

7. Баренблатт Г. И. О распространении возмущений в среде с нелинейной зависимостью напряжений от деформаций.— ПММ, 1953, т. XVII, вып. 4.
8. Ильюшин А. А., Ленский В. С. Сопrotивление материалов. М., Физматгиз, 1959, с. 277.
9. Lubliner J. A general theory of strain-rate dependent plastic wave propagation in bars.— «J. Mech. Phys. Solids», 1964, vol. 12, p. 59—65.
10. Кристеску Н. О распространении продольных волн в тонких упруго-вязкопластических стержнях.— Сб. пер. Механика, 1966, № 3, с. 119—133.
11. Соколовский В. В. Распространение упруговязкопластических волн в стержнях.— ПММ, 1948, вып. 3, с. 261—280.
12. Малверн Л. Распространение продольных волн с учетом влияния скорости деформирования.— Сб. пер. Механика, 1952, вып. 1, с. 153—161.
13. Зубкова А. Н., Рыков Г. В. Распространение одномерных волн напряжений в вязкопластической среде.— В кн.: Материалы V Всесоюзного симпозиума 4—7 окт. 1971 г. Алма-Ата, «Наука», 1973, с. 165—173.
14. Скобеев А. М. Волна нагружения в вязкопластической среде.— «Изв. АН СССР. МТТ», 1967, № 2, с. 139—142.

УДК 628.198.624

ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ТОНКОГО ЭКРАНА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ УДАРЕ

Л. А. Мержиевский, В. М. Титов

(Новосибирск)

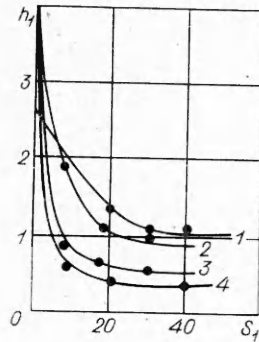
Пробивая тонкую пластину (экран), высокоскоростная частица (метеорит) разрушается в результате развивающихся в ней волновых процессов. При деформировании в частице вырабатывается поле скоростей с ненулевой составляющей, перпендикулярной направлению удара, поэтому траектории осколков направлены под различными углами к траектории частицы и удар осколков по преграде, расположенной за экраном, распределяется по площади, во много раз превосходящей площадь сечения частицы. Это вместе с потерей импульса частицы на пробивание и определяет защитное действие экрана.

Процесс деформации и разрушения частицы при соударении с экраном рассмотрен в [1]. В данной работе на основе проведенных экспериментов обосновывается методика количественных оценок разрушений преграды (мишени), защищенной экраном. Методика ускорения стальных шаров описана в [2]. В зазоре между экраном и мишенью во всех опытах давление доводилось до 1 мм рт. ст.

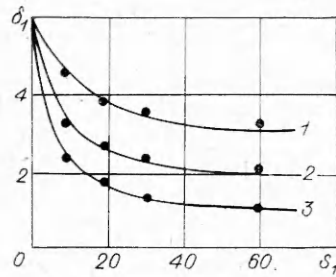
Общая постановка задачи о пробивании экранированной мишени осложняется тем, что при изменении расстояния между мишенью и экраном S меняется механизм воздействия на мишень. Если при малых S удар по мишени наносится неразошедшимся (компактным) облаком осколков либо только еще деформирующейся частицей, то с ростом S разрушение мишени все в большей степени определяется ударом наиболее крупных осколков рассредоточенного осколочного поля. Поэтому необходима оценка диапазона расстояний $S_1 = S/d_0$ (d_0 — диаметр ударяющей частицы), на которых воздействие на мишень определяется каждым из названных механизмов. При выборе в качестве мишени массивной (полубесконечной) преграды количественной характеристикой степени разрушения мишени и,

следовательно, защитных свойств экрана может служить глубина наибольшей из образующихся на мишени каверн h .

