

4. Шидловский В. П. Одномерные неустановившиеся движения вязкого теплопроводного газа с фронтами возмущений.— Численные методы механики сплошной среды, 1977, т. 8, № 1.
5. Fader W. I. Hydrodynamic model of a spherical plasma, produced by Θ -spoiled laser irradiation of a solid particle.— Phys. Fluids, 1968, vol. 11, N 10.
6. Басс Л. П. Конечно-разностные методы решения уравнений переноса в задачах со сложной геометрией. Препринт ИПМ АН СССР, 1975, № 4.
7. Спанье Дж., Гелбар Э. Метод Монте-Карло и задачи переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1972.
8. Bird G. A. Direct simulation and Boltzmann equation.— Phys. Fluids, 1970, vol. 13, N 11.
9. Белоцерковский О. М., Яницкий В. Е. Статистический метод для решения задачи динамики разреженного газа.— ЖВММФ, 1975, т. 15, № 5, 6.
10. Попов Ю. П., Самарский А. А. Полностью консервативные разностные схемы.— ЖВММФ, 1969, т. 9, № 4.
11. Lohn P. D., Lundgren T. S. Strong shock structure.— Phys. Fluids, 1974, vol. 17, N 10.
12. Кудин И. И., Рыков В. А. Отражение ударной волны от твердой стенки.— ЖВММФ, 1973, т. 13, № 5.
13. Кудин И. И., Рыков В. А. О сходимости к центру и отражении сферической волны в газе.— ЖВММФ, 1976, т. 16, № 5.
14. Аристов В. В., Шахов Е. М. Задача о сильном взрыве в разреженном газе.— ЖВММФ, 1979, т. 19, № 5.
15. Махмудов А. А., Попов С. П. Сравнение численных решений уравнений Навье — Стокса и кинетической модели в одномерном случае.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1980, № 5.

УДК 621.791.1

РАЗГОН ПЛАСТИН ДО ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ. УСТРОЙСТВО

*А. Г. Иванов, М. В. Коротченко, Е. З. Новицкий,
В. А. Огородников, Б. В. Певницкий, С. Ю. Пинчук
(Москва)*

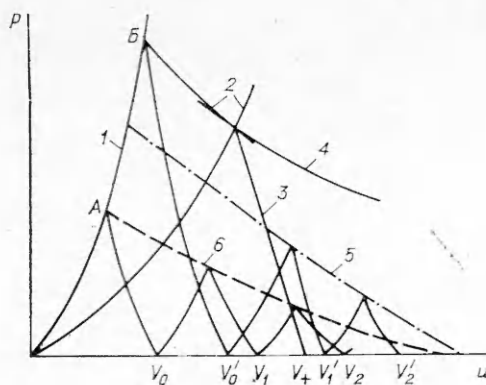
При решении различных задач технического и физического плана зачастую требуется осуществить разгон пластин до высоких скоростей.

В настоящее время среди множества известных способов [1—7] наиболее дешевым и простым по технической реализации следует считать способ разгона пластины продуктами взрыва при детонации на ее поверхности бризантного взрывчатого вещества (ВВ). К повышению скорости разгоняемой пластины приводит использование так называемых буферных систем, когда между зарядом ВВ и пластиной помещается набор пластин с резко отличными акустическими жесткостями [8—10].

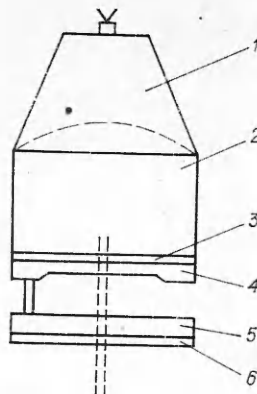
Максимальная скорость, которую может приобрести пластина, находящаяся в контакте с зарядом ВВ (или пластина в буферной системе), равна скорости истечения продуктов взрыва. Последняя приблизительно равна скорости детонации (Д). При скоростях, превышающих $5-6 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}$ ($\sim 0,7 \text{ Д}$), эффективность системы ВВ — пластина быстро падает, и эти скорости можно считать предельными.

