

но с образованием периодических деформаций в виде волн на схлопывающихся поверхностях. По-видимому, в данной ситуации для объяснения перехода струйного течения к волнообразованию необходимо ввести другие критерии, выходящие за рамки модели идеальной жидкости.

Поступила в редакцию
17/VII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. E. Charles. Munroc. Scribners Magasine, 1888, 3, 563.
2. Birkhoff, McDonald, Pugh, and Taylor. J. Appl. Phys. 1948, 19, 563—582.
3. М. А. Лаврентьев. Усп. мат. наук. 1958, 12, 4.
4. Дж. Уолш, Р. Шрефлер, Ф. Уиллиг. «Механика». Сб. переводов, вып. 2 (24), 1954.
5. С. К. Годунов, Я. М. Каждан, В. А. Симонов. ПМТФ, 1969, 6.
6. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеевков. ФГВ, 1967, 3, 4.
7. А. А. Дерибас, В. И. Мали, В. А. Симонов. Сб. «Второй Всесоюзный симпозиум по горению и взрыву». Ереван, 1969.
8. А. А. Дерибас. ФГВ, 1968, 4, 1.

УДК 532.592

УСТРОЙСТВО ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ ВЕЩЕСТВ, ПОДВЕРГНУТЫХ УДАРНОМУ СЖАТИЮ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Г. А. Ададуров, В. В. Густов, П. А. Ямпольский
(Москва)

Использование ударных волн для изучения различных превращений в веществе, сжатом до больших плотностей, открыло перед исследователями диапазон давлений очень трудно достижимых или недоступных статическим методом. В тех случаях, когда исследуются физико-химические свойства вещества, подвергнутого ударному сжатию, основной экспериментальной трудностью является создание взрывных устройств, которые обеспечивают не только сохранность вещества, но и приближают условия сжатия последнего к условиям, в которых проводятся строгие динамические исследования, например, регистрируется ударная адиабата. При сохранении ударно сжатого вещества для последующего исследования физико-химических свойств желателен получение тех или иных характеристик вещества в зависимости от давления, характера нагружения и времени динамического воздействия. В настоящее время для сохранения ударно сжатых веществ применяют методы, использующие цилиндрическую и плоскую геометрию.

В первом методе сжатие исследуемого вещества, помещенного внутри металлического цилиндра, осуществляется конусообразными сходящимися волнами, генерируемыми скользящей детонацией заряда ВВ. Картина сжатия в этом случае весьма сложна. В центральной части образец однократно сжимается головной ударной волной, которая занимает небольшую площадь. У стенок ампулы образец претерпевает двукратное сжатие падающей и отраженными волнами. О равенстве давлений за головной и отраженной ударными волнами можно говорить лишь

в первом приближении [1]. В центральной части, за счет однократности сжатия, вещество имеет большую температуру. Картина усложняется также из-за наличия в верхней части ампулы нестационарного участка при образовании трехударной конфигурации и за счет отражений от границы раздела образец — ампула. Оценка параметров ударного сжатия возможна только для начальной стадии процесса, если известна ударная адиабата исследуемого вещества [2].

Во втором методе сжатие исследуемого вещества осуществляется плоскими ударными волнами, генерируемыми в ампуле и образце плоской детонацией заряда ВВ или ударом пластины, разогнанной продуктами взрыва. Параметры ударного сжатия образца в этом случае могут быть измерены для первой проходящей волны или могут быть известны, если выполняются условия, когда давление в образце многократно отраженными ударными волнами доводится до предварительно измеренного давления в металлическом контейнере, окружающем исследуемое вещество. Следует отметить, что в большинстве работ по сохранению ударно сжатых веществ конечное давление было неопределенным, поскольку в образцах оно не доводилось до давления, имевшего место в материале контейнера из-за использованной геометрии опытов. Наиболее корректными, в этом смысле, можно считать условия, описанные в [3], когда эксперименты проводились на тонких образцах при относительно больших временах ударного воздействия.

