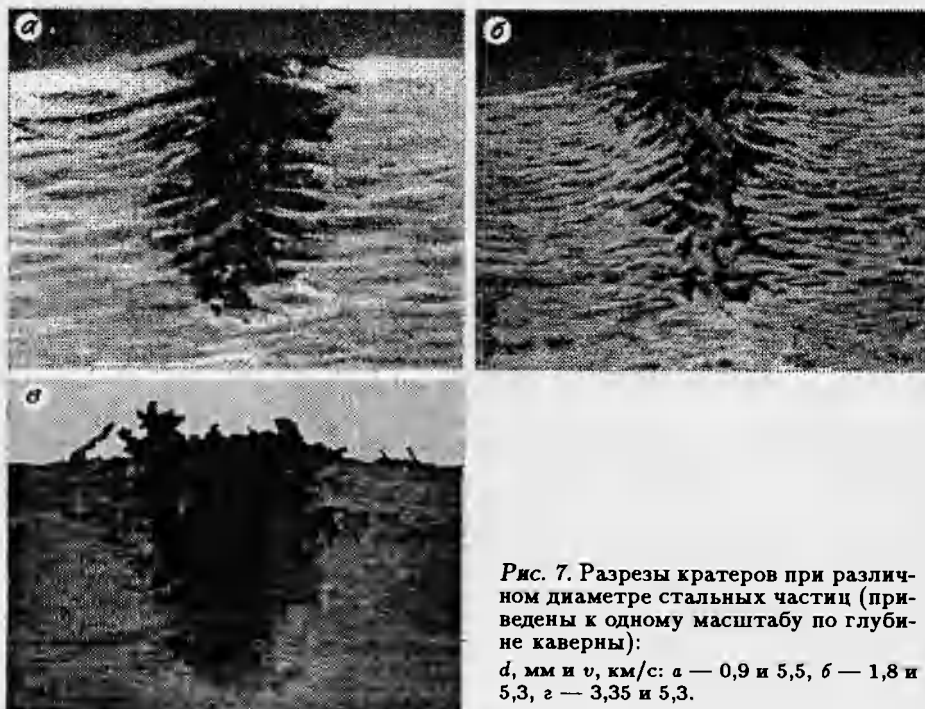


Рис. 7. Разрезы кратеров при различном диаметре стальных частиц (приведены к одному масштабу по глубине каверны):
 d , мм и v , км/с: а — 0,9 и 5,5, б — 1,8 и 5,3, в — 3,35 и 5,3.

На рис. 7 приведены фотографии разрезов кратеров для стальных частиц (относительная глубина каверн соответствует данным рис. 6). При росте размера частицы относительный размер зоны разрушения вдоль направлений армирования увеличивается при сохранении четко выраженной центральной почти цилиндрической каверны и удлиненной формы кратера. Материал мишени практически разрушается в пределах зоны 2 (см. рис. 3), но из кратера полностью не выносятся.

Зависимость глубины кратера от скорости удара. Результаты экспериментов для стальных ($d = 0,53 \div 4,5$ мм) и стеклянных частиц ($d = 1,3 \div 2,3$ мм) представлены на рис. 8, а, б соответственно. Данные для материала матрицы (эпоксидной смолы ЭД-20 с $\rho = 1,18$ г/см³) являются своеобразным верхним пределом для результатов по эпоксидным композициям. Следует отметить довольно большой разброс точек, что типично для всех результатов механических тестов для композитов и связано со случайно неоднородными механическими свойствами мишеней, вырезаемых даже из одного листа стеклотекстолита, и статистическим характером разрушения армирующих элементов. Несмотря на разброс, ряд зависимостей вполне определенно просматривается. При анализе результаты для стальных частиц при $v < 4$ км/с не учитывались, так как в этом диапазоне скоростей, как и для металлов, проявляются эффекты, сопровождающие внедрение прочного, практически недеформируемого плотного ударника в мишень с низким ударным импедансом, нарушающие монотонное нарастание глубины внедрения с ростом скорости [9].

