

Взрывное метание тонких пластин

А. К. МУЗЫРЯ

Взрывное ускорение пластин и последующее их взаимодействие с мишенью широко используется при решении как исследовательских, так и технологических задач. Типичные примеры таких процессов: создание высоких импульсных давлений в веществе ударом по нему пластиной с целью изучения динамических свойств материалов; сварка взрывом различных сочетаний веществ. Этот вид создания нагрузки находится в арсенале специалистов и обладает рядом положительных качеств. В частности, наряду с простотой ускоряющей системы возможно также относительно простое регулирование параметров удара. Так, амплитуда импульсного давления зависит от скорости соударения. Длительность импульса варьируется толщиной пластины. В данной работе экспериментально изучены прикладные возможности системы взрывного метания в широком диапазоне отношения удельных масс пластины и взрывчатого вещества (0,2–6). Установлены некоторые пределы, ограничивающие качественный удар по мишени. Полученная зависимость скорости от отношения удельных масс сравнивается с аналитическим решением для одномерного случая и результатами других авторов. Отмечается удовлетворительная корреляция. Решаются задачи сохранения целостности тонкой пластины и приемлемой одновременности удара по нагружаемой плоскости.

В практике исследования ударно-волновых процессов используется широкий набор нагружающих устройств. В их число входят разнообразные устройства, использующие энергию взрыва. Удар ускоренной взрывом пластиной создает в мишени импульс, характеризующийся следующими параметрами. Длительность импульса составляет $\tau = 2h/c$, где h – толщина пластины, c – скорость звука в ее материале. Давление на контактной границе зависит от скорости пластины и соотношения акустических жесткостей пластины и мишени.

Определенный интерес в практических приложениях вызывают импульсы короткой длительности и их действие на мишень. Однако, нагружение ударом тонких пластин сопряжено с рядом проблем: обеспечение необходимого диапазона скоростей; устойчивость ее движения;

целостность пластины в процессе ускорения, полета и удара по мишени; сохранение формы пластины и приемлемая разновременность удара по площади мишени.

1. Скорость пластины

Анализ задачи. Аналитическое решение одномерной задачи о метании несжимаемой пластины контактным взрывом ВВ получено Е. И. Забабахиным и К. П. Станюковичем. Установившаяся скорость пластины определяется соотношением удельных (на единицу площади) массы ВВ (m) и массы пластины $M\alpha = m/M$, а также скоростью детонации D . Предельные случаи решения: $\alpha \rightarrow 0$ (маленький заряд, тяжелая пластина) скорость $W \rightarrow 0$; $\alpha \rightarrow \infty$ (обратная ситуация) $W \rightarrow D$, то есть достигается максимально возможная скорость, равная скорости детонации и соответствующая разлету продуктов взрыва в вакуум. Практический интерес при использовании системы ВВ–пластина для создания ударных нагрузок представляют конечные значения α . В этом случае скорость пластины описывается выражением:

$$W(\alpha) = \frac{27D}{16\alpha} \left\{ 1 + \frac{16\alpha}{27} - \left(1 + \frac{32\alpha}{27} \right)^{0,5} \right\}.$$

Зависимость представляет собой гладкую возрастающую функцию с убывающей производной.

В ряде работ (Погорелов А. П. и др. (ФГВ. – 1977), Новиков С. А. и др. (ФГВ. – 1981), Дерibas А. А. «Физика упрочнения и сварки взрывом») рассмотрено ускорение пластин в двумерном процессе (скользящая детонация). Предложенные эмпирические зависимости $W(\alpha)$ адаптированы к конкретным диапазонам α и в совокупности охватывают широкую область вариации α .

При малых $\alpha < 0,3$ конечная скорость пластины линейно зависит от α : $W(\alpha) = 0,29D\alpha$.

Диапазон $0,3 \leq \alpha \leq 3,5$ аппроксимируется функцией $W/D = k_{1\alpha}/(\alpha+2)$.

Для $\alpha > 3,5$ предложена зависимость вида

$$W/D = k_2 \left(\sqrt{1+1,185\alpha} - 1 \right) / \left(\sqrt{1+1,185\alpha} + 1 \right).$$

Постановка экспериментов и метод регистрации. Для решения поставленных задач по

исследованию параметров ускорения пластин и сопутствующих процессов эксперименты выполнялись автором в следующей постановке. Метаемая пластина и взрывчатое вещество объединены в композицию, которая устанавливается поперечными краями на деревянные опоры. Размеры стальной пластины $0,5 \times 40 \times 130$ мм. Слой взрывчатого вещества длиной 260 мм состоит из нагружающей части и разгонного участка 120 мм. Этот участок предназначен для обеспечения приемлемой плоскостности фронта первоначально расходящейся детонационной волны от инициирования в одной точке электродетонатором. Разновременность детонационного фронта по ширине пластины в начале нагружающей части не хуже 0,2 мкс.

