

1. Л. Р. Вацамова. Успехи химии, 40, 945, 1971.
8. D. W. Lee, W. D. Kingery. J. Amer. Ceram. Soc., 43, 594, 1960.
9. Техника высоких температур (под ред. И. Э. Кемпбелла). Изд. впостр. лит., 1959, стр. 115.
10. R. Thorn, O. C. Simpson. J. Appl. Phys., 24, 633, 1953.
11. Е. М. Воронкова и др. Оптические материалы для инфракрасной техники. «Паука», 1965.

УДК 537.311.31

## ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛАНТАНА, НЕОДИМА И ЭРБИЯ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

И. П. Мардыкин

Приводятся результаты измерений удельного электрического сопротивления р лантана, неодима и эрбия в интервале температур 800–1600° К, включая область жидкого состояния (для лантана и неодима).

Нами был использован четырехзондовый метод на постоянном токе. Температура (при  $T > 1200^\circ \text{K}$ ) измерялась оптическим пирометром ЭОП-51, отградуированным по образцовой лампе (СИ-8-200). Модель черного тела (при исследованиях твердых образцов) осуществлялась в виде радиального сверления в средней части образца. При измерениях электросопротивления металлов в жидком состоянии для перевода получаемых значений яркостной температуры в истинные значения проведено измерение спектральной степени черноты тигля. С этой целью показания пирометра сопоставлялись с данными платинородиевой термпары ПР 30/6. При  $T < 1200^\circ \text{K}$  измерения температуры производились хромель-алюмелевыми термопарами.

Измерения проведены на двух установках. В одной использовались образцы в виде полых цилиндров (внутренний диаметр 6, внешний – 15, длина ~80 мм). Нагрев образца осуществлялся электронной бомбардировкой внутренней поверхности. Эти эксперименты проводились одновременно с измерениями температуропроводности и теплоемкости твердых и жидких металлов методом радиальных температурных волн [1].

Зонды (тапталовая проволока диаметром 0,2 мм) располагались на расстоянии ~15 мм от концов образца, расстояние между ними составляло 40–50 мм. При работе с металлами в жидком состоянии использовались тигли, изготовленные из тапталовых трубок с толщиной стенок 0,13 мм. Допышко и крышка тигля приваривались электроионлучевой сваркой.

Величина падения напряжения на рабочем участке образца и на нормальной катушке измерялась потенциометром класса 0,015.

Расчет  $\rho$  жидких металлов производился по формуле

$$\frac{1}{\rho} = \frac{4l}{\pi(d_2^2 - d_1^2)(1 + \alpha T)} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где  $l$  – расстояние между зондами;  $d_1$  – диаметр внутренней трубки;  $d_2$  – внутренний диаметр наружной трубки;  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения тапталла;  $R$  – общее сопротивление заполненного тигля;  $R_1$ ,  $R_2$  – сопротивления пустых трубок (внутренней и внешней). Измерения  $R$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  проводились в одинаковых условиях, одним и тем же методом.

Систематическая погрешность 2,5–3% для жидких металлов и ~2% для твердых\*.

Учет радиальных перепадов температуры  $\Delta T$  сводился к использованию усредненных по  $T$  значений  $\rho$ . В качестве температуры отнесения взято среднеарифметическое значение  $T$ .

Во второй установке использовался трубчатый графитовый нагреватель (высота 20 см, диаметр 30 мм, толщина стенок ~2 мм), разрезанный по образующей на длину 19 см, так что обе его половины включены в цепь питания последовательно. Нагреватель крепился в вертикальном положении в водоохлаждаемых медных токопроводах. Температура измерялась хромель-алюмелевой и платинородиевой (ПР 30/6) термопарами. Рабочая зона нагревателя ~15 см. Температура участков, расположенных на расстоянии 2 см от концов, составляла 0,9 от температуры средней части (на нижнем пределе измерений).

Образцы представляли собой цилиндры диаметром 6 мм и длиной 7 см (при исследованиях жидких металлов использовались тигли, изготовленные из тапталовых трубок диаметром 6 мм). Образец вместе с нагревателем помещался в водоохлаждае-

\* Расчет погрешностей приведен в кандидатской диссертации И. П. Мардыкина, МГУ, 1971.

мую камеру. Измерения проводились в вакууме  $10^{-4}$ – $10^{-3}$  мм рт. ст. Величина  $\rho$  рассчитывалась по формуле, схожей с (1).

