

## ЭКРАННАЯ ЗАЩИТА ОТ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО УДАРА ЧАСТИЦ ИЗ СТЕКЛА

А. П. Аникиева, Л. А. Мерзиевский  
(Новосибирск)

Защитные свойства тонкого экрана при ударе металлических частиц, имитирующих метеориты, рассмотрены в [1]. Как показывает изучение метеоритного вещества, основную долю наблюдающихся метеоритов составляют каменные метеориты. Это обстоятельство требует уточнения имеющихся данных и соответствующей корректировки расчетных методик применительно к реально существующим условиям. В лабораторных исследованиях проще всего моделировать удар каменных метеоритов с помощью частиц из стекла. Методика такого моделирования описана в [2], а результаты изучения соударения частиц из стекла с массивными (полубесконечными) и предельно пробиваемыми преградами [3] изложены в [4]. Принципиальных отличий в характере воздействия частиц из стекла на такие преграды по сравнению с воздействием металлических частиц в [4] не наблюдалось. Данный результат вполне понятен, если учесть, что основные величины, составлявшие предмет исследования (глубина каверны в полубесконечной мишени, предельная толщина одиночной преграды), определяются в первом приближении кинетической энергией ударяющей частицы и слабо зависят от прочностных характеристик металла, из которого она изготовлена, и особенностей поведения этого материала под действием интенсивных динамических нагрузок. Иная ситуация будет в случае изучения разрушения частицы при соударении с тонким экраном. В отличие от металлических частиц, частицы из стекла будут разрушаться хрупким образом, причем, как известно, возможно их разрушение в волне сжатия. Эти особенности в поведении материала частицы могут заметно повлиять на конечный результат ее соударения с экранированной мишенью.

В данной работе исследуется воздействие хрупких частиц, имитирующих каменные метеориты, на мишень, защищенную тонкой преградой. В опытах применялись экраны из алюминиевого сплава АД-1М, меди М-1 и нержавеющей стали Х18Н10Т, толщина которых  $\delta$  изменялась от 0,1 до 1 мм. В качестве защищаемой преграды (мишени) во всех случаях использовалась полубесконечная мишень из алюминиевого сплава АМГ-6. Зазор между экраном и мишенью вакуумировался до 1—5 мм рт. ст., что практически полностью исключило абляцию и торможение осколков. Диаметры ускоренных частиц из стекла  $d_0 = 1,3 \div 5,2$  мм, скорости —  $0,8 \div 8$  км/с [3].

Вопрос о выборе количественной характеристики воздействия осколков на мишень обсуждался в [1]. В данной работе такой характеристикой служит глубина наибольшей из образующихся на мишени каверн  $h$ . Переход от  $h$  к предельной толщине преграды при выбранном материале мишени затруднений не представляет.

Известно, что с изменением расстояния между экраном и мишенью  $s$  меняется механизм воздействия осколков на преграду [1]. При относительно малых расстояниях удар по мишени наносится либо деформирующейся частицей, либо компактным облаком осколков, причем в этом случае каверны могут налагаться друг на друга. При увеличении  $s$  вследствие отличий в направлении скоростей осколки расходятся и поражение мишени будет определяться ударом наиболее крупных или быстролетящих осколков. В случае удара стальных частиц смена механизмов воздействия происходит при  $s_1 = s/d_0 \geq 25 \div 30$ . Полученные в этой работе результаты по экспериментальному определению зависимостей  $h_1 = h/d_0$  от  $s_1$  приведены на рис. 1, 2. На рис. 2 для полученных в экспериментах значений величин использованы обозначения

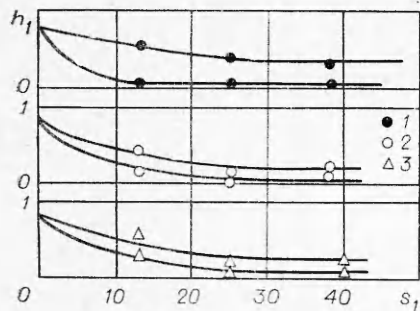


Рис. 1.

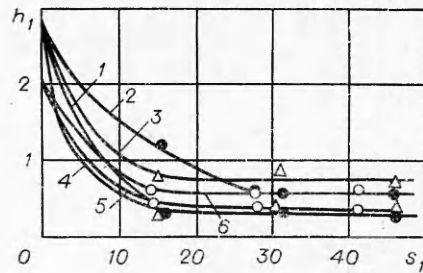


Рис. 2.

