

УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПОЛИИМИДА

А.В.Бушман, М.В.Жерноклетов, И.В.Ломоносов, Ю.Н.Сутулов*,
В.Е.Фортвов, К.В.Хищенко*

*Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий РАН
127412 Москва, Россия*

**Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики
607200 Арзамас-16, Россия*

Поступила в редакцию 8 сентября 1993 г.

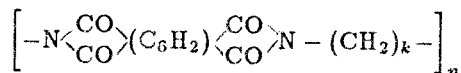
Экспериментально исследована сжимаемость полиимидного пенопласта четырех начальных плотностей в ударных волнах до давлений ≈ 700 кбар. На основе полученных опытных данных построено полуэмпирическое уравнение состояния полиимида для широкой области высокоэнергетических состояний.

Уравнение состояния веществ в условиях интенсивного импульсного воздействия мощных ионных или релятивистских электронных пучков, лазерного, рентгеновского излучения представляет существенный интерес для физики высоких плотностей энергии [1]. Результаты экспериментального исследования термодинамических свойств материалов при динамическом сжатии сплошных образцов определяют уравнение состояния вблизи ударной адиабаты [2]. Значительно расширяет область диаграммы состояний, достижимую для измерений, использование в ударноволновых экспериментах пористых образцов [3]. На основе динамических данных по ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов для широкой области фазовой диаграммы были построены полуэмпирические уравнения состояния большого количества металлов (см. [4] и приведенные там ссылки).

Совершенно иная ситуация наблюдается при исследовании термодинамики пластиков, обладающих уникальными физическими свойствами. Эти материалы характеризуются низкой плотностью, чрезвычайно малыми значениями электро- и теплопроводности, высокими радиационной стойкостью, пластичностью и износоустойчивостью. Пластики представляют собой новые перспективные материалы, которые находят широкое применение в конструкциях, несущих высокие силовые и тепловые нагрузки. Уравнения состояния пластиков в широком диапазоне плотностей и давлений являются необходимым элементом для решения многих задач физики высоких плотностей энергии, например при численном моделировании процессов высокоскоростного пробиывания защитных экранов космических аппаратов [5] или воздействия релятивистских электронных пучков на пластиковые мишени [6]. Однако количество экспериментальных работ по исследованию ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов пластиков крайне мало [7-9], а уравнения состояния для них до настоящего времени отсутствуют. Это стимулировало проведение экспериментальных исследований характеристик пластиков при высоких плотностях энергии и построение на основе совокупности имевшихся и выполненных измерений широкодиапазонных уравнений состояния. Ранее авторами были получены уравнения состояния полистирола [10], плексигласа и тефлона

[11], в данной работе приведены результаты впервые выполненных измерений динамической сжимаемости пористых образцов полиимида и на их основе построено уравнение состояния этого материала.

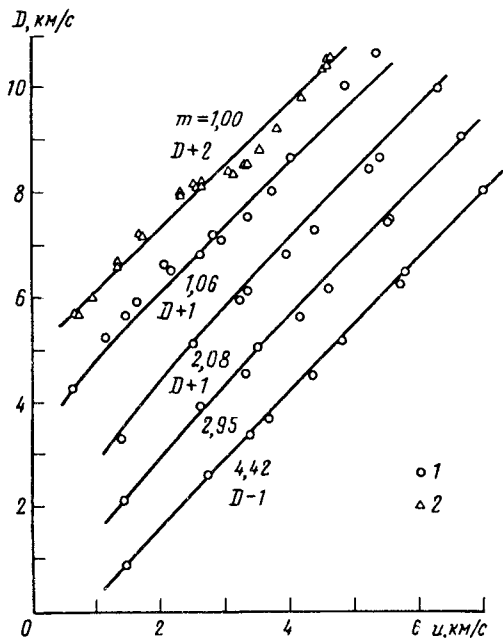
Полиимид является типичным представителем сложных высокомолекулярных полимеров с отмеченными выше характерными физическими свойствами, что привело к его широкому использованию, наряду с композитными материалами на основе полиимидных волокон, при производстве элементов аэрокосмической техники. Структурная формула полиимида



достаточно сложна и практически исключает возможность расчета термодинамических свойств методами квантовой механики. По этой причине построение уравнения состояния полиимида было проведено в рамках полуэмпирической модели, в которой общий вид функциональных зависимостей термодинамического потенциала устанавливается с привлечением теоретических представлений, а совокупность экспериментальных данных используется для определения численных коэффициентов в этих зависимостях. В настоящей работе получены данные по ударной сжимаемости полиимидного пенопласта четырех начальных плотностей и проведено обобщение всех имеющихся экспериментальных результатов в форме широкодиапазонного уравнения состояния.

