

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. V. Grossland. 1-й Междунар. симпозиум по плакированию взрывом. ЧССР, Мариански Лазни, 1970.
10. I. Chladek. 1-й Междунар. симпозиум по плакированию взрывом. ЧССР, Мариански 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,

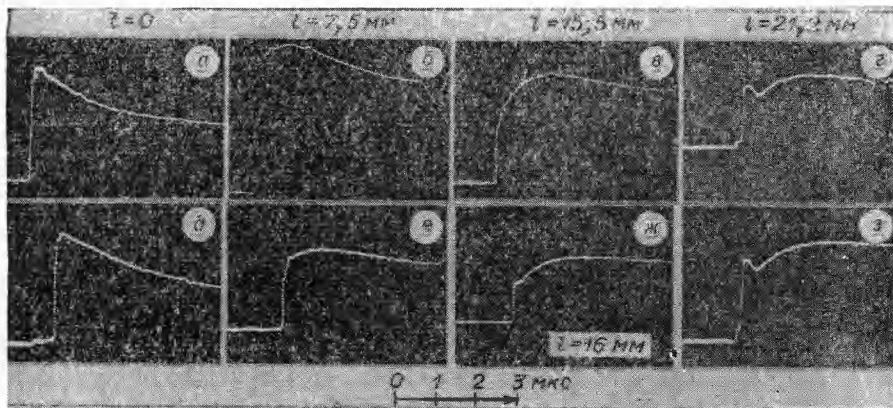


Рис. 1. Осциллограммы опытов регистрации профилей давления в плексигласовой преграде, расположенной на различных расстояниях от поверхности заряда. а—е) опыты с тротильным зарядом высотой 20 мм; ж) то же, для заряда высотой 34 мм.

дающей ударную волну, близкую к сферической, со средним радиусом кривизны фронта ~ 500 мм.

Приведенные на рис. 2 графики показывают, что уменьшение высоты заряда приводит к более быстрому падению максимального давления продуктов взрыва на преграду с увеличением расстояния от заряда и ограничивает рост τ . Из осциллограмм, приведенных на рис. 1, г, з, видно, что при больших расстояниях между поверхностью заряда и преградой нарастание давления на поверхности преграды происходит немонотонно; четко выделяется короткий пик давления на фронте. Данная особенность профилей давления может объясняться ударом о преграду разрыхленного поверхностного слоя заряда, непрореагировавшего из-за быстрой разгрузки от свободной поверхности. Давление, создаваемое ударом поверхностного слоя ВВ, практически не меняется с увеличением расстояния от заряда, в то время как давление, развиваемое при торможении продуктов взрыва, быстро падает. Это говорит о том, что нецелесообразно чрезмерно увеличивать расстояние между зарядом и ударником для предотвращения его разрушения.

Для того чтобы метаемые ударники в момент соударения имели плоскую центральную часть достаточно большого диаметра, должны быть приняты специальные меры. Из-за боковой разгрузки давление в продуктах взрыва на края заряда падает быстрее, чем на его оси. В результате на центральную часть ударника действует больший импульс силы, чем на края, центр ударника приобретает большую скорость и в полете ударник выгибается. Эффект боковой разгрузки в ПВ можно уменьшить, существенно увеличив поперечные размеры заряда при фиксированной его высоте с тем, чтобы приблизить процесс разгона ударника к одномерному. Иницирование детонации должно производиться плоско-волновым генератором, высота которого также меньше поперечных размеров.

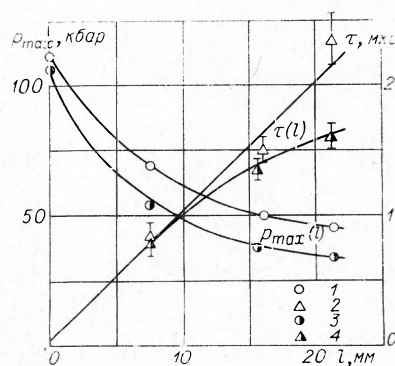


Рис. 2. Зависимость максимального давления в плексигласовой преграде и промежутка времени, в течение которого оно достигается, от расстояния между поверхностями заряда и преграды.

1, 2 — данные для тротильного заряда высотой 34 мм; 3, 4 — то же, для заряда высотой 20 мм.