Экспериментальные результаты по определению зависимости $h_1 = h/d_0$ от S_1 приведены на фиг. 1, где кривая 1 соответствует удару алюминий — алюминий при $\delta/d_0 = 0,3$ (δ — толщина экрана); 2—4 соответствуют удару сталь — Д16 при $\delta/d_0 = 0,2; 0,6$ и $0,67$. Здесь и далее первым наз-



Ф и г. 1



Ф и г. 2

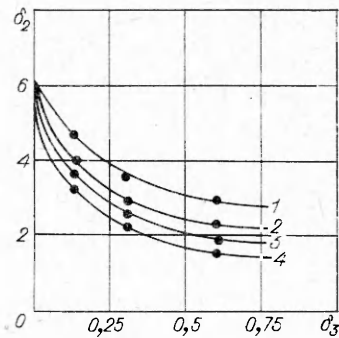
ван материал частицы, вторым — материал экрана, материал мишени — дюралюминий. Полученные данные, хорошо согласующиеся с данными [3], показывают, что, начиная с $S_1 \geq 25-30$, глубина h_1 практически постоянна. Близкий результат получен и при использовании в качестве характеристики защитных свойств экрана предельной толщины мишени δ_0 [4] (фиг. 2, $\delta_1 = \delta_0/d_0$, кривые 1—3 соответствуют удару сталь—Д16 при $\delta/d_0 = 0,125; 0,3$ и $0,6$). Различие в характере зависимости разрушения мишени от S_1 при $S_1 < 25-30$ и $S_1 > 25-30$ свидетельствует о том, что при $S_1 \approx 25-30$ происходит изменение механизма воздействия на мишень. Величину $S_1 \approx 25-30$ можно считать критической при переходе от малых S_1 к большим (строго говоря, для данной пары материалов).

При ударе одиночными осколками для выбранного материала мишени в рассматриваемом диапазоне скоростей выполняется соотношение

$$(1) \quad \delta_0 \approx (1,4 + 0,5)h,$$

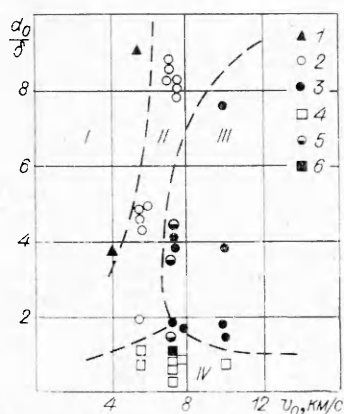
поэтому при больших S_1 характеристики δ_0 и h равноправны. При малых расстояниях в силу уже указанных особенностей воздействия осколков на мишень соотношение (1) несправедливо. Если считать, что недопустимым разрушением мишени является ее сквозное пробивание, что в качестве характеристики защитных свойств экрана следует использовать величину δ_0 . Зависимость суммарной предельно пробиваемой толщины $\delta_2 = (\delta + \delta_0)/d_0$ от δ при различных $S_1 < 30$ показана на фиг. 3, где кривые 1—4 соответствуют удару сталь — Д16 при $S_1 = 8,8; 17,6; 29,4$ и $58,8$.

Более полные экспериментальные данные получены для больших расстояний между экраном и мишенью. В этом случае при фиксированных материалах поражение мишени будет определяться толщиной экрана δ

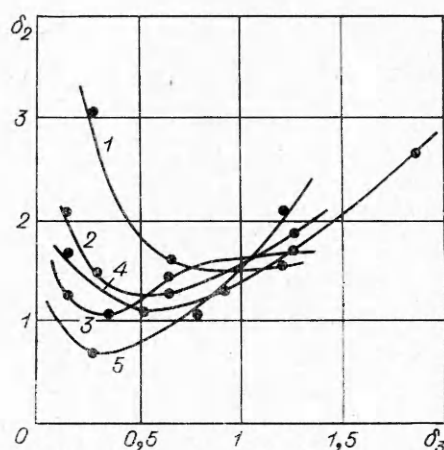


Ф и г. 3

и скоростью удара v_0 . Характерные особенности осколочных полей удобно анализировать, введя понятие структуры поражения мишени. Наиболее простой случай — отсутствие полного разрушения, когда центральная часть ударяющего тела остается неразрушенной. Это происходит при относительно малых скоростях удара или очень тонких экранах и связано с малой интенсивностью распространяющейся по частице ударной волны; увеличение толщины экрана аналогично увеличению скорости v_0 (способствует разрушению). При достаточных значениях δ и v_0 происходит полное разрушение тела. Размеры каверн от отдельных осколков в этом случае близки, и эта структура в дальнейшем называется структурой равномерного разрушения. Дальнейшее повышение скорости приводит к появлению четко выделяющихся краевых каверн, что означает переход к коль-



