

Общероссийский математический портал

А. В. Бушман, В. П. Ефремов, И. В. Ломоносов, А. В. Уткин, В. Е. Фортов, Ударная сжимаемость и уравнение состояния углепластика при высоких плотностях энергии, *ТВТ*, 1990, том 28, выпуск 6, 1232–1234

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.14.86

19 января 2025 г., 02:07:05



Результаты экспериментального исследования электрических характеристик оксидных материалов в среде продуктов сгорания

ЦИК		ЦГБ		МК		МБ		МШК	
Т, К	σ , См/м	Т, К	σ , См/м	Т, К	ρ , Ом·м	Т, К	ρ , Ом·м	Т, К	ρ , Ом·м
1850	29,0	1610	0,8	1920	6,7	1920	2,1	1850	13,5
1890	38,0	1720	1,3	2000	3,8	1960	1,6	1920	8,0
2000	43,0	1850	3,2	2040	2,2	1980	0,8	1960	10,0
2170	63,0	1940	5,8	2080	1,3	2060	0,5	2000	5,0
2350	80,0	2000	12,0	2130	0,7	2130	0,4	2100	2,8
—	—	2130	20,0	2220	0,6	2150	0,2	2170	1,6
—	—	2220	40,0	—	—	—	—	2220	0,9

печи с нагревателем из платинородиевой проволоки ПР-30 диаметром 1,0 мм; температура в печи измерялась термопарой ПР 30/6.

Полученные результаты приведены на рис. 2, 3; там же приведены экспериментальные точки для среды продуктов сгорания. Видно, что электропроводность всех испытанных материалов в среде продуктов сгорания практически можно получить при экстраполяции кривых, полученных в воздушной атмосфере, т. е. σ и ρ мало зависят от изменения газовой среды.

Таким образом, высокотемпературная газовая горелка является хорошим инструментом, позволяющим просто и надежно проводить измерения электропроводности оксидных материалов при уровне температур выше 1800 К в среде продуктов сгорания. При этом для многих оксидов результаты адекватны полученным в воздушной среде.

Авторы выражают благодарность Л. Б. Боровковой и Г. П. Чернышеву за предоставление образцов для проведения исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Материалы для канала МГДГ/Под ред. А. И. Рекова. М.: Наука, 1969.
2. Материалы для МГД-генератора/Под ред. А. И. Рекова. М.: Наука, 1977.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
07.04.89

УДК 536.2 © 1990 г.

*А. В. Бушман, В. П. Ефремов, И. В. Ломоносов,
А. В. Уткин, В. Е. Фортос*

УДАРНАЯ СЖИМАЕМОСТЬ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ УГЛЕПЛАСТИКА ПРИ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЯХ ЭНЕРГИИ

Композитные материалы на основе углеродных волокон находят широкое применение в качестве элементов конструкций, несущих высокие силовые и тепловые нагрузки [1, 2]. Изучение процессов мощного импульсного энерговыделения требует знания теплофизических свойств вещества. Однако имеющийся набор опытных данных о композитных материалах в важной для решения многих прикладных задач области фазовой диаграммы крайне малочислен [1-3], относится к области сравнительно невысоких давлений (до 30 кбар) и не позволяет с достаточной степенью надежности обеспечить описание термодинамических характеристик. В данной работе экспериментально исследована ударная сжимаемость углепластика до давлений 440 кбар и на основе полученной информации построено уравнение состояния этого материала, описывающее широкий диапазон высокоэнергетических состояний. Дополнительные измерения продольной скорости звука при давлении 30-150 кбар позволили определить величину коэффициента Пуассона углепластика.

Композитные материалы характеризуются сильной анизотропией структурных и механических свойств, причем показано [2], что максимальная информация о свойствах композита может быть получена при исследовании динамических свойств в направлении, перпендикулярном армированию. По этой причине в выполненных экспериментах образцы размещались таким образом, чтобы плоскость расположения армирующих углеродных волокон была параллельна фронту ударной волны.

В проведенных экспериментах исследовался углепластик с начальной плотностью $\rho_0 = 1,46$ г/см³. Ударные волны в образцах генерировались алюминиевыми

или стальными ударниками, разогнанными продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ в интервале скоростей 1,1–5,3 км/с. Начальная амплитуда ударной волны, входящей в образец, дополнительно варьировалась выбором материала экрана (алюминий, медь). При давлениях $p > 150$ кбар измерения проводились по методу «отражения» оптическим или электроконтактным базисным способом. Регистрировалась скорость фронта ударной волны в образце (с погрешностью $\approx 1,5\%$), а массовая скорость и давление рассчитывались по известным ударным адиабатам экранов и заданным характеристикам генерируемых ударных волн.

