

13. R. Cipson and A. Maček. Eleventh Symposium (International) on Combustion, 1966.
 14. А. В. Соколов, И. В. Мильчаков, Л. В. Дубнов. В сб. «Взрывное дело», № 63/20. М., «Недра», 1967.
 15. В. К. Боболев, И. А. Карпухин, С. В. Чуйко. НТПГВ, 1965, 1, 1.
 16. А. Ф. Беляев. Горение, детонация и работа взрыва конденсированных систем. М., «Наука», 1968.
 17. А. И. Коротков, А. А. Сулимов и др. ФГВ, 1969, 5, 3.
 18. А. В. Обменин, А. И. Коротков и др. ФГВ, 1969, 5, 4.
 19. К. К. Андреев, А. Ф. Беляев. Теория взрывчатых веществ. М., Оборонгиз, 1960.
 20. А. Ф. Беляев, В. К. Боболев и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука», 1973.
-

УДК 662.217+662.215.2

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА ПЛАСТИНЫ, МЕТАЕМОЙ ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА СКОЛЬЗЯЩЕЙ ДЕТОНАЦИИ ВВ

*A. N. Михайлов, A. N. Дремин
(Москва)*

Скорость полета метаемой пластины — часто употребляемый параметр при построении зависимостей свойств соединений, полученных сваркой взрывом, от условий эксперимента. Метание пластины скользящей детонацией ВВ исследовалось в ряде работ. Наиболее полным решением можно считать расчет двумерной схемы метания с использованием метода характеристик, приведенный в работе [1]. Там же для определения максимальной скорости пластины предлагается выражение, полученное из теории одномерного метания:

$$v_{\max} = D \frac{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R - 1}}{\sqrt{1 + \frac{32}{27}R + 1}}, \quad (1)$$

где v_{\max} — скорость пластины; D — скорость детонации заряда; R — отношение удельных (на см^2) масс ВВ и металла. Для корреляции с экспериментальными данными по метанию скользящей детонацией автор предлагает вводить коэффициент 1,2.

Другой наиболее часто используемой зависимостью является формула Гарни [2], выведенная из теории мгновенного взрыва.

$$v = D \frac{0,602R}{2 + R}. \quad (2)$$

В работе [3] использовано выражение, полученное в [4] для случая одномерного метания пластины детонационной волной, падающей на плоскость пластины:

$$\begin{aligned} v &= D \left[1 - \frac{\theta - 1}{\eta \cdot \theta} - \frac{H}{Dt} \theta \right], \\ h &= Dt \left[1 + \frac{\theta - 1}{\eta \cdot \theta} \right] - H, \\ \eta &= \frac{16}{27} \cdot \frac{m_m}{m_{\text{BB}}}, \quad \theta = \left[1 + 2\eta \left(1 - \frac{H}{Dt} \right) \right]^{-1/2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь h — база полета, t — время полета пластины на базе h , H — высота заряда ВВ, m_m и $m_{\text{вв}}$ — удельные (на см^2) массы металла и ВВ.

В работе [2] приводится еще ряд зависимостей для определения скорости полета, полученных Дуваллом, Эркманом, Чедвиком, при выводе которых использованы те же физические предпосылки как и в формулах (1) — (3).

Относительно приведенных выражений можно заметить следующее. Решения (1) и (3) выведены для случая, когда фронт детонации падает плоско на метаемую пластину. Совпадение с результатами экспериментов достигается или искусственно, подбором эмпирических коэффициентов (которые, конечно, не могут быть одинаковыми для различных смесей ВВ), или каким-то случайнным образом (3)¹.