Токораспределение между стенками тигля и слоем жидкого металла определялось величиной  $(5-7)10^{-2}\rho_{\text{Ta}}/\rho$  ( $\rho_{\text{Ta}}$  – удельное сопротивление тантала) и при фиксированной температуре являлось постоянным. Изменение его при изменении  $T$  учитывалось при расчете  $\rho$  по формуле типа (1). В процессе опробования установки измерялось электросопротивление тантала.

При определении погрешностей учтены погрешности измерений размеров образца ( $\sim 0,5\%$  для твердых металлов и  $\sim 1\%$  для жидких), температуры ( $0,5$ – $1\%$ ) и

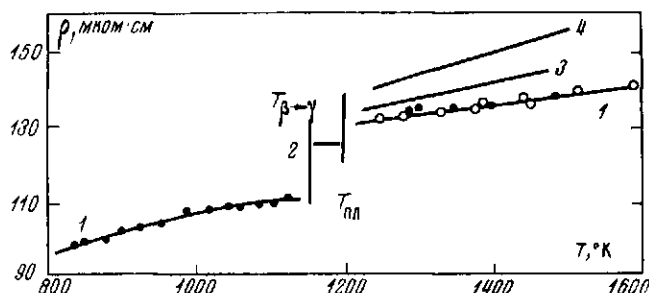


Рис. 1. Электросопротивление лантана при высоких температурах: 1 – данные автора (светлые и темные точки получены соответственно на первой и второй установках); 2 – [4]; 3 – [5]; 4 – [6]

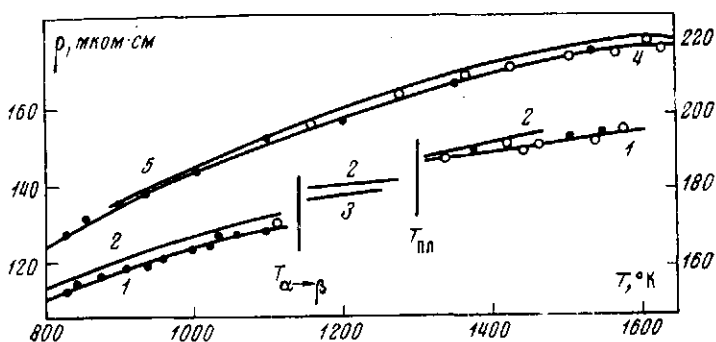


Рис. 2. Электросопротивление неодима и эрбия при высоких температурах.

Nd: 1 – данные автора (светлые и темные точки – то же, что и на рис. 1); 2 – [5]; 3 – [4], Er (правая шкала); 4 – данные автора; 5 – [9]

расстояния между зондами ( $\sim 0,5\%$ ). Поправки на тепловое расширение для изученных металлов в твердом состоянии рассчитывались по данным работы [2]. Значения коэффициента линейного расширения тантала взяты из [3]. Суммарная систематическая погрешность результатов составила  $\sim 1,5\%$  для твердых и  $\sim 2,5\%$  для жидких металлов. Случайная погрешность, полученная квадратичным сложением составляющих, лежит в пределах  $0,6$ – $1\%$ .

При проведении экспериментов с жидкими металлами не наблюдалось сколько-нибудь заметного растворения тантала. Эти заключения сделаны на основе сопоставления данных, полученных при нагревании и охлаждении изучаемых металлов.

Измерено электросопротивление твердых и жидких лантана, неодима и твердого эрбия. Необходимость исследований этих элементов отмечалась в связи с большим расхождением имеющегося экспериментального материала (для лантана), узостью температурного интервала проведенных измерений [1].

Состав исследованных образцов был следующим (в вес.% контролируемые примеси): лантан марки Ла-1 – 99,84 La, 0,03 (Fe, Ca, Nd), 0,025 Ge, 0,016 Nb, 0,01 (Cu, Sm); неодим – 99,65 Nd, 0,05 (Cu, Sm), 0,1 Pr, 0,12 La, 0,01 (Ce, Fe, Ca), эрбий – 99,88 Er, 0,02 (Dy, Ho), 0,01 (Cu, Fe), 0,04 Ca, 0,005 (Tm, Yb).

Усредненные значения полученных данных представлены в таблице. Среднеквадратичное отклонение экспериментальных точек относительно приведенных в этой таблице значений составляет  $\sim 1\%$ , что согласуется с расчетными оценками случайной погрешности.