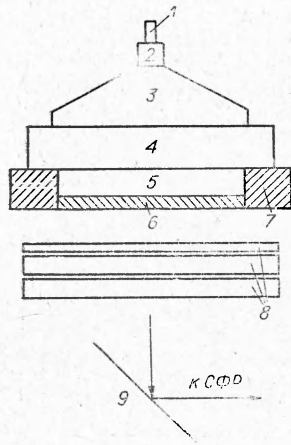


Рис. 3. Схема устройства для метания пластин продуктами взрыва.

1 — электродетонатор; 2 — переходная таблетка ВВ; 3 — взрывная линза диаметром 100 мм; 4 — заряд ВВ диаметром 120 мм; 5 — полость; 6 — метаемая пластина (ударник); 7 — кольцо; 8 — набор плексигласовых пластин; 9 — зеркало.

В качестве такого плоскоровнового генератора используют устройство, в котором осуществляется метание тонких пластин скользящей детонацией листового заряда ВВ, инициируемого линейно-волновым генератором [5]. В целом такое экспериментальное устройство для метания толстых пластин получается довольно сложным и громоздким, а общий вес заряда ВВ оказывается зачастую слишком велик.

Альтернативное решение заключается в том, чтобы искусственно поднять давление в ПВ у краев ударника и тем самым увеличить действующий на края импульс силы. В [6] разгоняемые продуктами взрыва алюминиевые ударники окружались стальными кольцами той же толщины, что и ударник. Сталь имеет большую динамическую жесткость, чем алюминий, поэтому после отражения детонационной волны от поверхности ударника и кольца давление в ПВ над кольцом, а затем и у краев ударника, оказывается более высоким, чем на оси заряда. Увеличение максимального давления, действующего на края ударника, компенсирует более быстрое падение да-

вления на периферии заряда; импульсы силы, действующие на центральную часть ударника и на его края, выравниваются, что приводит к уменьшению искривления ударника в полете.

На рис. 3 приведена схема отработавшихся в данной работе устройств для метания продуктами взрыва толстых алюминиевых и плексигласовых ударников. Метаемые диски диаметром 85—100 мм запрессовывались в стальные (для алюминиевых ударников) или плексигласовые (для плексигласовых ударников) кольца. Заряд ВВ диаметром 120 и высотой 20—40 мм наклеивался непосредственно на кольцо; между торцом заряда и поверхностью ударника оставлялась воздушная полость толщиной от 6 до 20 мм. Инициирование детонации осуществлялось взрывной линзой диаметром 100 и высотой 53 мм. Толщина ударников составляла 5—7 мм. На расстоянии 25 мм от поверхности ударника располагалась «мишень», представляющая собой набор плексигласовых пластин, разделенных тонкими (0,1 мм) воздушными зазорами. С помощью скоростного фоторегистра, работающего в режиме фоторазвертки, определялась форма ударника во время соударения с мишенью по свечению воздуха перед мишенью и в зазорах. Полученные для различных конкретных условий фотохронограммы приведены на рис. 4.

Для оценки состояния разогнанного ударника фиксировались (с использованием манганиновых датчиков [7]) профили давления в мишени на расстоянии 3—4 мм от поверхности соударения. Осциллограммы этих опытов приведены на рис. 5.

Рассмотрим качественно процесс разгона ударника при данной геометрии сборки. Как показали проведенные в данной работе измерения, фронт разлетающихся с торца заряда ТНТ в полость продуктов взрыва имеет скорость $8,0 \pm 0,2$ км/с и значительно опережает ударную волну в кольце, поэтому волновые процессы в кольце учитывать не будем.

Можно выделить три стадии разгона, определяющие соотношение импульсов сил, действующих на центральную и периферийную части ударника. После выхода фронта детонации на торец заряда давление