В формуле (3) вообще непонятно, как авторы определяют скорость для случая, когда $H < Dt$. Выражение $H - Dt$ лишено здесь физического смысла, поскольку в условиях скользящей вдоль пластины детонации H и Dt отвечают различным осям координат. Использование теоретического решения двумерной задачи в каждом конкретном случае вряд ли удобно. К тому же оно предполагает знание показателя политропы K , который может сильно отличаться от тройки для слабых смесевых ВВ [5]. Тот же недостаток наблюдается и при пользовании схемой Гарни, в которой привлекает простота решения, определенная обоснованностью физических предпосылок. Больше того, для применения указанных выше зависимостей необходимо знать скорость детонации данного ВВ данных размеров. В работе [2] имеются убедительные, на наш взгляд, аргументы в пользу того, что $\frac{v}{D}$ при постоянном R изменяется в зависимости от высоты заряда. И, наконец, ни в одной из указанных работ не подтверждена убедительно экспериментом возможность применения полученных зависимостей в случае, когда ВВ разбавляется инертным веществом. В то же время разбавление ВВ инертными добавками часто применяется на практике при изготовлении взрывчатых составов с низкой скоростью детонации, необходимой для осуществления сварки взрывом. Представляет интерес получить экспериментально зависимость скорости полета пластины, метаемой скользящей детонацией ВВ в широком интервале изменения высоты заряда, массы пластины и степени разбавления ВВ инертной добавкой.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

При измерении скорости полета пластины обычно пользуются либо скоростной съемкой на приборах типа СФР в режиме щелевой развертки, либо электроконтактными датчиками [1—3]. Для интерпретации полученных результатов или проверки полученных зависимостей по типу (1), (2), (3), необходимо в тех же экспериментах использовать дополнительные устройства для определения скорости детонации. Кроме того, всегда остается вопрос, насколько тот участок заряда, где измеряется скорость полета, находится в области установившейся детонации или установившегося процесса метания. В работе [6] предложен метод определения скорости летящей пластины по изменению сопротивления двух натянутых на пути пластины проволочек; метод обеспечивает одновременно и измерение скорости детонации. Однако для обсчета осциллограмм используется предположение о стационарности процесса метания по длине сварки.

¹ Выражение (3) выведено из расчета импульса продуктов взрыва. Некоторое совпадение результатов расчетов для плоского метания и экспериментов для скользящей волны, по-видимому, можно объяснить тем, что при скользящей детонации давления на границе ВВ металла меньше, а время до прихода волны разряжения больше, чем у заряда той же высоты при падающей детонации, т. е. импульс может не сильно отличаться.

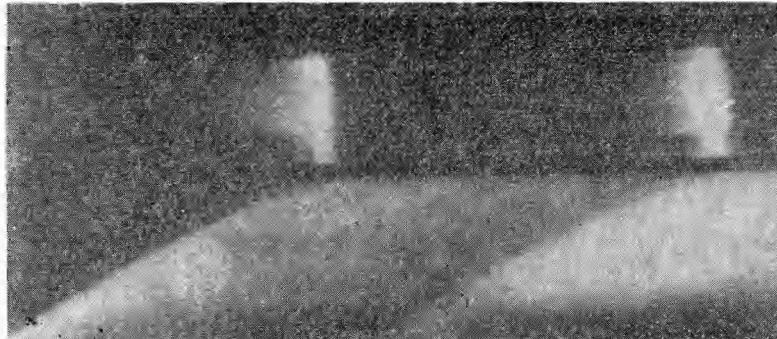


Рис. 1. Типичная фотохронограмма процесса.

Для устранения указанных недостатков в настоящей работе применена следующая методика. В прибор СФР-2м вместо одной вставлены две параллельные щели. Типичная фотохронограмма и ее схема представлены на рис. 1, 2. Яркость подсветки выбирается так, чтобы работать в области нормальных экспозиций пленки. На фотохронограмме видны: 1) отметки прохождения фронтом детонации двух мест заряда ВВ, что позволяет определить скорость детонации заряда на данном участке; 2) два следа от полета пластины на двух участках заряда; это позволяет контролировать стационарность полета или исключить возможные местные изменения скорости, например, из-за разнотолщины заряда; 3) взяв на двух следах полета моменты одного времени, имеем положение пластины в этот момент, т. е. ее угол наклона в процессе полета.

