

## СКОРОСТИ МЕТАНИЯ ПЛАСТИН ИЗ РАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРОДУКТАМИ ДЕТОНАЦИИ

И. М. Воскобойников

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, voskob@chph.ras.ru

Измерены скорости метания пластин из разных материалов продуктами взрыва с торца плоского заряда малой толщины. Скорости метания непористых металлических пластин равной массы из алюминия, стали, меди и тантала отличаются не более чем на 5 %. Различие скоростей метания пористых пластин из одного материала и пластин из слоев разных материалов при равной массе достигает 20 %. Слоистые пластины из алюминия разной пористости удается ускорить до больших скоростей, чем сплошные. При помещении под стальную пластину слоя талька той же толщины, т. е. при возросшей суммарной массе, уменьшение скорости метания не зафиксировано. Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены при волновом подходе к рассмотрению процесса метания.

Ключевые слова: скорость метания пластины продуктами взрыва, состояние и превращение вещества за фронтом ударной волны.

Имеется несколько подходов к оценке ожидаемых скоростей метания пластин продуктами взрыва [1]. В первом, инерционном, предполагается, что скорость метания определяется только соотношением масс пластины и заряда взрывчатого вещества без учета динамических свойств, плотности и других свойств материала пластины. Во втором, волновом, подходе рассматриваются циркуляции волн сжатия и разрежения по пластине, в которых пластина приобретает скорость (кинетическую энергию) при разлете продуктов взрыва.

Эмпирические соотношения, предложенные в рамках инерционного подхода, получили более широкое распространение. Используя их, можно сделать правильные оценки конечных скоростей метания для ряда практически интересных ситуаций при неправильном, чаще всего, описании начального этапа разгона пластины. Последнее обстоятельство порождает недоверие к использованию эмпирических соотношений для нахождения конечных скоростей метания в ситуациях, сильно отличающихся от тех, для которых они были предложены. В инерционном подходе не рассматривается возможная зависимость скорости метания от материала пластины при варьировании плотности и сжимаемости материала, ведущих к большому различиям начальных скоростей контактных границ «продукты взрыва — пластина». В то же время при часто используемых соотношениях масс заряда и пластины (напри-

мер, 2 : 1) вклад начальных скоростей контактных границ нередко оказывается решающим.

Волновой подход лишен отмеченных недостатков, но его применение предполагает знание некоторых характеристик материала пластины, которые не всегда известны, а корректные вычисления проводятся для модельных ситуаций, которые, естественно, не охватывают всех практически интересных случаев, хотя позволяют правильно ориентироваться в них.

Полного направленного исследования влияния материала пластины на приобретаемую ею скорость при фиксированном соотношении масс заряда и пластины, по-видимому, не проводилось, в опубликованных работах недостаточно варьировалась структура материала пластины. Ниже приведены результаты измерения скоростей метания пластин, в том числе изготовленных из нетрадиционных материалов.

Схема проведения опытов представлена на рис. 1. Пластина 1 исследуемого материала разгонялась продуктами взрыва прессованного заряда 2 ТГ 40/60 диаметром 40 мм и высотой  $l = 10$  мм. Плотность заряда  $\rho_0 = 1.65$  г/см<sup>3</sup>, скорость детонации  $D_1 = 7.8$  мм/мкс (показатель политропы продуктов взрыва полагался равным  $n = 2.7$ ). Детонация заряда инициировалась ударом пластины 3 из дюралюминия толщиной 1 мм, подлетающей со скоростью  $2.0 \div 2.5$  мм/мкс. Увеличение скорости пластины 3 до 3 мм/мкс не отражалось

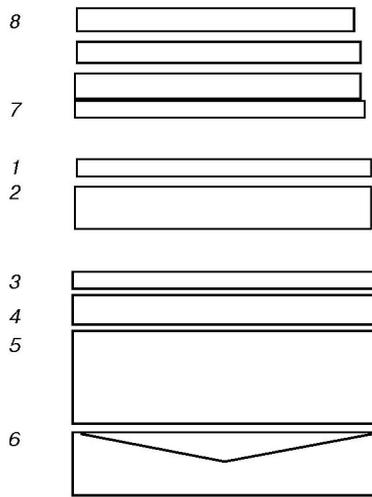


Рис. 1. Схема измерений:

1 — пластина из исследуемого материала, 2 — заряд ТГ, 3-6 — блок инициирования, 7, 8 — блок регистрации

на скорости метания основной пластины 1, что указывает на малое влияние поджатия блоком инициирования продуктов взрыва заряда 2 при выбранной толщине пластины 3. Разновременность инициирования центральной части заряда 2 в сечении диаметром 20 мм не превышала 0.5 мкс, а в сечении диаметром 30 мм — 1 мкс. Алюминиевая пластина для инициирования 3 разгонялась продуктами взрыва заряда 5 ТГ 40/60 плотностью 1.65 г/см<sup>3</sup> или гексогена плотностью 1.7 г/см<sup>3</sup>, высотой 25 ÷ 30 мм и диаметром 40 мм, детонация которого инициировалась плосковолновым генератором 6. Между зарядом и алюминиевой пластиной находилась медная пластина 4 толщиной 5 мм, чтобы исключить подпор алюминиевой пластины продуктами взрыва на базе пролета 15 ÷ 20 мм.

Для нахождения скорости пластины 1 измерялась скорость ударной волны в сборке 8 плексигласовых пластин с зазорами, расположенной на пути полета пластины. На торце сборки перед плексигласом помещалась медная пластина 7, что устраняло подсветку от ударной волны в воздухе при подлете пластины. Измерения проводились в диапазоне интенсивностей волн, где адиабаты Гюгоню плексигласа и материала пластины определены наиболее достоверно. Точность нахождения скорости ударной волны в плексигласе  $u_{s1}$  была не хуже 0.1 мм/мкс. Состояние в меди рассчитывалось при совместном решении уравнений адиабат

Гюгоню плексигласа и меди. Затем при решении уравнений адиабат меди и материала пластины находили скорость пластины 1. Использовались следующие записи адиабат Гюгоню:  $u_s = 3.98 + 1.5u_p$  для меди;  $u_s = 5.25 + 1.39u_p$  для алюминия;  $u_s = 3.8 + 1.58u_p$  для железа при массовых скоростях  $u_p > 1$  мм/мкс;  $u_s = 2.51 + 1.545u_p$  при  $1.4 < u_p < 2.55$  мм/мкс и  $u_s = 3.167 + 1.3u_p$  при  $u_p > 2.55$  мм/мкс для плексигласа.

Изменение базы разгона пластины 1 от 7 до 25 мм не приводило к изменению приобретаемой пластиной скорости, что указывает на завершение разгона пластины на базах до 7 мм. В большинстве опытов база разгона составляла 10 ÷ 15 мм, к моменту удара по сборке пластина была разгружена. Такая схема применялась в [2, 3] для сравнения метательной способности взрывчатых веществ и составов, в том числе содержащих алюминий и перхлорат калия. В части опытов вместо сборки плексигласовых пластин помещался слой жидкости, для которой была известна зависимость яркости свечения ударного фронта (температуры) от давления. Такой способ регистрации (см., например, [4]) имеет более высокое амплитудное и временное разрешение, хотя из-за экспоненциальной зависимости спектральной яркости от давления на фронте волны приходится проводить большее число опытов, когда скорость подлетающей пластины не удается оценить априори с достаточной точностью. Систематического различия в результатах определения скоростей пластины обоими способами не наблюдалось.

Результаты измерений представлены в табл. 1-3 и на рис. 2, 3. Погрешности измерения скоростей метания сплошных медных, танталовых, железных (стальных) и алюминиевых пластин равной массы  $m$  одинаковы. Зависимость скорости метания сплошных металлических пластин от их массы показана на рис. 2. Значительно больше различаются скорости метания пластин разной пористости и слоистых составных пластин равной массы.

