

p_1 , кбар	$\tau_{0,5}$, мкс	$\tau_{0,9}$, мкс	p_1 , кбар	$\tau_{0,5}$, мкс	$\tau_{0,9}$, мкс	p_1 , кбар	$\tau_{0,5}$, мкс	$\tau_{0,9}$, мкс
20	40,6	125,1	50	4,0	12,3	150	0,31	0,96
25	22,3	68,6	75	1,53	4,7	200	0,16	0,50
30	14,0	43,05	100	0,78	2,4	250	0,10	0,31
40	7,0	21,5	125	0,47	1,44			

ностью импульса сжатия, то пороговое давление инициирования в этих условиях по данным таблицы находится в районе 50 кбар. Такое соответствие можно считать вполне удовлетворительным для оценочных расчетов.

Длительность химпика стационарной детонации с кинетикой в виде (5) составляет по оценке $\sim 0,4$ мкс. Эксперимент дает для литого тротила длительность химпика $\sim 0,3$ мкс [10], что также говорит о применимости предложенного кинетического уравнения в широком диапазоне интенсивностей ударной волны.

Авторы благодарят Г. А. Савельеву за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Отделение ИХФ АН СССР,
Черноголовка

Поступила в редакцию
18/XI 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. A. W. Campbell, W. L. Davis a.o. Phys. of Fluids, 1961, 4, 511.
2. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов.— В сб.: Взрывное дело, № 63/20, 1967.
3. С. А. Колдунов, К. К. Шведов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1973, 9, 2, 295.
4. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов и др. Докл. АН СССР, 1966, 167, 3, 610.
5. И. М. Воскобойников, В. М. Богомолов, А. Я. Апин. ФГВ, 1968, 4, 1, 45.
6. M. Cowperthwaite, R. F. Williams. J. Appl. Phys., 1971, 42, 1, 456.
7. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6, 884.
8. Г. И. Канель. Применение манганиновых датчиков для измерения давления ударного сжатия конденсированных сред. ВИНТИ, отд. научн. фондов, № 477—74. Деп. от 28 февр. 1974 г.
9. N. L. Colebun, Jr. T. P. Liddiard. J. Chem. Phys., 1965, 44, 1929.
10. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
11. А. Н. Дремин, И. А. Карпунин. ПМТФ, 1960, 3, 184.
12. А. А. Воробьев, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1974, 5, 94.

СТОЛКНОВЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТОМ ТИТАНЕ

Н. А. Костюков, А. М. Ставер

Взрывное нагружение пористых материалов используется для динамического прессования, а также при изучении физико-химических превращений в ударных волнах [1, 2]. Известны плоские и осесимметричные схемы нагружения, при которых порошок помещается соответ-

Т а б л и ц а 1

Взрывчатое вещество	ρ , г/см ³	D , км/с
Аммонит 6ЖВ+селитра (50/50)	1,2	3,1
Аммонит 6ЖВ	1,0	4,0
Гексоген+аммонит 6ЖВ (50/50)	1,0	5,6
Гексоген	1,0	6,7

венно либо между двумя пластинами взрывчатого вещества (ВВ), либо засыпается внутрь трубки, изготовленной из ВВ. Для изучения различных явлений, возникающих при взрывной обработке пористых материалов, необходимо знать параметры нагружения (плотность, импульс давления, температуру и т. д.). Эти параметры зависят от характера взаимодействия ударных волн. В настоящей работе изложены результаты экспериментальных исследований косоугольного столкновения плоских ударных волн разной интенсивности в пористом титане.

Исследуемый порошок помещался в контейнер из тонкого оргстекла со сторонами $140 \times 45 \times 20$ мм. Ударная волна в порошке создавалась слоем взрывчатого вещества толщиной 20 мм, который помещался на одной из больших граней контейнера. Остальные грани граничили с воздухом. Для создания плоского фронта детонации, перпендикулярного к направлению его распространения, применялся генератор, изготовленный из нескольких отрезков детонирующего шнура (ДШ) одинаковой длины. Размеры частиц порошка составляли $0,1 \div 0,5$ мм, пористость $m = \rho_0 / \rho_{00} = 2,74$ ($\rho_0 = 4,51$ г/см³ — плотность монолита, ρ_{00} — начальная плотность порошка). Изменение интенсивности ударной волны в порошке достигалось использованием различных ВВ (табл. 1).