Ф и г. 4



Ф и г. 5

цевой структуре поражения. При высоких скоростях удара (10—12 км/с) каверны внутри кольцевой области существенно меньше краевых. Высокий уровень начальных давлений приводит к диспергированию тела на мельчайшие осколки, плавлению и испарению части из них. В зоне поражения при этих скоростях присутствуют следы напыленного металла. Более глубокие кольцевые каверны образованы осколками, появление которых связано с краевыми эффектами при разрушении экрана и тела.

С переходом к достаточно толстым экранам поражение мишени все в большей степени определяется его осколками. При этом часть осколков имеет скорости, существенно меньшие, чем скорость частицы, и неправильную форму, что приводит к значительному разбросу параметров каверн. На фиг. 4 приведена структурная диаграмма для удара сталь — Д16, полученная при $S_1 \approx 60$, $d_0 = 0,8-2,3$ мм (I — отсутствие полного разрушения, зона I; 2 — равномерное разрушение, зона II; 3 — кольцевая структура, зона III; 4 — толстые экраны, зона IV; 5 и 6 — переходные структуры II—III и III—IV соответственно). Границы зон нанесены приближенно. Структурные диаграммы устанавливают границы схем образования осколочного поля и позволяют определить характер поражения мишени без постановки эксперимента. Опыты с шарами $d_0 = 8$ мм свидетельствуют о сохранении структур и их положения на структурных диаграммах при изменении масштаба явления.

Согласно сформулированной выше задаче, основным измеряемым параметром в поставленных экспериментах являлась глубина наибольшей из каверн, образованных на полубесконечной преграде. Ре-

зультаты в координатах δ_2 , $\delta_3 = \delta/d_0$ (использовано соотношение (1)) вместе с данными работы [3] приведены на фиг. 5 (кривые 1—3 соответствуют удару сталь — Д16 при $v_0 = 5,5$; 7,5 и 10 км/с, 4, 5 — удару сталь — титан и сталь — сталь при $v_0 = 7,5$ км/с). Качественно зависимости имеют одинаковый характер. При очень тонких экранах δ_2 стремится к величине предельной толщины для незащищенной преграды. С возрастанием δ_3 δ_2 уменьшается и достигает минимума при некотором значении δ_3 , зависящем от условий соударения. Дальнейший рост толщины экрана вызывает увеличение δ_2 , продолжающееся до тех пор, пока δ_3 не становится сравнимой с предельной для данной v_0 и материала. При экранах такой толщины h резко падает до нуля. Объяснение такого поведения приведенных зависимостей с точки зрения развития волновых процессов, обсуждавшихся выше, достаточно очевидно.

Принципиальное значение для оценок защиты от ударов метеоритов имеет анализ изменения поражения мишени с увеличением скорости удара, поскольку в настоящее время возможно получение экспериментальных данных только в нижнем диапазоне метеоритных скоростей. Результаты экспериментов показывают, что глубина поражения с ростом скорости удара падает. Этот вывод в диапазоне скоростей $5 \text{ км/с} \leq v_0 \leq 12 \text{ км/с}$ получен и в других работах (см., например, [5]). В большинстве работ предполагается, что при существенном повышении скорости удара поражение мишени при больших S_1 стремится к нулю вследствие полного испарения материала тела. Установление наличия кольцевой структуры поражения, определяемой краевыми эффектами, свидетельствует о конечности поражения мишени при любых скоростях удара.

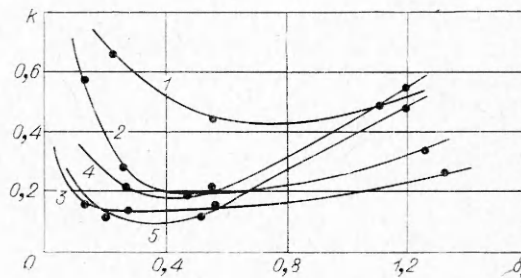
При использовании тонких ($\delta_0 < 1$) экранов из различных материалов определяющим параметром защитных свойств является плотность материала экрана, от которой зависит уровень давлений в ударной волне, проходящей по частице (см. фиг. 5). С уменьшением плотности материала экрана минимум зависимости δ_2 от δ_3 сдвигается вправо по оси δ_3 , т. е. для обеспечения наиболее полного разрушения понижение начального уровня давления в ударной волне должно компенсироваться увеличением длительности импульса. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о слабом влиянии прочностных характеристик на защитные свойства тонких экранов.