Дальнейшее увеличение скорости пластины может быть достигнуто за счет искусственного повышения давления в продуктах взрыва. Известно [7], что, кроме нормального режима, гидродинамическая теория детонации предсказывает также режим пересжатых детонационных волн, которые могут быть осуществлены при ударе по ВВ ударником, летящим со скоростью нескольких километров в секунду. Кроме того, гидродинамическая теория детонации предсказывает существование в детонационной волне зоны повышенных давлений, названной зоной химпика. Для конденсированных ВВ ширина зоны химпика изменяется в диапазоне $0,5-2,0 \text{ мм}$ [11, 12]. Естественно, что на разгон пластины повышенное давление в зоне химпика может оказывать влияние, когда толщина разгоняемой пластины l_2 соизмерима или меньше a — ширины зоны химпика. Разгон тонкой пластины продуктами взрыва сопровождается волновым характером обмена энергией между пластиной и продуктами взрыва с временем волнообмена $2l_2U^{-1}$ (U — скорость ударной волны в пластине). Можно представить два случая взаимодействия химпика с пластиной.

1. Если $l_2 \gg a$, то ударная волна химпика затухает на толщине пластины и скорость последней определяется состоянием Чепмена — Жуге. В координатах давление p — массовая скорость u процесс разгона, соответствующий этому случаю, представлен на фиг. 1, где кривые 1—3 — ударные адиабаты пластины, первого сжатия ВВ и ударника; 4, 5 —



Ф и г. 1



Ф и г. 2

изэнтропы разгрузки ВВ; 6 — пзэнтропа отражения продуктов взрыва. Состояние пластины при отражении от нее детонационной волны определяется точкой А; пластина приобретает скорость $V_0 \approx 2u_A$. Скорость пластины в следующих волнообменах есть V_1, V_2 и т. д. Предельная расчетная скорость пластины в этом случае равна скорости детонации, а практически (из-за конечных размеров ВВ) всегда меньше ее.

2. Если $i_2 \leq a$ и ударник имеет скорость V_+ , то на первом этапе процесса разгона определяющей является ударная адиабата 2 первого сжатия холодного ВВ (фиг. 1), так как в течение некоторого времени ВВ не претерпевает существенных изменений. Пластина нагружается до состояния В, приобретая скорость $V'_0 \approx 2u_B$ (фиг. 1). На следующем этапе разгона состояние пластины определяется промежуточным состоянием между состояниями в химпике и в точке Чепмена — Жуге (V'_1, V'_2 и т. д.). Ясно, что в такой ситуации пластина может быть разогнана до больших скоростей по сравнению с первым случаем. Таким образом, создавая режим пересжатой детонации и используя зону химпика, можно осуществить разгон тонких пластин до скоростей, превышающих величину скорости нормальной детонации. Эта идея реализована нами в двухкаскадном устройстве разгона пластин, содержащем ВВ в каждом каскаде.

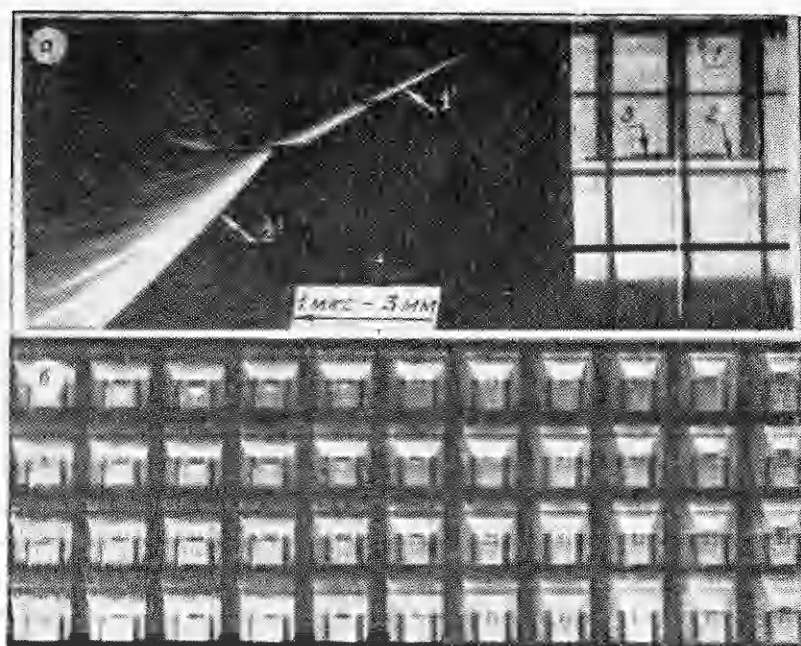
На фиг. 2 приведена принципиальная схема экспериментального двухкаскадного устройства. Генератор плоской ударной волны 1 инициирует основной заряд ВВ 2. Основной заряд через пластину 3 из плексигласа разгоняет стальной ударник 4 (каскад I) на базе полета 86 мм. Ударник нагружает второй каскад, состоящий из слоя ВВ 5 (плексигласа в отдельных опытах) и ускоряемой тонкой пластины 6.