Формальное представление результатов зависимостью $p/d \sim v^\alpha$ без коррекции на масштабный эффект приводит к значениям $\alpha = 0,54$ и $0,59$ для СТЭФ и ЭД-20 соответственно, а с коррекцией $\alpha = 0,73$ и $0,77$ средняя величина $\langle \alpha \rangle = 0,63 \div 0,68$. На этом основании для описания зависимости p/d от v для стальных и стеклянных частиц выбрана известная формула Чартерса — Саммерса с $\alpha = 0,67$ [11]:

$$p/d = 1,5(\rho/\rho_0)^{1/3}(\rho v^2/(2S_t))^{1/3}. \quad (1)$$

Здесь S_t — характеристика материала мишени — динамическое прочностное сопротивление материала внедрению ударника, которое должно определяться в независимой серии экспериментов. Эта полуэмпирическая зависимость интересна тем, что позволяет учесть влияние и прочности преграды, и плотности ударника. Прямые 1', 2' на рис. 8, а получены при $v > 3$ км/с методом наименьших квадратов с использованием формулы (1) для пар сталь/СТЭФ и сталь/ЭД-20 соответственно. Уравнение (1) хорошо описывает все экспериментальные данные.

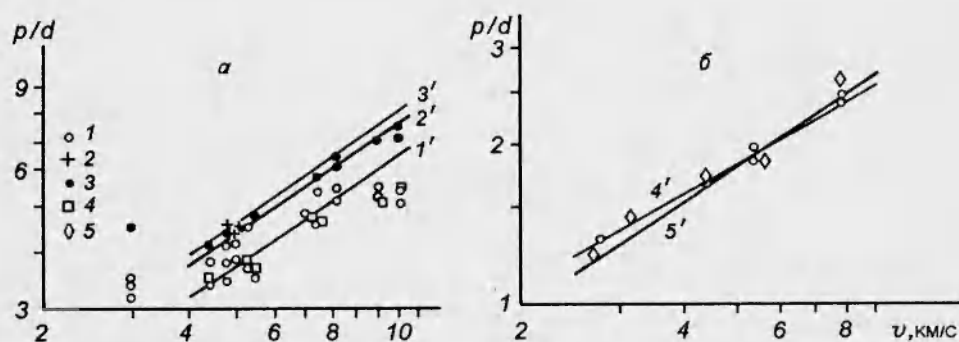


Рис. 8. Глубина внедрения стального (а) и стеклянного (б) ударника.

Материал мишени: 1 — СТЭФ, 2 — СТ-1, 3 — ЭД-20, 4 — Д16Т [12], 5 — Д16АТ [13].
 p/d : 1' — $1,26v^{2/3}$, 2' — $1,48v^{2/3}$, 3' — $1,56v^{2/3}$, 4' — $0,74v^{0,57}$, 5' — $0,62v^{2/3}$.

Для СТЭФ и ЭД-20 $S_t = 28$ и 27 ГПа соответственно. Отсюда следует, что увеличение глубины каверны в смоле по сравнению со СТЭФ связано, прежде всего, с ее меньшей плотностью. Качественно понятно, что величина S_t связана со сдвиговой прочностью материала мишени, так как материал в области каверны разрушается в основном за счет действия сдвигового течения. По-видимому, величины сдвиговой прочности, определяющие при кратерообразовании уровень разрушающих напряжений, близки для обоих материалов: для композита — это межслойная прочность на отрыв и сдвиг, близкие к сдвиговой прочности материала матрицы. Никакого отношения к величине динамического сопротивления S_t высокая прочность материала мишени в направлении армирования не имеет.

С этой точки зрения представляют интерес результаты по удару для материалов с пространственной структурой армирования, так как у них сдвиговая прочность в статических условиях существенно выше аналогичной величины материала матрицы. Однако специфика высокоскоростного удара (наличие интенсивной расходящейся ударной волны, убегающей перед внедряющимся ударником) может нивелировать эффект армирования вообще. Это обусловлено тем, что за фронтом опережающей волны существуют сдвиговые напряжения и соответствующее течение материала, которые могут приводить к разрушению отдельных элементов армирующего каркаса за счет действия напряжений поперек волокон. Возможно, происходит своеобразное ударно-волновое дробление арматуры композита при любом способе армирования. А тогда армирующие элементы выполняют только роль наполнителя, увеличивая среднюю плотность материала. Эффективное в условиях высокоскоростного удара сопротивление материала внедрению определяется в основном прочностными характеристиками материала матрицы.