Применение экранов прежде всего ведет к снижению веса стенки защищаемой конструкции или, если экран изготовлен из того же материала, что и стенка, к снижению ее толщины. На основе приведенных результатов предлагается следующая приближенная методика расчета экранной защиты от удара метеорита. Для расчета суммарной предельной толщины экрана и мишени примем соотношение

$$\delta_2 = k\delta_1,$$

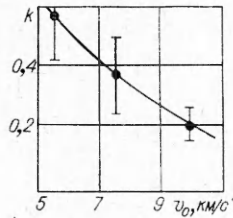
где δ_1 — относительная предельная толщина одиночной преграды, вычисляемая по формулам, приведенным в [4, 6]; $k < 1$ — эмпирический коэффициент, зависящий от тех же параметров, что и δ_2 .

На фиг. 6 приведены зависимости k от δ_3 для экранов из алюминиевых сплавов, титана и стали в случае $S_1 > 30$ (параметры удара для кривых



Ф и г. 6

1—5 те же, что и на фиг. 5). Как и следовало ожидать, наблюдается качественное соответствие величин k и δ_2 , сохраняющееся и для зависимостей от скорости удара (фиг. 7, удар сталь—Д16). Для конкретных расчетов было бы удобнее иметь некоторое постоянное значение величины k , справедливое для широкого диапазона условий соударения. Из приведенных данных



Ф и г. 7

следует, что для широкого диапазона изменения величины δ_3 (приблизительно для $0,3 \leq \delta_3 \leq 0,8$) величина $k_1 \leq 0,3$. Ясно, что величина $k_1 = 0,35$ при соответствующем выборе δ_3 обеспечит защиту мишени от пробивания. При этом с увеличением плотности материала экрана действительное значение k уменьшится и сделанный выбор k_1 обеспечит определенный запас «непробиваемости» стенки. Тенденция к уменьшению k с ростом скорости удара позволяет распространить предлагаемую схему на метеоритный (по крайней мере нижний) диапазон скоростей. Толщину экрана предлагается выбирать из условия $\delta_3 \approx 0,5-0,6$, хотя минимумы зависимостей фиг. 6 для тяжелых экранов находятся левее по оси δ_3 ; такое значение обеспечивает справедливость выбора k_1 для широкого диапазона изменения плотности материала экрана. Аналогичное рассмотрение в случае малых расстояний между экраном и мишенью ($5 \leq S_1 \leq 20-25$) дает величину $k_1 = 0,7$.

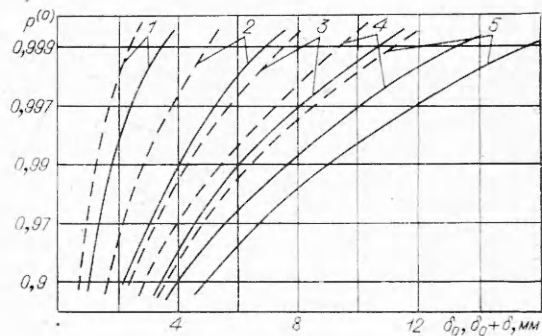
Столкновение метеорита с космическим аппаратом — явление в достаточной степени случайное (в действительности эта гипотеза является некоторой вероятностной моделью реальных статистических данных). В рассматриваемом процессе возможны два исхода — пробивание стенки или отсутствие пробивания; наиболее вероятное число пробиваний τ значительно меньше общего числа метеоритов в космическом пространстве, т. е. размер выборки много больше вероятности P положительного исхода испытаний. Следовательно, вероятность получения аппаратом n пробиваний $P(n)$ подчиняется закону Пуассона