На рис. 3 (кривая 1) показаны скорости метания пористых пластин из железа, изготовленных прессованием порошка с размером частиц 0.05 ÷ 0.1 мм. Масса пластин была неизменной и равнялась массе сплошной пластины толщиной 1 мм. В диапазонах плотностей 7.82 ÷ 5.4 и 4.95 ÷ 3.82 г/см<sup>3</sup> скорости метания уменьшаются, а вблизи плотности 5.0 г/см<sup>3</sup>

Таблица 1  
Скорости метания металлических пластин

Материал пластины	Толщина пластины, мм	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$u_{s1}$ , мм/мкс	$w$ , мм/мкс	$m$ , г/см <sup>2</sup>
Cu	1.51	8.92	3.87	$1.14 \pm 0.05$	1.35
Ta	0.77	16.6	4.28	$1.18 \pm 0.05$	1.28
Fe	1.0	7.82	4.60	$1.70 \pm 0.05$	0.78
Al	2.88	2.70	3.86	$1.85 \pm 0.05$	0.76
Fe	0.52	7.82	5.35	$2.35 \pm 0.07$	0.41
Al	1.29 1.50	2.70	4.50	$2.57 \pm 0.07$ (2.35)*	0.35 0.41
Fe	1.44	5.45	4.0	$1.31 \pm 0.07$	0.78
Тальк и Fe	1.2 1.0	2.2 7.82	4.60	$1.70 \pm 0.07$	1.05

\*Экстраполировано по значениям для других толщин.

Таблица 2  
Скорости метания слоистых пластин из алюминия разной пористости

$h_{cont}$ , мм	$h_{por}$ , мм	$k$	$w$ , мм/мкс
2.89	—	—	1.85
1.86	1.55	0.33	2.00
1.28	2.52	0.37	2.20
0.98	2.77	0.33	1.80

Таблица 3  
Скорости метания слоистых пластин из разных материалов

Основная пластина		Промежуточный слой		$w$ , мм/мкс
материал	толщина, мм	материал	толщина, мм	
Fe	1	—	—	$1.70 \pm 0.07$
		Тальк ( $\rho_0 = 2.2$ г/см <sup>3</sup> )	1	1.77 (1.5)
		Al ( $\rho_0 = 2.71$ г/см <sup>3</sup> )		1.27 (1.46)
		Плексиглас ( $\rho_0 = 1.18$ г/см <sup>3</sup> )		1.44 (1.57)
		Графит ( $\rho_0 = 2.0$ г/см <sup>3</sup> )		1.30 (1.51)
		VN ( $\rho_0 = 1.75$ г/см <sup>3</sup> )		1.50 (1.53)
Cu	1.5	—	—	1.15
	1.3	Тальк	0.8	1.25 (1.3)
	1.02		1.91	1.05 (1.7)
	0.72		3.03	1.00 (2.0)
	0.3		4.67	0.65

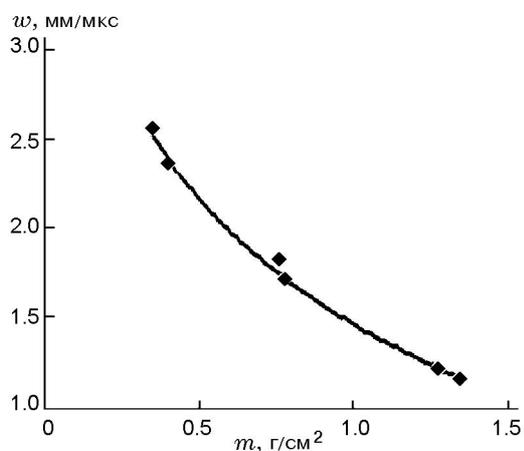


Рис. 2. Зависимость скорости метания от массы сплошных металлических пластин

(пористость пластин  $k = 0.36$ ) возрастают. На рис. 3 представлены также (кривая 2) скорости метания сборок из пяти медных фольг толщиной 0.3 мм каждая. Зазоры между фольгами варьировались для получения разной пористости. Отметим немонотонное изменение скоростей метания с пористостью (особенность наблюдается при тех же пористостях, что и в случае прессованных пластин), причем на начальном участке пористости спад скоростей меньше. Скорость метания сборки из фольг той же пористостью 0.4 больше скорости метания сплошной пластины той же массы.