Влияние прочности связующего. При использовании в качестве связующего менее прочного материала, например фенолформальдегидной смолы вместо эпоксидной, следует ожидать увеличения глубины каверны при прочих равных условиях, что и наблюдается для СТ-1.

Предположим, что при замене одного материала матрицы в стеклотекстолите другим константу S_t можно оценить, полагая, что она пропорциональна твердости композита по Бринеллю H_B (статической обобщенной прочностной характеристике материала мишени). Основанием для этого является отмеченная выше корреляция эффективности кратерообразования с H_B . Тогда оценка S_t для СТ-1 дает: $S_t^{СТ-1} \sim (H_B^{СТ-1}/H_B^{СТЭФ}) \cdot S_t^{СТЭФ} = 16$ ГПа. Уменьшение S_t для СТ-1 связано с меньшей прочностью материала матрицы. Линия 3' на рис. 8,а — результат оценки p/d с этим значением S_t при ударе стальной частицей, согласие с экспериментальными точками для СТ-1 вполне удовлетворительное.

Влияние плотности ударника. Согласно (1), $p/d \sim (\rho v)^{2/3}$. Прямая 4' на рис. 8,б — наилучшее приближение результатов зависимостью $p/d \sim v^\alpha$ с $\alpha = 0,57$, а 5' — предсказание результатов удара по мишеням из СТЭФ ударников из стекла ($\rho = 2,7$ г/см³) при найденном S_t . Согласие расчета по формуле (1) с экспериментом хорошее.

Таким образом, формула Чартерса — Саммерса позволяет достаточно хорошо для стеклотекстолита описать влияние скорости ударника, его плотности и прочности мишени, в качестве которой используется величина, пропорциональная твердости материала мишени.

На рис. 8 приведены аналогичные данные для удара стальными и стеклянными частицами по преградам из дюралюминия [12, 13]. Видно, что у более прочного СТЭФ глубина кратера близка к результатам для алюми-

ниевых преград, несмотря на разницу в плотностях материалов мишени и существенно иную форму каверн.

Аномальное поведение при максимальных скоростях удара.

При увеличении скорости стальной частицы до 10–11 км/с ($d = 0,68$ мм) глубина каверн уменьшается примерно на 1 калибр по отношению к экстраполированному значению из области более низких скоростей (см. рис. 8,а). Эту разницу полностью объяснить влиянием масштабного эффекта не удастся, если, конечно, не предполагать, что значение масштабного фактора существенно увеличивается при этой скорости удара. Дополнительно наблюдаются следующие особенности в этом диапазоне: более сильное почернение «белков» со стороны удара (см. рис. 1,а), появляется четко выраженный конический вход у каверны, что указывает на более интенсивный выброс материала мишени (см. рис. 1,б). В соответствии с оценкой, удельная энергия за фронтом УВ достигает $\sim 20 \div 25$ кДж/г (ударное давление $\sim 1,5 \div 2$ Мбар), что в ~ 5 –8 раз превышает оценку энергии испарения материала матрицы. Возможно, реализуются условия для полного испарения материала матрицы при разгрузке. Испарение сопровождается газодинамическим истечением материала из каверны в направлении, противоположном удару, и ударник дополнительно тормозится, а глубина каверны уменьшается. Входной диаметр каверны увеличивается до $\sim 2,5 d$, глубина кратера относительно уменьшается ($p/D \approx 2$), а материал матрицы разлагается с выделением углерода в виде сажи, оседающей в объеме верхнего белка.

Аналогичный эффект не отмечался в мишенях из физически однородного материала (эпоксидной смолы), каверна сохраняет форму цилиндра с $p/d \sim 7 \div 7,5$ и $p/D \approx 2$ (см. рис. 4,з), хотя преимущественное отклонение точек при $v = 10 \div 11$ км/с вниз от аппроксимирующей прямой заметно (см. рис. 8). Разницей в ударных давлениях в смоле и стеклотекстолите вряд ли можно объяснить наблюдаемое поведение результатов для СТЭФ.

