

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Козорезов К.И., Скугорова Н.Ф. Упрочнение сталей ударными волнами // Изв. АН СССР, ФизХОМ. — 1969. — № 2. — С. 78—83.
2. Дерibas А.А., Нестеренко В.Ф., Тесленко Т.С. Универсальная зависимость параметров упрочнения металлов от интенсивности ударно-волнового воздействия // ФГВ. — 1982. — 18, № 6. — С. 68—74.
3. Одинг И.А., Либеров Ю.П. Развитие повреждаемости в никеле при статическом растяжении // Изв. АН СССР. — Metallургия и топливо. — 1962. — № 6. — С. 126—128.
4. Одинг И.А., Либеров Ю.П. Накопление дефектов и образование субмикротрещин при статическом растяжении армо-железа // Изв. АН СССР. Metallургия и горное дело. — 1964. — № 1. — С. 18—21.
5. Соболенко Т.М. Исследование упрочнения некоторых металлов после воздействия взрывных нагрузок / Канд. дис. — Новосибирск, 1966.
6. Тесленко Т.С. Особенности структуры и свойств металлов в условиях взрывного нагружения / Канд. дис. — Новосибирск, 1981.
7. Дидык Р.П., Грязнова Л.В., Семенюк Е.Н., Усов О.Я. Возможный механизм действия двухслойного заряда ВВ при взрывном упрочнении металлов // ФГВ. — 1980. — № 1. — С. 124—125.

320600 г. Днепропетровск,  
Государственная горная академия Украины  
г. Москва  
НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова

Поступила в редакцию  
26/VII 1993,  
после доработки — 28/II 1994

УДК 534.222.2

В.В. Киселев

### ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ МЕТАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИЕЙ ЗАРЯДОВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ В НАЧАЛЬНОЙ ФАЗЕ ПРОЦЕССА

Экспериментально изучалось метание металлических пластин скользящей детонацией заряда ВВ на начальном этапе процесса. Показано, что сжимаемость материала пластины может оказывать существенное влияние на динамику процесса метания. Предложена формула для оценки параметров метания, в которой учитываются как метательные, так и бризантные свойства ВВ.

Метание металлических пластин слоями взрывчатых веществ (ВВ) в режиме скользящей детонации широко применяется при обработке материалов взрывом и при проведении разного рода экспериментов. При этом скорость полета пластины является определяющим параметром процесса.

Скорость пластины  $v$  (рис. 1) связана со скоростью детонации заряда ВВ  $D$  и углом разворота пластины  $\beta$  при метании соотношением [1]

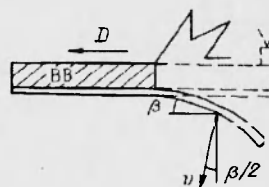
$$v = 2D \sin(\beta/2). \quad (1)$$

Если величину  $D$  можно измерить практически в любых условиях, то определение угла  $\beta$  или значения  $v$  требует постановки специального эксперимента. Поэтому часто используются различные способы численной оценки этих величин. Наиболее распространены два выражения: формула Гарни [1, 2], выведенная в приближении мгновенного взрыва для максимальной скорости полета пластины,

$$v = \sqrt{2E_G} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{r^2 + 5r + 4}}, \quad (2)$$

© В.В. Киселев, 1995.

Рис. 1. Рассматриваемая схема метания пластины.



где  $r = \delta_0 \rho_0 / \delta_1 \rho_1$ ;  $\delta_0 \rho_0, \delta_1 \rho_1$  — толщина и плотность заряда ВВ и метаемой пластины;  $E_G$  — энергия Гарни в расчете на единицу массы ВВ, и уравнение для угла разворота пластины при метании, полученное на основе проведения двумерных расчетов и сравнения их с экспериментальными данными [3]:

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left[ \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right] \frac{r}{r + 2,71 + 0,184/y} \quad (3)$$

Здесь  $k$  — интегральный показатель политропы продуктов детонации равный 2,8, 2,5 и 2,2 для гексогена, аммонита 6ЖВ и смеси аммонита с аммиачной селитрой в соотношении 1/1;  $y$  — отношение расстояния, которое пролетает пластина в направлении нормали к ее плоскости в начальный момент времени, к  $\delta_0$ .

