

## МЕЗОСТРУКТУРА ПОВЕРХНОСТИ РАЗРУШЕНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ В МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

И. А. Попова, В. Н. Гунькин, М. В. Черенкова, А. Е. Гриднев

*Воронежский государственный университет*

Поступила в редакцию 17.07.2003 г.

**Аннотация:** методом мультифрактальной параметризации исследована структура поверхности разрушения карбида кремния в подшипниках скольжения. Получены канонические и псевдо- мультифрактальные спектры структуры поверхности, показана универсальность применения мультифрактального описания.

**Ключевые слова:** мультифрактал, мультифрактальная параметризация, мезоструктура поверхности, канонические и псевдо- спектры.

**Abstract:** structure of failure surface of silicon carbide using in friction bearings was analyzed by multifractal parameterization methods. Canonical and pseudo- multifractal spectra of surface structure were obtained, universality of the multifractal description has been shown.

**Keywords:** multifractal, multifractal parameterization, mesostructure of surface, canonical and pseudo- spectra.

### ВВЕДЕНИЕ

Накопленный к настоящему времени опыт доказывает, что в практическом плане данные мультифрактальной параметризации (МФП) позволяют решать задачи, связанные не только с прочностью материала, но и с управлением его свойствами, а также с оптимизацией технологических условий получения и эксплуатации.

Выбор для исследований реакционноспеченного карбида кремния (РКК) связан с его экстремально высокими эксплуатационными характеристиками, такими как эрозионная и химическая стойкость, термоустойчивость, надежность. Детали, изготовленные из РКК и представляющие собой подшипники скольжения герметичных погружных химических насосов типа ГХ и ГХМ, были предоставлены ЗАО "Гидрогаз".

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для нарезания образцов шириной 3 мм использовали бронзовую дисковую пилу, импрегнированную алмазной крошкой. Зону резки непрерывно охлаждали дистиллированной водой. Затем образцы подвергали грубой шлифовке алмазной пастой с постепенным переходом от зернистости 125–150 мкм к зернистости 2–3 мкм. С помощью пасты с зернистостью 1–2 мкм образцы полировали до зеркального блеска. Полировка позволяет доводить образцы до толщины, соответствующей минимальной толщине неповрежденного слоя, которая для наиболее твердых материалов может составлять всего несколько микрометров [1].

Изображения поверхностной структуры карбида кремния были получены с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) JSM-6380LV.

Полученные микрофотографии для дальнейшей мультифрактальной параметризации аппроксимировались с использованием программы MFR Drom. В данной программе применяются алгоритмы автоматического выбора масштабов и статистического анализа мультифрактальных канонических и псевдо- спектров, что позволяет рассчитать все мультифрактальные характеристики, необходимые для описания структуры материала [2].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 1 и 2 представлены микрофотографии и их аппроксимированные изображения для образцов РКК до эксплуатации и подвергшихся разрушению в процессе эксплуатации.

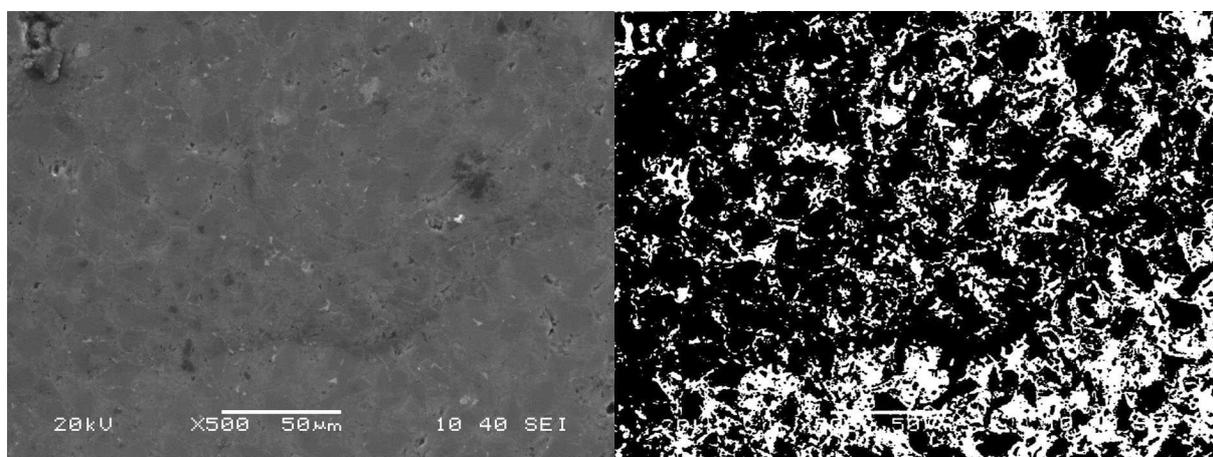


Рис. 1. Микрофотография образца РКК до эксплуатации (поверхностный срез, увеличение 500 раз): неаппроксимированное изображение (слева) и аппроксимированное изображение (справа).