Возможно, причина связана с различным содержанием углерода в единице объема (или массы) материала мишени: в стеклотекстолите его в 3–4 раза меньше, чем в эпоксидной смоле. При высоких ударных давлениях физическое состояние материала мишени, его теплофизические характеристики и газодинамическое поведение при разгрузке могут определяться фазами высокого давления углерода и температурой ударного сжатия отдельных компонентов композита. Что такое энергия сублимации на единицу массы для физически и химически неоднородного материала мишени в этих условиях, какова температура более сжимаемого компонента — смолы, не известно.

Предельная толщина для стеклотекстолита СТЭФ

На рис. 9 приведены новые данные, дополняющие зависимость предельной толщины δ от скорости удара для стальных и стеклянных частиц [6]. При ударе частицами из стекла предельная толщина уменьшается примерно в 2 раза сравнительно с ударом стальными частицами. На рис. 9 также приведены аналогичные данные для мишеней из дюралюминиевых сплавов [12, 13]. Для стеклотекстолита значения δ/d при ударе стальными частицами больше, чем для дюралюминия, и эта разница увеличивается по мере роста скорости частиц. При ударе частицами из стекла величина δ/p примерно та же; $\delta/p \sim 1,5$ для СТЭФ, как и в случае дюралюминиевых преград, когда роль откольных явлений мала [12].

Данные приближены уравнением $\delta/d \sim K_t \rho^\beta v^\alpha$, где ρ выражено в г/см³, v — в км/с и K_t — константа для материала мишени. Формула Фиша — Саммерса [1] с $\alpha = 0,875$ плохо обобщает результаты для

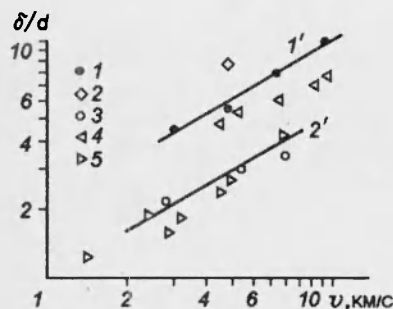


Рис. 9. Зависимость предельной толщины от скорости удара.

1 — сталь/СТЭФ; 2 — сталь/СТ-1; 3 — стекло/СТЭФ; 4 — сталь/Д16 [12]; 5 — стекло/Д16АТ [13]; 1', 2' — $\delta/d = 0,8(\rho v)^{2/3}$.

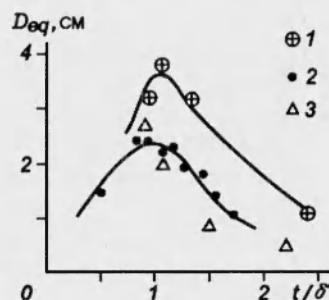


Рис. 10. Эквивалентный диаметр «белка» в зависимости от относительной толщины мишени t/δ при различной энергии удара.

Ударник: 1 — сталь, $v = 3$ км/с, $E = 138$ Дж, 2 — сталь и стекло, $4,8 \div 7,8$ км/с, $58 \div 65$ Дж, 3 — сталь, $11,2$ км/с, 87 Дж.

СТЭФ по скорости, возможно, за счет иного определения понятия предельной толщины. Лучшие результаты получаются при $\alpha = 2/3$ [12] (см. рис. 9). Описание результатов для стеклянных частиц с тем же значением K_t , но с меньшей плотностью и $\beta = 0,5$ (формула Фиша — Саммерса) или $\beta = 1/3$ [12] также не проходит. Для СТЭФ необходима более сильная зависимость от плотности ударника, $\delta/d \sim \rho^{2/3}$. Прямая 2' на рис. 9 построена при том же значении $K_t = 0,8$, но $\rho = 2,7$ г/см³. Для СТ-1 с менее прочным связующим необходимо увеличение K_t до 1,1.

На рис. 10 приведена зависимость эквивалентного диаметра «белка» от относительной толщины мишени t/δ для различных значений кинетической энергии ударника. Наблюдается немонотонное изменение размера «белка» при росте скорости удара: для пары сталь/СТЭФ размер области побеления уменьшается относительно ожидаемого при $v = 11,2$ км/с (энергия удара 87 Дж). Похоже, что в данном случае меньшая часть энергии ударника расходуется на образование «белка». Объяснение этого факта отсутствует, но он коррелирует с отмеченным выше относительным уменьшением глубины кратера в полубесконечной мишени.

