

зерна, по-видимому, оно будет больше, но не превысит для разрядов с близкой геометрией критическое давление инициирования жидкого тротила (120—130 кбар [2]).

По-видимому, для верхних оценок критических давлений инициирования детонации без заметной задержки в наполненных системах достаточно воспользоваться данными для ВВ в гомогенном состоянии (жидкое или монокристаллическое).

* *
*

1. В водонаполненных зарядах развитие ударной волны с параметрами значительно ниже детонационных происходит плавно, как и в твердых ВВ. Скорость роста параметров тем выше, чем больше давление ударной волны и больше дефектов зерна ВВ.

2. При давлениях ~ 20 —100 кбар в водонаполненных зарядах тротила разложение ВВ начинается сразу в очагах и происходит без заметного ускорения, несмотря на рост давления над фронтом.

3. Возникновение детонации без заметного участка развития в водонаполненных зарядах происходит при таком давлении ударного сжатия, которое обеспечивает практически гомогенное разложение ВВ. Для гранулированного водонаполненного тротила это давление составляет ~ 110 кбар (время $\tau = 0,6$ мкс) и повышается с увеличением плотности и уменьшением дефектности зерна.

*Поступила в редакцию
14/1 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Дремин, С. Д. Савров и др. Детонационные волны в конденсированных средах. М., «Наука», 1970.
2. А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. И. Воскобойников. Сб. «Взрывное дело», № 68/25, «Недра», 1970.
3. М. Ф. Друкованный, В. М. Комир и др. Использование взрыва в народном хозяйстве. Ч. I. Киев, «Наукова думка», 1970.
4. А. И. Романов, И. В. Карис, Б. А. Игнатьев. Использование взрыва в народном хозяйстве. Ч. I. Киев, «Наукова думка», 1970.
5. П. Ф. Похил, В. М. Мальцев, В. М. Зайцев. Методы исследования процессов горения и детонации. М., «Наука», 1970.
6. С. А. Колдунов, К. К. Шведов, А. Н. Дремин. ФГВ, 1973, 10, 2.
7. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов. Сб. «Взрывное дело», № 63/20, «Недра», 1967.
8. А. Н. Дремин, С. А. Колдунов, К. К. Шведов. ФГВ, 1971, 7, 1.

УДК 541.12.03

УДАРНОЕ СЖАТИЕ ПОРИСТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ

*А. А. Дерibas, А. М. Ставер
(Новосибирск)*

Интенсивное развитие физики высоких давлений связано с решением одной из главных проблем физики твердого тела — получением материалов с особыми физическими свойствами. Эти исследования идут по пути создания статических устройств высокого давления и разработки

динамических методов сжатия. Существенный интерес представляет изучение поведения материалов при действии кратковременных высоких давлений, являющихся предметом настоящих исследований. Динамические методы характеризуются относительной простотой получения высоких импульсных давлений в сотни килобар и более. Кроме того, при динамическом сжатии могут происходить новые процессы, не встречающиеся при статических давлениях. Сравнительно недавно были начаты работы по изучению физико-химических превращений, вызванных ударными волнами [1—3]. В результате этих исследований были получены многообещающие результаты, связанные, в частности, с проблемой синтеза новых материалов.

В работах [2, 3] показано, что под действием сильных ударных волн могут происходить полиморфные превращения, образование твердых растворов и новых соединений, могут также весьма существенно изменяться физические и химические свойства веществ.

В работе [4] использовалась энергия взрыва для прессования некомпактных материалов: металлические порошки (железо, титан, вольфрам, кобальт) и графит. В работах [5, 6] изучались различные схемы ударного сжатия порошков.

При ударном обжатии порошковых материалов как с целью прессования заготовок (изделий), так и для изучения физико-химических превращений исследуемый материал размещается в специальных металлических контейнерах (некоторые авторы называют контейнер ампулой сохранения). Схемы динамического сжатия порошков можно классифицировать в зависимости от расположения взрывчатого вещества относительно контейнера на две группы: 1) схемы с непосредственным расположением ВВ на поверхности контейнера, 2) схемы с расположением ВВ относительно контейнера через слой другого материала.

Наиболее интересные результаты были получены при обжатии пористых материалов в цилиндрических контейнерах. На рис. 1 показан цилиндрический контейнер с зарядом ВВ. Контейнер заполняется исследуемым порошком. Иницирование ВВ производится с одного из торцов.

Многие исследователи указывают на неоднородность свойств монолитных образцов, полученных из порошка по описанной схеме. Нередко в центре наблюдается растрескивание, а иногда и образование полостей в виде центральных каналов [7]. Распределение твердости в поперечном сечении обычно неравномерно, величина плотности по сечению образцов также, как правило, неоднородна. Как показали проведенные исследования, эти неоднородности в свойствах образцов могут быть объяснены особенностями ударно-волновых явлений, возникающих при динамическом обжатии. В настоящей работе рассмотрены эти явления.

