

11;12

## СПЕЧЕННЫЙ ПОРОШОК НИОБИЯ КАК ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА

© Л.И.Скатков, В.В.Конотоп, А.Г.Черемской

Фрактальная геометрия различных естественных и искусственных тел является в последние годы предметом интенсивных исследований (см. обзор [1]).

Напомним, что согласно [2] фрактальные системы, по определению, обладают дробной размерностью, не совпадающей с размерностью пространства, в котором они существуют. В частности, исследования поверхности пористого твердого тела методами малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (РМР), нейтронов или света [3] свидетельствуют о нецелом значении поверхностной размерности  $D_p$ . Анализ наблюдающегося в этих случаях аномального закона рассеяния первичного пучка позволяет численно оценить значение  $D_p$ , которое всегда оказывается лежащим в диапазоне  $2 < D_p < 3$ .

Ранее [4] были экспериментально изучены поверхностные неоднородности (поры) структуры, образованной путем высокотемпературного вакуумного спекания порошка ниобия. Выявленная в [4] корреляция между формой и радиусом поверхностных пор позволила высказать в [5] предположение о фрактальных свойствах рассматриваемой системы. Исследование указанных свойств и прежде всего поверхностной фрактальной размерности  $D_p$  является предметом настоящей работы.

Для описания рентгеновского рассеяния пористым твердым телом даже в области Порода  $a \ll s^{-1} \ll R_{\max}$  ( $a$  — постоянная решетки;  $s = 2\pi \sin \theta / \lambda$  — волновой вектор;  $2\theta$  — угол рассеяния;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $R_{\max}$  — наибольший размер зерна) хорошо известный закон Порода  $I(s) \sim s^{-4}$  ( $I(s)$  — интенсивность рассеяния) должен быть модифицирован [6,7]. Соответствующая теория развита в [7]. Основная формула данной теории, способной объяснить наблюдаемые экспериментально результаты, имеет следующий вид:

$$I(s) \sim \text{const} \cdot s^{D_p - 6}. \quad (1)$$

На рис. 1 представлены результаты исследования поверхности спеченного порошка ниобия методом РМР. Видно, что зависимость интенсивности рассеяния излучения от

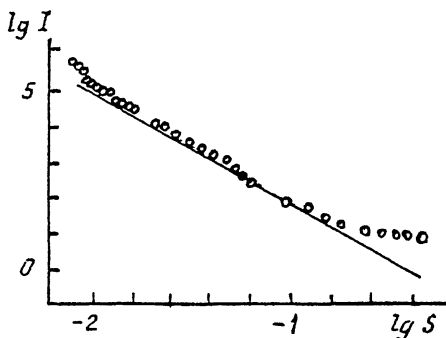


Рис. 1. Логарифмическая зависимость интенсивности рассеянного пучка РМР от волнового вектора.

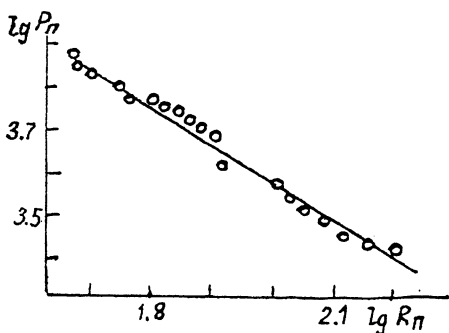


Рис. 2. Логарифмическая зависимость площади открытых пор  $P_n$  от радиуса  $R_n$  (данные ртутной порометрии); исследован диапазон пор с  $R_n = 1-100$  нм.

волнового вектора носит фрактальный характер. Действительно наклон линеаризованного участка кривой на графике составляет  $73^\circ$ , что отвечает зависимости

$$L(s) \sim \text{const} \cdot s^{-3.19}. \quad (2)$$

Сравнение выражения (2) с формулой (1) дает непосредственно значение фрактальной поверхности  $D_n = 2.81$ .

Как отмечалось в [7], результаты, полученные методом РМР, как и любым другим методом, связанным с рассеянным излучением, оказываются неоднозначными. Данное обстоятельство требует использования полностью независимого от рентгеновского излучения экспериментального метода нахождения фрактальной поверхностной размерности. В качестве такого метода в настоящей работе использована

ртутная порометрия. Высокие давления, развиваемые порометром, обеспечивали проникновение ртути в субмикропоры, радиус которых соответствовал диапазону размеров, анализируемых РМР. При принятии наименьшего радиуса пор в качестве параметра  $\varepsilon$  измерения площади поверхности [1] увеличение давления означает фактически переход к меньшему масштабу и дает в результате степенную зависимость удельной поверхности  $P_n$  от радиуса наименьшей поры  $R_n$ . В этом случае поверхностная размерность  $D_n$  может быть определена через известное во фрактальной теории [1] соотношение

$$P_n \sim R_n^{(2-D_n)} (\sim \varepsilon^{(2-D_n)}). \quad (3)$$

Подобное поведение наблюдалось и в настоящей работе. Указанная зависимость представлена на рис. 2, иллюстрирующем функцию  $P_n \sim R_n$ . Тот факт, что размерность площади поверхности, предсказываемая РМР, больше 2, означает, что суммарная площадь поверхности определяется пористостью твердого тела. Соответственно величина  $P_n$  на рис. 2 отвечает суммарной эффективной площади поверхности. Простой расчет угла наклона линейного отрезка графика (рис. 2) дает, согласно формуле (3), результат  $D_n = 2.84$ .

Полученное значение  $D_n$  находится в весьма хорошем соответствии с данными РМР и является новым экспериментальным доказательством корректности описания законом (1) структуры спеченного порошка ниобия.

### Список литературы

- [1] Feder J. *Fractals*. N.Y.; L.: Plenum Press, 1988. 233 p.
- [2] Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 143 с.
- [3] Hurd A., Schaefer D.W., Smith O.M. et al. // *Progress in Electromagnetics Research Symposium*. Cambridge, 1989. P. 17.
- [4] Скاتков Л.И., Черемской П.Г., Гомозов В.П. и др. // *Поверхность*. 1993. № 4. С. 112–114.
- [5] Skatkov L.I., Konotop V.V., Cheremskoy P.G. et al. // *Phys. Stat. Sol. (b)*. 1994. V. 183. K1–K3. Skatkov L.I., Konotop V.V., Cheremskoy P.G. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 1994. V. 81. N 4. P. 427–429.
- [6] Bale H.D., Schmidt P.W. // *Phys. Rev. Lett.* 1984. V. 53. P. 596–599.
- [7] Wong Po-zen // *Phys. Rev. B*. 1985. V. 32. P. 1417–1424.

Харьковский государственный  
политехнический университет

Поступило в Редакцию  
15 марта 1996 г.