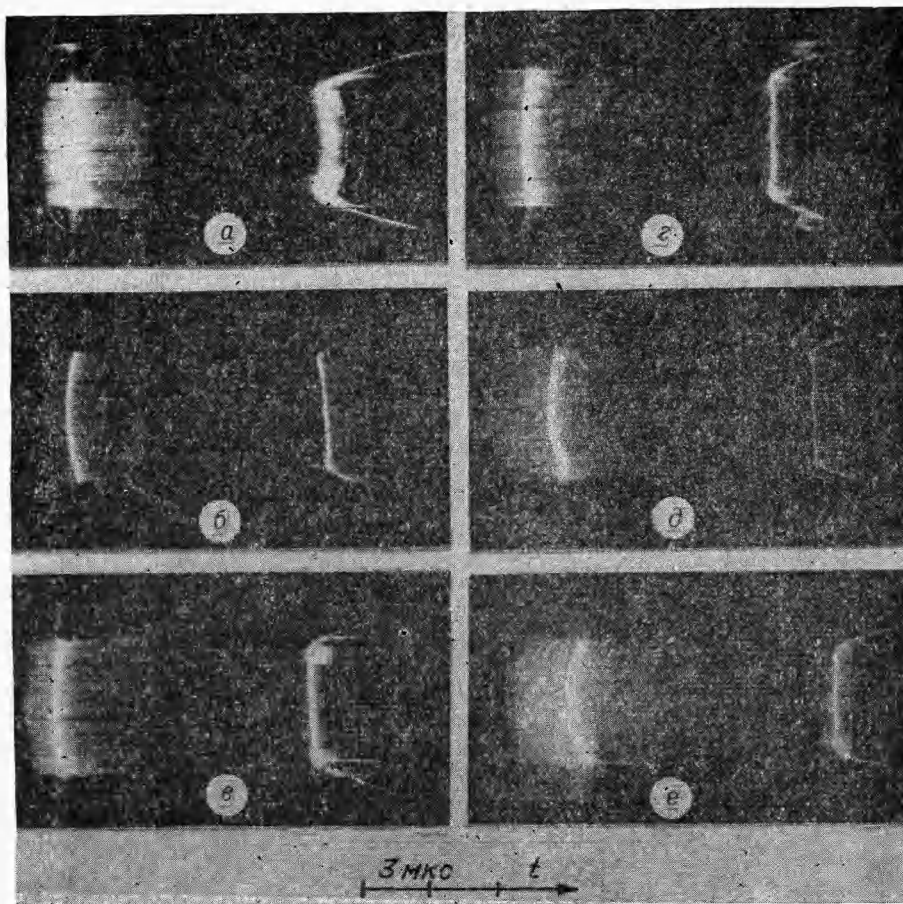


Рис. 4. Фотохронограммы опытов по отработке устройства для метания плексигласовых пластин взрывом.

a, б, в) шестимиллиметровые ударники в плексигласовом кольце, высота заряда ТНТ — 20 мм, толщина полости — 9 мм, диаметр ударников 85, 90 и 95 мм соответственно; *г)* опыт, подобный *б*, но со стальным кольцом; *д)* ударник диаметром 97,5 и толщиной 6 мм в плексигласовом кольце, толщина полости — 20 мм, высота заряда ТНТ — 34 мм; *е)* опыт, аналогичный *д*, но на поверхность заряда наклеена ацетатная пленка толщиной 0,15 мм.

в ПВ над кольцом оказывается более высоким, чем в продуктах взрыва, свободно разлетающихся в полость над ударником. Сжатые над кольцом ПВ разгружаются радиальной волной разрежения, идущей от края полости; при этом продукты взрыва из пространства над кольцом «стекают» в полость, что дает дополнительный импульс силы, действующий на края ударника при торможении ПВ на его поверхности. Фактором, регулирующим на этой стадии дополнительный импульс силы, действующий на края ударника, является волна разрежения, идущая в ПВ с боковой поверхности заряда к его оси. Чем меньше расстояние от боковой поверхности заряда до края полости, тем быстрее прекратится натекание в полость продуктов взрыва из области над кольцом. Следовательно, изменяя диаметр ударника при постоянном диаметре заряда, можно регулировать действующий на края ударника дополнительный импульс и тем самым регулировать скорость краев ударника и, соответственно, его форму в момент соударения с образцом (см. рис. 4, *a—в*).

На второй стадии разгона ударника, после выхода его из кольца, происходит разлет сжатых продуктов взрыва из полости над ударником через образовавшийся между кольцом и ударником зазор. Этим