Методы экспериментального исследования ударных волн в пористых материалах

Для изучения особенностей течения за ударными волнами была разработана методика с использованием четырехтрубчатой импульсной рентгеновской установки [8]. Сущность этой методики заключается в определении течения за ударными волнами путем «мгновенной» регистрации (время экспозиции в используемой установке составляло 0,1—0,2 мкс) деформации пористого цилиндра с размещенной в нем прост-

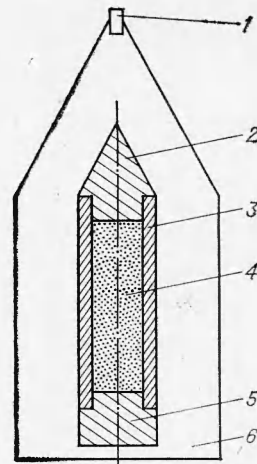


Рис. 1. Контейнер с зарядом ВВ.

1 — детонатор; 2 — верхняя пробка; 3 — корпус контейнера; 4 — порошок; 5 — нижняя пробка; 6 — заряд ВВ.

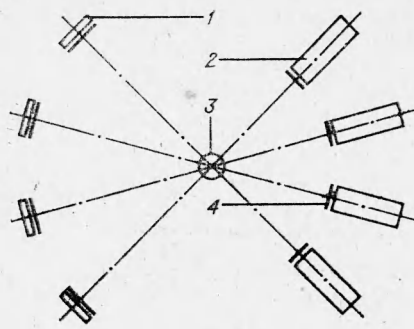


Рис. 2. Схема опыта.
1 — кассета с пленкой; 2 — источник рентгеновского излучения; 3 — ампула; 4 — защитный экран.

уменьшить поглощение рентгеновских лучей, стенки ампулы изготовлялись из материалов с малой плотностью: алюминия, винипласта и др. При отработке методики ударному сжатию подвергались порошки окиси алюминия с размером частиц от 8 до 20 мк.

Опыты показали, что пространственная решетка не оказывала заметного влияния на течение, возникающее за ударными волнами. По начальному положению решетки и ее положению в разные моменты времени после прохождения ударной волны определялись скорости частиц за волной.

Режимы ударного сжатия пористых цилиндров

Из исследований, проведенных ранее [9], известно, что в пористом цилиндре возможно образование: 1) конфигурации, соответствующей слабой ударной волне, 2) конфигурации, названной конической волной и 3) трехударной конфигурации.

Режим сжатия слабыми ударными волнами. Фотографии на рис. 3 соответствуют разным моментам процесса ударного сжатия; видны границы ампулы с верхней пробкой, фронт детонации и ударная волна. Детонационная волна переходит в порошок в виде ударной волны и затухает, не достигнув оси ампулы. Из характера деформации фольг за ударной волной следует, что течение за ней в некотором смысле ламинарно. Схематическое изображение этого режима представлено на рис. 4. Из графика видно, что частицы на стенке ампулы имеют максимальную скорость, которая затем убывает и на некотором расстоянии от стенки ампулы становится равной нулю. Исследование плотности образцов после взрывного обжатия в этом режиме с помощью рентгеновской теневой съемки и последующей обработки негативов на микрофотометре [10], а также методом гидростатического взвешивания показало уменьшение плотности образцов в направлении от стенок к оси ампулы.

Режим ударного сжатия с образованием конической волны. Ударная волна имеет почти правильную форму конуса. На рис. 5 видно, что коническая волна, начиная с некоторого расстояния, движется вдоль ампулы без изменения геометрических размеров, т. е. становится стационарной. При обжатии ампул с горизонтальными фольгами выяснилось, что за фронтом ударной волны последние деформируются и принимают форму конуса (рис. 5, а).

С помощью вертикальных фольговых цилиндров и горизонтальных плоских фольг, размещаемых в обжимаемых ампулах, можно определить поле скоростей и исследовать картину течения за фронтом ударной волны. На рис. 6 показаны рентгеновские фотографии, соответствующие разным стадиям обжатия ампулы. Заметим, что вертикальные цилиндры

ранственной решеткой на разных стадиях обжатия. Пространственная решетка создавалась размещением в ампуле с порошком тонких горизонтальных слоев и вертикальных цилиндров из более плотного материала. Эти слои в одних опытах изготовлялись из смеси исследуемого материала с порошком свинца, в других — из конденсаторной бумаги с тонким слоем свинца. Толщина слоев и стенок вертикальных цилиндров составляла 20—60 мк.

