

О ТРАНСФОРМАЦИИ УДАРНОГО СЖАТИЯ В ИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ

*Г. А. Ададунов, В. В. Густов, В. С. Жученко,
М. Ю. Косыгин, П. А. Ямпольский*

(Москва)

Высокие давления находят все более широкое применение в различных областях науки и техники. К сожалению, исследование веществ в статических условиях до настоящего времени ограничено потолком по давлениям, а динамические методы, основанные на сжатии вещества ударными волнами (УВ) и дающие возможность достигать давления в миллионы и десятки миллионов бар, сопряжены с неизбежным разогревом вещества, что во многих случаях является нежелательным. В связи с этим представляется перспективной возможность трансформации ударного сжатия в изэнтропическое. При этом станет возможным при помощи УВ получать высокие сжатия вещества, недоступные современной лабораторной практике [1].

Исследования конденсированных веществ при динамических воздействиях сейчас проводятся в двух направлениях: 1) исследования в проходящих УВ, позволяющие с большой точностью получать заданные значения давления, плотности и энергии вещества при ударном сжатии, а также получать информацию об оптических, электрических и других свойствах веществ, сжатых УВ [2—4]; 2) исследование физико-химических свойств веществ, претерпевших ударное сжатие и сохраненных для последующих анализов [5—7]. Сочетание этих двух направлений кроме научного интереса уже сейчас представляет важное практическое значение.

При ударном сжатии увеличение энтропии приводит к росту температуры вещества (в зависимости от его свойств) до 10^3 — 10^5 °С при давлениях ~ 1 Мбар. Такие значения температур часто являются помехой, например, в случае гипотетического перехода водорода в металлическое состояние. Кроме того, после снятия давления волнами разгрузки вещество остается нагретым за счет необратимости ударного сжатия, что может приводить к отжигу образовавшейся структуры при сжатии как это имеет место при ударном синтезе алмаза из графита.

Из теории УВ известна принципиальная возможность снижения температуры при ударном сжатии вещества за счет разбиения УВ, имеющей большую амплитуду, на серию последовательно воздействующих УВ с меньшими амплитудами. Существенно, что при одинаковом конечном давлении в этом случае снижается температура и увеличивается степень сжатия вещества за счет уменьшения тепловой составляющей давления. В результате состояния на ударной адиабате многократного сжатия располагаются вблизи кривой сжатия при температуре абсолютного нуля.

В литературе описаны эксперименты по двукратному сжатию веществ при лобовом и косом столкновении УВ [8, 9], а также при отражении УВ от жесткой преграды [10]. В экспериментах с сохранением конденсированных веществ, претерпевших ударное сжатие, например, при плоской схеме нагружения [11], образец, обладающий малой динамической жесткостью, помещается в контейнер из металла (так называемую ампулу сохранения) и претерпевает многократное ударное сжатие. В приведенных примерах происходит уменьшение нагрева по сравнению с однократным сжатием, однако при сильных

ударных воздействиях, например 0,5 Мбар и более, амплитуда первой УВ велика и дает основной вклад в конечный нагрев.

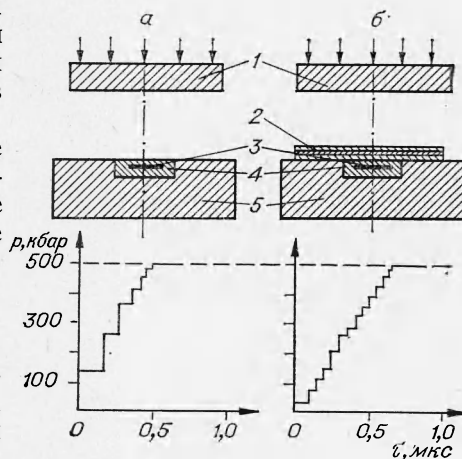
В настоящей работе с целью трансформации ударного сжатия в сжатие, приближающееся к изэнтропическому, предложена и использована в экспериментах с сохранением методики ударного нагружения веществ, дающая значительную степень изэнтропичности при ударном сжатии за счет уменьшения амплитуды первой входящей в образец УВ и увеличения числа последующих волн.

Несомненный интерес представляет непосредственное сравнение последствий воздействия на вещество изэнтропического и однократного ударного сжатий. Однако в настоящее время задача о превращении ударного сжатия в изэнтропическое находится только в стадии постановки [1]. Осуществление однократного сжатия с сохранением вещества до очень высоких давлений в малоплотных веществах сопряжено со значительными трудностями в экспериментах.