Преимущество формулы (3) в том, что при помощи параметра  $y$  учитывается стадия разгона пластины. При  $y \rightarrow \infty$  расчеты скорости по формуле Гарни и соотношениям (3), (1) для одинаковых  $k$  и  $r$  практически совпадают, если

$$E_G = D^2 / [2(k^2 - 1)]. \quad (4)$$

При рассмотрении процесса метания материал пластины обычно описывается как набор абсолютно жестких, не связанных между собой элементов с конечной массой. В соответствии с этим считается, что  $v \rightarrow 0$  и  $\beta \rightarrow 0$  при  $y \rightarrow 0$ . Исходя из этой гипотезы подбирался вид и коэффициенты формулы (3) [3].

В [4] отмечается, что при метании тонких пластин зарядами бризантных ВВ большой массы, когда можно пренебречь затуханием в пластине ударной волны, вызванной скользящей детонационной волной, при  $y \rightarrow 0$  пластина должна разворачиваться на угол, определяемый взаимодействием изоэнтропы разгрузки продуктов детонации и ударной адиабаты материала пластины. В экспериментах [4] с использованием скоростного фоторегистратора тонкие пластины (0,2—3 мм) разгонялись большими зарядами бризантных ВВ ( $r \gg 1$ ). Экстраполяция экспериментальной зависимости  $\beta(y)$  на нулевую базу метания приводила к ненулевому значению угла поворота, причем эти значения совпали с полученными из оценок по  $p - u$ -диаграммам. Непосредственных измерений начального угла поворота пластин в [4] не проводилось.

В данной работе предпринята попытка изучить начальную фазу процесса метания пластины более подробно.

#### Методика экспериментов и результаты

Для исследования начальной стадии разгона пластин применялся электроконтактный метод: пластина в полете последовательно замыкала контакты, находящиеся в фиксированных точках пространства [1, 5]. Методика регистрации профиля пластины описана в работе [6]. Отличие заключалось в том, что вместо натянутой нихромовой проволоки под пластиной устанавливался набор из металлических иголок, соединенных между собой отрезками нихромовой проволоки, которые играли роль резисторов в электрической цепи. Иголки располагались вертикально на одной прямой вдоль продольной оси пластины. Пластина в полете поочередно замыкала верхние концы иголок, уменьшая общее сопротивление цепи. Напряжение на входе осциллографа при этом ступенчато снижалось при постоянном значении тока, проходящего по цепи. Можно было выставлять замыкаемые концы

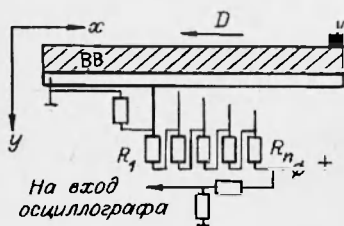


Рис. 2. Схема экспериментального устройства.

иглолок вдоль любой заданной кривой, для чего использовались специально изготовленные шаблоны. Расположение концов иглолок вдоль прямой аналогично натянутой проволоке. Зазор между первой иглолкой и поверхностью пластины устанавливался при помощи медной фольги толщиной 0,025 мм, которая перед проведением эксперимента удалялась.

Определив по осциллограмме время замыкания каждой иглолки и зная форму кривой, на которой расположены замыкаемые концы иглолок, строили профиль метаемой пластины, полагая процесс метания стационарным [6]. Схема эксперимента приведена на рис. 2.

В экспериментах медные пластины размером 100 × 300 мм и толщиной  $\delta_1 = 4$  мм металась зарядом аммонита 6ЖВ высотой  $\delta_0 = 6$  мм ( $r = 0,17$ ). Расшифровка сигналов показала, что на расстоянии 0,2 мм от первоначального положения нижняя поверхность пластины имела наклон в одном случае  $2,6^\circ$  при  $D = 3,32$  км/с, а в другом  $2,7^\circ$  при  $D = 3,52$  км/с. Для алюминиевой пластины (100 × 270 мм,  $\delta_1 = 5$  мм,  $\delta_0 = 6$  мм,  $r = 0,434$ ) при  $D = 2,66$  км/с  $\beta = 4,8^\circ$ . Относительная погрешность определения величины угла не превышала 15 %.

