

Рис. 3.

ного удара. На рис. 3 приведена фотография пластины из дюралюмина толщиной 7 мм после удара стеклянной частицы ( $d = 2,35$  мм) со скоростью 4,4 км/с. Такие эксперименты позволили сравнить разрушения при ударе каменных метеоритов с ранее известными данными для стальных частиц [10].

Несмотря на простоту полученных технических решений, задача

имитации удара каменных метеоритов имеет свою историю. Возможность ускорения частиц из стекла была показана в свое время В. П. Чистяковым, Ю. П. Фадеенко, которых авторы благодарят за обсуждения. Отдельные эксперименты с такими частицами поставлены одним из авторов данной работы; их результаты приведены в [10]. Но только улучшение технологии изготовления частиц из стекла позволило создать средства метания, годные для серийных экспериментов.

Авторы признательны А. Н. Аникиевой, благодаря помощи которой удалось получить частицы из стекла с улучшенными прочностными свойствами, а также Г. А. Швецову, В. В. Полюдову за помощь в организации работы.

*Институт гидродинамики  
СО АН СССР,  
Новосибирск*

*Поступила в редакцию  
23/VI 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Златин, А. П. Красильщиков и др. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях. М., «Наука», 1974.
2. В. М. Титов, Ю. И. Фадеенко, Н. С. Титова. Докл. АН СССР, 1968, 180, 5, 1051.
3. З. М. Титов, Г. А. Швецов. ФГВ, 1970, 6, 3, 401.
4. В. Ф. Лобанов, Ю. И. Фадеенко. ФГВ, 1974, 10, 1, 119.
5. F. L. Whipple.— In: Vistas in Astronautics, v. 2, NY, Pergamon Press, 1958.
6. В. Ф. Лобанов, Ю. И. Фадеенко.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 7. Новосибирск, 1971, с. 226.
7. Г. В. Прякин, В. М. Титов, Г. А. Швецов. ПМТФ, 1971, 3, 137.
8. В. В. Сильвестров, В. П. Урушкин.— В сб.: Динамика сплошной среды. Вып. 7. Новосибирск, 1971, с. 125.
9. Е. И. Биченков, В. В. Полюдов и др. ПТЭ, 1974, 13, 208.
10. В. М. Титов, Ю. И. Фадеенко. Космические исследования, 1972, X, 4, 589.

#### ИЗМЕРЕНИЕ ОСТАТОЧНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ КВАЗИИЗЭНТРОПИЧЕСКОМ СЖАТИИ

*С. А. Бордзиловский, Н. Н. Горшков*

Изэнтропическое сжатие конденсированного вещества до высоких давлений [1—3] занимает промежуточное положение между статическим методом и однократным ударно-волновым. Преимущество изэн-

тропического сжатия по сравнению с нагружением вещества однократной ударной волной до того же давления заключается в расширении диапазона параметров сжатия (уменьшение удельного объема, температуры и градиента давления в волне сжатия), что создает новые условия для исследования физико-химических превращений вещества.

Среди предложенных схем, осуществляющих приближение к изэнтропическому режиму сжатия [4—6], наиболее доступным в эксперименте является метод сжатия многократно отраженными ударными волнами в «легкой» прокладке, ограниченной «жесткими» поршнем и стенкой [7]. Ранее в [8] была показана возможность преобразования импульса летящего ударника в последовательность скачков давления посредством использования прокладки из жидкого водорода, который характеризуется малым динамическим импедансом. Последнее обстоятельство обуславливает малый прирост давления в отдельных циклах сжатия прокладки. В более жесткой среде процесс формирует ступенчатую волну сжатия с низкой температурой за фронтом.

В настоящей работе исследовался процесс квазиизэнтропического сжатия медных образцов через прокладку из жидкого водорода. Степень изэнтропичности сжатия контролировалась измерением остаточной температуры образцов. Размеры зоны низкотемпературного сжатия определялись глубиной, на которой волна сжатия трансформируется в ударный скачок. Плоская геометрия эксперимента обеспечивала наиболее контролируемые условия.