Несмотря на более простую картину сжатия вещества в случае применения плоских ударных волн по сравнению с цилиндрической геометрией, получение характеристик ударно сжатого вещества в зависимости от давления требует большого количества опытов для сохранения и проведения специальных измерений. Как уже отмечалось, для оценки параметров ударных волн при использовании цилиндрической геометрии и в ряде случаев плоской необходимо знание ударной адиабаты исследуемого вещества. Однако регистрация ударной адиабаты вещества вообще, а тем более реагирующего или меняющего структуру в условиях ударного сжатия, задача весьма трудоемкая и требует постановки специального эксперимента.

В настоящей работе предлагается методика, позволяющая в одном эксперименте осуществить ударное сжатие одного или нескольких различных веществ в широком интервале фиксированных давлений с последующим сохранением образцов для проведения физико-химических анализов.

Известно, что тонкий слой вещества с меньшей динамической жесткостью по сравнению с металлом, в котором он находится при прохождении ударной волны, будет сжат многократными отраженными ударными волнами до давления в металле. Можно создать условия, когда по мере распространения ударной волны по металлическому блоку будут резко спадать параметры ударного сжатия на относительно небольшой толщине. С помощью специальных измерений можно получить зависимость давления от глубины металла. Если затем металлический блок заменить набором пластин необходимой толщины и между пластинами помещать тонкие образцы исследуемых веществ, то в одном опыте вещество претерпит многократное ударное сжатие при различных фиксированных давлениях.

Условия однократного сжатия, в описанной выше постановке эксперимента, можно получить, если динамическая жесткость исследуемого вещества больше по сравнению с материалом слоистого блока. Для определения параметров ударного сжатия в этом случае необходимо знать ударную адиабату вещества.

После проведения физико-химических анализов веществ, сохранившихся после ударного сжатия, можно получить зависимость различных характеристик от давления. Сопоставление полученных данных при сжатии вещества в слоистой сборке, где времена ударного воздействия малы, с данными, полученными в независимых экспериментах при одинаковом давлении, но с заданными и увеличенными временами сжатия, дадут возможность получения зависимости характеристик от времени ударного воздействия.

В настоящей работе было использовано устройство, показанное на рис. 1. Ударная волна в сборке создавалась ударом алюминиевой пластины толщиной 1 мм, разогнанной продуктами взрыва от плоской детонации тонкого слоя ВВ. Рас-

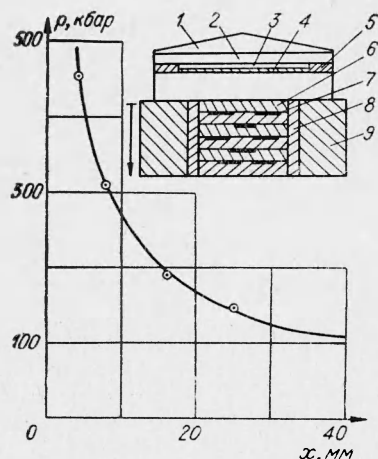


Рис. 1. Зависимость давления от толщины меди и экспериментальное устройство.

1 — генератор плоской детонационной волны; 2 — заряд ТНТ, $\rho_0 = 1,2 \text{ г/см}^3$, диаметр 100 мм; 3 — воздушный зазор; 4 — алюминиевый ударник толщиной 1 мм, диаметр 70 мм; 5 — стальной диск; 6 — медные пластины с углублениями под образцы; 7 — образцы исследуемого вещества; 8 — цилиндр из стали; 9 — стальное кольцо.