Заметим, что, как отмечалось рядом авторов [1], при больших скоростях полета пластины впереди нее идет воздушная ударная волна, след которой виден на фотохронограммах рядом со следом от пластины. При обсчете следует их различать.

Использовались заряды ВВ насыпной плотности из смеси аммонита с баритовой селитрой с процентным содержанием аммонита 100, 75, 60, 40 и 30. Плотность зарядов из этих смесей соответственно 0,82; 0,93; 1,12; 1,21 г/см³. Селитра бралась марки Х4, аммонит 6ЖВ в расфасовке на патроны по 200 г, смещивание производилось в врачающихся емкостях с деревянными кубиками. Высота заряда была 20, 30, 40, 50 и 60 мм, ширина 90 и длина 250 мм. Использовались пластины из дюрэла толщиной 1,5 и 5 мм и из меди толщиной 2,4 и 6 мм. Размеры пластины 150×250 мм. Баритовая селитра была выбрана как недетонирующая самостоятельно и негигроскопическая добавка.

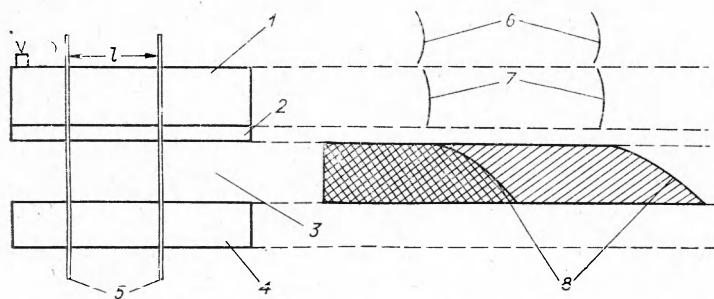


Рис. 2. Схема фотохронограммы.

1 — заряд ВВ; 2 — метаемая пластина; 3 — воздушный зазор; 4 — нижняя пластина; 5 — проекция двух щелей на изображение экспериментальной сборки; 6 — засветка от разлетающихся продуктов взрыва; 7 — засветка от прохождения фронта детонационной волны; 8 — следы полета пластины от двух щелей.

Чтобы избежать обтекания продуктами взрыва пластины и перекрытия ими света от подсветки, помимо широкой металлической пластины использовалась боковая защита заряда инертными брусками (плексиглас, через который проводилось фотографирование, был шириной 40 мм). Это позволяет ослабить действие волн разрежения из-за разлета продуктов взрыва с боковой поверхности и считать, что все определяется волной разрежения с верхней свободной поверхности заряда, даже если ширина заряда немного меньше, чем две его высоты (так принято делать, чтобы заряд считался плоским).

При проведении исследований использована методика рационального планирования экспериментов, описанная в [7]. Большой комбинационный квадрат строился для четырех факторов: a — высота заряда, b — база полета, c — масса пластины на см^2 , d — процент аммонита в смеси. Каждый из факторов принимал по 5 значений.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В таблице указаны значения факторов a , b , c , d , отвечающие условиям экспериментов, а также измеренные значения скорости ($v_{\text{эксп}}$). Усреднение полученных данных по указанной методике позволило построить зависимости скорости полета от каждого отдельного фактора при средних значениях остальных (рис. 3, 4). Обработка результатов позволила получить следующие практически совпадающие зависимости скорости полета:

$$v = \frac{2760}{c+2} + 6,6a + 15b + 7d - 800, \quad (4)$$

$$v = \frac{2760}{c+2} + 870a^{0.16} + 15b + 466d^{0.27} - 300. \quad (5)$$

Выражение (4) значительно проще для расчета и использовалось в дальнейшем. Значения скоростей были рассчитаны по зависимости (4). В таблице представлены относительные отклонения. Среднее по всем 25 точкам отклонение составляет 12%. Если провести усреднение отклонений отдельно по различным факторам, то они составят:

Фактор	a	b	c	d
Относительное отклонение	12	13	13	11

Все зависимости вносят примерно одинаковый вклад в ошибку расчетной скорости.