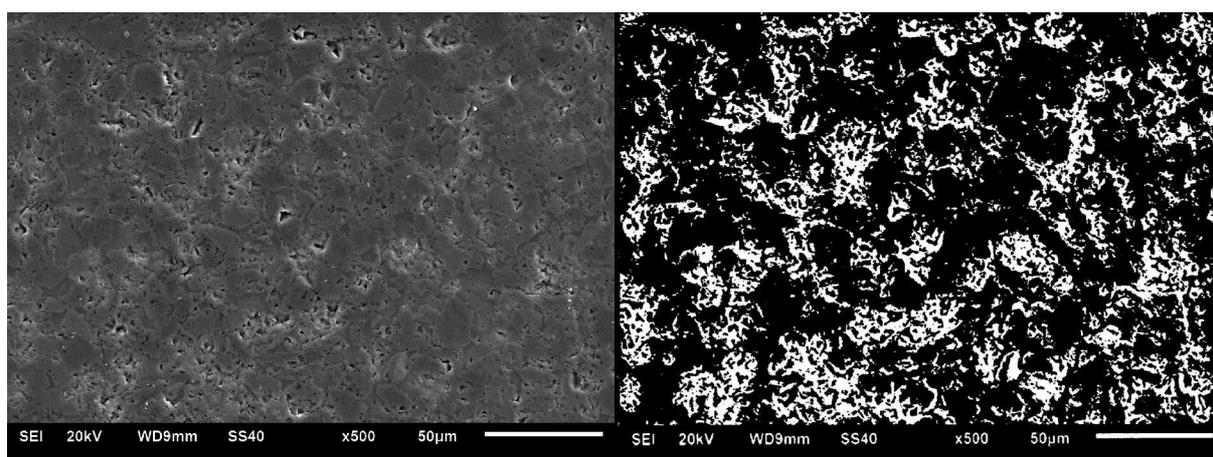


Рис. 2. Микрофотография образца РКК, разрушенного в процессе эксплуатации (поверхностный срез, увеличение 500 раз): неаппроксимированное изображение (слева) и аппроксимированное изображение (справа).

В результате обработки аппроксимированных изображений были получены канонические и псевдо- спектры размерностей Реньи  $D_q$  и сингулярностей  $f(\alpha)$ . Индекс  $q$  означает набор вещественных чисел (в общем случае  $-\infty < q < \infty$ ). Бесконечный интервал может быть заменен на конечный с границами, отвечающими вырождению мультифрактального множества (например,  $[-200; 200]$  в нашем конкретном случае). Для каждого  $q$  из интервала  $[-200; 200]$  вычисляются обобщенные корреляционные функции  $D_q$  и  $f(\alpha)$ . Величину  $\alpha$  можно трактовать как статистическую термодинамическую величину по каноническому ансамблю, связанную производной с величиной  $q$  с помощью преобразований Лежандра [3]:

$$\tau(q) = q\alpha - f(\alpha); \quad \alpha = \frac{d\tau}{dq}; \quad q = \frac{df}{d\alpha}. \quad (1)$$

На рисунках 3 и 4 приведены канонические спектры размерностей Реньи и спектры сингулярностей для поверхностных срезов образцов до эксплуатации и образцов, разрушенных в процессе эксплуатации.

Расчет мультифрактальных характеристик проводился с проверкой спектров на корректность для всех поддиапазонов разбиения при параметре  $q$  в интервале  $[-200; 200]$ . Анализ полученных кривых свидетельствует о корректности применения методики МФП к исследованию реальной физической структуры РКК, что вытекает из выполнения следующих критериев [4]:

$$\begin{aligned} D_{q_1} &\geq D_{q_2}, q_1 \leq q_2; \\ f(\alpha(q=0)) &= \text{maximum} = D_0; \\ f(\alpha(q=1)) &= \alpha(q=1) = D_1; \\ f(\alpha(q_1)) &\leq f(\alpha(q_2)), q_1 \geq q_2 \geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

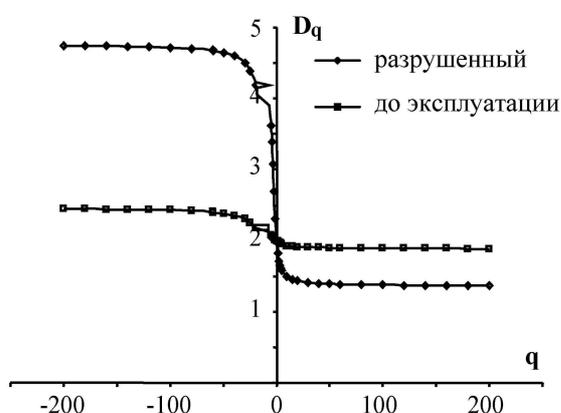


Рис. 3. Канонический спектр размерностей Реньи  $D_q$  для поверхностного среза образца.