Схема опыта показана на рис. 2. Ампулы обжимались во взрывной камере, где также размещались металлические кассеты с фотопленкой. Чтобы

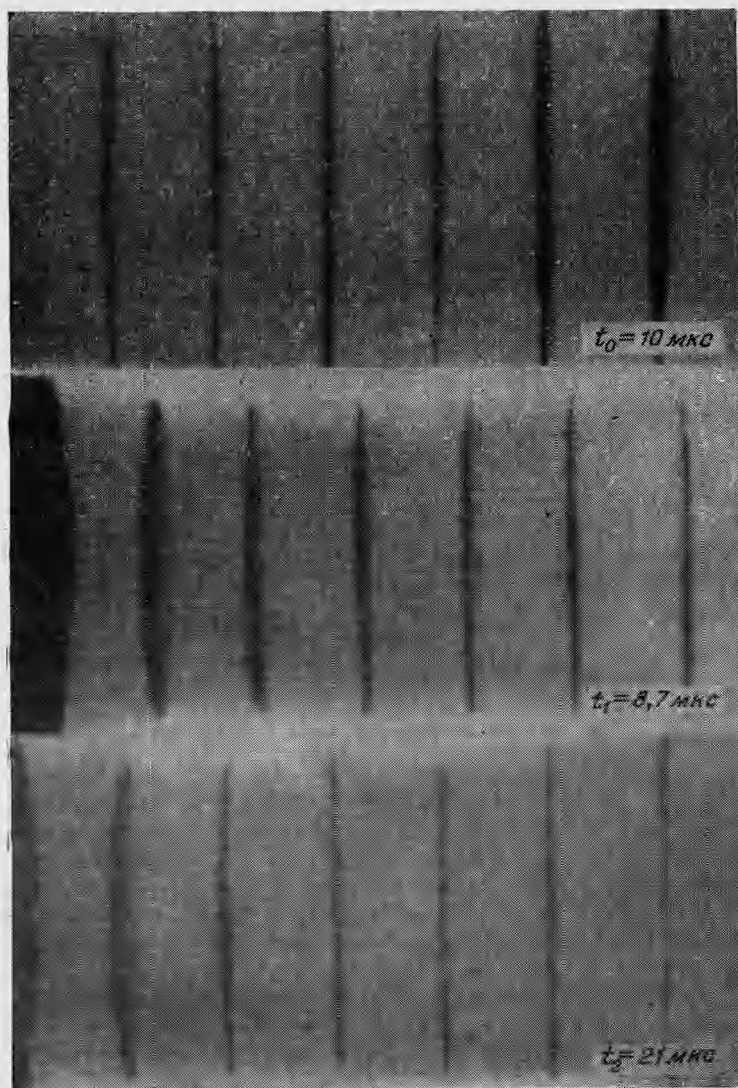
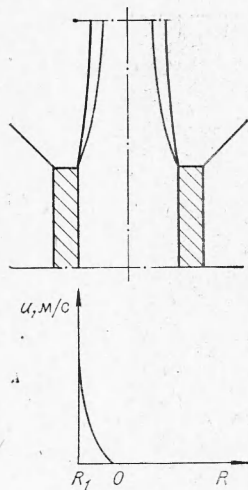


Рис. 3. Рентгеновские фотографии ударного сжатия ампулы слабыми ударными волнами.

в этом случае имитируют линии тока. На фотографиях отчетливо видно преломление их при переходе через фронт. Непрерывность линий тока за волной указывает на то, что течение в этом режиме не имеет тангенциальных разрывов.

Путем обработки рентгеновских фотографий легко рассчитать поле скоростей за ударной волной в разные моменты времени. Для пояснения схемы расчета массовых скоростей частиц изобразим три разные стадии обжатия ампул, как показано на рис. 7, а, б, в. После прохождения ударной волны точки 1—7, находящиеся на боковой поверхности коаксиальных цилиндров и на горизонтальных плоскостях (плоскости образованы фольгами), смещаются и занимают новое положение 1'—7'. Вследствие стационарности ударно-волновой картины сжатия ампулы по положению точек 7' и 6' можно определить траекторию движения точки из положения 5 в положение 5'. Для этого необходимо точки 7' и 6' расположить относительно 5 так, как они расположены относительно 7 и 6. Соединив точки 5, 7', 6', 5', получим траекторию движения точки 5. Вре-



мя движения частиц из положения 5 в $5'$ определяется из соотношения $t=L/D$, где D — скорость детонации, мм/мкс; L — путь, пройденный фронтом детонации от точки 5 , мм.

Средняя скорость движения частиц на участке $5, 7', 6', 5'$ определяется соотношением $v_{ср}=S/t$, где S — путь, пройденный частицами при движении от 5 в точку $5'$.

Аналогично можно рассмотреть скорость движения частиц из положения 1 в $1'$, из 2 в $2'$ и т. д. Относительная ошибка при определении массовой скорости по описанной методике не превышала 8%. Она может быть уменьшена использованием рентгеновских аппаратов с меньшим временем экспози-

Рис. 4. Схематическое изображение сжатия слабыми ударными волнами и график изменения массовой скорости за волной по радиусу ампулы.