Скорость полета пластины должна зависеть от материала, толщины и скорости ударника, а также от толщины слоя ВВ, толщины и материала пластины. Для выяснения этих зависимостей проведена серия экспериментов и расчетов.

В опытах непрерывное измерение зависимостей путь — время полета ударника и пластины проводилось с помощью установки СФР-3М в режиме фоторегистра (проекция щели СФР-3М условно показана на фиг. 2 двумя штриховыми линиями). Развитие процессов, происходящих во взрывном устройстве, контролировалось второй установкой СФР-3М в режиме лупы времени при частоте съемки 10^6 кадр·с⁻¹.

Типичный целевой снимок приведен на фиг. 3, а. Расчет скорости ударника 1 и пластины 2 (цифрой 3 здесь обозначен слой ВВ) по фотохронограммам проводился исходя из наклона светящихся границ 1' и 2' соответственно, усредненного для базы полета 50 мм. Фиг. 3, б демонстрирует характер развития процессов разгона ударника и пластины.

По данным [13] в интервале скоростей 5—15 км·с⁻¹ фронт воздушной УВ опережает летящее тело на 5—10%. В каждом конкретном случае ско-



Ф и г. 3

рости движения ударника и пластины рассчитывались с поправкой на их опережение воздушной УВ с помощью таблиц [13]. Точность измерения скоростей ударника и пластины по фотохронограммам не хуже $\pm 10\%$. В единичных экспериментах взрывное устройство фиг. 2 вакуумировалось до $p \approx 1$ гПа. Скорость полета пластины, измеренная электроконтактным методом, с точностью до ошибки эксперимента совпадала с величиной скорости, определенной фотохронографическим методом.

Плотность разгоняемых пластин оценивалась по скорости движения свободной поверхности преграды, по которой ударяла пластина. В качестве преграды выбирались материалы с акустической жесткостью, меньшей, чем акустическая жесткость пластины. Толщина преграды выбиралась так, чтобы исключить затухание ударной волны в преграде и чтобы масса пластины была равна массе преграды. В проведенных экспериментах скорость свободной поверхности преграды хорошо совпадала с этой же величиной, найденной расчетным путем, если плотность налетающей пластины принималась равной начальной. Кроме того, проведены опыты по рентгенографированию полета медной и алюминиевой пластин. Из опытов следовало, что пластина летит компактно, по крайней мере на базе регистрации 17 мм.

Численные расчеты проводились в гидродинамическом приближении и не учитывали возможного влияния негидродинамического затухания ударной волны, что, однако, в рассматриваемом диапазоне давлений не должно приводить к ощутимым погрешностям.

Результаты опытов и расчетов сведены в таблицу. Там же приведены исходные характеристики устройства. В таблице приняты следующие обозначения: l_1, l_2, l_3 — толщины ударника, пластины и прокладки соответственно; V_+, V_- — скорости ударника и пластины соответственно; E — внутренняя энергия слоя ВВ или прокладки на единицу поверхности; μ — масса пластины, отнесенная к суммарной массе прокладки (слоя ВВ) и ударника; φ_+, φ_- — измеренное и расчетное отношение кинетической энергии разогнанной пластины к сумме кинетической энергии ударника и внутренней энергии прокладки (слоя ВВ).