Скорость детонации измерялась с помощью камеры СФР. Измеряемыми величинами в порошке были скорость ударной волны $D_{ув}$ и величина компоненты массовой скорости, нормальной к границе раздела ВВ — порошок u_1 . Скорость ударной волны в порошке определялась по фотографиям, полученным на импульсной рентгеновской установке, которая позволяет делать мгновенный снимок на любой стадии процесса. На фотографиях фиксировалось положение ударной волны в порошке в некоторый момент после выхода явления на стационарный режим.

Анализ фотографий (рис. 1) показывает, что для всех использованных ВВ фронт ударной волны вблизи границы раздела ВВ — порошок близок к плоскому, а затем заметно искривляется, что свидетельствует

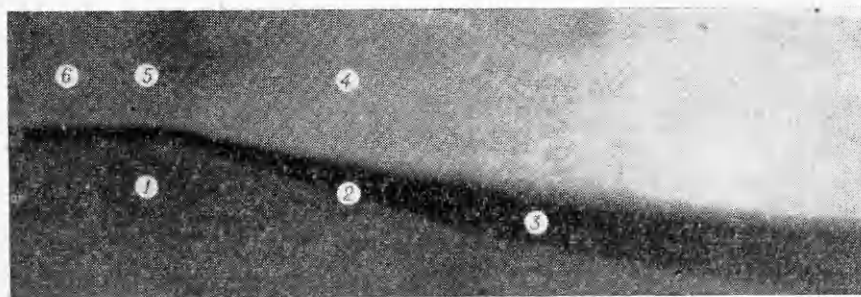


Рис. 1. Рентгеновская фотография ударного сжатия титанового порошка при нагружении аммонитом 6ЖВ.

1 — несжатый порошок; 2 — фронт ударной волны; 3 — сжатый порошок; 4 — продукты взрыва; 5 — фронт детонации; 6 — взрывчатое вещество.

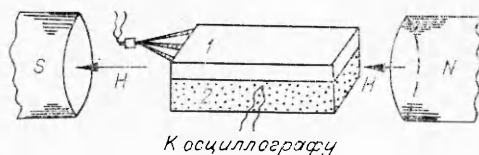


Рис. 2. Схема опытов с использованием электромагнита.
1 — ВВ; 2 — порошок.

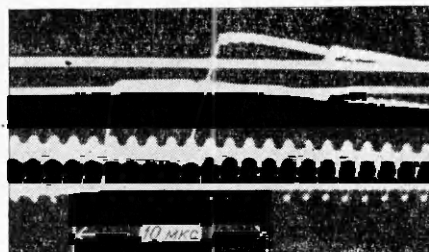


Рис. 3. Типичная осциллограмма изменения массовой скорости во времени. Величина калибровочных импульсов 350 мВ. Направление развертки слева направо.

о существенном затухании ударной волны. Толщина слоя порошка, сжимаемого плоским участком фронта ударной волны, зависит от типа ВВ и приблизительно равна $0,5 \div 1$ высоты слоя ВВ. Скорость ударной волны в любой точке фронта может быть вычислена по формуле

$$D_{уВ} = D \cdot \sin \Phi,$$

где D — скорость детонации ВВ, Φ — угол между касательной к данной точке фронта и направлением распространения фронта детонации.