рис. 1, где материал экрана: 1 — АД-1М, 2 — медь, 3 — сталь. Кривые на рис. 1 соответствуют скорости удара  $v_0 = 1$  км/с, на рис. 2 кривые 1, 2, 3, 5 получены при  $v_0 = 7,8$  км/с, 4, 6 — при  $v_0 = 5,4$  км/с. Относительные толщины экранов  $\delta_1 = \delta/d_0$  из АД-1М составляют 0,04 и 0,4 (см. рис. 1) и 0,08—0,8 (см. рис. 2, 2, 5); для экранов из меди  $\delta_1 = 0,04$  и 0,32 (см. рис. 1) и  $\delta_1 = 0,08—0,6$  (см. рис. 2, 1, 3); для остальных экранов  $\delta_1 = 0,04$  и 0,32 (см. рис. 1) и  $\delta_1 = 0,08$  и 0,55 (см. рис. 2). Верхние кривые на рис. 1 соответствуют более тонким экранам.

Результаты экспериментов показывают, что смена механизмов воздействия осколков на мишень происходит раньше, чем в случае стальных частиц, уже при  $s_1 \geq 15 \div 20$ . Это объясняется меньшими затратами времени на разрушение частицы и окончательное формирование поля скоростей разлетающихся осколков, поскольку при взаимодействии частицы из стекла с экраном отсутствует стадия пластического деформирования частицы. К тому же напряженное состояние в процессе разрушения частиц из стекла будет иметь совершенно иной характер по сравнению со случаем металлических частиц, что может привести к возрастанию радиальной составляющей скорости осколков. Отметим два обстоятельства, отличающие полученные данные от данных опытов со стальными частицами: 1) при малых скоростях удара экран может практически полностью исключить воздействие частицы на преграду, для стальных частиц в данном диапазоне скоростей этого не наблюдалось; 2) в случае высоких скоростей для тяжелых (стальных, медных) экранов кривые, соответствующие большим значениям  $\delta_1$ , расположены выше кривых, которые отвечают более тонким экранам (см. рис. 2, 4, 6 и 1, 3). Это связано с особенностями поведения зависимости  $h_1$  от толщины экрана и будет обсуждаться ниже.

При фиксированных материалах экрана и частицы и больших расстояниях  $s_1$  поражение мишени будет определяться скоростью удара  $v_0$  и толщиной экрана  $\delta_1$ . Зависимость поражения мишени, в рассматриваемом случае — величины  $h_1$  от  $\delta_1$ , должна иметь следующий характер: при очень тонких экранах  $h_1$  стремится к глубине каверны на полубесконечной мишени. С ростом  $\delta_1$   $h_1$  убывает и достигает минимума при некотором значении  $\delta_1$ , зависящем от конкретных условий соударения. Дальнейший рост толщины экрана вызывает увеличение  $h_1$ , продолжающееся до тех пор, пока  $\delta_1$  не станет сравнима с предельной толщиной для данного материала экрана и скорости удара. Начиная с этого момента,  $h_1$  резко падает до нуля. Анализ такого характера зависимости с точки зрения волновых процессов, сопровождающих взаимодействие частицы с преградой, проведен в [1].

Зависимости  $h_1$  от  $\delta_1$ , построенные по полученным экспериментальным данным, приведены на рис. 3. Для точек, соответствующих различным материалам экранов, приняты те же обозначения, что и на предыдущих рисунках;  $s_1 > 20$ ; 1 —  $v_0 = 7,8$  км/с, 2 —  $v_0 = 5,4$  км/с, 3 —  $v_0 = 1$  км/с. Как следует из рисунка, для экранов из АД-1М получен-

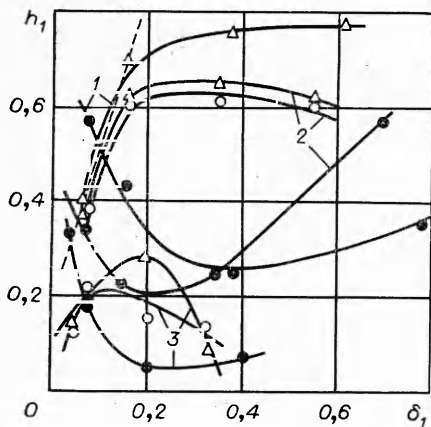


Рис. 3.

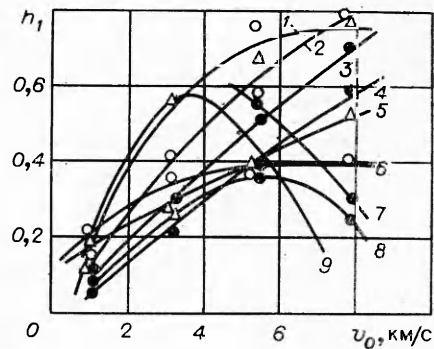


Рис. 4.