стояние полета составляло 25 мм. Параметры ударного сжатия в меди на различной глубине представлены в таблице и на рис. 1. Данные получены из измерений скорости свободной поверхности на различных толщинах меди с применением искусственного откола. Ударная адиабата меди и значения температур, близких к расчетным, заимствованы в работе [4]. В использованной постановке эксперимента длительность фазы сжатия

x , мм	D , км/сек	u , км/сек	p , кбар	T_y , °C	T_0 , °C
4	5,38	0,95	455	370	180
8	5,00	0,69	307	210	90
16	4,64	0,45	186	110	50
25	4,52	0,37	149	90	40
30	4,46	0,33	132	80	30

Примечание. D — скорость фронта, u — массовая скорость за фронтом ударной волны, p — давление ударного сжатия, T_y — температура ударного сжатия, T_0 — остаточная температура после разгрузки.

определялась догоняющей разгрузкой со стороны ударника. При помощи манганинового датчика давления¹ был зарегистрирован профиль ударной волны на глубинах меди 8, 15 и 35 мм, что соответствовало давлениям 307, 190 и 130 кбар. Спад давления до атмосферного в этих условиях происходил за времена 1,5 и 2 мксек соответственно.

Образцы исследуемых органических веществ в виде дисков толщиной до 0,7 мм, диаметром 15 мм или тонких пленок закладывались в выточки на медных пластинах или помещались между пластинами. В каждом слое можно располагать несколько образцов различных

¹ Измерения проводились Г. И. Канелем.

веществ. Толщина медных пластин может изменяться по необходимости, что позволит в отработанной сборке получить, например, по 15 точек при перепаде давления от 400 до 100 *кбар* для нескольких исследуемых веществ в одном опыте. Поскольку толщины образцов малы, можно считать, что существенного искажения фронта волны не происходит. Несмотря на резкий спад параметров ударного сжатия при использовании тонких слоев ($\sim 0,1$ мм) исследуемых веществ, конечное давление в образце после многократного сжатия будет равно давлению в металле, так как время однократного прохождения ударной волны составляет $\sim 0,02$ мксек. Следует отметить, что контакт тонкого слоя более сжимаемого вещества со слабо нагретым металлом (см. таблицу) способствует быстрому отводу остаточного тепла от образца, производя своеобразную закалку. При использовании более толстых (~ 1 мм) образцов однократная ударная волна распространяется за $\sim 0,2$ мксек, поэтому конечное давление будет меньше, чем давление в металле. В этом случае давление в образце можно оценить, если известна ударная адиабата вещества. В использованной постановке эксперимента, как уже отмечалось, время сжатия мало и снижение параметров происходит за счет догоняющей разгрузки со стороны свободной поверхности ударника. По этим причинам сохраненные образцы практически не имеют остаточной деформации, что весьма важно, поскольку в исследуемый процесс не вносится неконтролируемое влияние пластической деформации. Усиления параметров ударной волны при распространении по слоистой системе [5, 6] в использованных нами условиях ожидать не реально, поскольку ударная волна имеет резко спадающий профиль и не выполняется геометрия, необходимая для кумуляции.

Возможность использования многослойной сборки в качестве устройства для сохранения и изучения химических реакций веществ в широких интервалах динамического сжатия была подтверждена исследованием реакций полимеризации амида акриловой кислоты, а также вулканизацией дивинильного и натурального каучуков. Выбор этих веществ продиктован тем, что химические превращения их в ударных волнах изучены достаточно хорошо [7—8]. Акриламид марки х. ч. был очищен переосаждением из бензола и высушен в вакууме. Температура плавления составляла 84°C . Таблетки акриламида диаметром 15 мм, толщиной 0,5 мм и 0,3 мм и плотностью $1,05\text{—}1,12$ г/см³ помещались в выточки пластин многослойной сборки и подвергались динамическому сжатию по описанной выше схеме. Из сохраненного после сжатия вещества многократным промыванием в метаноле удалялся мономер и определялось содержание растворимого и нерастворимого в воде полимера, а также молекулярный вес. При построении кривых на рис. 2 за 100% принят вес заложенной в выточку таблетки. Выход нерастворимого в метаноле продукта растет с повышением давления в ударной волне, достигая максимального значения при давлениях 190—260 *кбар*. Экстремальный характер кривой 1 может быть объяснен конкурирующими с полимеризацией процессами деструкции. Это подтверждается уменьшением выхода растворимого в воде полимера при давлениях выше 190 *кбар*, а также изменением молекулярного веса полимера. Следует отметить, что образование газообразных продуктов, вероятно обусловленное пиролизом при высоких температурах, приводит к деструкции полимера, что подтверждается ниспадающими ветвями кривых 1, 2, 3.

