

УДК 539.12.04+531.78

А. П. Степовик

О КОЭФФИЦИЕНТЕ ГРЮНАЙЗЕНА ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА УПВ-1

В последние годы интенсивно развивается направление, связанное с изучением механических свойств материалов при быстром выделении в них энергии лазерного излучения, электронного, пучков ионов и т. д. [1—3]. Поглощение энергии за времена, много меньшие механической инерционности материала, приводит к возникновению в нем термоупругих напряжений. Применение источников излучения с различными спектром и величиной переноса энергии, использование материалов с разной поглощающей способностью дают возможность исследовать процесс распространения волн напряжений различной длительности по материалу, измерять его термодинамические и упругие параметры, а при достаточной поглощенной энергии — изучать откольные явления [4, 5].

Связь между возникающим термоупругим напряжением σ и поглощенной энергией излучения E выражается через известное соотношение [6] $\sigma = \Gamma(T, V)\rho E$ (Γ — коэффициент Грюнайзена облучаемого материала, ρ — его плотность).

Для большинства однородных изотропных тел в диапазоне температур выше $\sim 0,3 \Theta$ (Θ — температура Дебая) Γ слабо зависит от температур [7] и может быть выражен как [6]

$$\Gamma = \beta c_0^2 / c_V,$$

где β — коэффициент объемного теплового расширения; c_V — удельная теплоемкость; c_0 — скорость звука, определяемая сжимаемостью.

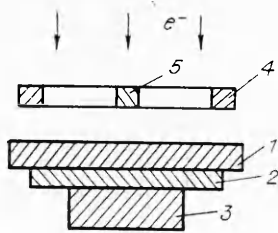
Для анизотропных тел Γ не является константой и для каждого направления в материале величина его будет различной.

Один из удобных материалов для изучения зависимости Γ от степени анизотропии материала — пиролиитический графит, получаемый путем осаждения метана на горячую поверхность графита [8]. Он представляет собой поликристаллический материал с большим количеством кристаллитов, имеющих предпочтительную ориентацию осей, которая зависит от способа изготовления и обработки материала [9].

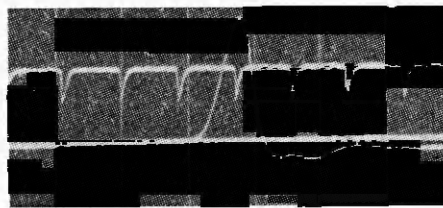
В [9, 10] проведены измерения на установке с импульсным электронным пучком коэффициента Γ в двух взаимно перпендикулярных направлениях пиролиитических графитов PG1, PG2, PG3 и высокоанизотропного графита SAPG. Получено, что если у PG1, PG2 и PG3 для направлений параллельно и перпендикулярно плоскости осаждения углерода отличаются только значения Γ , то для SAPG изменяется и знак.

В настоящей работе излагаются результаты измерений коэффициента Грюнайзена отечественного пиролиитического углерода (пироуглерода) УПВ-1. Измерения проведены на установке, по типу и принципу работы аналогичной [11], с выведенным в атмосферу электронным пучком. Длительность импульса электронов на полувысоте $\sim 1,3 \cdot 10^{-7}$ с, максимальная энергия их ~ 1 МэВ, средняя энергия 0,3 ... 0,5 МэВ.

Было изготовлено два образца диаметром 60 мм и толщиной 10 мм с различной ориентацией плоскостей по отношению к направлению осаждения углерода: перпендикулярно и параллельно плоскости осаждения. Толщина образцов превышала величину практического пробега электронов с максимальной энергией ~ 2 мм. Поскольку исходная заготовка



Р и с. 1



Р и с. 2

пирougлерода имела толщину ~ 7 мм, образцы изготавливали из отдельных пластин, вырезанных в нужном направлении, которые затем соединяли тонким слоем (30 ... 40 мкм) эпоксидного клея.

К полученным образцам 1 (рис. 1) приклеивали пластину плавленого кварца 2 толщиной 6 мм и диаметром 50 мм, а к ней — пьезодатчик 3 (пьезокерамику ЦТС-19 диаметром 30 мм и толщиной 13 мм). Пластина плавленого кварца необходима для повышения помехоустойчивости измерений. Пучок электронов падал на свободную лицевую поверхность образца.

Регистрировали величину переноса энергии электронов, падающего на образец, и амплитуду механического напряжения, действующего на пьезодатчик.

Величину переноса энергии измеряли по разогреву стальных калориметров полного поглощения: кольцевого 4 с наружным диаметром 57 мм и внутренним 45 мм и центрального 5 диаметром 6 мм.

Поскольку величина пробега электронов в УПВ-1 существенно меньше толщины образца, из облученного объема будет распространяться в направлении датчика биполярный импульс напряжения с фазами сжатия и растяжения. Информация о знаке и значении Γ содержится в фазе, возглавляющей биполярный импульс, так как вторая фаза обусловлена отражением от свободной облучаемой поверхности образца.