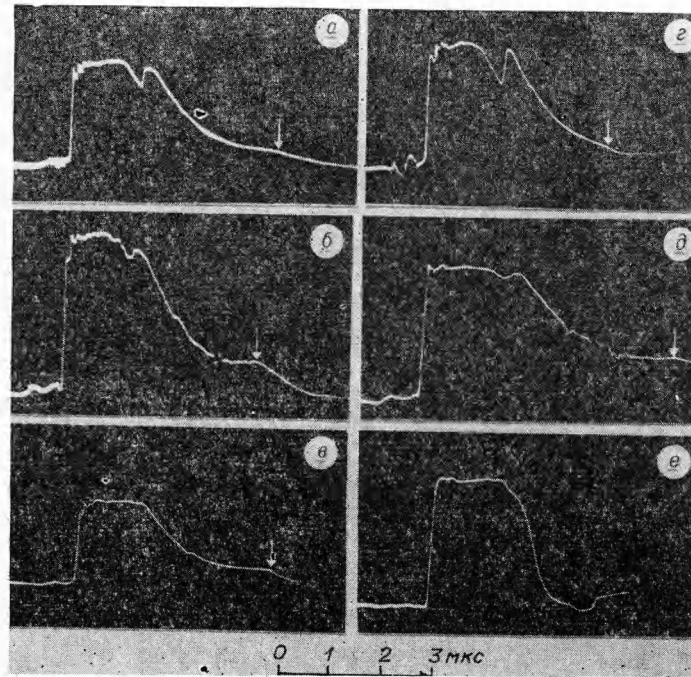


Рис. 5. Осциллограммы опытов по регистрации профилей давления в ударной волне, генерируемой ударником в мишени. а, б, в) плексигласовый ударник в плексигласовом кольце, высота заряда ТНТ 34 мм, база полета ударника 25 мм, диаметр ударника 97,5 мм, толщина 6 мм, толщина полости 9, 15 и 20 мм соответственно; г) опыт, аналогичный а, но база полета ударника 37 мм; д) опыт, аналогичный а, но на поверхность ударника, обращенную к заряду, наклеена полиэтиленовая пленка толщиной 0,5 мм; е) осциллограмма опыта с алюминиевым ударником толщиной 7 мм.

сокращается импульс силы, действующий на края ударника. Если углубить ударник в кольцо, то начало второй стадии отодвигается, так как ударник будет находиться в кольце дольше. Следовательно, изменяя толщину кольца при фиксированных толщинах ударника и полости, также можно регулировать соотношение импульсов сил, действующих на края ударника и на его центральную часть, и тем самым регулировать форму ударника к моменту соударения с образцом.

В некоторой степени форма ударника зависит и от третьей стадии разгона, наступающей после схождения волны сжатия, идущей в продуктах взрыва от кольца к оси симметрии. При этом образуется осевая струя продуктов взрыва с повышенной скоростью, нагоняющая ударник. В ряде опытов (см. рис. 4, г) отмечалась крутая выпуклость в центре ударника. По-видимому, причиной ее появления является удар осевой струи продуктов на третьей стадии разгона. Как показывают эксперименты, вероятность появления выпуклости в центре ударника тем выше, чем большей динамической жесткостью обладает материал кольца (см. рис. 4, б, г), что объясняется увеличением амплитуды кольцевой волны сжатия и интенсивности осевой струи. В опытах по метанию алюминиевых ударников с применением стальных колец было замечено также, что увеличение толщины полости между торцом заряда и поверхностью ударника увеличивает вероятность появления выпуклости в центре ударника.

Очередность следования трех стадий разгона определяется соотношением геометрических размеров устройства. При размерах, типичных для описанных экспериментов, стадии, судя по оценкам характерных времен, следуют в перечисленном порядке. Уменьшение диаметра удар-

ника может привести к тому, что вторая и третья стадии наложатся друг на друга или даже поменяются местами.

Таким образом, при выбранных размерах заряда ВВ, толщине полости и толщине ударника обработка устройства, подобного изображенному на рис. 3, с целью получения максимального диаметра плоского участка ударника сводится к подбору диаметра ударника и высоты кольца. Следует отметить, что форма разогнанного взрывом ударника в случае применения относительно тонких зарядов ВВ может в значительной мере определяться типом взрывной линзы.

Ряд дополнительных мер пришлось принять при обработке устройства для метания взрывом плексигласовых пластин. Необходимость в таком устройстве определяется потребностью проведения измерений профилей массовой скорости в образцах магнитоэлектрическим методом и относительно высокой сжимаемостью плексигласа, дающей возможность исследования полной (до нулевого давления) разгрузки материалов, изэнтропы которых в координатах p — u идут положе изэнтроп разгрузки алюминия.