Для измерения величины компонента массовой скорости, нормальной к границе раздела ВВ — порошок, был использован электромагнитный метод, разработанный Е. К. Завойским [3]. Ориентация образца в магнитном поле и размещение датчика в порошке показаны на рис. 2. Датчики из алюминиевой фольги толщиной $50 \div 70$ мкм размещались на разной глубине от границы раздела ВВ — порошок. Длина рабочей части — 10 мм, напряженность магнитного поля — $300 \div 400$ Э. Для изоляции датчиков от порошка применялась фторопластовая пленка толщиной 20 мкм. Наведенная на датчиках ЭДС регистрировалась двухлучевым осциллографом ОК-33. Значение массовой скорости определялось из соотношения $u = u_1 / \cos \Phi$. Обработка осциллограмм этих опытов показывает, что в плоской части ударного фронта величина массовой скорости меняется в пределах $\pm 10\%$ от значения в середине участка. На криволинейном участке фронта ударной волны массовая скорость существенно уменьшается. Осциллограмма записей ЭДС, наведенных на двух датчиках, которые расположены соответственно на глубине 4 и 8 мм от границы раздела ВВ — порошок, приведена на рис. 3. Ударная волна в этом опыте создавалась аммонитом 6ЖВ. Полученные в экспериментах значения u , а также рассчитанные из закона сохранения импульса нормальные к фронту ударной волны напряжения P приведены в табл. 2.

При определении углов перехода регулярного режима столкновения в нерегулярный слой исследуемого порошка в виде усеченной призмы размещался между двумя слоями одинакового ВВ, которые инициировались одновременно (рис. 4). При детонации ВВ в порошке создавались две сталкивающиеся ударные волны. Угол столкновения ударных

Таблица 2

$D_{уВ}$, км/с	u , км/с	P , кбар
1	0,62	10
1,2	0,86	17
1,5	0,96	24
2	1,15	38

волн изменялся варьированием угла при вершине призмы, а изменение интенсивности сталкивающихся ударных волн — использованием разных типов ВВ. Размеры образцов выбирались так, чтобы столкновение ударных волн происходило плоскими участками. Для уменьшения влияния способа инициирования на изучаемое явление в верхней части образца располагался стальной клин. Угол при его вершине подбирался так, чтобы генерируемые ударные волны до столкновения скользили вдоль граней под углом в 90° . Ударно-волновая конфигу-

рация, возникающая при столкновении ударных волн, фиксировалась на пленке с помощью импульсной рентгеновской установки. Кроме того, изучалась структура поперечного сечения ВСД спрессованных образцов.

Результаты этих экспериментов показали, что при малых углах столкновения ударные волны сходятся под острым углом (рис. 5), т.е. реализуется регулярный режим столкновения. Спрессованные в этих режимах образцы представляют собой сплошные однородные пластины. Следует отметить, что на фотографиях видны ударные волны в продуктах детонации, образующиеся при выходе отраженных ударных волн из сжатого материала на границу раздела сжатый материал — продукты взрыва. Таким образом, хотя отраженную ударную волну по снимкам определить не удастся, место ее выхода на поверхность образца может быть установлено довольно точно. При углах столкновения больших, чем некоторое критическое значение $2\alpha_{кр}$, зависящее от интенсивности сталкивающихся волн, между падающими ударными волнами появляется третья ударная волна — головная (рис. 6). Спрессованный образец

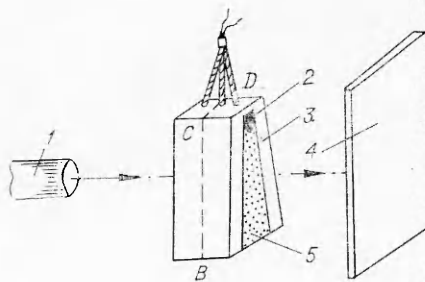


Рис. 4. Схема опытов по столкновению ударных волн.

1 — рентгеновская трубка; 2 — клин; 3 — ВВ;
4 — кассета; 5 — порошок.