Таким образом, для стеклотекстолита СТЭФ по сравнению с металлами наблюдается более сильная зависимость предельной толщины от плотности ударника. В то же время зависимость δ от скорости удара хорошо описывается законом $2/3$.

Выводы

При высокоскоростном ударе по слоистому стеклотекстолиту структура армирования материала оказывает значительное влияние на размеры и характер дополнительных зон разрушения на поверхности мишени. Площадь последних значительно превышает площадь собственно каверны от удара. Появление этих зон связано со слоистой структурой материала и малой межслойной и сдвиговой прочностью композитов.

Относительная глубина кратера в полубесконечной мишени и предельная толщина для стеклотекстолита полотняного переплетения зависят от скорости и плотности сферического ударника в степени $2/3$.

Ряд эмпирических зависимостей, установленных ранее для металлов: эффективность кратерообразования от твердости мишени по Бринеллю, влияние размера ударника, его плотности и скорости, а также влияние прочности мишени на глубину кратера в полубесконечной мишени — могут использоваться для оценки результатов удара по стеклотекстолиту.

Низкий ударный импеданс и невысокие значения плотности стеклопластиков, их хрупкий характер разрушения и деформирования приводят к образованию удлиненных каверн при ударе стальными и стеклянными частицами. Возможно, что наблюдаемые особенности (удлиненные каверны и уменьшение скорости роста глубины кратера при 10–11 км/с), связаны со своеобразным характером деформирования внедряющегося ударника, происходящего в условиях слабого радиального течения материала преграды. Ударник может сохранять относительную компактность при внедрении в упругохрупкий материал, не «растекаться» в радиальном направлении по стенке образующегося кратера, как в случае упругопластических преград. Но на начальной стадии характер течения материала преграды и его физическое состояние могут сильно зависеть от давления соударения.

Специфическая форма каверн в композитах указывает на отсутствие стадии инерционного послетечения при формировании кратера после срабатывания или остановки ударника, что обусловлено упругохрупким характером деформирования армированных стеклопластиков.

Авторы признательны академику В. М. Титову за поддержку работы и обсуждение ее результатов. Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект 93-013-16499.

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. Мержиевский Л. А., Титов В. М. Высокоскоростной удар // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 92–108.
3. Yew C. H., Kendrick R. B. A study of damage in composite panels produced by hypervelocity impact // Int. J. Impact Eng. 1987. V. 5, N 1–4. P. 729–738.
4. 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.
5. Schonberg W. P. Hypervelocity impact response of spaced composite material structures // Ibid. P. 509–523.
6. Горшков Н. Н., Пластинин А. В., Сильвестров В. В. Сквозное пробивание стеклотекстолита при высокоскоростном ударе // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 4. С. 115–120.
7. Мержиевский Л. А., Титов В. М., Фадеев Ю. И., Швецов Г. А. Высокоскоростное метание твердых тел // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 5. С. 77–82.
8. Эйчельбергер Р., Кайнике Дж. Высокоскоростной удар // Физика быстротекущих процессов. М.: Мир, 1967. Т. 2. С. 204–246.
9. Williams A. E., Persechino M. A. The effect of projectile properties on target cratering // Int. J. Impact Eng. 1987. V. 5, N 1–4. P. 709–728.
10. Пластинин А. В., Сильвестров В. В., Горшков Н. Н. Динамическое сжатие однонаправленного стеклопластика // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т гидродинамики. 1989. Вып. 93, 94. С. 111–118.
11. Геринг Дж. Высокоскоростной удар с инженерной точки зрения // Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1970. С. 468–516.
12. Титов В. М., Фадеев Ю. И. Сквозное пробивание при метеоритном ударе // Космич. исслед. 1972. Т. 10, вып. 4. С. 589–595.
13. Аникиева А. П., Мержиевский Л. А., Титов В. М. Пробивание преград при ударе частиц из стекла, имитирующих каменные метеориты // Журн. прикл. механики и техн. физики. 1977. № 3. С. 131–136.

Поступила в редакцию 24/VI 1994 г.,
в окончательном варианте — 29/XI 1994 г.