

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-1-I-47-49

УДК (UDC) 539.38

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОТРЕЩИН ПАЛМКВИСТА МЕТОДОМ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛИЗА*

© Игорь Георгиевич Григоров¹, Юрий Галиулович Зайнулин¹,
Артем Игоревич Григоров²

¹ Институт химии твердого тела УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: igor.grigorov2012@yandex.ru

² ООО «ГИ-СКАН», г. Екатеринбург, Россия; e-mail: argrigorov@yandex.ru

Статья поступила 4 октября 2016 г.

Обосновано применение метода фрактального анализа при исследовании изображений микротрещин Палмквиста. Определены численные значения фрактальной размерности микротрещины на различных участках ее распространения от отпечатка индентора Виккерса. Исследовали металлокерамический твердый сплав (кермет) на основе карбонитрида титана с никель-молибденовой связкой (КНТ12). Рассмотренный способ количественного анализа изображений микротрещин Палмквиста, полученных с помощью сканирующего электронного микроскопа, основан на измерении длины Ричардсона (измеренная длина зависит от масштаба измерения). Предложен относительно простой алгоритм определения фрактальной размерности кривой линии, включающий покрытие ее изображения на плоскости квадратами разной площади. Фрактальную размерность (параметр) изображения контура микротрещин Палмквиста определяли двумя способами: при постоянном увеличении и по серии снимков с монотонно меняющимся увеличением.

Ключевые слова: микроструктура кермета; фрактальная размерность; индентор Виккерса; микротрещина Палмквиста.

STUDY OF THE IMAGES OF PALMQUIST MICROCRACKS BY FRACTAL ANALYSIS

© Igor G. Grigorov¹, Yuriy G. Zainulin¹, Artem I. Grigorov²

¹ Institute of solid state chemistry, Urals branch of RAS, Yekaterinburg, Russia; e-mail: igor.grigorov2012@yandex.ru

² GI-SCAN Ltd, Yekaterinburg, Russia; e-mail: argrigorov@yandex.ru

Submitted October 4, 2016.

Substantiation of using fractal analysis in studying the images of Palmquist microcracks is presented. The numerical values of the fractal dimension of the Palmquist microcracks (PMC) at various sites of crack propagation (the Vickers indenter) are determined. A sintered carbide alloy (cermet) based of titanium carbonitride with nickel-molybdenum binder (KNT12) was taken as a test object. A method of quantitative analysis in the study of the PMC images obtained using scanning electron microscope is considered. An example of the length measurements in which the measured value depends on the scale of measurements (Richardson coastline paradox) is taken as a basis. We used a simple method of covering the curve image on the plane by the squares of different sizes to determine the fractal dimension of the curve. Fractal dimension (parameter) of the image of the PMC contour was determined in two ways: i) at a constant magnification and ii) using series of images with a monotonically varying magnification.