№ п/п	Каскад I		Каскад II						μ	Φ_+	Φ_-
	Ударник		Прокладка			Пластина					
	l_1 , мм	V_+ , км·с ⁻¹	Материал	l_3 , мм	E , кДж·см ⁻²	Материал	l_2 , мм	V_- , км·с ⁻¹			
1	1,5	5,64	ВВ	3,0	1,72	Al	0,1	11,6	0,02	0,09	0,06
2	1,5	5,64	»	3,0	1,72	»	0,3	10,7	0,05	0,23	0,21
3	1,5	5,64	»	3,0	1,72	»	0,92	9,5	0,15	0,60	0,45
4	4,0	3,80	»	3,0	1,72	»	0,3	7,8	0,07	0,34	0,28
5	1,5	6,20	»	3,0	2,70	»	0,3	12,8	0,05	0,26	0,21
6	1,5	5,64	»	3,0	1,72	Cu	0,1	11,2	0,05	0,27	0,21
7	1,5	5,64	»	3,0	1,72	»	0,3	10,3	0,16	0,71	0,46
8	1,5	5,64	»	3,0	1,72	»	0,5	9,1	0,28	0,91	0,59
9	1,5	5,64	»	3,0	1,72	»	1,0	6,8	0,55	1,0	—
10	1,5	5,64	»	1,0	0,57	»	0,3	10,3	0,20	0,74	0,51
11	1,5	5,64	»	5,0	2,85	»	0,3	10,0	0,14	0,62	0,43
12	1,0	6,14	»	3,0	1,72	»	0,3	10,0	0,22	0,82	0,54
13	1,5	6,20	»	3,0	2,70	Pb	0,3	11,3	0,2	0,83	0,51
14	1,5	6,20	»	3,0	2,70	»	1,0	6,6	0,66	0,98	—
15	1,5	5,64	»	3,0	1,72	Ta	0,3	8,5	0,31	0,88	0,66
16	1,5	5,64	Плексиглас	3,0	—	Al	0,15	9,9	0,03	0,11	0,11
17	1,5	5,64	»	3,0	—	»	0,92	8,6	0,16	0,49	0,50
18	1,5	5,64	»	3,0	—	Cu	0,1	9,9	0,06	0,23	0,25
19	1,5	5,64	»	3,0	—	»	0,5	7,0	0,3	0,59	0,61

Как следует из таблицы, устройство позволяет разгонять металлические тонкие пластины толщиной менее 1 мм до скоростей 7—12 км·с⁻¹. Используя такие пластины, можно реализовать, например, в преграде из меди импульсы давления интенсивностью 300—600 ГПа с длительностью 15—350 нс. По интенсивности ударной волны это на порядок превышает давление, развиваемое в медной преграде при контактном взрыве ВВ.

Видно, что скорость пластины определяется в основном скоростью ударника, соотношением масс пластины и ударника, а также зависит от материала прокладки в каскаде II (ВВ или инертный материал). Скорость пластины слабо зависит от массы прокладки. При соотношении $l_3/l_1 = 1-3$ скорость пластины постоянна, при $l_3/l_1 > 3$ скорость пластины уменьшается за счет разгрузки давления со стороны ударника. Сравнение экспериментальных значений Φ_+ с расчетными Φ_- показывает, что при использовании в каскаде II инертной прокладки (плексигласа) они с точностью до 5% совпадают и составляют в оптимальных условиях ($\mu \approx 0,3$) величину $\Phi_+ \approx 0,6$. Иначе обстоит дело, когда прокладка в каскаде II выполнена из ВВ. Коэффициент отбора энергии пластиной от ударника и прокладки из ВВ при $\mu = 0,3-0,6$ составляет $\Phi_+ \approx 0,95$, что на ~35% превышает расчетное значение Φ_- . Напомним, что в опытах всегда реализовался случай, когда ширина зоны химпика больше толщины пластины, а в расчетах использовалось уравнение состояния продуктов взрыва без учета кинетики химической реакции (химпика). Естественно, что наличие химпика и связанной с ним дополнительной энергии не учитывалось. Это обстоятельство, по-видимому, является наиболее вероятной причиной занижения расчетных скоростей по сравнению с измеренными в опытах.