Высокие давления создавались методом соударения ускоряемых взрывом пластин с мишенью. Для метания дюралюминиевых пластин использовалась схема, аналогичная [9], с увеличенной до 60 мм толщиной заряда из ТГ 50/50. Скорость ударника (толщина 8 мм, диаметр 80 мм) измеренная методом светящихся щелей, составляла  $3,6 \pm 0,1$  км/с, кривизна ударника  $\approx 150$  нс при диаметре 50 мм. При соударении с медным образцом ударник с такой скоростью создает ударную волну с давлением  $p_T = 575 \pm 25$  кбар, с глубиной влияния догоняющей разгрузки  $\sim 50$  мм и углом боковой разгрузки  $\sim 33^\circ$ . Измерения давления биметаллическим датчиком (медь — константан) [8] по величине сигнала ЭДС и по скорости ударной волны в константане дало значение  $p_T = 540 \pm 50$  кбар.

Общая схема нагружения медных образцов через слой жидкого водорода изображена на рис. 1. Многократное отражение ударных волн в водороде формирует ступенчатую волну сжатия, проходящую в глубь образца. Для регистрации время-амплитудного профиля волны применялся биметаллический датчик с площадью контактирующих поверхностей  $21 \text{ мм}^2$ . В качестве изолятора, предохраняющего поверхность контакта от боковой разгрузки, использовалась окись бериллия. Время записи сигнала датчика определялось длиной константанового стержня: выход головы волны сжатия на контакт константан — электрод ограничивал время записи  $2 \div 3$  мкс.

На рис. 2 приведена осциллограмма сигнала ЭДС с датчика, поверхность контакта которого расположена вблизи границы раздела

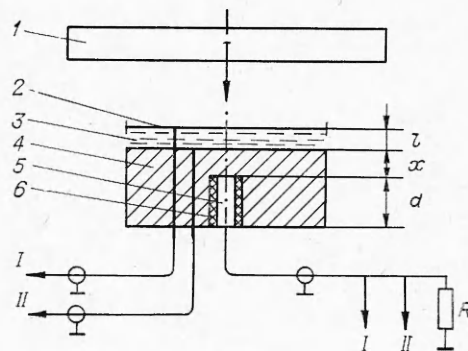


Рис. 1. Схема экспериментов по измерению глубины «опрокидывания»:

1 — ударник; 2 — мембрана,  $\delta = 50$  мкм; 3 — слой водорода; 4 — образец; 5 — константановый стержень диаметром 5 мм; 6 — изолятор;  $R = 75$  Ом. I, II — осциллографы.

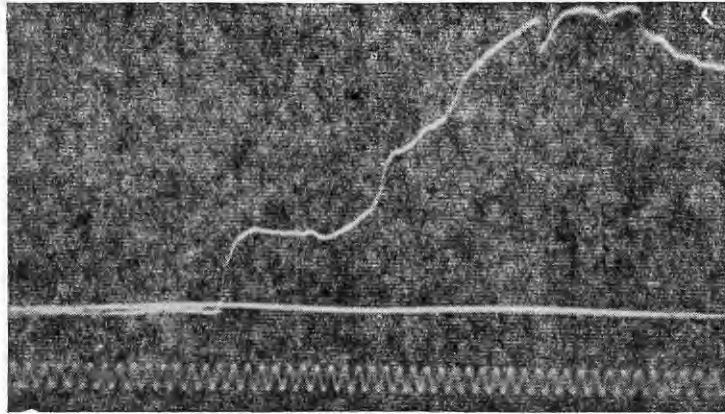


Рис. 2. Осциллограмма сигнала с биметаллического датчика при  $l=10.2$  мм,  $x=0.79$  мм. Метки 10 МГц.

жидкий водород — медь. Калибровочная кривая, снятая в [8], дает для первой проходящей волны  $p_2 \approx 120$  кбар и  $p_m \approx 550$  кбар. (Здесь  $p_2$  — давление в первой ударной волне,  $p_m$  — асимптотическое значение давления в ступенчатой волне сжатия.) Длительность волны сжатия  $\sim 2,5$  мкс. Ввиду того, что скорость распространения отдельных ступенек возрастает с давлением, такая волна при движении в глубь образца начинает трансформироваться в ударный скачок. Исследование процесса трансформации проводилось датчиками при различном заглублении поверхности контакта  $x$ . Сигнал подавался на осциллографы I и II. Осциллограф I запускался коаксиальным контактным датчиком в момент соударения летящей пластины с мембраной, осциллограф II — в момент отражения волны со скоростью  $u_{s1}$  от поверхности образца. Зазор между иглой датчика и медной фольгой, укрепленной на поверхности образца, составлял  $\sim 20$  мкм. Это обеспечивало время срабатывания датчика ( $\sim 30$  нс) при давлении в падающей волне 18 кбар. При обработке осциллограмм определялись скорость первой ударной волны  $u_{s1}$  в жидком водороде, давление в первом скачке волны сжатия в точке  $x$  и средняя скорость головы волны сжатия на участке  $0 \div x$ . Контроль разброса скорости ударника проводился с помощью расчета массовой скорости первой волны в водороде по ударной адиабате [10] и измеренной  $u_{s1}$ .