ции и способных регистрировать более слабые градиенты плотностей. Последнее обстоятельство является определяющим для выбора материала и толщины фольг, причем чем меньше их толщина и плотность, тем, очевидно, меньше будет искажаться течение за фронтом ударных волн.

В таблице приведены результаты расчета скоростей частиц за фронтом ударной волны при обжатии ампулы диаметром 32 мм с порошком $\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$. В качестве ВВ использовался гексоген. Из таблицы видно, что скорости частиц за конической волной больше у частиц, расположенных ближе к стенкам ампулы. Векторы скоростей частиц вблизи волны нормальны к ней (рис. 7), с удалением от фронта они изменяют свое направление, а затем векторы становятся почти параллельными оси ампулы. С увеличением параметров обжатия (давление, импульс) угол при вершине возрастает. Одновременно возрастают и модули скоростей частиц, расположенных у оси ампулы. Градиент скоростей частиц по радиусу ампулы становится значительным. На рис. 8, а, б приведены

Рис. 5. Рентгеновские фотографии ударного сжатия ампулы в режиме с образованием маховской волны.

а) совмещенные фотографии, соответствующие разным моментам сжатия ампулы с горизонтальными фольгами; б) ампула с вертикальными цилиндрами.



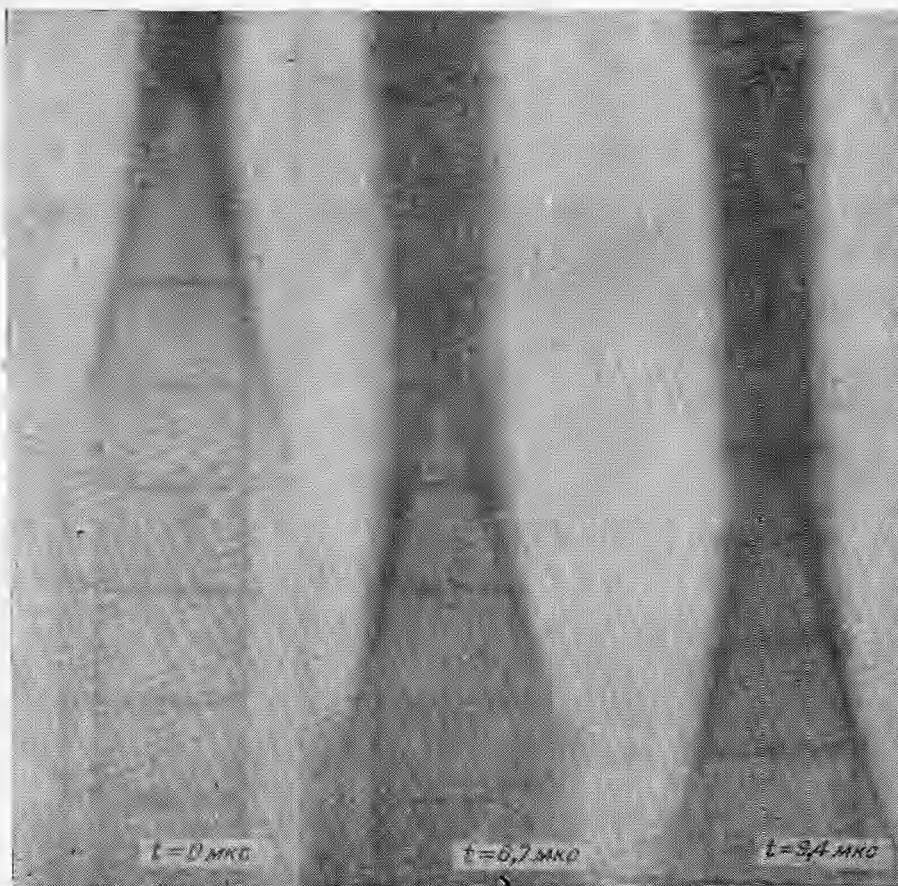


Рис. 6. Рентгеновские фотографии сжатия ампулы с горизонтальными фольгами и вертикальными цилиндрами в режиме с образованием конической волны.

графики изменения массовой скорости и плотности в сохранных образцах в функции от радиуса при обжатии в режиме с образованием конической волны.

В режиме ударного сжатия с образованием «трехударной» волновой конфигурации ударно-волновая картина и течение за ударной волной резко отличаются от описанных выше. На рис. 9 показаны рентгеновские фотографии процесса обжатия пористого цилиндра с образованием трехволновой конфигурации. Здесь видна геометрия ударной волны, которая состоит из «головной волны» и конической части, а также положение горизонтальных фольг в разные моменты времени. Оказалось, что геометрические размеры волны зависят от скорости детонации ВВ, диаметра заряда, а также от свойств исследуемого материала. Так, с увеличением диаметра заряда диаметр «диска Маха» растет.