$$(2) \quad P(n) = (\tau^n/n!)e^{-\tau},$$

если τ — постоянная величина. Последнее допущение также является приближенным, так как известно, что число метеоритов (даже если не учитывать метеоритные потоки) меняется во времени. С практической точки зрения интересен случай отсутствия пробоев с вероятностью $P(0)$, близкой к единице. Из (2) следует

$$(3) \quad \tau = -\ln P(0).$$

Соотношение (3) по заданному уровню надежности $P(0)$ определяет наиболее вероятное число пробиваний стенки аппарата за время полета. С другой стороны, при известной частоте ударов $N(m)$ (m — масса метеорита) число их за время полета T составит NTQ , где Q — площадь уязвимой поверхности аппарата. Приравняв эту величину значению τ , определенному из (3), можно определить «критическую» массу метеорита m_1 , от которого еще нужно защищаться,



Ф и г. 8

чтобы обеспечить требуемый уровень надежности. Зависимости $N(m)$ имеют вид *

$$N(m) = Am^{-r}, \quad r > 0,$$

поэтому $m_1^r = AQT/\tau$.

Предположив, что метеорит имеет форму шара, а его плотность равна некоторой средней величине ρ_0 , можно вычислить диаметр метеорита d_1 , соответствующий массе m_1 .

Таким образом, предлагаемая методика позволяет по заданному уровню надежности и известной метеоритной модели, включающей в себя функцию $N(m)$, среднюю плотность метеоритов ρ_0 и их среднюю скорость v_0 , определить параметры экранной защиты и стенки конструкции. В качестве примера такого расчета на фиг. 8 приведены зависимости толщины одиночной стенки (сплошные линии) и суммарной толщины экрана и экранированной стенки (штриховые линии) от задаваемого уровня надежности для различных «экспозиций» QT (кривые 1—5 соответствуют экспозициям: $4,5 \cdot 10^3 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$, $1,1 \cdot 10^5 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$, $6,75 \cdot 10^5 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$, $1,7 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$, $3,4 \cdot 10^6 \text{ м}^2 \cdot \text{ч}$). В расчетах использовалась метеоритная модель Уиппла [7]

$$N(m) = 10^{-14,48} (0,44/\rho_0)^{1,34} m^{-1,34}, \quad \rho_0 = 2,7 \text{ г/см}^3, \quad v_0 = 30 \text{ км/с.}$$

При расчете экранированной стенки считалось, что $S_1 > 30$.

Поступила 19 III 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Мерзиевский Л. А., Титов В. М. Пробивание пластин при высокоскоростном ударе.— ПМТФ, 1975, № 5.
2. Титов В. М., Фадеенко Ю. П., Титова И. С. Разгон твердых частиц кумулятивным взрывом.— «Докл. АН СССР», 1968, т. 180, № 5.
3. Arenz R. J. Projectile size and density effects on hypervelocity penetration.— «J. of Spacecraft and Rockets», 1969, vol. 6, N 11.
4. Титов В. М., Фадеенко Ю. П. Сквозное пробивание при метеоритном ударе.— «Космические исследования», 1972, т. 10, № 4.
5. Maiden C. J., McMillan. An investigation of the protection afforded a spacecraft by a thin shield.— «AJAA. J.», 1964, vol. 2, N 11. Рус. пер.— «Ракетн. техника и космонавтика», 1964, т. 2, № 11.
6. Мерзиевский Л. А., Фадеенко Ю. П. Разрушение тонкостенного трубопровода, заполненного жидкостью, при ударах метеоритов.— «Космические исследования», 1973, т. 11, № 6.
7. Уиппл Ф. Оценка возможности метеоритных пробоев в космических летательных аппаратах.— «Вопросы ракетной техники», 1965, № 4.

УДК 531.78.781

ОБ ИСПОЛЪЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОННО-ИНЕРЦИОННОГО ЭФФЕКТА ПРИ УДАРНОМ НАГРУЖЕНИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИИ СТЕРЖНЕЙ

Ю. Г. Кашаев, С. А. Новиков, В. А. Синицын

(Москва)

В широко известных опытах Толмена [1] катушка с большим количеством витков проволоки приводилась в быстрое вращательное движение и резко тормозилась. С помощью гальванометра, присоединенного к вы-