В настоящей работе было произведено сопоставление результатов динамического воздействия на вещества, дающего различную степень приближения к изэнтропическому сжатию. Схемы экспериментов и профили давления в образцах приведены на рисунке. В контрольных экспериментах конечное давление в исследуемых органических веществах составляло 500 кбар и определялось давлением, развитым в стальной ампуле, за счет удара латунной пластины толщиной 10 мм, разогнанной продуктами взрыва. Условия экспериментов заимствованы из работы [11].

В предложенной методике (см. рисунок) уменьшение амплитуды первой УВ и увеличение кратности сжатия при том же конечном давлении 500 кбар достигалось за счет перепускаания УВ в образец через систему пластин (экранов) плексиглас — сталь — плексиглас — сталь перед образцом (крышка ампулы), имевших толщины 3,0; 1,0; 2,0 и 1,5 мм соответственно. Параметры состояния и характер взаимодействия УВ в образце плексигласа толщиной 1 мм определялись анализом диаграмм в координатах давление — массовая скорость и время — расстояние. Предполагалось, что ударные адиабаты двукратного и многократного сжатий использованных веществ являются зеркальным отображением ударных адиабат однократного сжатия. Проведенный анализ показал, что характер ударного нагружения образца сильно зависит от выбранной толщины экранов. Так, применение экранов одинаковой толщины не дает преимуществ по сравнению с контрольными экспериментами. В случае убывающей толщины экранов удается уменьшить амплитуду первой УВ, однако второй скачок давления составляет 170 кбар. При некоторых соотношениях толщин экранов возможна кумуляция УВ [12], приводящая к увеличению максимального давления.

В таблице приведены давление p_1 и прирост температуры ΔT_1 в первой УВ и конечные значения $p_{\text{кон}}$ и $T_{\text{кон}}$ для плексигласа, развиваемые в контрольных экспериментах [13], а также рассчитанные для использованной методики данной работы. Для сравнения



Принципиальные схемы динамических экспериментов и профили нарастания давления.

а) контрольные условия, б) условия приближения к изэнтропическому сжатию.

1 — ударник, 2 — экраны, 3 — исследуемое вещество, 4 — ампула сохранения, 5 — контейнер.

приведены параметры в условиях однократного ударного сжатия и изэнтропического до 500 кбар. При расчете температур до давлений первой УВ предполагалось, что изэнтропа и ударная адиабата совпадают. Последующее изменение температуры рассчитано по параметрам состояния в первой волне и конечного состояния после изэнтропического дожатия. Коэффициент Грюнрайна $\gamma=0,7$ [13], $\Delta T=T-T_0$ — прирост температуры. Считалось, что $T_0=290^\circ\text{K}$.

Условия сжатия	p_1 , кбар	ΔT_1 , °C	$p_{\text{кон'}}$ кбар	$T_{\text{кон'}}$, °C
Однократная УВ [4] . . .	—	—	500	2200
Контрольные условия . . .	127	550	500	750
Приближение к изэнтропическому сжатию . . .	30	60	500	400
Изэнтропическое сжатие	—	—	500	200

В качестве объектов исследования были выбраны органические вещества: мономер — амид акриловой кислоты (АА) и полимерполипропилен (ПП). Ранее было показано, что полимеризация АА [14] и структурный переход в ПП происходят за счет ударного нагрева активированных при прохождении УВ веществ.

Эксперименты, проведенные в контрольных условиях, показали, что произошло значительное выгорание АА. Остаток в виде черного порошка, составляющий 30% от заложенного количества, на одну четверть растворялся в метаноле (продукты деструкции и мономер). Оставшаяся часть представляла смесь полимера с очень низким молекулярным весом ($\sim 5 \cdot 10^3$) и нерастворимых в воде продуктов деструкции — в основном сажи.

Сжатие АА по предложенной методике позволило сохранить $\sim 80\%$ вещества, в котором отсутствовали следы выгорания. Выход полимера составил 28% от заложенного количества мономера. Половину этого количества составлял растворимый в воде полимер АА с молекулярным весом $\sim 50 \cdot 10^3$.