Полученные зависимости специально проверялись при сочетании факторов, которые не входили в комбинационный квадрат. На рис. 5

Номер точки	a , мм	b , мм	c , $\text{г}/\text{см}^2$	d , %	$v_{\text{эксп}}$, м/с	$v_{\text{расч}}$, м/с	$\frac{v_p - v_{\text{эксп}}}{v_{\text{эксп}}} \cdot 100$	Номер точки					$v_{\text{эксп}}$, м/с	$v_{\text{расч}}$, м/с	$\frac{v_p - v_{\text{эксп}}}{v_{\text{эксп}}} \cdot 100$
								a , мм	b , мм	c , $\text{г}/\text{см}^2$	d , %	$v_{\text{эксп}}$, м/с	$v_{\text{расч}}$, м/с		
1	20	10	0,4	40	720	910	26	14	50	10	1,78	100	950	1110	6
2	30	210	0,4	50	1050	930	13	15	60	81	1,78	75	890	980	10
2	30	210	0,4	50	1000	930	13	16	20	43	1,56	100	480	590	23
3	40	410	0,4	75	1300	1200	8	17	30	613	1,56	30	380	200	42
4	50	810	0,4	30	1000	1010	1	18	40	83	1,56	40	380	360	5
5	60	610	0,4	100	1830	1540	16	19	50	23	1,56	75	630	590	6
6	20	81	1,35	50	770	630	18	20	60	103	1,56	50	670	600	10
7	30	101	1,35	75	975	910	7	21	20	615	1,34	75	350	330	6
8	40	211	1,35	100	920	1020	11	22	30	815	1,34	100	550	600	9
9	50	611	1,35	40	750	730	3	23	40	1015	1,34	30	260	200	23
10	60	411	1,35	30	550	700	27	24	50	415	1,34	50	310	320	3
11	20	211	1,78	30	280	300	7	25	60	215	1,34	40	270	290	7
12	30	411	1,78	40	580	470	19								
13	40	611	1,78	50	580	630	9								

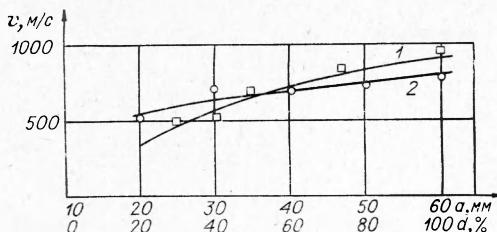


Рис. 3. Зависимость скорости полета от высоты заряда (a) и процентного содержания аммонита в смеси (d) при средних значениях остальных факторов.
1 — $v=f(d)$; 2 — $v=f(a)$.

показаны результаты этих экспериментов. Видно, что расчетные кривые лежат в пределах экспериментального разброса. Измеренные скорости детонации зарядов из различных смесей и различной высоты представлены на рис. 6.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное выражение для скорости полета дает возможность наглядно представить степень влияния различных факторов. Известно, что скорость полета сильно зависит от R . Результаты работы показывают, что основной вклад в эту зависимость дает вес пластины. Влияние высоты заряда значительно слабее. Вторым фактором по силе влияния на скорость является степень разбавления ВВ инертной добавкой. Слабо изменяется скорость полета при изменении базы полета. Это вполне согласуется с утверждением авторов [1, 2] о том, что пластина набирает почти максимальную скорость уже на базе равной 0,5—1 толщине пластины.

Представляло интерес сравнить полученные зависимости с известными ранее (рис. 7). Отдельные кривые действительно согласуются с выражениями (1) и (2). В общем же случае говорить о совпадении нельзя. Это объясняется неправильным выбором системы координат. На возможность построения кривых скорости полета в таких координатах лишь для ВВ с неизмененной скоростью заряда при различной высоте указывал Шрибман [2]. Из его данных видно, что кривые в координатах $\frac{v}{D} = f(R)$ для тонких зарядов тримонита лежат заметно выше, чем для толстых. Эта же тенденция следует и из наших результатов (рис. 8). Для приведенных здесь смесей кривые при $a=20$ мм отличны от кривых при $a=40$ или 60 мм, которые практически совпадают. Заметим, что в этой области изменения высот заряда мало отличаются и скорости детонации (см. рис. 6).