В методическом плане отличие выполненных исследований от цитируемых работ состоит в соединении скользящей детонации и импульсной рентгенографии. Мгновенный снимок процесса, являясь по сути статичным, позволяет определять по одному этому снимку кинематическую величину – скорость движения пластины. С этой целью в системе координат, связанной с детонационным фронтом, рассматривается двумерное стационарное течение, к которому применимо уравнение Бернулли. Материал пластины, не подвергшийся действию взрыва, втекает во фронт со скоростью детонации D , и затем течение поворачивается на угол β . Величина скорости сохраняется равной D в соответствии с уравнением Бернулли для несжимаемого вещества пластины. Возвращение в лабораторную систему координат осуществляется приданием

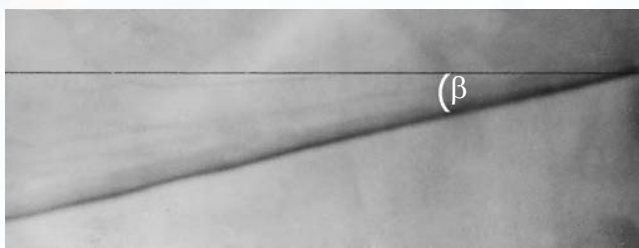
фронт скорости D . Скорость пластины W получается сложением повернутого вектора \vec{D} и такого же по величине, но направленного по движению фронта детонации.

AO – начальное положение пластины, OB – повернутый участок, W – скорость пластины, W_r , W_n – тангенциальная и нормальная составляющие скорости W .

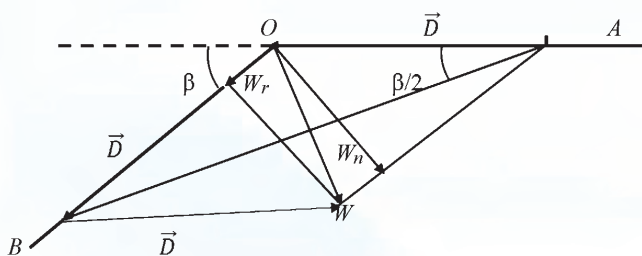
Из представленной схемы следует: $W = 2D \sin \beta/2$, а также $W_n/W = \cos \beta/2$. Отсюда искомая скорость пластины в направлении ее движения $W_n = W \cos \beta/2 = 2D \sin \beta/2 \cdot \cos \beta/2$, то есть $W_n = D \sin \beta$. В эксперименте регистрируется угол β , и при известной скорости детонации определяется скорость пластины W_n . Относительная скорость $W_n/D = \sin \beta$.

Результаты измерений. В опытах с пластинами одной толщины (0,5 мм) варьировалась толщина взрывчатого вещества от 0,5 до 16 мм. Таким образом, диапазон отношения удельных масс взрывчатого вещества и пластины составил $\alpha = 0,19-6,2$; то есть размах примерно 30 раз. Полученные результаты представлены на графике, где наряду с экспериментальными точками нанесены описанные выше кривые других исследователей.

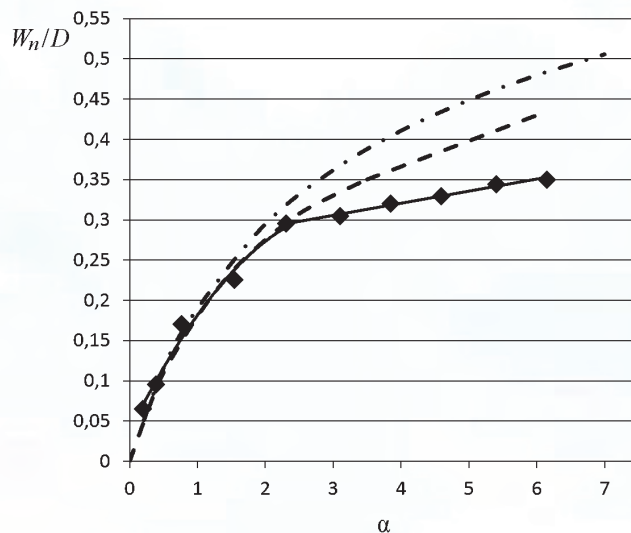
При изменении толщины заряда VB от 0,5 до 16 мм пластина приобретает скорость от 0,5 до 2,75 км/с. Отчетливо видно, что полученные экспериментальные точки принадлежат двум разным областям. Первая ($\alpha = 0,19-2,3$) аппроксимируется полиномом $W_n/D = -0,026\alpha^2 + 0,1698\alpha + 0,0376$ и хорошо коррелирует с приведенными



Рентгенограмма взрывного ускорения пластины



К определению скорости пластины



Зависимость приведенной скорости пластины от отношения удельных масс VB и пластины: - · - · - · - · - одномерный аналитический расчет, -- -- скользящая детонация ($\alpha < 3,5$; $k_1 = 0,65$) и ($\alpha > 3,5$; $k_2 = 0,9$), \blacklozenge – эксперимент

на графике расчетными кривыми других исследователей. Вторая область $W_n/D = 0,0151\alpha + 0,2604$ ($\alpha = 2,3-6,15$) находится заметно ниже расчетных кривых.