Наряду с акриламидом был подвергнут динамическому сжатию дивинильный каучук СКД с 50 весовыми частями наполнителя (силикагель), введенными вальцеванием в течение 15 мин. В исходном веществе концентрация поперечных связей составляла $0,7 \cdot 10^{20}$ связи на грамм,

а содержание гель-фракции — 75%. Возрастание концентрации поперечных связей и увеличение гель-фракции (рис. 3) свидетельствуют о протекании процессов сшивания в каучуке при воздействии ударной волны.

Исследовалось поведение в многослойной сборке пленки натурального каучука, толщиной 0,3 мм, полученной отложением из латекса. Зависимость молекулярного веса золь-фракции (рис. 4) от давления

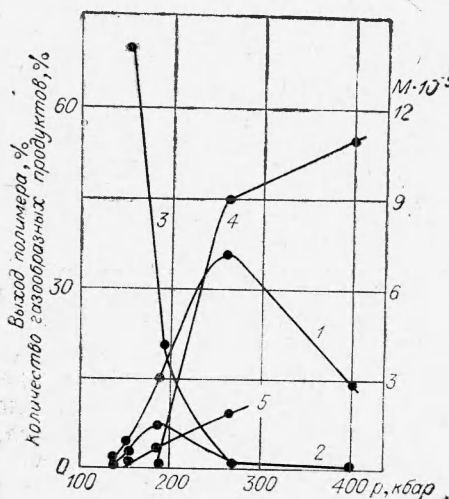


Рис. 2. Превращения в акриламиде в зависимости от давления в ударной волне. 1 — выход нерастворимого в мтаноле продукта; 2 — выход растворимого в воде полимера; 3 — молекулярный вес полимера; 4 — выход газообразных продуктов; 5 — молекулярный вес полимера, полученного сжатием акриламида при $T = -196^\circ \text{C}$.

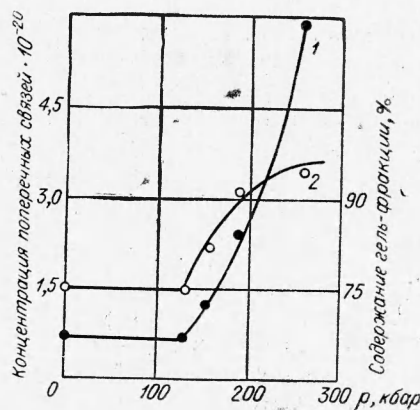


Рис. 3. Сшивание СКД в зависимости от давления в ударной волне. 1 — изменение концентрации поперечных связей; 2 — изменение содержания гель-фракции.

свидетельствует о том, что при давлениях ниже 190 кбар каучук претерпевает деструкцию, что согласуется с данными, полученными ранее на сборках обычного типа. Содержание гель-фракции определялось методом экстракции бензолом в аппарате Сокслета. При давлениях выше 190 кбар наблюдается увеличение гель-фракции (рис. 4, 2) вплоть до практически полного сшивания каучука при давлениях 260 кбар.

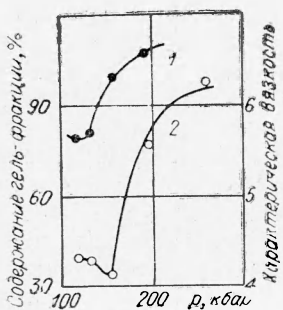


Рис. 4. Сшивание натурального каучука в зависимости от давления в ударной волне. 1 — изменение содержания гель-фракции, 2 — изменение молекулярного веса каучука.