Оптический и рентгенографический анализы образцов ПП показали, что в контрольных экспериментах происходит структурное превращение, заключающееся в переходе среднесферолитной или фибриллярной исходных структур в мелкосферолитную, изотропную. Это изменение структуры ПП при ударном сжатии происходит, начиная с 200 кбар [15]. В случае нагружения образцов ПП по предложенной методике структурного перехода не происходило.

Следует отметить, что снижение начальной температуры при проведении экспериментов в контрольных условиях нагружения до температуры -196°C приводит к изменениям в АА и ПП, аналогичным описанным при использовании условий, дающих значительную степень изэнтропичности.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о возможности существенного снижения температуры в сильно сжимаемых конденсированных веществах даже при весьма высоких динамических давлениях. Уменьшение температуры в сочетании с увеличением степени сжатия позволило изменить и физико-химические свойства веществ.

Использование различных схем приближения ударного сжатия к изэнтропическому в сочетании с низкими начальными температурами позволит в будущем осуществлять сжатие больших объемов веществ с незначительным подогревом до давлений в миллионы бар. Осуществление этих условий значительно расширит возможности физики высоких давлений и может привести к решению ряда актуальных задач.

Поступила в редакцию
5/III 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. А. С. Компанеев, В. И. Романова, П. А. Ямпольский. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 4.
2. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн. М., Физматгиз, 1963.
3. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 197.
4. С. Б. Кормер. УФН, 1968, 94, 641.
5. С. С. Бацанов. Инж.-физ. журнал, 1967, 12, 1.
6. А. Н. Дремин, О. Н. Бреусов. Усп. хим., 1968, 37, 898.
7. Г. А. Ададунов, В. И. Гольданский, А. А. Ямпольский. ЖВХО им. Менделеева, 1973, 66, 1.
8. Л. В. Альтшулер, А. П. Петрунин. ЖТФ, 1961, XXXI, 6, 717.
9. Л. В. Альтшулер, С. Б. Кормер и др. ЖЭТФ, 1961, 41, 5 (11), 1382.
10. Г. А. Ададунов, Д. В. Балашов, А. Н. Дремин. Изв. АН СССР, сер. Геофиз., 1961, 5, 712.
11. И. Н. Дулин, Л. В. Альтшулер и др. ФТТ, 1969, 11, 5.
12. Е. И. Забабахин. ЖЭТФ, 1965, 49, 2 (8).
13. Л. В. Альтшулер, И. М. Баркалов и др. ЖВЭ, 1968, 2, 1.
14. Г. А. Ададунов, В. В. Густов и др. ФГВ, 1972, 8, 4.
15. В. А. Каргин, И. Ю. Царевская и др. Высокмолекулярные соединения, 1968, 10, А, 2600.

,УДК 533.6.011.72+532.593+530.17

О ПОДОБИИ ТЕЧЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ОТРАЖЕНИИ СЛАБЫХ УДАРНЫХ ВОЛН ОТ ЖЕСТКОЙ СТЕНКИ И СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Б. И. Заславский, Р. А. Сафаров

(Москва)

В работе оптическими методами исследуются движения, возникающие при отражении слабых ударных волн от жесткой стенки. Приводятся результаты измерений перепадов плотности вдоль фронтов маховских и отраженных волн, критических углов и углов, определяющих положение тройной точки. Измерения проведены в широком диапазоне изменений относительных интенсивностей и углов падения набегающих ударных волн. Полученные данные систематизированы и обработаны таким образом, чтобы выявить область применимости закона подобия, который для рассматриваемых движений вытекает из асимптотической теории коротких волн [1, 2]. Показано, что во всем исследованном диапазоне относительных интенсивностей этот закон хорошо выполняется, если использовать значения критических углов, полученных экспериментально. Для сравнения приведены некоторые результаты измерений, проведенных другими авторами.

Пусть бесконечно длинная плоская ударная волна с перепадом плотности на фронте $\Delta\rho_1 = \rho_1 - \rho_0$ набегаёт на клин, составленный из плоских абсолютно жестких или свободных поверхностей. Если пренебречь влиянием вязкости, то известными методами [3] можно установить, что движение определяется следующими безразмерными параметрами: $\Delta\rho_1/\rho_0$; n ; α/α^* ; x/c_0t ; y/c_0t . Здесь x и y — координаты, t — время, c_0 — начальная скорость звука, ρ_0 и ρ_1 — плотности перед и за фронтом падающей волны, n — показатель адиабаты, α — угол полураствора клина (угол падения волны), α^* — критический угол; при $\alpha \geq \alpha^*$