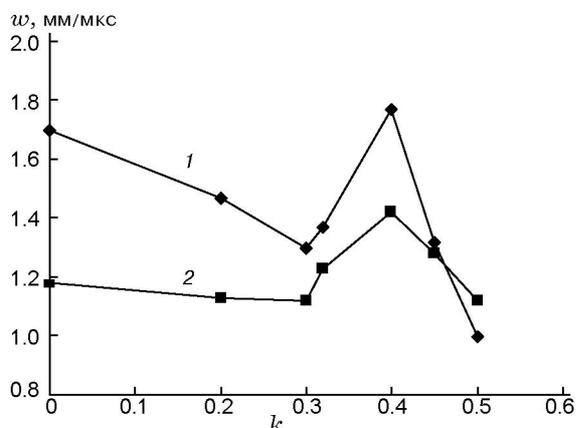


Рис. 3. Зависимость скорости метания от пористости металлических пластин из железа (1) и сборки из медных фольг (2)

Падение скорости метания (точнее, скорости ударной волны в сборке плексигласовых пластин, которая затем пересчитывалась на скорость метания) с увеличением пористости до 0.3 и выше 0.4 может быть вызвано рядом причин, в том числе и тем, что подлетающие к медному экрану 7 пластины имеют остаточную пористость. В [5] было показано, что при переходе ударной волны из сплошного экрана в пористую пластину падение давления в экране тем больше, чем больше пористость пластины. Результат будет подобным, если перейти в систему координат, где пластины разной пористости подлетают к сплошному экрану с одинаковой скоростью. Существенно, что нарушение монотонного изменения скорости метания происходило при тех же пористостях, при которых увеличивалось передаваемое в нитрометан давление от продуктов взрыва через образцы алюминия разной пористости [6]. В обоих вариантах продукты взрыва динамически менее жестки, чем материал пористых пластины или образца.

Качественное объяснение наблюдаемому эффекту может быть дано в рамках слоистой модели пористого образца Тувенина [7]. Пористый образец рассматривается как набор фольг сплошного вещества, разделенных промежутками такой толщины, что плотность системы равна плотности пористого образца. Для выбранного соотношения сжимаемостей материалов экрана (в опыте — продуктов взрыва) и пластины возможны следующие ситуации:

1) время, за которое свободная поверхность 1-й фольги системы достигает 2-й фоль-

ги, меньше времени циркуляции волн по 1-й фольге; параметры волнового процесса определяются массовой скоростью на контактной границе «1-я фольга — экран перед пористым образцом»;

2) время, за которое свободная поверхность 1-й фольги достигает 2-й фольги, больше или равно времени циркуляции волн в 1-й фольге (относительно большая пористость); параметры волнового процесса в пористом образце определяются массовой скоростью во 2-й фольге после удара по ней 1-й фольги.

Граница между указанными пористостями образцов  $k_{cr}$  зависит от массовой скорости в 1-й фольге системы на границе контакта с продуктами взрыва (ударником) и может быть оценена из геометрических соображений (см. ниже рис. 4) по выражению [6]

$$\frac{k_{cr}}{1 - k_{cr}} = 2 \frac{u_{p1}(u_{s1} - u_{p1})(u_{s2} + c_1 + u_{p1})}{u_{s1}^2 c_1},$$

где  $u_{s1}$ ,  $u_{p1}$ ,  $c_1$  — скорость ударной волны, массовая скорость и скорость звука за фронтом волны в 1-й фольге,  $u_{s2}$  — скорость ударной волны (относительно вещества), образовавшейся после выхода волны разрежения со свободной поверхности 1-й фольги на контактную границу «фольга — продукты взрыва (ударник)». Скорость свободной границы 1-й фольги полагалась равной  $2u_{p1}$ .