Расчет по формуле (3) дает существенно отличающиеся от экспериментальных значения:  $1^\circ$  для медной пластины и  $2,4^\circ$  для алюминиевой. Из оценок по  $p - u$ -диаграмме в одномерном случае  $\beta = 2,5, 3,0$  и  $4,3^\circ$  соответственно, что удовлетворительно согласуется с экспериментальными значениями. Величины показателя политропы  $\gamma$ , определенного по измерениям параметров детонации в плоскости Чепмена—Жуге, для оценок взяты из [7].

Таким образом, есть основание предположить, что полученные экспериментально значения угла наклона нижней поверхности метаемой пластины в непосредственной близости от ее первоначального положения обусловлены влиянием сжимаемости материала пластины.

Эксперименты по регистрации профиля пластин, метаемых различными зарядами, электроконтактной методикой и методом электроспротивления [6] показали, что экспериментальные кривые разгона пластины существенно отличаются от кривых, описываемых формулой (3). Анализ данных показывает, что кривая  $\beta(y)$  хорошо описывается формулой

$$\beta(y) = \beta(0) + [\beta(\infty) - \beta(0)] [1 - \exp(-\xi y)], \quad (5)$$

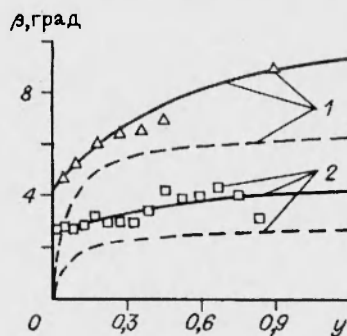
где  $\beta(0)$  — начальный угол, обусловленный влиянием сжимаемости материала пластины;  $\beta(\infty)$  — максимальный угол, на который может развернуться пластина при метании данным зарядом;  $y$  — расстояние, которое пролетает пластина от своего первоначального положения, измеренное в толщинах заряда  $\delta_0$ ;  $\xi$  — коэффициент, который, возможно, зависит от свойств ВВ. В первом приближении можно взять  $\xi = 2$ . Для расчетов по (5) необходимо оценить  $\beta(0)$  и  $\beta(\infty)$ . Величина  $\beta(0)$ , определенная по  $p - u$ -диаграмме при одномерной схеме, удовлетворительно совпадает с экспериментальными значениями

$$\beta(0) = 2 \arcsin(u/D),$$

где  $u$  определяется из уравнения

$$\rho_1 u(a + bu) = \frac{r_0^2 D}{\gamma + 1} \left[ 1 - \frac{(\gamma^2 - 1) u}{2\gamma D} \right]^{\frac{2\gamma}{\gamma - 1}}.$$

Рис. 3. Зависимость угла разворота пластины от дистанции метания (заряд — аммонит 6ЖВ,  $\delta_0 = 6$  мм,  $\rho_0 = 1$  г/см<sup>3</sup>).  
 1 — алюминий,  $\sigma_1 = 5$  мм; 2 — медь,  $\delta_1 = 4$  мм; ——— расчет по (5);  
 - - - - - расчет по (3),  $k = 2,5$  [1,3].



Здесь левая часть представляет собой ударную адиабату металла, а правая — давление в одномерной волне разгрузки в продуктах детонации [8, 9]. На точность оценки влияет не только затухание волн сжатия в материале пластины, но и величина показателя политропы продуктов детонации  $\gamma$  в плоскости Чепмена — Жуге, который зависит от скорости детонации и начальной плотности заряда ВВ [7, 10].

Очевидно, что на максимальный угол разворота пластины сжимаемость материала пластины не влияет, поэтому значение  $\beta(\infty)$  можно оценить по соотношениям (1), (2) или по формуле (3). Если для расчетов метания в качестве характеристик ВВ использовать теплоту взрыва  $Q_v$  и показатель политропы  $\gamma$  [2] вместо  $E_G$  и  $k$ , то можно получить значения  $\beta$ , сильно отличающиеся от экспериментальных. Используемые в (2) и (3)  $E_G$  и  $k$  являются интегральными характеристиками метательной способности взрывчатого вещества. Они могут существенно отличаться от  $Q_v$  и  $\gamma$  [5, 7, 10].