Гораздо лучшее совпадение наблюдается для зарядов различной высоты, если ее влия-

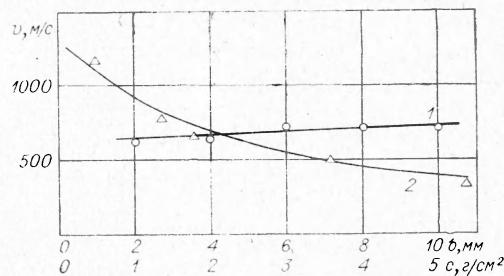


Рис. 4. Зависимость скорости полета от базы полета (b) и веса пластины (c) при средних значениях остальных факторов.
1 — $v=f(b)$; 2 — $v=f(c)$.

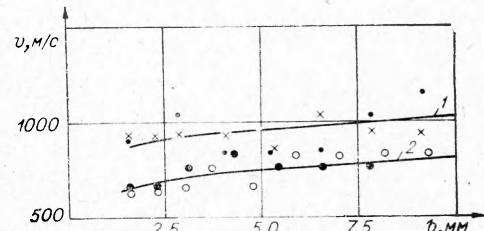


Рис. 5. Экспериментальная проверка полученной зависимости при значениях факторов, не вошедших в большой комбинационный квадрат (точки — результаты, полученные на различных щелях).
1 — $a=50$ мм, $c=1,35$ г/см 2 , $d=75\%$; 2 — $a=30$ мм, $c=1,78$ г/см 2 , $d=75\%$.

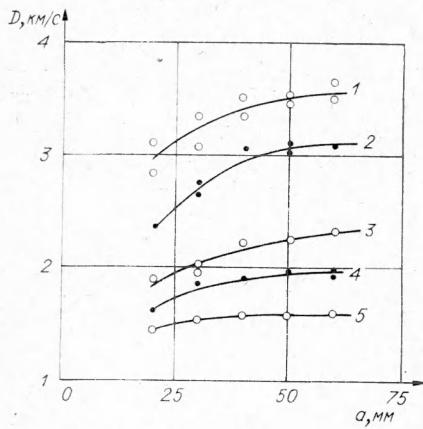


Рис. 6. Зависимость скорости детонации от высоты заряда ВВ для различных смесей.

$d, \%$: 1 — 100, 2 — 75, 3 — 50, 4 — 40, 5 — 30.

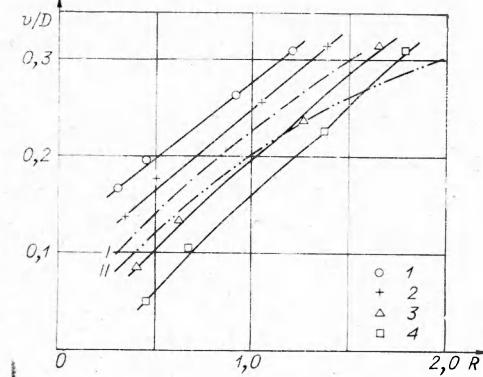


Рис. 7. Зависимость относительной скорости полета (v/D) от отношения удельных масс ВВ и пластины (R) для зарядов высотой 20 мм при различном процентном составе смеси.

$d, \%$: 1 — 100, 2 — 75, 3 — 50, 4 — 40. I — расчет по формуле (1); II — расчет по формуле (2).

ние представлять в координатах $v=f(R)$ (рис. 9). Разница в скоростях в этом случае около 10% и тем меньше, чем меньше отношение R . Однако для смесей ВВ — инертная добавка различного процентного содержания функции $v=f(R)$ отличаются. Из рис. 9 легко видеть, что кривые для различных смесей нельзя совместить простым пересчетом на количество активного ВВ. Вероятно, играет роль плотность разбивателя и условия для протекания взрывной реакции аммонита чистого и в смеси.

