

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГРАФИТА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ 1750—2850° К

Я. А. Крафтмахер, В. О. Шестопал

(Новосибирск)

До настоящего времени теплоемкость графита при температурах свыше 1800° К была экспериментально определена только в работах Рейзора и Макклилленда [1, 2]. Измерение теплоемкости проведено импульсным методом, причем точность измерений по данным авторов составляла $\pm 5\%$. Здесь приводятся результаты измерения теплоемкости графита в диапазоне 1750—2850° К при помощи модуляционного метода [3], с использованием цветовой пирометрии.

В работе использовался спектрально чистый графит с удельным весом 1,61, из которого вытачивались стержни диаметром 0,4—0,6 мм и длиной около 40 мм. Дальнейшее уменьшение диаметра было невозможно ввиду пористости исходного материала, а увеличение диаметра вызвало бы уменьшение амплитуды колебаний температуры и, следовательно, снизило бы точность измерений. Нагрев образца производился переменным током частотой 50 гц. В диапазоне 1750—2200° К измерения проводились в вакууме. При более высоких температурах графит начинает в вакууме испаряться, поэтому в диапазоне 2000—2850° К измерения проводились в атмосфере аргона под давлением 15—17,5 кг/см². Теплоемкость вычислялась по формуле

$$mc = P/2\omega\theta \quad (1)$$

Здесь P — мощность, подводимая к образцу; ω — частота тока, питающего образец; θ — амплитуда колебаний температуры образца.

Масса и мощность определялись для среднего участка образца длиной 17—19 мм, на котором температура практически постоянна по длине. Этот участок выделялся двумя потенциальными вольфрамовыми проводами диаметром 0,03 мм, расстояние между которыми определялось катетометром. В литературе [4, 5] описаны методы оптического определения колебаний температуры, основанные на колебаниях светимости образца. В работе [4] использовалось выражение

$$\theta = \frac{i}{\alpha I / \alpha T} \quad (2)$$

Здесь I_0 — ток фотоумножителя, i — переменная составляющая тока фотоумножителя. При этом производная от тока по температуре находилась опытным путем, что служило источником погрешностей, особенно при высоких температурах, и лимитировало точность эксперимента. Кроме того, при возрастании температуры образца ток фотоумножителя быстро растет. Это позволяет определить производную от тока по температуре лишь на базе сравнительно узкого диапазона температур, что, в свою очередь, ограничивает точность измерений.

В работе [5] использовано уравнение (2) в том виде, как это следует из закона Вина, когда коэффициент черноты не зависит от температуры

$$\theta = \frac{i}{I} \frac{T^2}{\alpha} \quad (3)$$

Однако коэффициент черноты существенно меняется с температурой, и α не является постоянной, на что указывают и сами авторы этой работы. Аналогичное уравнение использовано в [2] для определения скорости изменения температуры образца, но оно применялось для модели абсолютно черного тела.

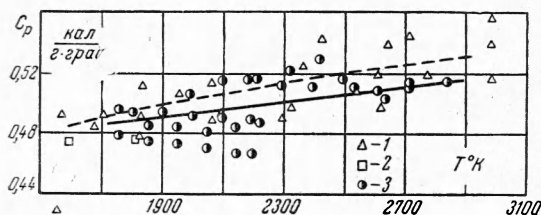
В настоящей работе принят метод измерения, базирующийся на цветовой температуре, что позволяет повысить точность результатов. Сущность метода заключается в измерении колебаний светимости образца при использовании двух различных светофильтров (например, красного и синего). Тогда из закона Вина следует

$$\ln(I_1/I_2) = B - A/T \quad (4)$$

Здесь I_1, I_2 — постоянные составляющие тока фотоумножителя, A, B — коэффициенты, не зависящие от температуры. Дифференцированием (4) легко получается

$$\theta = \frac{T^2}{A} \left(\frac{i_1}{I_1} - \frac{i_2}{I_2} \right) \quad (5)$$

Здесь i_1, i_2 — амплитуды колебаний тока фотоумножителя. Применение цветовой температуры предъявляет менее жесткие требования к условиям эксперимента, так как поправка на коэффициент α зависит от изменения коэффициента черноты ϵ с темпе-



ратурой, тогда как поправка на коэффициент A зависит от изменения отношения ϵ_1 / ϵ_2 с температурой, а эта величина изменяется существенно медленнее.

Согласно [6], при комнатной температуре графит является серым. Имеются данные [7] о том, что, по крайней мере до 2100° К, спектральный коэффициент черноты графита от температуры не зависит. Поэтому в настоящей работе производилось измерение цветовой температуры и предполагалось, что цветовая температура совпадает с истинной температурой образца.