Амплитуду напряжения первой фазы биполярного импульса σ_1 вычисляли из выражения

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_3 (z_3 + z_2)(z_2 + z_1)}{4 z_3 z_2},$$

где σ_3 — напряжение, действующее на пьезодатчик; z_3, z_2, z_1 — акустические импедансы материала датчика, плавленого кварца и образца соответственно; $z = \rho v$; v — скорость звука в материале.

Скорость звука в направлениях a и c (a — вдоль плоскости осаждения углерода, c — перпендикулярно ей) была измерена по времени прохождения импульса механического напряжения по толщине образцов. Характерный вид осциллограммы, регистрируемой с помощью пьезодатчика, приведен на рис. 2. Длительность меток 0,4 мкс. Положительный сигнал — профиль термоупругого напряжения.

Коэффициент Грюнайзена пирougлерода определяли путем сравнения с коэффициентом Грюнайзена известного материала при одинаковой величине переноса энергии электронов. С этой целью изготовлена такая же слойка: образец — плавеный кварц — пьезокерамика, где в качестве образца выбран сплав АМГ6 (Γ алюминия равен 2,09 [6]). Выбор этого сплава обусловлен также тем, что средний атомный номер элементов, из которых он состоит, и плотность близки к углероду, поэтому и профили энерговыделений электронов в этих материалах должны быть близкими (средние потери энергии при неупругих соударениях на 1 см пути электронов с энергией 0,5 МэВ отличаются менее чем на 10%). Величина переноса энергии электронов, падающего на образец, не превышала 6 ... 8 Дж/см². При таких уровнях энергии максимальный разогрев пирougлерода составлял несколько градусов, т. е. температура образца практически не изменялась и была близка к комнатной (~ 300 К).

Материал	Направление			
	с		а	
	Г	v, см/мкс	Г	v, см/мкс
УПВ-1	0,26+0,04	0,36+0,04	0,17+0,03	0,53+0,05
PG1	0,3+0,03	0,33+0,05	0,3+0,03	0,65+0,05
PG2	0,29+0,02	0,35+0,05	0,32+0,03	0,55+0,05
PG3	0,3	0,36	0,2	0,61
SAPG	0,48+0,03	0,38+0,05	-0,99+0,15	2,2+0,1

В таблице приведены измеренные значения коэффициента Грюнайзена и скорости звука пироуглерода УПВ-1, а также для сравнения аналогичные данные [9, 10] при температуре 300 К. Из таблицы видно, что характеристики УПВ-1 близки к PG2 и PG3 и значительно отличаются от SAPG. Действительно, из всех этих материалов структура SAPG ближе всего к структуре кристаллического графита. Размеры кристаллитов в материале, приготовленном таким же способом, что и SAPG, достигают в направлении *a* 10 ... 40 мкм [9] и ориентация их наиболее упорядочена. Для сравнения укажем, что, согласно [12], в УПВ-1 кристаллиты имеют размер порядка 0,19 мкм. По способу изготовления из отечественных материалов ближе всего к SAPG пиролитический графит УПВ-1Т.

Данные о коэффициенте Грюнайзена и скорости звука в нем в настоящее время в литературе отсутствуют.

ЛИТЕРАТУРА

- Oswald R. B., Schallhorn D. R., Eisen H. A., McLean F. B. Dynamic response of solids exposed to a pulsed-electron-beam // Appl. Phys. Let.— 1968.— V. 13, N 8.
- Глушак Б. Л., Новиков С. А. и др. Исследование волн напряжений в стеклотекстолите и фторопласте при их быстром разогреве излучением // ПМТФ.— 1980.— № 6.
- Воробьев С. А., Лопатин В. С. и др. Разрушение твердого тела в результате облучения сильнооточными пучками понов // ЖТФ.— 1985.— Т. 55, вып. 6.
- Perkin J. L., Morriss E., Large D. W. The spalling of aluminum with a pulsed electron beams // J. Phys. D: Appl. Phys.— 1971.— V. 4, N 7.
- Степовик А. П. Влияние ориентации текстуры исходного материала на характер откольных повреждений сплавов Д16 и АМГ6 // Пробл. прочности.— 1989.— № 5.
- Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
- Barron T. N. K. Grüneisen parameter for equation of solids // Ann. Phys. (USA).— 1957.— V. 4, N 1.
- Лутков А. И., Волга В. И., Дымов Б. К. Теплопроводность, удельное электрическое сопротивление и теплоемкость плотных графитов // ХТТ.— 1970.— № 1.
- Benson D. A., Gauster W. B. Grüneisen parameter of pyrolytic graphites // Phil. Magazine.— 1975.— V. 31, N 5.
- Gauster W. B. Elastic constants and Grüneisen parameters of pyrolytic graphite // Phil. Magazine.— 1972.— V. 25, N 3.
- Ковалев В. П., Кормилицын А. И. и др. ИГУР-1 — электронный ускоритель с индуктивным накопителем энергии и взрывающимися проводниками // ЖТФ.— 1981.— Т. 51, № 9.
- Кожевников И. Г., Новицкий Л. А. Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник.— М.: Машиностроение, 1982.

г. Челябинск

Поступила 18/VII 1990 г.,
в окончательном варианте — 5/VI 1991 г.