В интервале 30–150 кбар с помощью манганиновых датчиков регистрировались профили давления (с погрешностью $\approx 5\%$) в двух различных сечениях образца. Первый датчик располагался на контактной границе экран – образец (входящий импульс), второй – на глубине 10 мм. Одновременная фиксация профилей давления в двух сечениях позволяет найти не только скорость фронта ударной волны D , но и дает возможность непосредственно определить значения давления p в этих сечениях. Поскольку реализуемые давления много больше предела прочности углепластика [2], анализ распространения ударных волн выполнялся в гидродинамическом приближении [4]. Независимые измерения D и p позволяют скорректировать результаты полученных экспериментальных данных и с большей надежностью осуществлять регистрацию характеристик ударной волны в образце. Кроме того, по моментам прихода фронта волны разрежения от тыльной стороны ударника в двух фиксированных сечениях определялись значения продольной скорости звука при заданном давлении.

Единственным источником информации о термодинамических свойствах углепластика в области высоких плотностей энергии являются полученные в работе экспериментальные данные по ударной сжимаемости. На энергетической поверхности давление – энергия – объем они определяют линию ударной адиабаты. Это обстоятельство, а также сложный физический и химический состав углепластика накладывают существенные ограничения на выбор термодинамического потенциала и заставляют применять для описания теплофизических свойств упрощенные модели. Уравнение состояния задавалось в обобщенной форме

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

с зависящим от энергии и объема коэффициентом Грюнайзена

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

где индекс «с» относится к упругой компоненте; $\sigma_c = V_{0c}/V$; V_{0c} – удельный объем при $p=0$, $T=0$ К; выражение $\gamma_c(V)$ соответствует случаю малых тепловых энергий (температур), а значение γ_i характеризует область сильнонагретого конденсированного вещества. Энергия ангармонизма E_a определяет тепловую энергию перехода от одного предельного случая к другому и находится из данных динамических экспериментов при высоких давлениях.

Объемные зависимости упругой компоненты энергии и коэффициента Грюнайзена определялись согласно выражениям

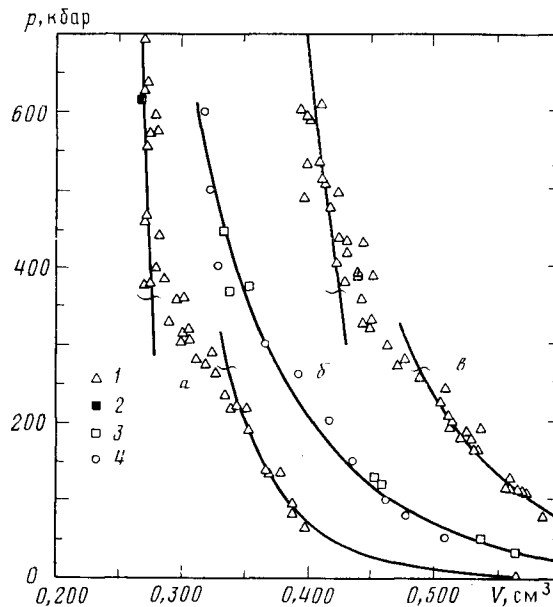
$$E_c(V) = \frac{B_{0c} V_{0c}}{3-n} \left[\frac{\sigma_c^3}{3} - \frac{\sigma_c^n}{n} \right] + E_b,$$

$$\gamma_c(V) = \frac{2}{3} + \left(\gamma_0 - \frac{2}{3} \right) \frac{1 + \sigma_m^2}{\sigma^2 + \sigma_m^2} \sigma.$$