Поправка на немнохроматичность светофильтров при измерении цветовой температуры зависит от соотношения спектральных характеристик фотоумножителя и светофильтров. Нами подобраны такие светофильтры, что в рабочем диапазоне никакого искажения прямых (4) обнаружено не было, тогда как в работе [2] коэффициент α в том же диапазоне изменяется примерно на 3%. Формула (5) действительна при произвольной величине постоянной составляющей тока фотоумножителя. Это позволяет работать во всем температурном диапазоне в наиболее благоприятном режиме, поддерживая оптимальную величину тока фотоумножителя изменением диафрагмы объектива.

Градуировка фотоумножителя производилась по цветовым температурным лампам второго разряда в диапазоне 1700—3000° К. В диапазоне 2100—2550° К была произведена проверка по тонкой вольфрамовой нити. Температура ее определялась, исходя из интегральной излучательной способности вольфрама по данным [8], с поправкой на цветовую температуру по [9] и на отклонение от закона Ламберта по [10]. Данные обеих градуировок разошлись между собой в диапазоне измерений не более чем на 7.5°. В процессе градуировки была проверена линейность фотоумножителя по току и воспроизводимость данных при различных установках оптической системы; можно считать, что градуировка по температуре проведена с точностью до 0.5%.

Колебания температуры образца, определенные по формуле (5), находились в пределах 1—15°, возрастаая с увеличением температуры.

Результаты измерения теплоемкости графита в диапазоне 1750—2850° К для пяти образцов приведены на фигуре, где сплошной линией даны усредненные значения теплоемкости по результатам измерений. Точки 1 — данные [1]; точки 2 — данные [11]; точки 3 — результаты измерений авторов. Ввиду того что авторы работы [1] провели кривую усредненной теплоемкости выше своих экспериментальных точек, полученная нами кривая сравнивается с усредненной кривой, принятой по работе [1] в справочнике [12], которая показана на фигуре пунктиром. Как видно из графика, разброс данных не превышает разброса, имевшего место в работе [1], и в пределах разброса приведенные измерения совпадают с [1] и [11]. Точность измерений составляет $\pm 5\%$.

Авторы благодарны П. Г. Стрелкову за внимание к работе и Н. Г. Потапову за изготовление образцов.

Поступила 9 I 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. R a s o r N. S., M c C l e l l a n d J. D. Thermal properties of graphite, molybdenum and tantalum to their destruction temperatures. J. Phys. Chem. Sol., 1960, vol. 15, No. 1—2, p. 17.
2. R a s o r N. S., M c C l e l l a n d J. D. Thermal property measurements at very high temperatures. Rev. Scient. Instrum., 1960, vol. 31, No. 6, p. 595.
3. К р а ф т м а х е р Я. А. Модуляционный метод измерения теплоемкости. ПМТФ, 1962, № 5, стр. 176.
4. L o w e n t h a l G. C. The specific heat of metals between 1200° K and 2400° K. Austral. J. Phys., 1963, vol. 16, No. 1, p. 47.
5. Ф и л и п п о в Л. П., Т у г а р е в а Н. А., М а р к и н а Л. И. Способы измерения малых пульсаций высоких температур и их использование для определения теплоемкости металлов. Инж.-физ. ж., 1964, № 6, стр. 3.
6. B e t z H. T., O l s o n O. H., S c h u r i n B. D., M o r r i s J. C. Determination of emissivity and reflectivity data on aircraft structural materials. WADC Tech. Report 56—222, 1957, Part 2 (данные взяты из справочника «Handbook of thermophysical properties of solid materials», Macmillan Co, N. Y., 1961, vol. 1).
7. P l u n k e t t J. D., K i n g e r y W. D. The spectral and integrated emissivity of carbon and graphite. Proc. of the 4th Conf. on Carbon, Pergamon Press., 1960.
8. F o r s y t h e W. E., W a t s o n E. M. Resistance and radiation of tungsten as a function of temperature. J. Opt. Soc. Amer., 1934, vol. 24, No. 4, p. 114.
9. L a r r a b e e R. D. Spectral emissivity of tungsten. J. Opt. Soc. Amer., 1959, vol. 49, No. 6, p. 619.
10. Р и б о Г. Оптическая пиromетрия. ОНТИ, 1934.
11. F i e l d h o u s e J. B., H e d g e J. C. et al. Measurements of thermal properties. WADC Tech. Report 55—495, 1956, Part 1 (данные взяты из справочника «Handbook of thermophysical properties of solid materials», Macmillan Co, N. Y., 1961, vol. 1, p. 111).
12. Г у р в и ч Л. В., Х а ч к у р у з о в Г. А. и др. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, т. 2. 1962, стр. 314.