ные данные описывают участки зависимостей в окрестности минимальных значений  $h_1$ . Величины  $\delta_1$  соответствующие минимуму  $h_1$ , значительно меньше аналогичных значений  $\delta_1$  в случае удара стальных частиц [1], что связано с меньшей прочностью частиц из стекла. Ранее [1] установлено, что с ростом плотности материала экрана положение минимума  $h_1$  сдвигается влево по оси  $\delta_1$ . Выбранные толщины медных и стальных экранов соответствуют возрастающему участку зависимости  $h_1(\delta_1)$ , что и объясняет сделанное ранее наблюдение о том, что зависимости на рис. 2, соответствующие более толстым экранам, расположены выше кривых, полученных для более тонких экранов. Минимумы зависимостей  $h_1(\delta_1)$  в случае медных и стальных экранов находятся в области очень малых значений  $\delta_1$  и для их уточнения необходимы эксперименты с очень тонкими экранами.

Отметим еще одно обстоятельство, отличающее результаты для стальных и медных экранов от случая экранов из алюминиевого сплава. Для первых из них участок возрастания зависимостей  $h_1(\delta_1)$  практически совпадает с расчетной зависимостью глубины каверны, полученной в предположении, что удар по полубесконечной мишени наносится компактным телом, изготовленным из материала экрана с размером, равным толщине экрана. Сказанное иллюстрируется сравнением на рис. 3 штриховой линии, соответствующей такому расчету с возрастающим участком зависимости 1 [1]. Сравнение аналогичных расчетных зависимостей с возрастающими участками экспериментально определенных функций  $h_1(\delta_1)$  для экранов из АД-1М показывает их существенное отличие. Наблюдаемые особенности свидетельствуют о различии процессов взаимодействия частиц из стекла с тяжелыми (стальными, медными) и легкими экранами. На основании анализа полученных результатов можно предположить, что процесс взаимодействия частицы из стекла и последующее поражение мишени происходит следующим образом.

При соударении с самыми тонкими тяжелыми экранами длительность нагружающего импульса недостаточна для полного дробления частицы и поражение мишени определяется ее осколками. При достижении оптимальной (для данных условий соударения) толщины экрана (соответствующей минимуму  $h_1(\delta_1)$ ) происходит полное дробление частицы; поражение начинает определяться осколками экрана, который разрушается таким образом, что максимальные его осколки имеют характерный размер, равный толщине экрана. Такое разрушение может происходить по известным схемам разрыва экрана или выбивания пробки.

При дальнейшем увеличении толщины экрана протяженность импульса, нагружающего экран, становится меньше  $\delta$ , а в разрушении экрана определяющую роль начинают играть откольные явления.

В пользу этой гипотезы свидетельствует выход зависимостей  $h_1(\delta_1)$  на участок, при котором поражение мишени остается практически постоянным. И наконец, затухание амплитуды импульса, нагружающего экран, вследствие взаимодействия с волнами разгрузки начинает приводить к уменьшению толщины отколовшегося слоя и снижению  $h_1$ . Проведенное рассмотрение носит гипотетический характер, однако позволяет объяснить все особенности наблюдаемых зависимостей. Взаимодействие с легкими экранами, по-видимому, имеет тот же качественный характер, что и в случае стальных частиц [7].

Рассматриваемые данные позволяют сделать заключение о слабом влиянии прочности материала экрана на его защитные свойства уже в нижнем метеоритном диапазоне скоростей. Действительно, кривые для стальных и медных экранов расположены довольно близко и качественно повторяют друг друга, причем кривая для медного экрана расположена ниже кривой для экрана из стали. Близость этих зависимостей как раз и свидетельствует об одинаковом защитном эффекте экранов из столь различных по прочностным характеристикам материалов, а их взаимное расположение — об определяющей роли волновых процессов, уровень которых выше в случае медных экранов, имеющих более высокую плотность. Относительно резкое различие аналогичных кривых в случае малой скорости удара (кривые 3 на рис. 3) может быть объяснено большей склонностью стали подвергаться откольным разрушениям, вызываемым разгрузкой при выходе ударной волны на тыльную поверхность экрана.