Аналогично, с разделением на области, аппроксимированы зависимости скорости пластины от толщины взрывчатого вещества:

$$W_n(h) = -0,0291h^2 + 0,5043h + 0,2949$$

$$(h = 0,5-6 \text{ мм}),$$

$$W_n(h) = 0,0464h + 2,0176 \quad (h = 6-16 \text{ мм}).$$

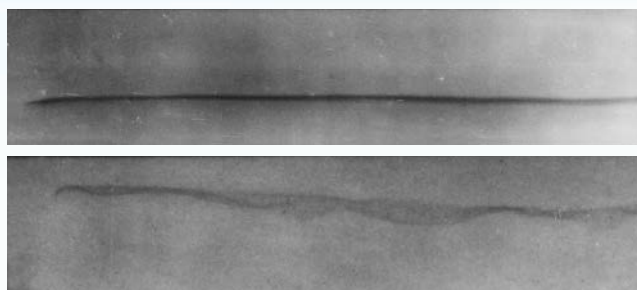
Производные этих функций характеризуют темп приращения скорости пластины с увеличением толщины взрывчатого вещества. В первой области

$dW_n/dh = -0,0582h + 0,5043$, и увеличение h на 1 мм дает постепенно уменьшающееся приращение W_n от 0,475 до 0,155 км/с со средним значением 0,35 км/с. На втором участке $dW_n/dh = 0,0464$, то есть таков показатель приращения W на каждый миллиметр взрывчатого вещества. Здесь изменение h в 2,7 раза с 6 до 16 мм увеличивает скорость пластины всего в 1,2 раза. Заряды взрывчатого вещества этого участка заметно менее эффективны по метательной способности, хотя взрывчатые характеристики остались прежними. Причина видится в конечной ширине заряда (40 мм) конкретного метательного устройства и наличии разгрузочных процессов. Их влияние начинает ощущаться с отношения толщины заряда к его ширине 0,2 и становится существенным при отношении 0,4.

2. Устойчивость движения и целостность пластин

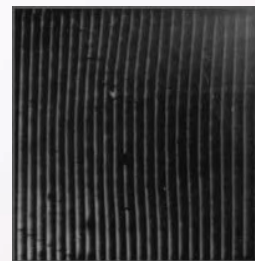
В стремлении получить короткие ударные импульсы следует использовать тонкие пластины, исходя из пропорциональности длительности импульса толщине пластины: $\tau = 2h/c$. Однако малые толщины создают проблему устойчивости их движения.

В поисках границы устойчивости полета пластины ее толщина уменьшалась до 0,2 мм и до 0,1 мм при толщине взрывчатого вещества 0,5 мм. В последнем случае полет неустойчивый (на рисунке), что коррелирует с выводом В. А. Раевского (ВАНТ, 1994). Этот эффект он связывает с влиянием Рэлей-Тейлоровской неустойчивости на ускорение плоского слоя твердого вещества. Используемые в работе стальные пластины толщиной 0,5 мм движутся устойчиво. Удар такой пластиной по преграде характеризуется одновременностью не более $0,2 \pm 0,01$ мкс по полю 40×40 мм. Это определялось при фоторегистрации методом щелевого



Рентгенограммы различного состояния пластин в полете при движении к мишени: устойчивое движение пластины 0,5 мм (вверху) и неустойчивое движение пластины 0,1 мм (внизу). Направление движения сверху вниз

растра. Свечение воздуха в тонком зазоре при ударе пластины регистрируется в виде изображения набора параллельных светящихся щелей. Локальный и общий изгиб вертикальных светящихся щелей пропорционален разновременности удара в разных точках и скорости развертки по горизонтали. Из приведенной растрограммы видно, что изгиб незначителен, его величина относительно базовых вертикальных линий дает значение разновременности удара не более 0,2 мкс.



Растрограмма удара стальной пластиной 0,5 мм по отсечке из оргстекла. Размер изображения соответствует участку пластины 40×40 мм

Сохранение сплошности пластины к моменту удара по образцу определялось по качеству отпечатка на медном приемнике. Отпечатки показали отсутствие разрывов в ударяющей пластине.

Таким образом, композиция ВВ + стальная пластина толщиной 0,5 мм в режиме скользящей детонации обеспечивает устойчивое движение пластины, ее целостность и приемлемую одновременность удара по мишени.

При конкретной ширине пластины (40 мм) эффективный набор ее скорости при росте толщины ВВ происходит до 6 мм. Дальнейшее приращение скорости существенно замедляется из-за влияния боковой разгрузки.

Автор благодарен А. И. Бричкову за качественную регистрацию процессов.

МУЗЫРЯ Александр Кириллович –

главный научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИТФ
им. академ. Е. И. Забабахина, доктор технических наук,
лауреат премии Правительства РФ