В [11, 12] показано, что удовлетворительное совпадение расчетных значений максимальной скорости полета пластины с экспериментом получается, если определять интегральный показатель политропы  $k$  по углу разлета продуктов детонации. При этом в [11] энергию Гарни предлагается рассчитывать по формуле (4).

Исходя из этого, находим

$$\beta(\infty) = 2 \arcsin[v/2D],$$

$v$  вычисляется по (2), а  $E_G$  по (4).

На рис. 3 сплошными кривыми показаны примеры расчета по формуле (5) в сравнении с экспериментальными данными. Значение  $k$  рассчитывалось по углу разлета продуктов детонации, который определялся по снимкам, сделанным на СФР. Для аммонита 6ЖВ при  $\delta_0 = 6 \div 10$  мм и  $D = 2,83 \div 3,75$  км/с  $k = 1,91 \div 2,03$ , т.е. разброс значений составил около 6 %.

### Выводы

Измерены углы наклона нижней поверхности пластин, метаемых скользящей детонацией заряда ВВ, в непосредственной близости от ее первоначального положения. Значения углов превышают рассчитанные в предположении о несжимаемости материала пластин и удовлетворительно совпадают с оценками, сделанными с учетом сжимаемости. Это позволяет сделать вывод, что сжимаемость материала пластины может существенно влиять на динамику метания пластины скользящей детонационной волной на малых дистанциях метания, а также при малых значениях  $\gamma$ .

Предложенная для оценки угла поворота метаемой пластины формула (5) имеет преимущество перед ранее существующими, поскольку позволяет учесть начальный угол и лучше описывает экспериментальные кривые  $\beta(\gamma)$ . В эту формулу входят параметры, характеризующие как бризантные свойства ВВ, которые определяют характер процесса на начальном этапе метания, так и его метательное действие.

В дальнейшем необходимо предложить обоснованный вывод для параметров, характеризующих свойства ВВ и позволяющих описывать динамику метания пластины на всех стадиях процесса.

Автор выражает благодарность В.В. Паю за практическую помощь в освоении метода проведения экспериментов и А.А. Дерибасу за внимание к работе и ряд критических замечаний.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. — Новосибирск: Наука, 1980.
2. DeCarli P.S., Meyers M.A. // Shock Waves and High-Strain-Rate Phenomena in Metals, Edited by M.A. Meyers and L.E. Murr. — Plenum Press, New York, 1981. — P. 341—373.
3. Кузьмин Г.Е. // Динамика сплошной среды. — Новосибирск, 1977. — Вып. 29. — С. 137—142.
4. Дреннов О.Б., Михайлов А.Л. О начальной стадии разгона тонких пластин в режиме скользящей детонации заряда ВВ // ФГВ. — 1979. — 15, № 4. — С. 143—146.
5. Crossland В. Explosive Welding of Metall and its Application. — Clarendon Press, Oxford, 1982.
6. Кузьмин Г.Е., Мали В.И., Пай В.В. О метании плоских пластин слоями конденсированных ВВ // ФГВ. — 1973. — 9, № 4. — С. 558—562.
7. Шведов К.К., Дремин А.Н. // Взрывное дело. — М.: Недра, 1976. — № 76/33. — С. 137—150.
8. Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др. Физика взрыва. — М.: Наука, 1975.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц В.М. Гидродинамика. — М.: Наука, 1988.
10. Дремин А.Н., Савров С.Д., Трофимов В.С., Шведов К.К. Детонационные волны в конденсированных средах. — М.: Наука, 1970.
11. Вацек Я., Моштяк П. // Тр. 9-й Междунар. конф. «Высокоэнергетическое воздействие на материалы». Новосибирск, 18—22 авг. 1986 г. / Ред. И.В. Яковлев, В.Ф. Нестеренко. — Новосибирск, 1986. — С. 325—329.
12. Pinghuang Shao, Dengxia Zhang, Weibo Chen, Guohao Li // Тр. II Совещания по обработке материалов взрывом / Ред Г.Е. Кузьмин, В.А. Симонов, И.В. Яковлев, В.Ф. Нестеренко. — Новосибирск, 1982. — С. 51—59.

630090, г. Новосибирск  
Конструкторско-технологический институт  
гидроимпульсной техники СО РАН

Поступила в редакцию  
30/III 1994,  
после доработки — 25/VII 1994