Предлагаемая конструкция может быть использована для исследования процессов, протекающих при различных начальных температурах вещества. Проведение эксперимента при начальной температуре жидкого азота показало прекрасную сохраняемость образцов и сборки в целом. В этих условиях наблюдается некоторое снижение выхода как растворимого, так и нерастворимого в воде полимера, по сравнению с выходами при начальной температуре опыта, в 20°C . Вплоть до давления 260 кбар не обнаружено экстремального характера зависимости выхода полимера от давления. Анализ кривых (рис. 2, 5) изменения молекулярного веса и выхода полимера, полученного сжатием акрила-

мида при $T = -196^\circ$, показывает, что до давлений 160 кбар заметных процессов деструкции не протекает.

Характеристики подвергнутых ударному сжатию образцов акриламида и каучуков в многослойной сборке несколько отличаются от характеристик этих объектов, полученных в ампулах сохранения обычного типа. Эти отличия заключаются в том, что наблюдаемые химические эффекты сдвинуты в область более высоких давлений. Можно было ожидать, что использованные толщины образцов велики для данных условий и происходило некоторое снижение параметров ударных волн. Однако специальные эксперименты на образцах акриламида толщиной 0,3 мм дали близкие результаты к полученным на толщинах 0,5 мм. Отличие наблюдалось при использовании образцов толщиной 0,7 мм. Полученные результаты, по-видимому, отображают истинное положение, так как еще в [9] отмечалось, что при достаточно сильных ударных волнах (до 100 кбар), но очень коротких временах ударного сжатия, полимера не наблюдалось. Отличающиеся от известных [8] результаты, полученные при охлаждении сборки, могут быть объяснены тем, что понижение начальной температуры почти на 200°C существенно замедляет процессы термической деструкции. Это подтверждается тем, что область существования полимера с высоким молекулярным весом оказалась сдвинута в сторону более высоких давлений по сравнению с аналогичными опытами, проведенными при начальной температуре 20°C . Отсутствие заметных количеств газообразных продуктов свидетельствует об отсутствии процессов пиролитического разложения.

Обнаруженный сдвиг характеристик исследованных веществ в сторону больших давлений и некоторые качественные отличия по сравнению с полученными ранее при использовании обычных схем сохранения ударно сжатых веществ требует, конечно, дальнейшего более глубокого анализа. Тем не менее можно считать, что результаты получены в условиях, приближенных к условиям чистого ударного сжатия, поскольку сжатие было кратковременным, отсутствовало заметное пластическое течение вещества и происходил быстрый отвод тепла от образцов менее нагретым металлом.

Приведенные выше результаты показывают, что использование многослойной сборки значительно упрощает проведение взрывных экспериментов и расширяет возможности исследователей для изучения физико-химических превращений в веществе.

Авторы выражают благодарность В. Е. Чемагину и Г. И. Канелю за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
14/VIII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. А. Ададулов, А. Н. Дремин, Г. И. Канель. ПМТФ, 1969, 2, 126.
2. Г. А. Ададулов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2, 281.
3. И. Н. Дулин, Л. В. Альтшулер и др. ФТТ, 1969, 11, 5, 1252.
4. R. G. McQueen, F. P. March. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7.
5. Е. И. Забабахин. ЖЭТФ, 1965, 49, 2 (8), 642.
6. А. С. Козырев, В. Е. Костылева, В. Т. Рязанов. ЖЭТФ, 1969, 56, 2, 427.
7. П. А. Ямпольский, И. М. Баркалов и др. ВМС, 1968, 10А, 4, 799—807.
8. Т. Н. Игнатович, И. М. Баркалов и др. ХВЭ, 1970, 4, 5, 443.
9. В. А. Веретенников, А. Н. Дремин, А. Н. Михайлов. ФГВ, 1966, 2, 3, 95.