В работе [6] указанное выражение правильно описывает особенности передачи динамических давлений через алюминиевые образцы разной пористости от продуктов взрыва тротила в нитрометан (ожидалось при пористости  $k = 0.42$ , наблюдалось при  $k = 0.4 \div 0.48$ ) и увеличение скорости метания медных и стальных пластин (ожидалось при  $k = 0.38$ , наблюдалось при  $k = 0.3 \div 0.38$ ).

Были выполнены опыты с метанием двухслойных пластин из алюминия (материал выбран для облегчения изготовления образцов). Соотношение толщин контактирующего с зарядом сплошного ( $h_{cont}$ ) и внешнего ( $h_{por}$ ) слоев пористостью 0.33 варьировалось при неизменной массе пластины. Результаты представлены в табл. 2. При некотором соотношении толщин слоев (здесь 1 : 2), зависящем от материала пластины и пористости внешнего слоя, скорость слоистой пластины имеет максимум, который здесь больше скорости сплошной пластины.

Положение максимума соответствует одновременному выходу на внешнюю поверхность пластины первой волны от продуктов взрыва и второй волны, возникающей при падении на контактную границу «сплошной алюминий — продукты взрыва» волны разрежения от границы контакта сплошного алюминия с пористым алюминием. Это проверялось при записи яркости свечения ударной волны (схема опытов подобна использованной в [4]) в  $\text{CCl}_4$ , который находился за пластиной. Яркость свечения ударного фронта в  $\text{CCl}_4$  при выходе первой волны почти вдвое меньше, чем при выходе второй волны. В случае, когда толщина пористого образца меньше оптимальной, начальное свечение ударного фронта в  $\text{CCl}_4$  возрастает при догоне первой волны второй [8].

Были измерены скорости метания  $w$  пластин из железа и меди при использовании со стороны заряда прокладок из талька, нитрида бора, алюминия, плексигласа и графита. Полученные значения  $w$  приведены в табл. 3, где также указаны плотности  $\rho_0$  материала прокладки, для железных пластин в скобках приведены ожидаемые скорости с учетом изменившейся суммарной массы, а для медных пластин — ожидаемые скорости в отсутствие прокладок. Толщина прокладок под пластинами из железа была 1 мм. При прокладке из талька снижения скорости метания не наблюдалось. При прокладке из нитрида бора оно было небольшим, а при прокладках из алюминия и графита — возросло.

Использование прокладки из талька той же толщины, что пластина, не приводит к уменьшению скорости метания железной и медной пластин при увеличении суммарной массы. Известно о превращении нитрида бора и талька за фронтом ударной волны с уменьшением удельного объема при давлениях больше 10 и 17 ГПа соответственно. Превращения в графите происходят при давлениях выше 23 ГПа.

При соотношении толщин сплошной пластины и заряда 1 : 10 конечная скорость метания определяется вкладом первой циркуляции волн по пластине. Это находит отражение в корреляции между конечной скоростью метания пластины из железа и начальной скоростью контактной границы «продукты взрыва — пластина» для разных взрывчатых веществ [2]. На рис. 4 схематически показано увеличение начальной массовой скорости в материале пластины в случае использования про-

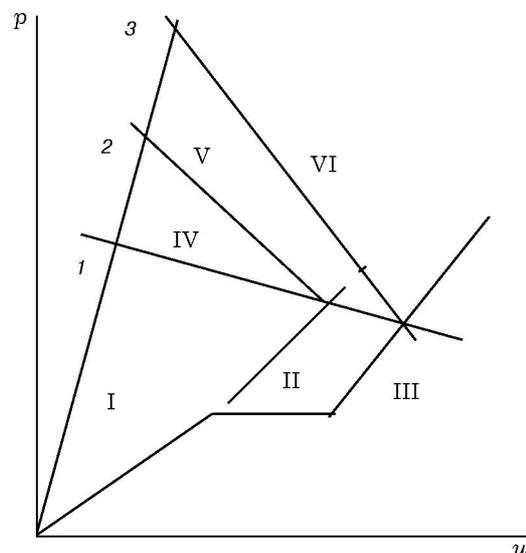


Рис. 4. Диаграмма «давление — массовая скорость» процесса распространения ударной волны к пластине через слой вещества промежуточной жесткости