Сводка результатов измерений электросопротивления лантана при высоких температурах представлена на рис. 1. Полученные нами данные для  $\beta$ -лантана удовле-

творительно согласуются с результатами [4] и [5]. Что касается различия результатов [6] и наших данных для жидкого лантана, то, как нам кажется, можно предположить наличие в [6] значительных систематических погрешностей, обусловленных трудностями определения в этой работе сечения жидкого металла. Сопоставление с результатами [5] для жидкого лантана затруднено отсутствием в этой работе таблиц. Можно, однако, сделать вывод, что различие лежит в пределах 4–5% (погрешность измерений на основе метода вращающегося магнитного поля, использованного в [5], составляет ~5%).

На рис. 2 представлены результаты измерений  $\rho$  неодима. Они удовлетворительно согласуются с имеющимися данными.

Удельное электросопротивление лантана, неодима и эрбия при высоких температурах, мком·см

Металл	Температура, °К								
	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500	1600
La	96,6	102,2	106,8	110,1	131,0	133,1	136,0	138,7	141,1
Nd	110,0	117,1	123,6	129,0	—	147,0	149,5	152,0	155,3
Er	163,8	174,5	183,5	191,8	198,6	204,6	210,0	214,4	218,2

По нашим данным (см. также [7])  $\rho$  жидких лантана, неодима изменяется линейно в интервале от  $T_{пл}$  до ~1600°К. Величины  $\sigma_{тв}/\sigma_{ж}$  ( $\sigma$  — электропроводность) для легких лантаноидов коррелируют со значениями  $\lambda_{тв}/\lambda_{ж}$  ( $\lambda$  — коэффициент теплопроводности). Экспериментальные значения  $\sigma_{тв}/\sigma_{ж}$  близки к величинам, полученным для  $\lambda_{тв}/\lambda_{ж}$  из соотношения, установленного в [8] на основе анализа данных для большой группы металлов.

Результаты для эрбия представлены на рис. 2 кривой 4. Наши данные согласуются с [9]. Обращает на себя внимание то обстоятельство, что величины  $\rho$  для эрбия значительно превосходят значения, характерные для легких лантаноидов. Температурная зависимость характеризуется отклонением от линейной, причем  $d\rho/dT$  уменьшается с температурой. Подобные особенности поведения  $\rho$  отмечаются также для иттрия [1].

Автор выражает благодарность И. И. Новикову за внимание к работе.

Институт металлургии им. А. А. Байкова  
Академии наук СССР

Поступило в редакцию  
14 III 1974

#### ЛИТЕРАТУРА

1. И. И. Новиков, И. П. Мардыкин. Теплофизика высоких температур, 11, 527, 1973.
2. F. Varson, S. Legvold, F. H. Spedding. Phys. Rev., 105, 418, 1957.
3. В. М. Амоненко, П. Н. Вьюгов, В. С. Гуменюк. Теплофизика высоких температур, 2, 20, 1964.
4. F. H. Spedding, A. H. Daane, K. W. Herrmann. J. Metals, 9, 895, 1957.
5. Ф. Гайбуллаев, А. Р. Регель, Х. Хусанов. Физика твердого тела, 10, 2220, 1968.
6. G. Krieg, R. B. Genter, A. V. Grosse. Inorg. Nucl. Chem. Lett., 5, 849, 1969.
7. И. П. Мардыкин, В. И. Кашин, А. А. Вертман. Изв. АН СССР, Металлы, № 6, 96, 1972.
8. И. З. Копп. Ж. физ. химии, 40, № 12, 1966.
9. С. Е. Habermann, A. H. Daane. J. Less-Comm. Met., 7, 31, 1964.

УДК 536.3

### ИЗМЕРЕНИЕ МОНОХРОМАТИЧЕСКОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ПИРОЛИТИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Б. Н. Альтшулер

Пиролитический углерод (пирографит) имеет двумерную упорядоченность структуры, в которой базисные плоскости кристаллитов графита располагаются параллельно поверхности осаждения. Структурные характеристики пирографита зависят от температуры осаждения [1, 2].

Наиболее полно изучена излучательная способность графита [3–6]. Теплофизические свойства пирографита также исследовались в широком интервале температур [3, 7, 8]. Однако сопоставление результатов этих работ затруднено из-за влияния анизотропии структуры пирографита на излучательную способность [7, 8], зависящей, кроме того, от состояния поверхности, которое определяется технологическими условиями осаждения пиролитического углерода.