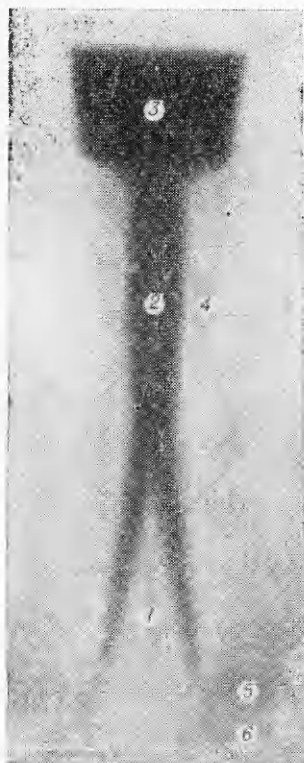


Рис. 5. Рентгеновская фотография столкновения ударных волн в регулярном режиме.

1 — несжатый порошок; 2 — сжатый порошок; 3 — стальной клин; 4 — ударная волна в продуктах взрыва; 5 — фронт детонации; 6 — взрывчатое вещество.

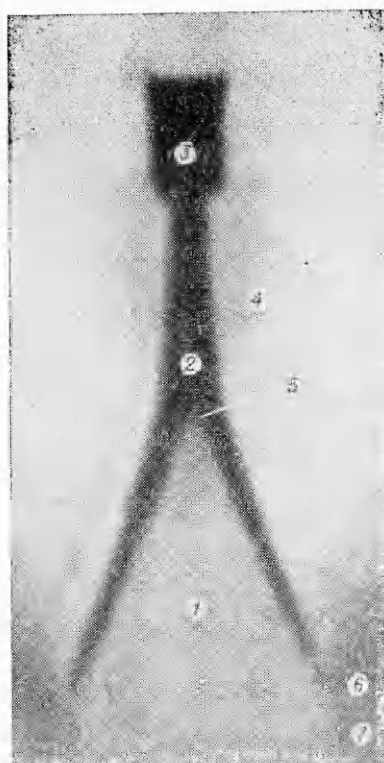


Рис. 6. Рентгеновская фотография столкновения ударных волн в нерегулярном режиме.

1 — несжатый порошок; 2 — сжатый порошок; 3 — стальной клин; 4 — ударная волна; 6 — фронт детонации; 7 — взрывчатое вещество.

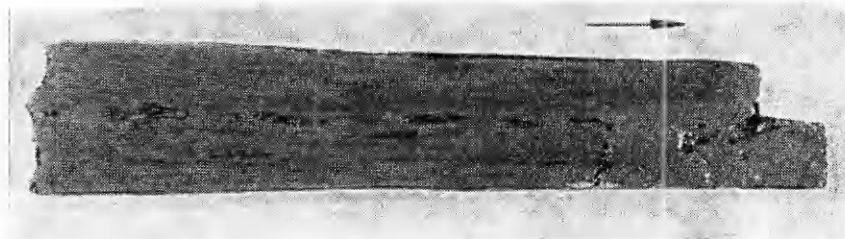


Рис. 7. Шлиф сечения ВСД образца, спрессованного при нерегулярном режиме столкновения ударных волн. Стрелкой указано направление распространения детонации.



Рис. 7. Шлиф сечения ВСД образца, спрессованного при угле столкновения ударных волн, близком к критическому.

в этом случае представляет собой пластину, разделенную каналом с переменным сечением и с оплавленными поверхностями (рис. 7). По-видимому, этот эффект обусловлен значительным увеличением внутренней энергии той части вещества, которая испытывала однократное сжатие в головной ударной волне, по сравнению с соседними слоями, сжатыми двукратно до таких же давлений в падающей и отраженной ударных волнах. Оценки показывают, что внутренняя энергия вещества, сжатого головной ударной волной, настолько велика, что ее достаточно для плавления и даже для испарения вещества в волне разгрузки.

Наряду с механизмом, предложенным в [4], образование канала может быть обусловлено как выносом вещества в жидкой или газообразной фазе со свободных поверхностей образца, так и образованием усадочных раковин при затвердевании расплава. Размер головной волны существенно зависит от угла столкновения ударных волн. При значениях углов столкновения, близких к критической величине, головная волна становится трудно различимой на рентгеновских фотографиях. В этих опытах фотографии служили лишь для определения величины угла столкновения, а критерием нерегулярного режима было наличие канала в спрессованных образцах.