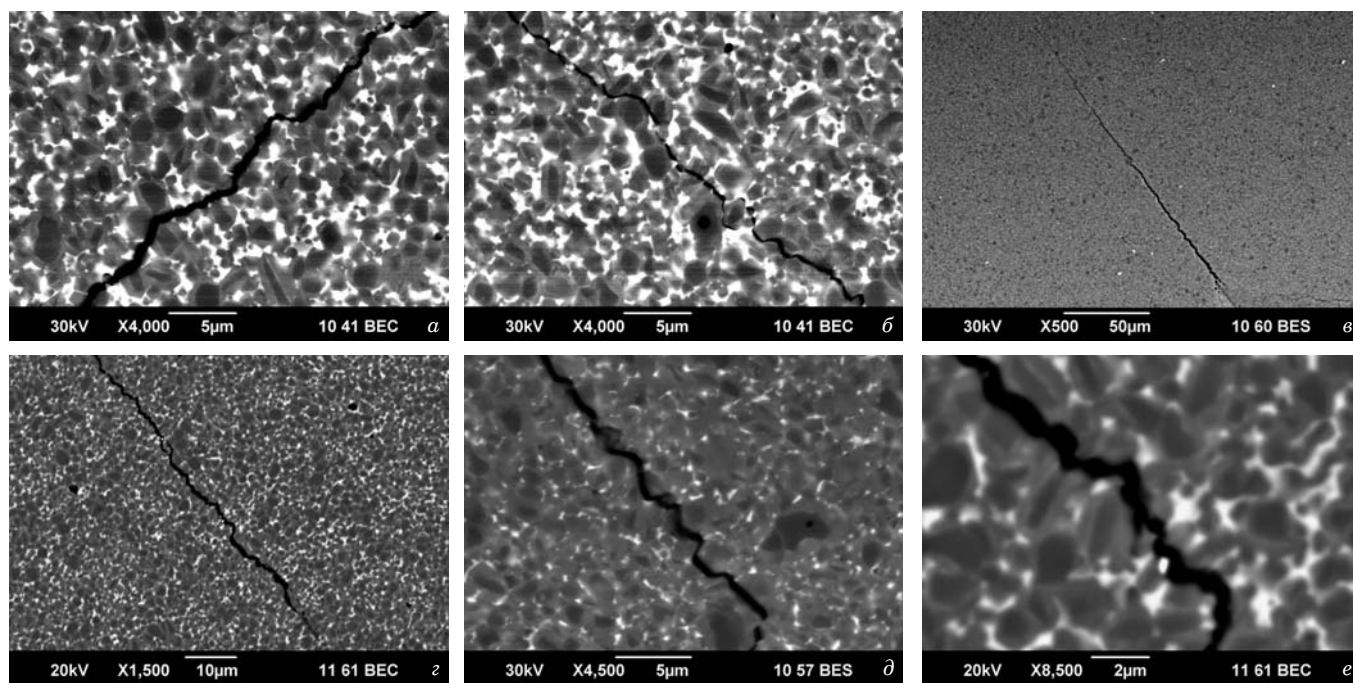
Keywords: cermet microstructure; fractal dimension; Vickers indenter; Palmquist microcrack.

Фрактальный анализ изображения микрошлифов, в том числе и микротрещин Палмквиста, в отличие от физических или технических измерений, позволяет количественно оценить морфологию структуры [1 – 5]. Как правило, фрактальные кривые характеризуются свойством самоподобия (скейлинга) при изменении масштаба

[6], поэтому фрактальная геометрия нашла особое применение в описании поверхностей разрушения (ее используют в качестве количественного показателя шероховатости поверхности разрушения или ее профиля [7]).

Цель работы — определение фрактальной размерности микротрещины Палмквиста методом покрытия ее изображения квадратами разной площади [6 – 8].

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 15-29-04868 и).



Вид микротрещины Палмквиста вблизи угла отпечатка пирамиды Виккерса (а), на конечном участке «торможения» распространения трещины (б) и при $\times 500$ (в), $\times 1500$ (г), $\times 4500$ (д), $\times 8500$ (е) (JSM JEOL 6390 LA)

В общем случае фрактальный параметр — интегральная количественная мера структурности объекта. Вместе с функциональными характеристиками он дает полное представление о структуре материала [5].

Определение фрактальной размерности (параметра) контура микротрещины Палмквиста путем прямого применения математических зависимостей — чрезвычайно трудоемкий процесс. При этом в качестве количественной меры выступает такое понятие, как расстояние между точками в пространстве [6], а надежность получаемых результатов не всегда удовлетворительна [5]. Поэтому на практике фрактальные размерности часто определяют способом разделения пространства на небольшие участки: отрезки, квадраты, кубы, окружности либо сферы. Подсчитав число участков, необходимых для покрытия интересующего множества точек, находят меру величины множества [6].