При изучении характера течения за трехударной конфигурацией установлено, что оно характеризуется большей неоднородностью по сечению ампулы. За ударной волной в этом режиме можно выделить три области (рис. 10, а). Область течения за падающей конической волной, характер преломления линий тока за волной указывают на то, что здесь (область 1) течение ламинарно. Область 2 — течение за плоской частью волны. Таким образом, вблизи ударной волны наблюдаются два типа течения: высокоскоростное — за плоской волной и низкоскоростное, которое образуется за конической волной. Зафиксирована также область

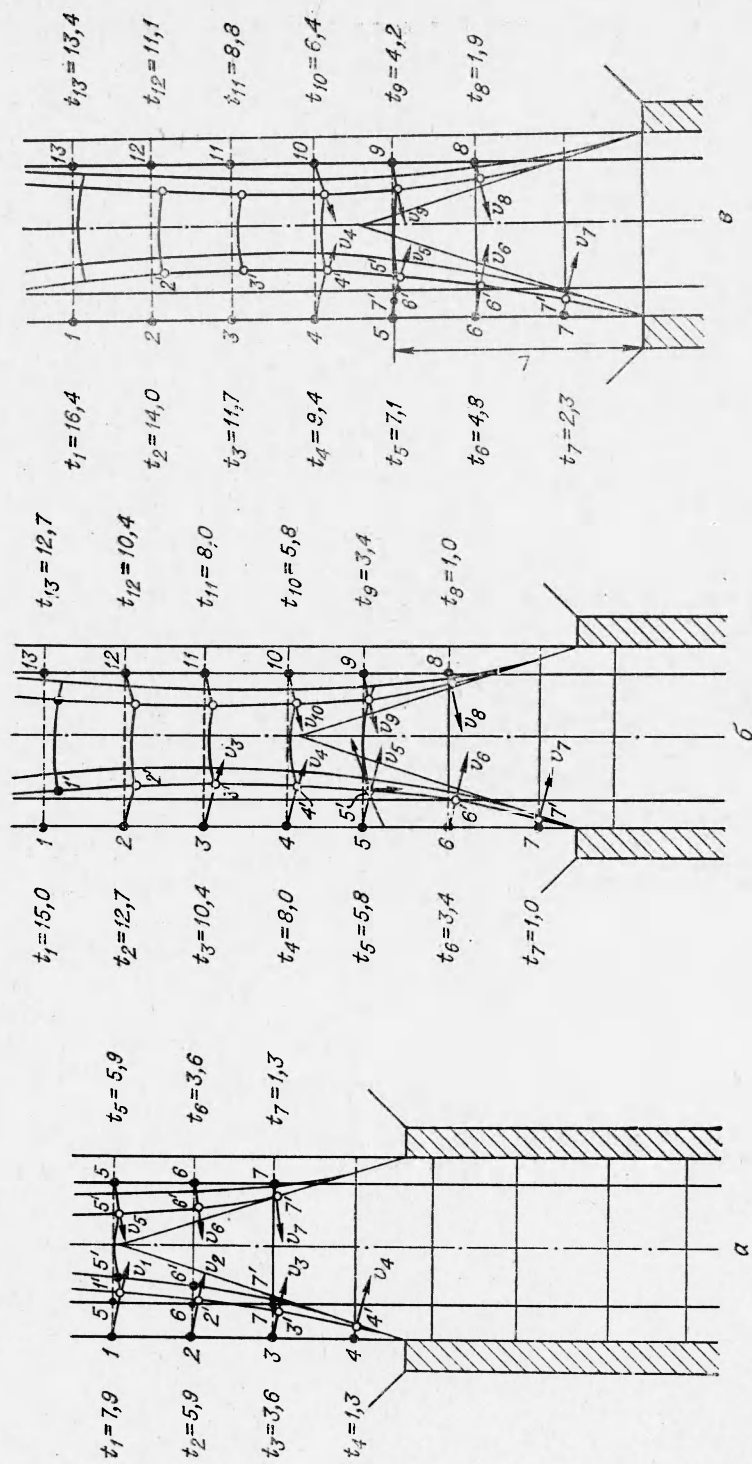


Рис. 7. Определение поля скоростей в режиме конической волны (две линии тока).

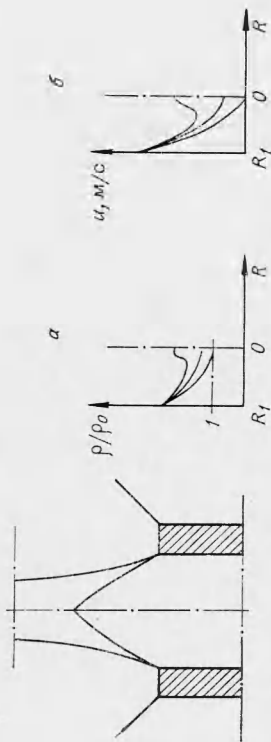


Рис. 8. Схематическое изображение ударного сжатия конечной волны.