Полученные экспериментальные данные относятся к нижнему интервалу скоростей метеоритов. С точки зрения проведения оценок противометеоритной защиты важно представлять, как изменяются защитные свойства экранов с ростом скорости соударения. В случае удара металлических частиц установлено, что поражение мишени уменьшается с ростом  $v_0$ ; эта тенденция, проявляющаяся с момента  $v_0 \geq 3-5$  км/с, выявлена в [1, 5] для самых разнообразных условий соударения. В рассматриваемом случае дело обстоит сложнее. Уменьшение поражения с ростом скорости удара при  $v_0 > 5$  км/с зафиксировано только для экранов из АД-1М и только для относительно толстых экранов (рис. 4, 7 и 8,  $s_1 > 20$ ,  $\delta_1 = 0,7-0,8$  и  $0,34 \div 0,4$  соответственно). Кривые на рис. 4 соответствуют: 1, 2 —  $\delta_1 = 0,32 \div 0,39$ ,  $s_1 > 20$ , 3 —  $\delta_1 = 0,15 \div 0,2$ ,  $s_1 = 13 \div 15,5$ , 4 —  $\delta_1 = 0,07 \div 0,08$ ,  $s_1 > 20$ , 5, 6 —  $\delta_1 = 0,07 \div 0,08$ ,  $s_1 > 20$ . В случае стальных, медных экранов и тонких экранов из АД-1М во всем рассматриваемом диапазоне изменения скорости поражение с ростом скорости возрастает или, в лучшем случае, выходит на стационарный уровень (см. рис. 4, 1 и 6). Различия в характере зависимостей  $h_1(v_0)$  в случае металлических и стеклянных частиц хорошо иллюстрируется сравнением кривых 3 и 9, полученных в сходных условиях. Кривая 9 взята из работы [6] и описывает результаты соударения алюминиевых частиц с мишенями, защищенными алюминиевыми экранами при  $\delta_1 = 0,2$ ,  $s_1 = 15,6$ . В то время, как кривая 9, достигая максимума при  $v_0 \approx 3,5$  км/с, при более высоких значениях скорости удара убывает, кривая 3 монотонно возрастает во всем исследованном диапазоне скоростей.

При анализе защитных свойств экрана в случае удара стальных частиц [1] для больших  $s_1$  введено понятие структуры поражения мишени — характеристика качественных особенностей воздействия осколков частицы и экрана на мишень. Для аналогичной характеристики результатов в опытах с частицами из стекла эту классификацию применить нельзя. Во-первых, в этих опытах частица всегда, даже при самых низких скоростях удара и тонких экранах, разрушается полностью, распавшись на осколки, образующие каверны, близкие по размерам (в [1] это названо структурой равномерного разрушения). Это явление вполне

объяснимо, так как стекло при импульсных нагрузках разрушается хрупким образом — путем возникновения и раскрытия хрупких трещин, образующихся при достаточно низких значениях величин сдвиговых напряжений. Очевидно, во всех проведенных опытах интенсивность ударных волн, распространяющихся по частице, обеспечивает уровень напряжений, необходимый для ее разрушения.

Во-вторых, в описываемых опытах не наблюдалось кольцевой структуры поражения, характерной для удара металлических частиц. Это отличие становится понятным, если вспомнить, что разрушение стальных частиц происходит, когда материал находится в пластическом состоянии. Само разрушение вызывается действием растягивающих напряжений, создаваемых волнами разгрузки, которые, естественно, приходят в конкретное сечение в первую очередь с боковой поверхности деформированной частицы. Таким образом, можно предположить, что кольцевой характер разрушения стальных частиц связан с последовательными отколами ее внешних слоев. В то же время частица из стекла к моменту ее разрушения находится в упругом состоянии, а ее разрушение происходит посредством распространения волны хрупкого разрушения, приблизительно равномерно дробящей частицу.

При  $v_0 = 10 \div 12$  км/с в случае стальных частиц на мишени наблюдается ряд более глубоких, по сравнению с остальными, каверн, расположенных почти точно по окружности. Они образуются осколками экрана, появление которых связано с краевыми эффектами при его разрушении. В опытах с частицами из стекла этого не наблюдается, поскольку уровень скоростей частиц, а тем более — реализующихся в экране напряжений в этом случае значительно ниже. Таким образом, при достаточно больших  $s_1$  поражение мишени, защищенной экраном, при ударе хрупких частиц характеризуется полем каверн, близким к равномерному.

В [1] предложена приближенная методика расчета параметров экранной защиты по заданной метеоритной модели и требуемому уровню надежности. Проведенные исследования показывают, что в случае каменных метеоритов, моделируемых в поставленных опытах частицами из стекла, она может применяться только в случае ее существенной коррекции в соответствии с полученными данными.

Авторы выражают благодарность В. П. Урушкину за совместное проведение экспериментов с частицами из стекла.

*Поступила в редакцию  
10/IV 1979*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 2.
2. В. П. Урушкин, Н. Н. Горшков, В. М. Титов. ФГВ, 1977, 13, 3.
3. В. М. Титов, Ю. И. Фадеев. Космические исследования, 1972, 10, 4.
4. А. П. Аникиева, Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1977, 3.
5. C. J. Maiden, A. R. McMillan. AIAA J., 1964, 2, 11.
6. Высокоскоростные ударные явления. М., «Мир», 1973.
7. Л. А. Мерзиевский, В. М. Титов. ПМТФ, 1975, 5.

#### К УДАРНОМУ СЖАТИЮ ПОРИСТЫХ ТЕЛ

*В. Ф. Анисичкин*

*(Новосибирск)*

Взрывное прессование порошков позволяет создавать новые материалы с полезными свойствами, в том числе такие, которые нельзя получить другими способами. Качество прессовок зависит от начальной