Формирование микротрещин может привести к разрушению материала [9]. Количественные данные, характеризующие механизм разрушения, могут использоваться в качестве оперативной информации о влиянии микроструктуры кермета на кинетику процесса разрушения [9].

Для вычисления фрактального параметра микротрещины методом покрытия ее изображением квадратами разной площади использовали специально разработанную компьютерную программу Grider [10], позволявшую менять площадь квадратов не менее чем на два порядка. По-

лученные таким образом данные затем обрабатывали с помощью программы Table Curve.

Множество квадратов N со стороной x находили, принимая за единицу длины протяженность обреза изображения в пикселях (программа Grider). Зависимость N от x (программа Table Curve) получали в виде

$$\ln N = a + D \ln x,$$

где a — константа; D — параметр, определяющий угловой коэффициент (наклон) графика $\ln N$ как функции от $\ln x$ [4 – 8].

Образование микротрещин Палмквиста происходило в результате испытания сплава КНТ12 на твердость по Виккерсу ($HV = 15,0 \pm 0,5$ ГПа). Одновременно определяли коэффициент интенсивности напряжения — трещиностойкости ($K_{Ic} = 9,2 \pm 0,3$ МПа $\cdot$ м^{1/2}) [11].

Микроструктура кермета КНТ12 соответствует структуре типа ядро-оболочка со средним размером керамического зерна $1,60 \pm 0,02$ мкм [2]. Размер исследуемой области изображений микротрещины составлял 2560×1920 пикселей [12]. При увеличении $\times 4000$ размер зерна соответствовал приблизительно 50 пикселям на изображении.

Фрактальную размерность изображения контура микротрещины Палмквиста определяли следующими способами:

1. При одинаковом увеличении ($\times 4000$) двух участков микротрещины: вблизи угла отпечатка

Результаты определения фрактальной размерности D изображения контура микротрещины Палмквиста

Способ определения	Область определения (см. рисунок)	$a \pm 0,001$	$D \pm 0,001$
1	<i>a</i>	8,628	-1,264
	<i>b</i>	8,526	-1,265
2	<i>b - e</i>	8,811	-1,200

пирамиды Виккерса (область начала распространения трещины, где расстояние между «берегами» максимально) (см. рисунок, *a*) и на конечном участке «торможения» распространения трещины (область наибольшего проявления зависимости направления движения трещины от компонентов микроструктуры кермета) (см. рисунок, *b*) [2]. Режим [размер стороны квадрата (пиксель)/масштаб изображения (%): 48/20, 24/40, 12/80, 6/160. Число квадратов покрытия (участок 1/участок 2) соответственно: 56/49, 108/102, 221/194, 585/528.

2. При разных увеличениях ($\times 500$, $\times 1500$, $\times 4500$, $\times 8500$) одного и того же участка микротрещины (выбирали по изображению с $\times 8500$) (см. рисунок, *b - e*). Режим [размер стороны квадрата (нм)/увеличение]: 298/500, 99/1500, 34/4500, 17/8500. Число квадратов покрытия соответственно: 6, 28, 97, 224.

Полученные в результате количественного анализа изображений данные приведены в таблице.

Видно, что вблизи отпечатка пирамиды и на конечном участке распространения микротрещины (способ 1) фрактальный параметр имеет приблизительно одинаковые (до второго знака после запятой с точностью $\pm 0,001$) значения. При уменьшении числа квадратов покрытия (способ 2) величина параметра также несколько уменьшается.