Исследуемые пористые образцы (цилиндрические таблетки диаметром 12 и толщиной 3 мм) производились из заготовок, полученных методом вспенивания порошков, приготовленных из полиимидной смолы, с последующим отверждением образовавшегося пенопласта. Плотность сплошных образцов исследуемого пластика $\rho_0 = 1,41 \text{ г/см}^3$, в экспериментах были использованы таблетки полиимида с начальными плотностями $\rho_{00} = 1,33; 0,68; 0,48$ и $0,32 \text{ г/см}^3$. Ударные волны в образцах генерировались через алюминиевые экраны стальными ударниками различной толщины, разогнанными продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ вплоть до скоростей $\approx 5,6 \text{ км/с}$. При фиксированных амплитудах ударных волн в экранах регистрация (с погрешностью $\approx 1,5\%$) волновой скорости D в образцах дает возможность по известной динамической адиабате экрана определить методом отражения [2] значения массовой скорости u и давления p . Измерения проводились электроконтактным базисным способом с фиксацией сигналов от датчиков на скоростном осциллографе. Сводка полученных опытных данных представлена в таблице, экспериментальные точки, каждая из которых является усреднением 6–8 независимых регистраций, нанесены на $D - u$ -диаграмму (см. рисунок). Отметим, что данные экспериментов с образцами наименьшей пористости $m = 1,06$ удовлетворительно согласуются с результатами выполненных ранее исследований по ударному сжатию сплошных образцов полиимида [9].

На энергетической поверхности давление – объем – энергия для исследуемого пластика имевшиеся ударноволновые регистрации определяли лишь одну ударную адиабату, соответствующую сжатому состоянию сплошного вещества. Полученные в работе экспериментальные данные по динамическому сжатию пористых образцов несут более существенную информацию о поведении полиимида при высоких плотностях энергии. Для описания результатов проведенных экспериментальных измерений и полученных ранее данных [9] использовалась упрощенная модель уравнения состояния с небольшим числом



Ударные адиабаты образцов полиимида различной пористости ($m = \rho_0 / \rho_{00}$). Эксперимент: 1 – данная работа, 2 – [9]

подгоночных параметров.

Экспериментальные данные по ударной сжимаемости полиимидного пенопласта

u , км/с	D , км/с	p , кбар	u , км/с	D , км/с	p , кбар
$\rho_{00} = 1,33, m = 1,06$			$\rho_{00} = 0,48, m = 2,95$		
0,62	3,27	27	1,43	2,12	15
1,13	4,24	64	2,61	3,92	49
1,45	4,66	90	3,31	4,55	72
1,63	4,93	107	3,50	5,04	85
2,06	5,64	155	4,16	5,63	112
2,16	5,53	159	4,61	6,17	137
2,61	5,82	202	5,51	7,41	196
2,80	6,19	231	5,56	7,48	200
2,94	6,09	238	6,65	9,02	288
3,35	6,52	291			
3,72	7,00	346			
4,00	7,63	406			
4,85	8,99	580			
5,33	9,63	683			
$\rho_{00} = 0,68, m = 2,08$			$\rho_{00} = 0,32, m = 4,42$		
1,38	2,31	22	1,47	1,89	9
2,50	4,12	70	2,72	3,61	31
3,22	4,95	108	3,37	4,37	47
3,34	5,13	117	3,67	4,69	55
3,94	5,82	156	4,35	5,51	77
4,38	6,27	187	4,82	6,18	95
5,22	7,42	264	5,72	7,25	133
5,39	7,64	280	5,78	7,48	138
6,29	8,95	383	7,00	9,02	202