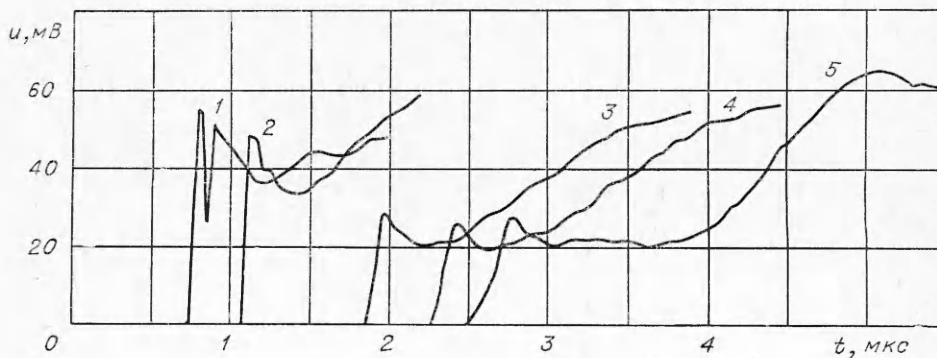


Рис. 3. Сигналы с биметаллических датчиков,  $l=5.2 \div 5.8$  мм  
 $x$ , мм: 1 — 9,76, 2 — 7,75, 3 — 4,68, 4 — 2,53, 5 — 1,87.

В проведенных экспериментах был зарегистрирован процесс «опрокидывания» волны сжатия в ударную по мере ее движения в глубь образца. Серия осциллограмм, приведенных на рис. 3, иллюстрирует отдельные фазы этого процесса. Давление на фронте волны при  $x=9,76$  мм достигает 340 кбар, т. е.  $\sim 0,6 p_m$ . Как и следовало ожидать, прослеживается увеличение средней скорости головы волны от  $\sim 4,3$  км/с на участке  $x=0 \div 4,68$  мм до  $\sim 4,7$  км/с на участке  $x=4,68 \div 9,76$  мм.

Полученные результаты были использованы при выборе размеров образцов в опытах по измерению остаточной температуры ( $T_{ост}$ ). Схема опытов осталась прежней: медные образцы нагружались через слой жидкого водорода  $l=10$  мм. Стальная обойма диаметром 120 мм и медный поддон предохраняли образец от разрушения. Сборка охлаждалась жидким водородом до начальной температуры  $T_0=20,5$  К. Достаточно большие размеры зоны, в которой отсутствует влияние разгрузки на  $p_m$ , позволили применить калориметрический метод измерения остаточной температуры. Сохраненный образец улавливался в контейнер с деревянными стенками и помещался в калориметр через 15–30 с после нагружения. Оценка нагрева образцов при торможении дает величину  $\Delta T \sim 10$  К. После попадания образца в контейнер возможен его нагрев за счет теплопроводности, конвективного теплообмена и др. Для учета этого нагрева образцы, охлажденные до температуры кипения жидкого азота (77,4 К), помещались в контейнер на 2 мин, их нагрев в этих условиях не превышал 10 К.

Были проведены три типа опытов:

1) измерение интегральной остаточной температуры массивного образца диаметром 50 и высотой 30 мм, в котором начинается процесс «опрокидывания». По результатам предыдущих опытов глубина опрокидывания  $x \sim 2l$ ;

2) измерение  $T_{ост}$  отдельных частей секционированного образца: образец диаметром 40 мм был набран из трех пластин толщиной по 10 мм. Остаточная энтальпия каждой из трех частей измерялась в отдельном калориметре;

3) контрольный опыт по измерению  $T_{ост}$  при ударном сжатии образца, охлажденного до  $T_0=20,5$  К (перед подрывом заряда жидкий водород выливался из криостата). Размеры образца такие же, как и в опыте 1.