Отметим одну интересную закономерность, позволяющую считать скорость соударения основным параметром, определяющим условия осуществления сварки взрывом. В работе [8] для многих металлов экспериментально получены зависимости угла соударения (γ) и скорости точки контакта (v_k), которая определяет нижнюю границу процесса охватывания:

$$v_k \geq 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho v_k^2}}, \quad (6)$$

где H_v — микротвердость, ρ — плотность металла. Автор объясняет возможность сварки в этих режимах условиями образования потока

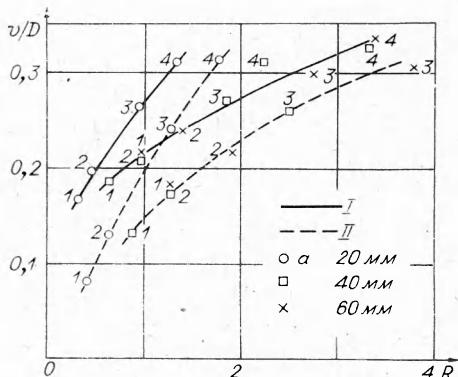


Рис. 8. Зависимость v/D от R для зарядов различной высоты.

I — $d=100\%$; II — $d=50\%$, $c, \text{ г}/\text{см}^2$: 1 — 1,35; 2 — 1,78; 3 — 3,56; 4 — 5,34.

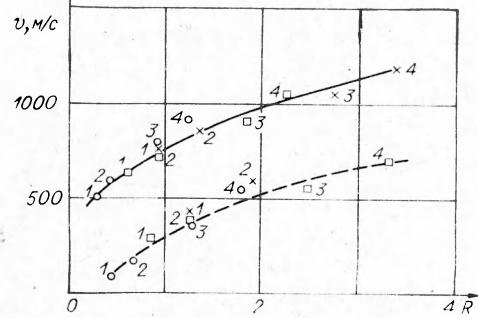


Рис. 9. Зависимость скорости полета от параметра R . Обозначения см. на рис. 8.

массы вещества, необходимого для самоочищения поверхностей. На наш взгляд, этот критерий представляет количественное выражение условия сварки, выдвинутого еще в ранних работах [1, 9], где показано, что давление соударения должно быть больше некоторого (какого — неизвестно) критического. Действительно, условие (6) можно переписать $v_{kp} \cdot v \geq \text{const} = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho}}$. В [10] приводится несколько выражений, определяющих связь v_k и скорости соударения пластин, которые при углах, обычно применяемых, практически совпадают:

$$v = 2v_k \cdot \sin \frac{\gamma}{2} = v_k \cdot \sin \gamma = v_k \cdot \operatorname{tg} \gamma = v_k \cdot \gamma.$$

Таким образом, условие нижней границы сводится к

$$v \geq 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho}} \text{ или } \rho v^2 \geq 1,3 H_v. \quad (7)$$

В свою очередь, ρv^2 с тем или иным коэффициентом, зависящим от принятой модели расчета, определяет давление, возникающее при соударении. Выражение (7) с ясным физическим смыслом, определяющим необходимое для самоочищения поверхностей давление соударения, гораздо проще (так как необходимо задаться лишь одной величиной — скоростью соударения) и, на наш взгляд, более предпочтительно в качестве количественного критерия, чем (6).

Заметим, что выражения (6) и (7) не являются единственным критерием сварки. Необходимо иметь в виду первый критерий, требующий осуществления дозвукового течения в окрестности точки соударения [1]. Это, например, исключает образование сварного соединения при плоском ударе ($v_k \rightarrow \infty$), даже если критерий (7) выполняется.

Аналогично можно упростить и выражение для верхней границы сварки, полученное в [8]. Там, при определении количества тепла, выделяющегося на поверхности раздела, используется выражение $\delta \rho v_k^2 \sin^2 \frac{\gamma}{2}$, где δ — толщина метаемой пластины. Его можно заменить на $\frac{mv^2}{2}$, характеризующую кинетическую энергию единицы поверхности летящей пластины. Помимо упрощения выражения, эта замена определит и более ясный физический смысл. Условие, что кинетическая энергия пластины не должна быть больше некоторой критической, уже выдвигалось и экспериментально подтверждалось в работе [9].

