

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗГОНА ПЛАСТИН ПРОДУКТАМИ ВЗРЫВА ЧЕРЕЗ ЗАЗОР

*В. А. Огородников, С. Ю. Пинчук, В. Ю. Шемякин,
А. Г. Иванов, Д. В. Григорьев, Е. З. Новицкий*

(Москва)

Пластины, разогнанные с помощью взрывчатого вещества (ВВ) до скоростей несколько километров в секунду, широко используются при экспериментальном исследовании процессов, протекающих при ударном сжатии конденсированных сред. При этом наиболее важным параметром является скорость полета метаемой пластины. В ряде случаев по конструктивным особенностям или с целью предотвращения разогрева пластины, либо исключения возможности ее откольного разрушения между зарядом ВВ и метаемой пластиной вводится воздушный зазор (Δ). В связи с этим возникает вопрос о влиянии величины зазора на конечную скорость пластины, а также вопросы расчетного описания динамики разгона пластин, связанные с применимостью тех или иных уравнений состояния продуктов взрыва (ПВ) и выбором схемы счета.

Эксперимент

Экспериментально фотохронографическим и электроконтактным методами определялась конечная скорость пластины из меди М1, стали Ст. 3, алюминия АМЦ толщиной 1,3; 1,5 и 3,9 мм соответственно, метаемой зарядами ВВ высотой 40 мм, и время пролета пластиной базы 60 мм. Основной заряд ВВ диаметром 120 мм инициировался генератором плоской волны со свинцовой линзой [1]. В качестве ВВ использовался сплав тротила с гексогеном (30/70) при плотности 1,72 г/см³. Между зарядом ВВ и стальной пластиной, вплотную к последней, помещалась прокладка из плексигласа толщиной 1 мм. В опытах зазор между зарядом ВВ и прокладкой из плексигласа составлял величину 0, 2, 5 и 10 мм. Отношение массы пластины к массе ВВ оставалось во всех опытах неизменным и составляло 0,18. Выбор этого отношения обусловлен тем, что в этом случае отбор энергии пластиной от ВВ близок к оптимальному и такие системы представляют наибольший практический интерес.

Чтобы метаемые пластины в процессе разгона не искажали своей формы, принимались специальные меры. В частности, центральная часть пластины диаметром 60 мм и толщиной h была номинального размера, а периферийная часть пластины утолщалась, или более легкие пластины из алюминия диаметром 60 мм запрессовывались в более тяжелые стальные диски той же толщины. Качественно процесс разгона таких пластин с облегченной центральной частью рассмотрен в [2].

В опытах с каждым из зазоров фотохронографическим методом регистрировалась $x-t$ -диаграмма движения свободной поверхности разгоняемых пластин. Характер этих диаграмм свидетельствует о том, что независимо от величины зазора Δ на расстоянии $x = 60$ мм от их начального положения пластины имеют постоянную конечную скорость v . Эти опыты показали, что асинхронность полета различных участков пластины, ограниченных диаметром 30 мм, к плоскости, удаленной на $x = 60$ мм от ее начального положения, не превышает 0,05 мкс.

Точные измерения v и интервала времени T пролета пластиной базы от $x = 0 \div 60$ мм для всех значений Δ выполнены с помощью электроконтактов. Помимо контактов (провод марки ПЭВ диаметром 0,05 мм), приклеенных на свободную границу пластины ($x = 0$), две группы контактов располагались при $x = 60$ и 66 мм в проекции центрального уча-

Материал пластины	Δ , мм	h , мм	v , км/с	T , мкс	v , км/с	T , мкс
Fe Al Cu	0	1,5 3,9 1,3	4,54 4,51 4,52	15,03 15,23 15,41	4,0 — —	16,04 — —
Fe Cu	2	1,5 1,3	4,52 4,56	15,01 16,42	— —	— —
Fe Al	5	1,5 3,9	4,52 4,55	15,49 15,35	4,10 —	16,40 —
Fe Cu	10	1,5 1,3	4,56 4,54	16,28 16,38	4,09 —	17,28 —

стка пластины диаметром 25 мм. Последние две группы контактов защищались от действия воздушной ударной волны [1]. Такая схема расположения контактов и использование электрооптической методики регистрации [3] позволяли измерять v с точностью $\pm 1,5\%$ и T с точностью $\pm 0,5\%$. Результаты, усредненные по 3—4 опытам, приведены в таблице. Там же (последние 2 столбца) даны результаты дополнительных опытов с пластинами из стали постоянной толщины 1,5 мм и диаметром 120 мм.