Здесь $\sigma = V_0/V$; V_0 и γ_0 – удельный объем и значение коэффициента Грюнайзена при нормальных условиях ($p=1$ бар, $T=293$ К); B_{0c} – модуль объемного сжатия в точке $\sigma_c=1$, $T=0$ К. Такая форма записи обеспечивает правильную газовую асимптотику для коэффициента Грюнайзена в случае больших и малых плотностей. Наклон экспериментальной ударной адиабаты $\lambda (D=c_0 + \lambda u)$ позволяет, по известному соотношению $B_{0p}' = 4\lambda - 1$ [5], определить производную модуля объемного сжатия по давлению $B_{0p}' = dB_c/dp$ при $\sigma_c=1$, что дает связь между B_{0p}' и n в виде $B_{0p}' = n + 5$. Условие нормировки упругой компоненты энергии $E_c(V_{0c})=0$ определяет значение коэффициента $E_b = B_{0c} V_{0c} / 3n$, имеющего смысл характерной энергии деструкции. Величина B_{0c} итерациями подбиралась такой, чтобы совместно с тепловой компонентой обеспечить экспериментальное значение изэнтропического модуля объемного сжатия при нормальных условиях $B_{0s} = \rho_0 c_0^2$.

В композитных материалах тип армирующих волокон, связующих компонент и их взаимное содержание может варьироваться в значительных пределах, что обуславливает различие их теплофизических свойств. В то же время знание ударной сжимаемости исходных компонент позволяет для широкого класса веществ (смесевые составы, сплавы) построить по соотношениям аддитивности их ударные адиабаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными зависимостями [6, 7].

Расчетные и экспериментальные данные по ударной сжимаемости углепластика и его исходных компонент – эпоксидной смолы и синтетического графита, выбранного в качестве аналога углеродного волокна, – представлены на рисунке. Там же



Ударные адиабаты синтетического графита (а), углепластика (б) и эпоксидной смолы (в) (эксперимент: 1 — [9], 2 — [10], 3 — результаты авторов; 4 — ударная адиабата углепластика, полученная по соотношению аддитивности; сплошные линии — расчетные ударные адиабаты; для графита и эпоксидной смолы приведены результаты расчета фаз высокого и низкого давлений; волнистыми линиями отмечены границы области фазового перехода)

нанесена ударная адиабата углепластика, построенная аддитивным образом по расчетным адиабатам компонент. С ростом давления в ударной волне графит превращается в алмаз, а в гидрокарбонатах распад связей С—Н приводит к образованию молекулярного водорода и алмазоподобной фазы углерода высокого давления [8]. Эти характерные изломы на адиабатах компонент проявляются и на аддитивной ударной адиабате, что позволяет предположить наличие подобного фазового перехода в углепластике при $p \approx 200$ кбар. Аддитивная ударная адиабата углепластика хорошо согласуется с полученными опытными данными, однако участок фазового перехода требует дополнительных исследований. Рассчитанная по данной модели ударная адиабата углепластика хорошо описывает единым образом экспериментальные точки и согласуется с аддитивным расчетом.

Совместная обработка расчетных значений изэнтропической скорости звука на ударной адиабате и полученной экспериментально продольной скорости позволила определить коэффициент Пуассона углепластика в диапазоне давлений 30–150 кбар. Его величина в исследованном интервале параметров оказалась практически постоянной и равной $0,24 \pm 0,03$, что близко к характерным значениям коэффициента Пуассона для твердых тел.

Авторы выражают благодарность Г. И. Канелю за плодотворные дискуссии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудка К. К., Преображенский И. Н., Шестаков А. С. // Мех. комп. мат. 1983. № 4. С. 624.
2. Фитцер Э. Углеродные волокна и углекомпозиаты. М.: Мир, 1988.
3. Батюков Ю. В., Новиков С. А., Сеницын Л. Н., Чернов А. В. // Мех. комп. мат. 1979. № 2. С. 322.
4. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л., Фортгов В. Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногоровка: ИХФ АН СССР. 1988. 200 с.
5. Guinan M. W., Steinberg D. J. // J. Phys. Chem. Solids. 1974. V. 35. № 11. P. 1501.
6. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. // ПМТФ. 1971. № 4. С. 152.
7. Баканова А. А., Дудолов И. П., Сугулов Ю. Н. // ПМТФ. 1972. № 6. С. 167.
8. Ree F. H. // J. Chem. Phys. 1979. V. 70. № 2. P. 974.
9. LASL Shock Hugoniot Data/Ed. S. P. Marsh, Berkeley — Los Angeles — London. Univ. California Press, 1980.
10. Трунин Р. Ф., Симаков Г. В., Моисеев Б. Н. и др. // ЖЭТФ. 1969. Т. 56. В. 4. С. 1169.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
18.07.89