Ввиду того, что прочность плексигласа при отколе мала (от 1,5 до 2,5 кбар [8, 9]; для алюминия — 7,5÷16 кбар [10, 11]) минимальная толщина полости в случае метания взрывом плексигласовых ударников существенно больше, чем для алюминия. На рис. 5 показаны профили давления в ударной волне, генерируемой в мишени после удара разогнанной взрывом заряда ТНТ высотой 34 мм плексигласовой пластины с первоначальной толщиной 6 мм. В опытах, где толщина полости была меньше 20 мм, регистрируемые профили давления состояли из двух импульсов, что свидетельствует о разрушении ударника [9, 11]. Ударник раскалывается на две пластины, летящие друг за другом; причем характерно, что при уменьшении исходной толщины ударника от 6 до 5 мм сокращается длительность первого импульса давления (т. е. толщина первой пластины), в то время как второй импульс почти не меняется. Соотношение длительностей импульсов давления практически не меняется также при изменении толщины полости от 9 до 15 мм и при уменьшении высоты заряда от 34 до 20 мм (толщина полости фиксирована). Все это дает основание предположить, что откол происходит при отражении идущей от свободной поверхности ударника волны разрежения от границы раздела с продуктами взрыва. Если изэнтропа разгрузки ПВ идет в координатах давление — массовая скорость круче изэнтропы плексигласа (что вполне возможно, если учесть, что на фронте разлетающихся ПВ находятся осколки поверхностного слоя заряда), то волна разрежения в плексигласе отражается от поверхности раздела с ПВ в виде волны разрежения же. Наложение двух идущих навстречу друг другу волн разрежения может приводить к появлению отрицательных давлений и разрушению плексигласового ударника.

Интересно отметить, что несмотря на фиксируемое остаточное давление продуктов взрыва за ударником (окончательная разгрузка фиксируется датчиком после прихода волны разрежения от свободной поверхности мишени), расстояние между откольными пластинами с увеличением пройденного ими пути растет (см. рис. 5, а, г).

Расхождение откольных пластин существенно уменьшается, если на поверхность ударника, обращенную к заряду, наклеена полиэтиленовая пленка толщиной 0,5 мм (см. рис. 5, а, д). По-видимому, полиэтилен в этих условиях работает как амортизирующая прослойка, уменьшающая величину отрицательного давления, так как сжимаемость у полиэтилена выше, чем у плексигласа.

Разрушение плексигласового ударника не фиксируется, если толщина полости больше 20 мм при высоте заряда 34 мм (см. рис. 5, в). Однако с увеличением толщины полости поверхность ударника становится негладкой, на ней появляются нерегулярные и невоспроизводи-

Тип и плотность ВВ	Высота заряда, мм	Материал и толщина ударника	Диаметр ударника, мм	Толщина полости, мм	Скорость ударника, км/с	Диаметр плоского участка, мм
ТНТ (1,55 г/см ³)	20	Алюминий (7 мм)	90	6	1,95±0,05	60±2
ТНТ (1,55 г/см ³)	34	»	90	6	2,30±0,1	65±2
ТНТ/гексоген 50/50 (1,60 г/см ³)	33	»	90	6	2,50±0,05	72±2
ТНТ/гексоген 50/50 (1,60 г/см ³)	33	Алюминий (5 мм)	90	8	2,75±0,05	70±2
ТНТ (1,55 г/см ³)	34	Алюминий (10 мм)	90	6	1,85±0,1	38±2
ТНТ/гексоген 30/70 (1,60 г/см ³)	33	»	92	6	2,30±0,1	62±2
ТНТ (1,55 г/см ³)	34	Плексиглас (6 мм)	97,5	20	3,1±0,05	74±2

мые возмущения (см. рис. 4, *д*). Причиной этого является, по-видимому, турбулизация разлетающихся в полость продуктов взрыва непрореагировавшими осколками ВВ с поверхностного слоя заряда. На фотохронограмме, приведенной на рис. 4, *д*, видно, что детонационный фронт выходит из заряда гладким, невозмущенным, а на фронте ПВ, соударяющихся с ударником, фиксируются нерегулярные возмущения; поверхность разогнанного взрывом ударника качественно повторяет форму фронта ПВ. Негладкость фронта ПВ и поверхности ударника удается уменьшить, если на торец заряда наклеить мембрану из ацетатной пленки толщиной ~ 0,15 мм (рис. 4, *е*). Это может привести к разрушению плексигласового ударника, которое, однако, не фиксируется, если на обращенную к заряду поверхность ударника наклеена «амортизирующая» полиэтиленовая пленка толщиной 0,2 мм.