а) изменение массовой скорости; б) изменение плотности в сохраненных объемах в функции от радиуса.

Рис. 9. Рентгеновские фотографии трехволновой конфигурации.

а) ампула без фольги; б) ампула с горизонтальными фольгами.

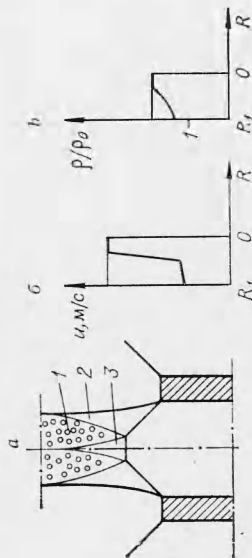
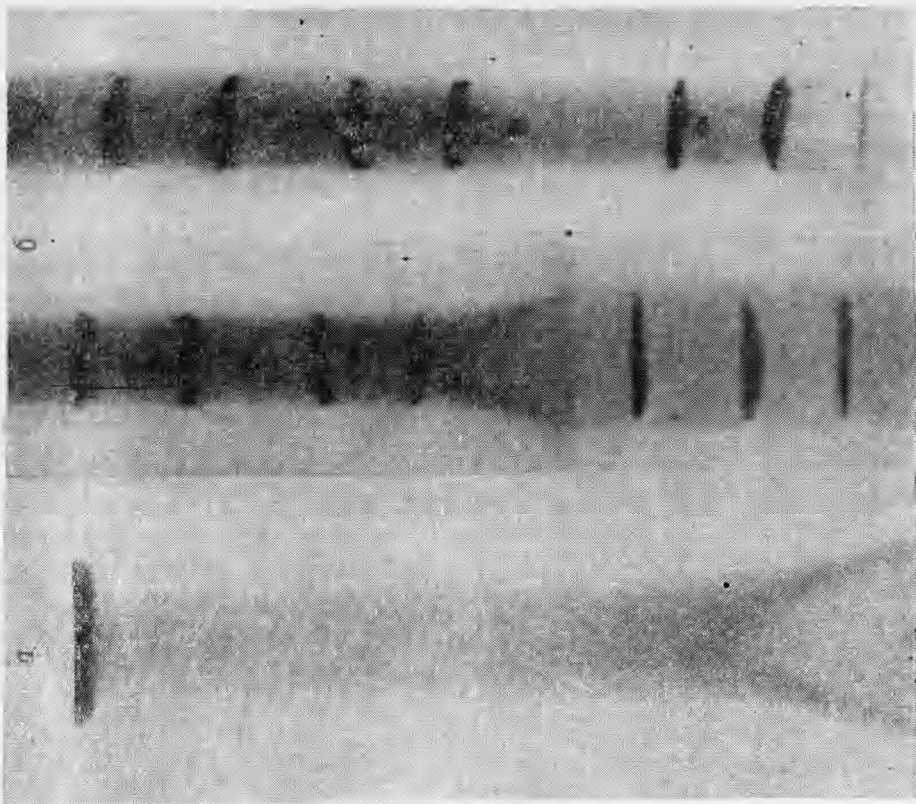


Рис. 10. Области течения за трехволновой конфигурацией (а), общий вид зависимостей массовой скорости за ударной волной от радиуса ампулы (а) и плотности сохраненных образцов от радиуса ампулы (б).

1 — зона турбулентного течения; 2 — течение за конечной частью волны; 3 — течение за «диском Маха».



| № точек на рис. 7 | Расстояние от оси, мм | | Средняя скорость м/с | № точек на рис. 7 | Расстояние от оси, мм | | Средняя скорость м/с |
|-------------------|-----------------------|------|----------------------|-------------------|-----------------------|------|----------------------|
| | 16 | 7,2 | | | 16 | 7,2 | |
| Р и с. 7, а | | | | | | | |
| 1 | 16 | 7,2 | 620 | 5 | 16 | 5,8 | 1000 |
| 2 | 16 | 5,9 | 720 | 6 | 16 | 3,4 | 1280 |
| 3 | 16 | 3,4 | 1100 | 7 | 16 | 1,05 | 1350 |
| 4 | 16 | 1,3 | 1300 | 8 | 11 | 1,0 | 1240 |
| 5 | 11 | 5,9 | 720 | 9 | 11 | 3,4 | 1100 |
| 6 | 11 | 3,6 | 1100 | 10 | 11 | 5,8 | 540 |
| 7 | 11 | 1,3 | 1200 | 11 | 11 | 8,8 | 520 |
| Р и с. 7, б | | | | | | | |
| Р и с. 7, в | | | | | | | |
| 1 | 16 | — | — | 4 | 16 | 9,3 | 350 |
| 2 | 16 | 12,7 | — | 5 | 16 | 7,1 | 730 |
| 3 | 16 | 10,4 | 350 | 6 | 16 | 4,8 | 1000 |
| 4 | 16 | 8,0 | 770 | 7 | 16 | 23,0 | 1250 |
| | | | | 9 | 11 | 1,9 | 1100 |
| | | | | 10 | 11 | 6,5 | 520 |