Таким образом, полученные данные свидетельствуют, что оба предложенных способа определения фрактального параметра микротрещины Палмквиста могут успешно применяться, естественно, с учетом своих особенностей (одно изображение в первом случае и несколько — во втором). При этом автоматизация процесса покрытия изображения квадратами разной площади существенно повышает оперативность определения фрактальной размерности по сравнению с ручным методом обработки [2].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ахметханов Р. С.** Применение вейвлет-анализа и теории фракталов в исследовании изображений микрошлифов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 3. С. 31 – 37.
2. **Григорьев И. Г., Зайнулин Ю. Г., Швейкин Г. П.** Фрактальный анализ разрушения металлокерамического твердого сплава / Материаловедение. 2016. № 6. С. 16 – 22.
3. **Орлов А. И.** Математические методы исследования и диагностика материалов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2003. Т. 69. № 3. С. 53 – 64.
4. **Кулак М. И.** Фрактальная механика материалов. — Мн.: Высшая школа, 2002. — 304 с.
5. **Арутюнов П. А., Толстикова А. Л., Демидов В. Н.** Система параметров для анализа шероховатости и микро рельефа поверхности материалов в сканирующей зондовой микроскопии / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 1999. Т. 65. № 9. С. 27 – 37.
6. **Федер Е.** Фракталы / Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 254 с.
7. **Dauskardt R., Haubensak F., Ritchie R.** On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces / Acta metall. mater. 1990. Vol. 38. N 2. P. 143 – 159.
8. **Falconer K.** Fractal geometry. — NY: Wiley, 2003. — 337 p.
9. **Кислый П. С., Боднарук Н. И., Боровиков М. С. и др.** Керметы. — Киев: Наукова думка, 1985. — 272 с.
10. **Ботвина Л. Р.** Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. — М.: Наука, 2008. — 334 с.
11. **Григорьев И. Г., Жилиев В. А., Ермаков А. Н., Зайнулин Ю. Г., Швейкин Г. П.** О методике прогнозирования некоторых физико-механических свойств керметов / Материаловедение. 2004. № 8. С. 14 – 20.
12. **Новиков В. А.** Особенности определения шероховатости поверхности методом сканирующей зондовой микроскопии / Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2016. № 5. С. 109 – 112.

REFERENCES

1. **Akhmetkhanov R. S.** The application of wavelet analysis and the theory of fractals in the study of the images of the micro-sections / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 3. P. 31 – 37 [in Russian].
2. **Grigorov I. G., Zainulin Yu. G., Shveikin G. P.** Fractal analysis of fracture of metal-ceramic hard alloy / Mater. Sci. 2016. N 6. P. 16 – 22.
3. **Orlov A. I.** Mathematical methods of investigation and diagnostics of materials / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2003. Vol. 69. N 3. P. 53 – 64 [in Russian].
4. **Kulak M. I.** Fractal mechanics of materials. — Minsk: Vysshaya shkola, 2002. — 304 p. [in Russian].
5. **Arutyunov P. A., Tolstikhina A. L., Demidov V. N.** The system parameters for the analysis of roughness and microrelief of the materials surface in scanning probe microscopy / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 1999. Vol. 65. N 9. P. 27 – 37 [in Russian].
6. **Feder J.** Fractals. — Moscow: Mir, 1991. — 254 p. [Russian translation].
7. **Dauskardt R., Haubensak F., Ritchie R.** On the interpretation of the fractal character of fracture surfaces / Acta metall. mater. 1990. Vol. 38. N 2. P. 143 – 159.
8. **Falconer K.** Fractal geometry. — NY: Wiley, 2003. — 337 p.
9. **Kislyi P. S., Bodnaruk N. I., Borovikov M. S., et al.** Cermets. — Kiev: Naukova dumka, 1985. — 272 p. [in Russian].
10. **Botvina L. R.** Destruction: kinetics, mechanisms, general laws. — Moscow: Nauka, 2008. — 334 p. [in Russian].
11. **Grigorov I. G., Zhilyaev V. A., Ermakov A. N., Zainulin Yu. G., Shveikin G. P.** The methodology of prediction of some physical and mechanical properties of the cermet / Mater. Sci. 2004. N 8. P. 14 – 20.
12. **Novikov V. A.** Features of Determining the Roughness by Scanning Probe Microscopy / J. of Surface Investigation. X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2016. N 5. P. 109 – 112.