В заключение укажем, что рассмотренное устройство позволяет повысить скорость деформации материалов до 10^{10} с⁻¹, что существенно приближает условия нагружения до предельно возможных — 10^{12} с⁻¹, определяемых колебаниями атомов в решетке; увеличить давление в материале до ~1 ТПа, не прибегая к сходящимся детонационным волнам [3]. Экспериментальное изучение процесса разгона тонких пластин мо-

жет быть использовано для получения сведений о состоянии ВВ в зоне химшика и построения изэнтроп расширения ВВ из состояния, промежуточного между химшиком и точкой Чепмена — Жуге*.

Поступила 6 V 1981

ЛИТЕРАТУРА

1. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений.— УФН, 1965, т. 85, вып. 2.
2. Леконт К. Высокоскоростное метание.— В кн.: Физика быстропротекающих процессов. Т. 1. М.: Мир, 1971.
3. Шалль Р. Физика детонации. Там же.
4. Дерибас А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1972.
5. Высокоскоростные ударные явления/Под ред. В. Н. Николаевского. М.: Мир, 1973.
6. Михайлов А. Н., Дремин А. Н. Экспериментальное изучение скорости полета пластины, метаемой продуктами взрыва скользящей детонации ВВ.— ФГВ, 1974, т. 10, № 6.
7. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
8. Accelerating flat plates to high velocity.— RSI, 1964, vol. 35, N 8.
9. Лаптев В. И., Тришин Ю. А. Увеличение начальной скорости и давления при ударе по неоднородной преграде.— ПМТФ, 1974, № 6.
10. Fowles G. R., Leung C., Rabie R., Shaner J. Acceleration of flat plates by multiple—staging.— In: High-Pressure Sci. and Technol. Proc. 6th AIRAPT Conf., Boulder, Colo, 1977. Vol. 2. N.Y.— L., 1979.
11. Кузнецов О. А., Соловьев В. С. Взаимодействие химшика с тонкой пластиной.— ФГВ, 1974, т. 10, № 3.
12. Альтшулер Л. В., Ашаев В. К. и др. Экспериментальное исследование состояний в зоне химической реакции детонационной волны.— В сб.: Детонация. Материалы VI Всесоюз. симпоз. по горению и взрыву. Черноголовка, 1980.
13. Кузнецов Н. М. Термодинамические функции и ударные адиабаты воздуха при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1965.
14. Судьенков Ю. В., Филиппов Н. М. и др. Влияние скорости нагружения на поведение упруговязкопластических материалов.— Письма в ЖТФ, 1980, т. 6, вып. 18.

УДК 621.791.1

РАЗГОН ПЛАСТИН ДО ГИПЕРЗВУКОВЫХ СКОРОСТЕЙ. НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ О ВОЗДУХ

А. Г. Иванов, Е. З. Новицкий, В. А. Огородников, С. Ю. Пинчук
(Москва)

Разгон пластин до скоростей ~ 10 км·с⁻¹ в воздухе по методу [1] сопряжен с таким неблагоприятным явлением, как неустойчивость. Появление и развитие неустойчивости может привести в конечном счете к потере компактности разгоняемой пластины.

В процессе разгона пластина практически всегда имеет начальное возмущение той или иной формы, которое обуславливается неидеальностью применяемого ускорителя. В процессе ее торможения в воздухе ускорение направлено от менее плотного воздуха к более плотной пластине, и наличие начального возмущения у пластины может привести к развитию возмущения по Тейлору (гравитационная неустойчивость) [2].

При взаимодействии летящей в воздухе пластины с преградой возможно возникновение дополнительных условий для развития неустойчивости. Так, при подлете пластины к преграде воздушная ударная волна (УВ), движущаяся впереди пластины, отражается от преграды и падает на границу раздела пластина — сжатый воздух. Если пластина имеет возмущение, а интенсивность падающей на нее отраженной УВ достаточно велика, то будет наблюдаться рост возмущений [3].

Исследовался полет пластин из алюминия и меди диаметром 60 мм и толщиной 0,3 мм, имеющих начальные скорости 8—11 км·с⁻¹. Разгон пластин осуществлялся по двухкаскадной схеме, подробно описанной в

* В последние годы интенсивно развивается лазерный метод получения коротких импульсов давления (см., например, [14]). Однако относительно низкий уровень интенсивности ударной волны (малые площади, нагружаемые излучением ОКГ, высокий уровень электромагнитных помех) осложняет и ограничивает возможности лазерного метода для широкого использования.