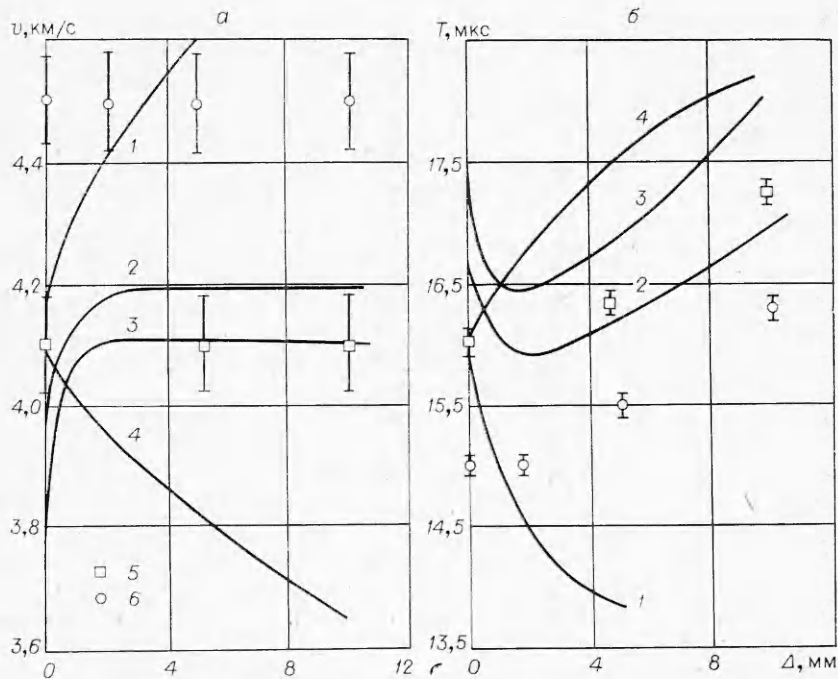
Из представленных в таблице данных можно сделать следующие выводы:

1) значение v равнотолщинной стальной пластины составляет 4,09—4,10 км/с и не зависит от Δ в интервале от 0 до 10 мм. Величины скоростей, полученных в опытах с аналогичными пластинами, но имеющими более тяжелую периферийную часть при диаметре более 60 мм, практически также не зависят от Δ и равны 4,52—4,56 км/с. Превышение скорости на $\sim 10\%$ в последних опытах связано, по-видимому, с двумерными эффектами, а именно, с перетеканием части ПВ с периферийной области пластины к центру;

2) время пролета пластиной базы 60 мм, оставаясь примерно постоянным при зазорах 0 и 2 мм, при дальнейшем увеличении зазора возрастает.

Обсуждение результатов

Процесс разгона пластин в исследуемой системе рассчитан на ЭВМ. Одномерные расчеты выполнены в гидродинамическом приближении методом конечных разностей. Поскольку заряд ВВ в опытах инициировался свинцовой линзой (0,7 кг свинца + 0,3 кг ВВ), то для оценки ее влияния на конечную скорость пластины проведены расчеты с различными способами ее моделирования: инициирование основного заряда ВВ от свободной границы; инициирование заряда ВВ от жесткой стенки, моделирование линзы слоями свинца и ВВ с массами, близкими к их фактическим массам в линзе, при этом инициирование ВВ, входящего в линзу, осуществлялось от его свободной границы. Критерием правильности моделирования линзы считалось совпадение конечной скорости пластины, полученное с кубическим уравнением состояния ПВ основного заряда ВВ в задаче без зазора, со значением величины конечной скорости в опыте без зазора. Выбор этого критерия связан с тем, что кубическое уравнение состояния достаточно точно аппроксимирует уравнение состояния ПВ конденсированных ВВ в диапазоне больших плотностей и позволяет получать в этих случаях правильные количественные результаты.



Зависимость конечной скорости пластин (а) и времени пролета базы 60 мм (б) от величины зазора.

1 — уравнение состояния ПВ в форме идеального газа; 2, 3 — уравнения состояния ПВ Зубарева [3, 4], 4 — кубическое уравнение состояния ПВ; 5 — равноплотинная стальная пластина; 6 — стальная пластина с более тяжелой периферийной частью.