Возможности описанной в данной работе схемы метания пластин иллюстрируются таблицей, где приведены параметры некоторых отработанных устройств. Скорость и диаметр плоского участка ударника измерялись на расстоянии 25 мм от начального положения ударника. Плоским считался тот участок ударника, одновременность удара которого о мишень была менее 0,1 мкс, а радиус кривизны в центре не менее 1 м. Указанный участок оставался плоским при изменении расстояния полета на ±5 мм. Целостность ударника проверялась по форме импульса давления, генерируемого ударником в мишени.

Существенным представляется вопрос о толщине ударника в момент соударения. Измерения длительностей импульсов давления в различных сечениях мишени и скорости головной части волны разрежения показывают, что эффективная толщина алюминиевых ударников в момент соударения может быть на 5—10% меньше первоначальной толщины. Следует отметить, что у тех алюминиевых ударников, которые после опыта удавалось найти, поверхность, обращенная к заряду, обычно была очень негладкой, бугристой, что вызвано, по-видимому, неоднородностью отколовшегося поверхностного слоя заряда. Уменьшение толщины ударника может также определяться деформацией его в процессе разгона.

Поступила в редакцию
16/V 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. G. R. Fowles, G. E. Duval a. o. Rev. Sci. Instr., 1970, 41, 7, 984.
2. С. С. Набатов, В. В. Якушев. Проблемы прочности (в печати).
3. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 2, 197.

4. К. П. Станюкович. Неустановившиеся движения сплошной среды. М., «Наука», 1971.
5. M. F. Rose. F. I. Grase. Britt. J. Appl. Phys., 1967, 18, 671.
6. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 3, 790.
7. А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ФГВ, 1972, 8, 1, 147.
8. Б. А. Тарасов. Проблемы прочности, 1972, 12, 63.
9. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, С. А. Колдунов. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, с. 569.
10. С. А. Новиков, И. И. Дивнов, А. Г. Иванов. ФММ, 1966, 21, 4, 608.
11. А. Н. Дремин, Г. И. Канель, А. М. Молодец. ФГВ, 1972, 8, 2, 283.

УДК 539.58

СКОРОСТЬ ОТКОЛА В ТВЕРДОЙ СРЕДЕ ПРИ ДЕЙСТВИИ СИЛЬНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНЫ

С. В. Бобровский, В. М. Гоголев, Б. В. Замышляев, В. П. Ложкина
(Ленинград)

Исследование ряда прикладных вопросов о сильных ударных волнах в твердых телах связано с необходимостью описания термодинамических свойств конденсированных сред в широком диапазоне состояний. В частности, для решения задачи об отколе при выходе на поверхность твердой среды сильной ударной волны с давлением на фронте порядка нескольких мегабар и выше уравнение состояния должно достаточно правильно отражать свойства среды от сверхвысоких до относительно низких состояний. Однако решение этого вопроса наталкивается на трудности, связанные с отсутствием в настоящее время необходимых экспериментальных данных и теоретических моделей. Поэтому при решении прикладных задач используются различные интерполяционные подходы, опирающиеся на асимптотические модели твердых сред [1].

Один из таких подходов был предложен в работе [2]. Интерполяционные построения в [2] опирались на модель Томаса — Ферми при сверхвысоких состояниях и на уравнение состояния Ми-Грюнайтзена при сравнительно низких состояниях. В силу специфики исследуемой задачи в этой работе основное внимание было уделено учету процессов теплового возбуждения электронов и ионизации. Процессы испарения и диссоциации не рассматривались.

Настоящая работа является развитием [2]. В ней предлагается способ построения интерполяционного уравнения состояния, учитывающего как ионизацию, так процессы испарения и диссоциации. Построенное на основе этого способа уравнение состояния гранита в работе используется для исследования процессов отражения и преломления на границах среды плоских ударных волн как малой, так и большой интенсивности. Результаты исследования позволяют получить представление об области применимости и точности гипотезы «зеркального отражения» и гипотезы «удвоения», применяемых в методах отражения и откола при экспериментальном исследовании динамической сжимаемости твердых тел.

УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ

Для описания состояния среды использовалась известная [1] трехчленная форма уравнения состояния:

$$\begin{aligned} p &= p_x + p_y + p_e, \\ E &= E_x + E_y + E_e, \end{aligned} \quad (1)$$

где p_i и E_i — соответственно компоненты давления и энергии; $i = x, y, e$