интенсивного перемешивания, которую назвали областью турбулентного течения (область 3). По методике, описанной выше, были определены скоростные характеристики течений в этих областях. Для одного из экспериментов скорость частиц вблизи оси ампулы (за фронтом плоской части волны) достигала 3300 м/с, в то время как скорость частиц за конической волной не превышала 850 м/с. Взаимодействие этих потоков приводит к быстрому разрушению фольг и вертикальных цилиндров, т. е. на некотором расстоянии за волной наблюдается интенсивное перемешивание материала. В этих экспериментах диаметр вертикальных цилиндров,

имитирующих линии тока, был меньше размеров диска Маха.

Область турбулентного течения может занимать микроскопические размеры, а в некоторых случаях может охватить все сечение ампулы. На рис. 10, в показано, что максимальная плотность наблюдается в той части, где прошла плоская волна.

В некоторых опытах по оси контейнера может образоваться полость. Ее образование связано с перетеканием вещества из верхней части контейнера в нижнюю. В некоторых случаях вещество из центральной области может быть также выброшено из контейнера. Выброс вещества из контейнера был зафиксирован экспериментально [10].

Теоретические модели расчета ударных волн

В первых исследованиях по динамическому сжатию использовались в основном плоские ударные волны. Для расчета параметров вещества за фронтом с успехом использовалась газодинамическая модель, в которой вещество считалось сжимаемым газом с заданным уравнением состояния, связывающим давление с плотностью и температурой. В рамках этой модели исследована ударная сжимаемость большинства твердых тел [11], построены достаточно сложные уравнения состояния [12]. Изменяя газодинамическую модель, авторы [13] исследуют более сложные явления в ударных волнах [13]. В опытах по ударной сжимаемости пористых тел были обнаружены эффекты, объяснение которых оказалось затруднительно. Рассмотрим с этой точки зрения волновые процессы, описанные выше.

Авторы настоящей работы пытались провести анализ явления образования конической ударной волны, но применить к расчету этого явления газодинамическую схему не удалось. На рентгеновских снимках можно видеть, что ударная волна пересекается с осью контейнера под некоторым углом.

Оставляя в стороне возможные сомнения о неточности расшифровки снимков в ближайшей окрестности оси, можно утверждать, что ударная волна имеет прямолинейную форму. В то же время уравнения газовой динамики в симметричном случае не допускают пересечения ударной волны с осью симметрии под ненулевым углом. Определенное экспериментально поле скоростей за фронтом ударной волны было обработано в предположении, что пористая среда является идеальной жидкостью. Расчеты, проведенные совместно с Г. Е. Кузьминым [14], показали, что

течение за фронтом не может быть описано ни уравнениями Эйлера, ни уравнениями Навье — Стокса. Таким образом, теоретическое описание обнаруженной экспериментально конической волны не может быть выполнено в предположении об отсутствии касательных напряжений, и для расчетов экспериментально наблюдаемого течения необходимо строить более сложные модели сплошной среды.

Конфигурация, похожая на трехударную волновую картину, была известна в газовой динамике [15]. С помощью подобной ударно-волновой картины описываются явления на входе в сужающемся канале, и использованная в предыдущем параграфе терминология базируется на этих исследованиях. Однако и в этом случае необходимо сделать некоторые замечания.

Во-первых, задача с трехударной конфигурацией в коническом случае не имеет строгого теоретического решения и не доказаны единственность и существование его в рамках модели идеальной сжимаемой жидкости. Во-вторых, на снимках можно наблюдать излом на фронте, но не удастся зафиксировать третью ударную волну в точке излома, и понятие «трехударной» можно использовать только условно. Заметим, что исследователям, наблюдавшим аналогичную картину в сплошных цилиндрах [16, 17], также не удалось зафиксировать отраженную ударную волну. В-третьих, характер течения за фронтом показывает наличие сильной турбулизации уже вблизи ударной волны. Эти соображения делают сомнительной целесообразность использования газодинамической модели для описания трехударной конфигурации.

В последнее время были проведены исследования косых ударных волн, порожденных детонационной волной, бегущей по поверхности пористого тела. Использование описанной методики позволило и в этом случае определить поле скоростей. Оказалось, что для теоретического описания возникающего за волной течения не подходят модели идеальной сжимаемой и вязкой сжимаемой жидкостей, а также модели линейно-упругих и идеально пластических сред.

Результаты проведенного исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. При ударном сжатии пористых цилиндрических тел обнаружено три ударно-волновых картины, которые соответствуют режимам: 1) с затуханием ударной волны, 2) с образованием конической волны, 3) с образованием трехударной конфигурации.