Калорическая модель широкодиапазонного уравнения состояния, принятая для термодинамического описания свойств полиимида, задается в обобщенной форме Ми – Грюнайзена:

$$p(V, E) = p_c(V) + \frac{\gamma(V, E)}{V} [E - E_c(V)],$$

где $E_c(V)$, $p_c(V) = -dE_c/dV$ – упругие составляющие энергии и давления при $T = 0$ К. Зависящий от объема и энергии коэффициент Грюнайзена имеет вид

$$\gamma(V, E) = \gamma_i + \frac{\gamma_c(V) - \gamma_i}{1 + \sigma_c^{-2/3} [E - E_c(V)]/E_a},$$

где $\sigma_c = V_{0c}/V$, V_{0c} – удельный объем при $p = 0$, $T = 0$ К, выражение $\gamma_c(V)$ соответствует случаю малых тепловых энергий, а значение γ_i характеризует область сильно разогретого конденсированного вещества. Энергия ангармонизма E_a определяет тепловую энергию перехода от одного предельного случая к другому и находится из данных ударноволновых экспериментов при высоких давлениях. Подробное описание модели и методики нахождения коэффициентов уравнения состояния по результатам динамических измерений приведено в работах [10,11].

Анализ совокупности данных, полученных в настоящей работе и содержащихся в компендиуме [9], свидетельствует о наличии физико-химического превращения вещества во фронте ударной волны. На ударной адиабате сплошного вещества превращение начинается в области давлений $p \approx 200$ кбар и проходит с заметным изменением плотности и сжимаемости среды, на пористых адиабатах за счет действия возникающих высоких температур эффект существенно сглаживается. Традиционно это объясняется деструкцией полимера, вызванной распадом С–Н-связей, что приводит к образованию малосжимаемой алмазоподобной фазы высокого давления углерода и соответствующего количества молекулярного водорода, а также других низкомолекулярных компонент [12]. В данной работе из соображений удобства использования в практических приложениях стрелось обобщенное уравнение состояния полиимида, единым образом описывающее фазовые модификации низкого и высокого давления. Такое упрощение приемлемо в практике проведения численных расчетов нестационарных газодинамических процессов, поскольку интегральная картина течения слабо зависит от локальных особенностей термодинамического описания свойств среды. Построенное уравнение состояния полиимида, как это видно из рисунка, адекватным образом описывает результаты измерений ударной сжимаемости сплошных и пористых образцов во всем реализованном интервале кинематических характеристик.

-
1. Physics of High Energy Density, Eds. P.Caldirola, H.Knoepfel, New-York: Academic Press, 1971.
 2. Л.В.Альтшулер, УФН **85**, 197 (1965).
 3. Я.Б.Зельдович, Ю.П.Райзер, Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений, М.: Наука, 1966.
 4. А.В.Бушман, И.В.Ломоносов, В.Е.Фортов, Уравнения состояния металлов при высоких плотностях энергии, Черноголовка: ИХФ РАН, 1992.
 5. С.И.Анисимов, А.В.Бушман, Г.И.Канель и др., Письма в ЖЭТФ, **39**, 9 (1984).
 6. V.E.Fortov, V.P.Efremov, G.I.Kanel et al, In: Shock Compression of Condensed Matter – 1991, Eds. S.C.Schmidt, R.D.Dick, J.W.Forbes, D.G.Tasker, Amsterdam: North-Holland, 1992. p.833.
 7. И.П.Дудолов, В.И.Ракитин, Ю.Н.Сутулов, Г.С.Телегин, ПМТФ №24, 148 (1969).

8. Compendium of Shock Waves Data, Ed. M. van Thiel, Livermore Lawrence: Livermore Laboratory Report UCRL-50108, 1977.
9. LASL Shock Hugoniot Data, Ed. S.P.Marsh, Berkeley: Univ. of California Press, 1980, p.444.
10. A.V.Bushman, V.E.Fortov, I.V.Lomonosov, In: High Pressure Equations of State: Theory and Applications, Eds. S.Eliezer, R.A.Ricci, Amsterdam: North-Holland, 1991, p.249.
11. А.В.Бушман, М.В.Жерноклетов, И.В.Ломоносов и др., ДАН **320**, 581 (1993).
12. F.H.Ree, J.Chem. Phys. **70**, 974 (1979).