Следует особо обратить внимание на особенность детонации смесей ВВ — инертный разбавитель. Из рис. 6 видно, что чем сильнее разбавлена смесь, тем меньше различие в скоростях детонации зарядов различной высоты. Эта особенность детонации смесевых ВВ, по-видимому, может представлять интерес при практическом их использовании и при изучении механизма детонации таких ВВ.

*Поступила в редакцию
31/V 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. V. Shribman, B. Crossland. The Second Intern. Conference of the center for High Energy forming Ester Park. Colorado, June, 23—27, 1969, p. 731.
3. О. А. Деняченко, В. С. Седых и др. Технология машиностроения. Тр. ВПИ. Волгоград, 1970, стр. 85.
4. Ф. А. Базум, К. П. Станюкович, Г. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.

5. А. Н. Дремин, К. К. Шведов и др. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1971, 1.
6. Г. Е. Кузьмин, В. И. Мали, В. В. Пай. ФГВ, 1973, 9, 4.
7. М. М. Протодьяконов, Р. И. Тедер. Методика рационального планирования экспериментов. М., «Наука», 1970.
8. И. Д. Захаренко. Канд. дисс. Новосибирск, 1973.
9. В. Grossland. 1-й Междунар. симпозиум по плакированию взрывом. ЧССР, Марианский Лазни, 1970.
10. I. Chadek. 1-й Междунар. симпозиум по плакированию взрывом. ЧССР, Марианские Лазни, 1970.

УДК 534.222.2

О МЕТАНИИ ПЛАСТИН ВЗРЫВОМ

Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев
(Москва)

Для экспериментального исследования процессов, протекающих при ударном сжатии конденсированных сред, в ряде случаев необходимо проводить измерения в условиях соударения с образцом плоской пластины с заданными толщиной и сжимаемостью. Пластины в таких экспериментах метаются либо с помощью пороховой или легкогазовой пушки [1, 2], либо энергией взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) [3]. В последнем случае устройство для высокоскоростного метания пластин может быть значительно более компактным и дешевым. В данной работе изложен опыт отработки устройств для разгона до скорости 2—3 км/с компактными зарядами ВВ (не более 1 кг) алюминиевых и плексигласовых пластин (ударников) толщиной 5—10 мм при диаметре плоского участка в момент соударения не менее 60 мм.

Поскольку размеры заряда ВВ ограничены, то профиль давления в детонационной волне имеет форму, близкую к треугольной. Если относительно толстый ударник размещать в непосредственном контакте с зарядом, то после отражения треугольного импульса давления от свободной поверхности может произойти откол, разрушение ударника [3]. Для того чтобы исключить разрушение ударника, его размещают на некотором расстоянии от поверхности заряда ВВ. Как показано в [4], профиль давления на поверхности соударения продуктов взрыва (ПВ) с ударником в этом случае должен иметь «размытый» фронт. Скорость спада давления за фронтом также уменьшается с увеличением ширины зазора, т. е. чем больше ширина зазора между торцом заряда и ударником, тем более толстые или менее прочные ударники можно без разрушения разгонять данным зарядом ВВ.

На рис. 1 приведены осциллограммы опытов по регистрации профилей давления в плексигласовых пластинах, расположенных на различных расстояниях от торца заряда ВВ, а на рис. 2 полученные из этих опытов графики зависимостей максимального давления p_{\max} и промежутка времени τ , в течение которого оно достигается, от расстояния l между поверхностями заряда ВВ и плексигласовой преграды. Датчики в этих опытах располагались в плексигласе на расстоянии 3—4 мм от поверхности, обращенной к ВВ. В качестве зарядов ВВ использовались прессованные тротиловые таблетки с плотностью 1,55 г/см³, диаметром 120 мм и высотой 20 и 34 мм. Детонация заряда инициировалась взрывной линзой диаметром 100 мм и высотой 53 мм,