Результаты измерений представлены в таблице, где  $\Delta H = H_{ост} - H_0$  — необратимое приращение энтальпии образца в процессе сжатия и последующей разгрузки ( $H_0$  — энтальпия образца перед экспериментом). При квазиизэнтропическом сжатии массивного образца получено уменьшение интегральной величины  $T_{ост}$  на 40% по сравнению с ударным сжатием при той же начальной температуре. В опыте 2 «опрокидывание» волны приводит к последовательному увеличению  $T_{ост}$  в глубь образца.

В последней строке таблицы приведены результаты расчета для ударного сжатия меди при  $p_T=560$  кбар, по данным [11]. Различие между рассчитанной для этого случая  $\Delta H$  и измеренной в опыте 3 незначительно. Это показывает достаточную надежность калориметрического метода измерения  $T_{ост}$  в исследованном диапазоне давлений и температур.

Номер опыта	$\Delta H$ , Дж/г	$T_{ост}$ , К	$k$
1	48	220	0,55
2	30	170	0,72
	35	186	0,67
	51	230	0,53
3	108	375	0
	99	540	0



Использование этого соотношения в приближении слабых ударных волн позволяет определить температуру сжатого вещества по  $T_{\text{ост}}$ . Результаты расчета для проведенных экспериментов и для случая  $T_0 = 293$  К [11] приведены ниже (индексы  $\Gamma$ ,  $s$  и  $q$  относятся к случаю ударного, изэнтропического и квазиизэнтропического сжатия соответственно):

$T_0$	$T_\Gamma$	$T_{\Gamma \text{ ост}}$	$T_s$	$T_q$	$T_{q \text{ ост}}$
293	815	540	444	—	—
20,5	569	375	31	257	170

Как видно, достижение предельно низких температур сжатого вещества требует высокой степени изэнтропичности процесса и минимально возможной низкой начальной температуры вещества.

В заключение отметим, что, поскольку динамический импеданс жидкого водорода как минимум на порядок меньше, чем у таких веществ, как плексиглас, жидкий азот и др., используемых в качестве «легкой» прокладки [6, 14], и жидкий водород одновременно является хладогентом с очень низкой температурой кипения, то схема, использующая его для сжатия многократно отраженными ударными волнами, наиболее приемлема в экспериментах по низкотемпературному сжатию.

Авторы выражают благодарность С. М. Караханову за полезные обсуждения.

*Институт гидродинамики  
СО АН СССР,  
Новосибирск*

*Поступила в редакцию  
18/V 1976*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Алдер.— В сб.: Твердые тела под высоким давлением, Под ред. В. Пол, Д. Варшауэр. М., «Мир», 1966.
2. Л. В. Альтшулер, Е. А. Дынин, В. А. Свидинский. Письма в ЖЭТФ, 1973, 17, 1.
3. П. А. Ямпольский. Вестн. АН СССР, 1975, 4, 42.
4. R. S. Hawke, D. E. Duerge a. o., J. Appl. Phys., 1972, 43, 6.
5. А. С. Компанеев, В. И. Романова, П. А. Ямпольский. Письма в ЖЭТФ, 1972, 16, 4.
6. Г. А. Ададунов и др. ФГВ, 1973, 9, 4.
7. Дж. Сомон.— В сб.: Физика высоких плотностей энергии. Под ред. П. Кальдирылы и Г. Кнопфеля. М., «Мир», 1974.
8. С. А. Бордзиловский, С. М. Караханов, В. М. Титов. ФГВ, 1974, 10, 2.
9. Г. И. Канель, А. М. Молодец, А. А. Воробьев. ФГВ, 1974, 10, 6.
10. M. van Thiel, B. Alder. Molec. Phys., 1966, 10, 427.
11. R. G. McQueen, S. P. Marsh. J. Appl. Phys., 1960, 31, 7.
12. J. M. Walsh, R. H. Christian. Phys. Rev., 1955, 97, 1544.
13. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., «Наука», 1966.
14. Г. А. Ададунов и др. Доклады I Всесоюзного симпозиума по импульсным давлениям, т. II. М., ВНИИФТРИ, 1974.

### КОЭФФИЦИЕНТ ОПТИЧЕСКОГО УСИЛЕНИЯ ЗА ОСЕСИММЕТРИЧНОЙ УДАРНОЙ ВОЛНОЙ

*В. А. Левин, Ю. В. Туник*

В настоящее время рассматриваются различные способы образования инверсии населенности колебательных уровней углекислого газа в смеси с азотом, гелием, водой и прочими добавками. В [1—3] при допущениях о стационарном и одномерном течении ставилась и решалась