кладки между зарядом и пластиной из материала, динамическая жесткость которого является промежуточной между продуктами взрыва и материалом пластины. Точка 1 соответствует отсутствию прокладки, линия IV — изоэнтропа продуктов взрыва, линия I — ударная адиабата материала пластины. Точка 2 — состояние в пластине при использовании прокладки из материала с промежуточной динамической жесткостью, линия II — ударная адиабата материала прокладки, линии V и VI — изоэнтропы нагруженного состояния материала прокладки. Увеличение будет больше, если материал прокладки претерпевает превращение с уменьшением удельного объема и увеличением скорости звука за фронтом ударной волны (точка 3), кривая III — ударная адиабата материала прокладки в этом случае.

При использовании прокладок из графита и из алюминия снижение скорости метания пластины из железа было одинаковым, поскольку давления, необходимые для перехода графита в алмаз, не достигались на контактной границе с зарядом ТГ. С большой вероятностью можно утверждать, что эффект будет иным при использовании для метания пластины заряда октогена плотностью  $1.86 \text{ г/см}^3$  из-за большего давления детонации. При толщине прокладки из талька более 1.9 мм скорость метания пластины из меди уменьшалась из-за за-

тухания волны в прокладке, что наряду с другими причинами связано с более быстрым затуханием волны в прокладке, материал которой претерпевает превращение с уменьшением удельного объема.

Таким образом, в работе показано, что скорости метания пластин, изготовленных из материалов с различными начальными плотностями, сжимаемостями и структурой, могут значительно отличаться при постоянном соотношении масс заряда и пластины. Полученным результатам может быть дано объяснение только в рамках волнового рассмотрения процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Физика взрыва** / Ф. А. Баум, Л. П. Орленко, К. П. Станюкович, В. П. Челышев, Б. И. Шехтер. — М.: Наука, 1975.
2. **Воскобойников И. М., Воскобойникова Н. Ф.** Оценка метательного действия взрывчатых веществ // Детонация: Материалы 2 Всесоюз. совещания по детонации. — Черногловка, 1981. — С. 64–67.
3. **Воскобойников И. М., Котомин А. А., Воскобойникова Н. Ф.** Влияние инертных добавок на скорость метания пластин смесевыми взрывчатыми веществами // Физика горения и взрыва. — 1982. — Т. 18, № 6. — С. 706–708.
4. **Воскобойников И. М., Долгобородов А. Ю., Афанасенков А. Н.** Исследование затухания ударных волн малой длительности в конденсированных веществах // Физика горения и взрыва. — 1983. — Т. 19, № 5. — С. 135–138.
5. **Гоголя М. Ф., Воскобойников И. М., Простосердов А. И.** Ударное сжатие пористого алюминия // Физика горения и взрыва. — 1985. — Т. 21, № 3. — С. 110–113.
6. **Воскобойников И. М., Гоголя М. Ф., Воскобойникова Н. Ф. и др.** Возможная схема описания ударноволнового сжатия пористых образцов // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 236, № 1. — С. 75–78.
7. **Thouvenin J.** Effect of a shock wave on porous solid // Proc. 4th Symp. (Intern.) on Detonation. — 1965. — P. 258–265.
8. **Долгобородов А. Ю., Воскобойников И. М.** Скорости волновых возмущений за фронтом ударной волны в алюминии // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 25, № 1. — С. 88–93.

*Поступила в редакцию 2/VII 2008 г.*