Было замечено также, что при углах столкновения, близких к критическим, канал с оплавленными границами располагается только в верхней части образца. Структура нижней части однородная и напоминает образцы, спрессованные в регулярном режиме (рис. 8). Возможной причиной образования такого канала является, по-видимому, переход возникшего в начальный момент столкновения нерегулярного режима отражения в регулярный. Такой переход может быть обусловлен следующими факторами:

- 1) переменным значением параметров падающих ударных волн в месте их столкновения, которое обусловлено трапециевидным профилем сечения образца;

- 2) ослаблением головной волны волнами разрежения, возникающими в момент выхода отраженных ударных волн на свободные поверхности сжатого материала;

- 3) неравномерной плотностью засыпки порошка по высоте образца.

Результаты экспериментов представлены в табл. 3. Значения углов перехода $\alpha_{кр}$ лежат между α_2 и α_1 , где α_2 — нижняя граница углов, при которых канал образуется по всей высоте спрессованного образца, α_1 — верхняя граница углов, при которых спрессованный образец имеет однородную структуру. При углах $\alpha_2 > \alpha > \alpha_1$ канал образуется только в верхней части образца.

Таким образом, экспериментальными исследованиями показано, что при косом столкновении ударных волн в пористом титане реализуются регулярный и нерегулярный режимы отражения. Образцы, спрессованные в регулярном режиме столкновения, имеют однородную по сечению структуру, а в структуре образцов, спрессованных в нерегулярном режиме, имеются зоны расплавов и пустоты. Установлено, что угол перехода регулярного режима столкновения в нерегулярный в пористом титане зависит от интенсивности сталкивающихся ударных волн. Полученные в работе значения углов перехода для титанового порошка существенно меньше, чем у монолитных металлов [5].

Авторы приносят глубокую благодарность Г. И. Новожинову, принимавшему участие в экспериментах по определению параметров ударного сжатия титанового порошка.

*Институт гидродинамики СО АН СССР,
Новосибирск*

*Поступила в редакцию
8/1 1976*

Т а б л и ц а 3

P , кбар	α_1 , град	α_2 , град
10	5,5	8
17	7,5	9
24	8,5	14
38	8	12

ЛИТЕРАТУРА

1. А. М. Ставер. Канд. дис., ИГД СО АН СССР. Новосибирск, 1971.
2. О. Н. Бреусов. Автореф. докт. дис., ИХФ, Черноголовка, 1975.
3. В. М. Зайцев, П. Ф. Похил, К. К. Шведов. Докл. АН СССР, 1960, **132**, 1339.
4. А. А. Дерibas, А. В. Крупин и др. ФГВ, 1973, **9**, 6, 883.
5. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1961, **41**, 5, 1382.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ЖИДКИХ ВВ СЛАБЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ

А. А. Гончаров, А. В. Дубовик, В. К. Боболев

Механизм инициирования нормальной детонации жидких взрывчатых веществ (ЖВВ) мощными ударными волнами подробно изучен теоретически и экспериментально [1]. Установлено, что взрывную реакцию возбуждают ударные волны с амплитудой ≈ 100 кбар. В работах [2—4] показано, что если жидкость содержит разрывы сплошности — кавитационные пузыри, которые образуются в процессе инициирования, то химическая реакция, распространяющаяся в форме нормальной детонации или детонации с малой скоростью, возникает под действием ударных волн с амплитудой 1—10 кбар.

В настоящее время отсутствуют экспериментальные данные, с помощью которых было бы можно ответить на вопрос, каков механизм инициирования ЖВВ при схлопывании кавитационных полостей ударными волнами. Наиболее вероятной представляется гипотеза, основанная на боуденовской концепции горячих точек [5], согласно которой возбуж-