Результаты расчетов и опытов без зазора показали, что наиболее удачно фокусирующая линза в одномерных расчетах моделируется слоями свинца и ВВ с массами, равными фактическим массам этих деталей в линзе, при возбуждении детонации на свободной поверхности ВВ линзой. Эта модель и применялась в дальнейших расчетах. Для инертных материалов использовались уравнения состояния в виде Ми — Грюнайзена, при этом кривая холодного сжатия задавалась в виде

$$p_x = \frac{\rho_0 c_0^2}{n} (\delta^n - 1),$$

где ρ_0 — плотность материала пластин и прокладок; p_x — давление; c_0 — скорость звука при нормальных условиях; $\delta = \rho/\rho_0$; ρ — плотность материалов за фронтом УВ; n — подгоночный параметр.

Для определения зависимости конечной скорости пластины от величины зазора использовались следующие уравнения состояния ПВ: кубическое уравнение состояния ПВ

$$p = A\rho^3, \tag{1}$$

где $A = \text{const}$;

уравнение состояния ПВ типа идеального газа

$$p = \Gamma \delta \rho_0 E \quad (\Gamma = \gamma - 1); \tag{2}$$

уравнения состояния ПВ Зубарева [4, 5].

Уравнения состояния ПВ типа (1), (2) характеризуются постоянной $\gamma = 3$ во всем диапазоне плотностей. Для малых плотностей ПВ (большие зазоры) такое значение γ является сильно завышенным; для типичных ПВ при $\rho \rightarrow 0$ $\gamma = 1,4$. Кроме того, в уравнении типа (1) отсутствует эн-

тропийный разогрев ПВ при прохождении по ним ударных волн. Уравнения состояния ПВ типа [4, 5] имеют примерно правильное значение γ при малых плотностях ПВ, а давление имеет холодную и тепловую составляющие. Результаты расчетов в координатах $v-\Delta$ и $T-\Delta$ приведены на рисунке. Здесь же нанесены результаты опытов.

Сравнение результатов расчетов и экспериментов показывает, что значение величины скорости и времени пролета пластиной базы 60 мм, полученной при использовании кубического уравнения состояния, совпадают с экспериментальными значениями при $\Delta = 0$. Введение зазора приводит к монотонному снижению расчетной скорости и увеличению расчетного времени полета пластины. Это связано с тем, что в расчетах по разгону пластины ПВ через зазор с использованием уравнения (1) происходит переход части энергии ПВ в энергию, не зависящую от плотности, которая не дает вклада в кинетическую энергию пластины.

Расчеты по уравнению (2) дают при $\Delta = 0$ значения скорости и времени полета пластины, совпадающие с величиной скорости, вычисленной с использованием уравнения (1) и эксперимента. Так как в системе без зазора нет сильных ударных волн, т. е. нет энтропийного разогрева ПВ, уравнения (1) и (2) с $\gamma = 3$ действительно не отличаются друг от друга: $A(S) = A = \text{const}$, $A(S)$ — коэффициент в записи уравнения состояния идеального газа в форме $p = A(S)\delta^\gamma$, где $\gamma = 3$, S — энтропия.

При увеличении зазора расчетная скорость возрастает, а время полета пластины уменьшается, что связано с непрерывным ростом положительного дисбаланса энергии в расчете. Под дисбалансом энергии понимается разность между суммой кинетической и внутренней энергий всех расчетных точек системы и начальной энергией системы, определяемой по расчетной калорийности ВВ, отнесенная к начальной энергии системы. Появление дисбаланса энергии в проведенных расчетах для систем с зазорами связано с неточностью расчета сильных волн разгрузки в ПВ, что характерно для разностной схемы счета.

Расчеты с уравнениями состояния [4, 5] дают при $\Delta = 0$ несколько заниженные значения скорости и завышенные времена полета пластины, что может быть связано с неточностью этих уравнений. Рост скорости и уменьшение времени полета пластины при введении зазора до $\sim 1,5$ мм связаны с ростом положительного дисбаланса энергии при расчете волны разгрузки. При дальнейшем увеличении зазора до 10 мм дисбаланс энергии остается постоянным и величина скорости не изменяется, что качественно соответствует результатам эксперимента.

Таким образом, результаты работы показывают, что при расчетном описании разгона пластин ПВ через зазор не применимы простые формы уравнения состояния ПВ типа (1), (2). Уравнения состояния Зубарева [4, 5] могут быть использованы для этой цели после их корректировки. При этом расчеты необходимо проводить методом, исключающим появление дисбаланса энергии при расчете волн разгрузки.

Поступила в редакцию
13/IV 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
2. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6.
3. А. А. Болотов, Б. М. Ловягин и др. ПТЭ, 1975, 3.
4. М. В. Жерноктетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4.
5. А. А. Евстигнеев, М. В. Жерноктетов, В. Н. Зубарев. ФГВ, 1976, 12, 5.