2. Во всех режимах течение за ударными волнами характеризуется значительными градиентами скоростей частиц. В случае образования трехударной конфигурации градиент скоростей частиц по радиусу ампулы становится значительным. В этом режиме условно можно выделить вблизи волны два течения: низкоскоростное за конической частью волны и высокоскоростное за плоской частью волны. Взаимодействие этих потоков приводит к турбулизации течения, к интенсивному перемешиванию вещества за волной.

3. Наблюдаемая структура течения за ударными волнами, по-видимому, является благоприятной для деформации частиц, для их лучшей упаковки и «сварки». Однако при взрывном прессовании порошков необходимо принимать во внимание то обстоятельство, что неоднородности в течении за ударными волнами могут приводить к неоднородностям свойств заготовок, получаемых взрывом.

4. Для теоретического описания наблюдаемых волновых конфигураций необходимо учитывать наличие касательных напряжений, возникающих за фронтом в сжимаемом порошке.

*Поступила в редакцию
21/II 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. Ю. Н. Рябинин. Докл. АН СССР, 1956, 109, 2, 289.
2. С. С. Бацанов, А. А. Дерибас. НТПГВ, 1965, 1, 1.
3. Г. А. Ададунов, В. И. Гольдманский, П. А. Ямпольский. Ж. Всесоюзного хим. общества, 1973, 18, 1.
4. E. Karpick. Steel, 1952, 131, 13.
5. U. S. Mokenpa. Patent USA, № 2648125, 1953.
6. R. I. Breicha, S. W. Moges. Amer. Machnist, 1962, 106, 3.
7. E. W. Bougler. Mech. Engineering, 1960, 82, 7.
8. А. М. Ставер. Междунар. симпозиум по обработке материалов высокой энергией. Мариански Лазни, 1970.
9. А. М. Ставер, М. П. Бондарь. Динамика сплошной среды. Вып. 5. Новосибирск, 1971.
10. А. А. Дерибас, В. В. Крупини др. ФГВ, 1973, 9, 6.
11. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
12. В. Е. Фортвов. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, стр. 561.
13. С. М. Бахрах, В. Н. Зубарев, А. А. Шанин. Горение и взрыв. М., «Наука», 1972, стр. 554.
14. А. М. Ставер. Канд. дисс. Новосибирск, Институт гидродинамики СО АН СССР, 1970.
15. Г. М. Арутюнян, Л. В. Карчевский. Отраженные ударные волны. М., «Машиностроение», 1973.
16. G. R. Fowles, J. H. Isbell. J. Appl. Phys., 1965, 36, 4.
17. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин, Г. И. Каннель. ПМТФ, 1969, 2.

УДК 539.63 : 666.192

ВОЗДЕЙСТВИЕ УДАРНЫХ ВОЛН НА ДВУОКИСЬ КРЕМНИЯ II. КВАРЦЕВОЕ СТЕКЛО

А. В. Ананьин, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин,
С. В. Першин, А. И. Рогачева, В. Ф. Тацкий
(Москва)

Бриджмен и Симон [1], исследуя сжимаемость кварцевого стекла при высоких статических давлениях, отметили, что после 100 кбар его уплотнение становится необратимым. В работах [2—5] необратимость уплотнения была подтверждена, но для порогового значения давления указывались значительно более низкие цифры, вплоть до 60 кбар. Маккензи в фундаментальных работах [6—8] обобщил полученные им и другими авторами результаты и пришел к выводу, что разногласия в значениях порогового давления объясняются различиями в величине сдвиговых напряжений, в той или иной мере характерных для разнообразных модификаций аппаратуры, применяющейся при создании высоких давлений. Кроме того, он подчеркнул роль времени действия давлений и истории исследуемых образцов. Максимальная плотность кварцевого стекла,

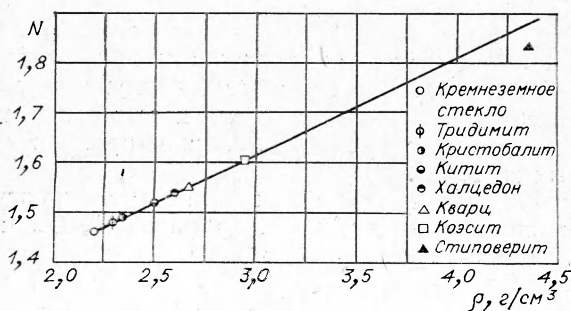


Рис. 1. Зависимость показателя преломления от плотности для различных модификаций двуокиси кремния.

наблюдавшаяся в «статических» экспериментах, составляла 2,64 г/см³ [6], т. е. была близка к плотности кварца (2,65 г/см³; плотность обычного кварцевого стекла—2,20 г/см³). Для плотного кварцевого стекла оставалась справедливой линейная зависимость между плотностью и показателем преломления, характерная для всех форм двуокиси кремния. Это позволяет