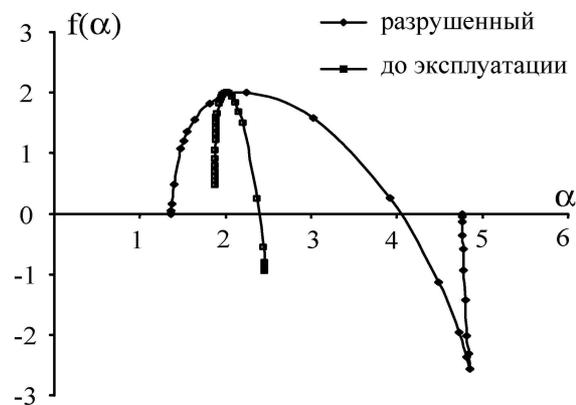


Рис. 4. Канонический спектр сингулярностей  $f(\alpha)$  для поверхностного среза образца.

Из канонических спектров для поверхностных срезов видно, что на графиках наблюдается большой разброс в размерностях. Учитывая этот факт, рассматривались и псевдоканонические спектры размерностей Реньи и спектры сингулярностей поверхностных срезов. Псевдоспектры, также удовлетворяющие критерию корректности (2), показаны на рис. 5 и рис.6. Характерно появление так называемых “рогов” на псевдоспектрах сингулярностей, что, вероятно, и свидетельствует о деградации материала.

Мультифрактальные параметры (или в дальнейшем МФП) вычислялись как средние величины по всем корректным спектрам. При заданных  $q_{max} = 200$  для канонических спектров

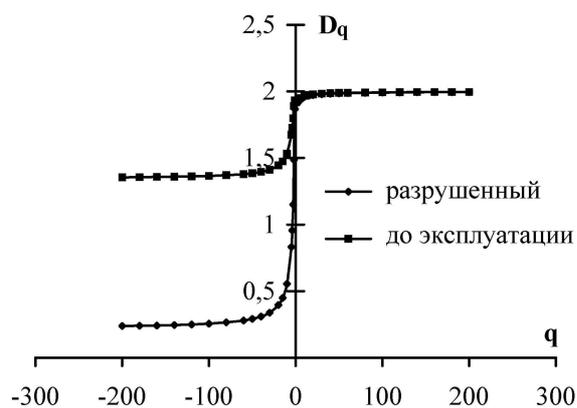


Рис. 5. Псевдоспектр размерностей Реньи  $D_q$  для поверхностного среза образца.

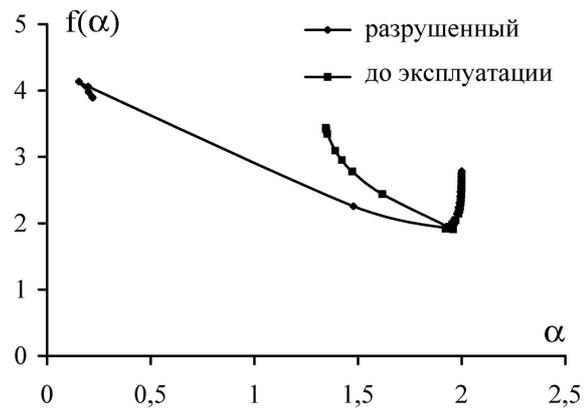


Рис. 6. Псевдоспектр сингулярностей  $f(\alpha)$  для поверхностного среза образца.

(таблица 1) и псевдоспектров (таблица 2) были определены обобщенные энтропии (размерности)  $D_q$ :  $D_0$  – фрактальная размерность Хаусдорфа;  $D_1$  – информационная размерность;  $D_2$  – корреляционная размерность,  $D_{200}$  – экстремальное значение  $D_q$  для данной структуры, эффективные количественные характеристики упорядоченности  $\Delta$  и однородности структуры  $f_{200}$ , а также  $K$  – параметр меры беспорядка и разреженности фрактального пространства.

Таблица 1. Мультифрактальные параметры для канонических спектров поверхностных срезов образцов.

параметры	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{200}$	$\Delta$	$f_{200}$	$K$
Образец до эксплуатации	2	1.996	1.992	1.908	0.088	0.001	0.56
Разрушенный образец	2	1.951	1.916	1.746	0.205	0.205	1.26

Таблица 2. Мультифрактальные параметры для псевдоспектров поверхностных срезов образцов.

параметры	$D_0$	$D_1$	$D_2$	$D_{200}$	$\Delta$	$f_{200}$	$K$
Образец до эксплуатации	2	1.931	1.935	1.996	-0.065	2.786	-1.758
Разрушенный образец	2	1.849	1.865	1.88	-0.144	3.252	-0.73

По мнению авторов [3], поверхность разрушения представляет собой своего рода “реликт” протекающих в материале процессов самоорганизации перед его разрушением. Согласно нашему расчету, наибольший разброс значений МФП наблюдается для степени однородности  $f_{200}$ , степени упорядоченности  $\Delta$  и меры беспорядка  $K$ , которые и определяют нарушения в структуре материала. В соответствии с представленными нами ранее результатами [4] наибольшие значения МФП и их изменения оказываются связанными с поверхностными срезами РКК.

Образуется множество фракталов с большим разбросом в значениях ФП. Эта фракталь-

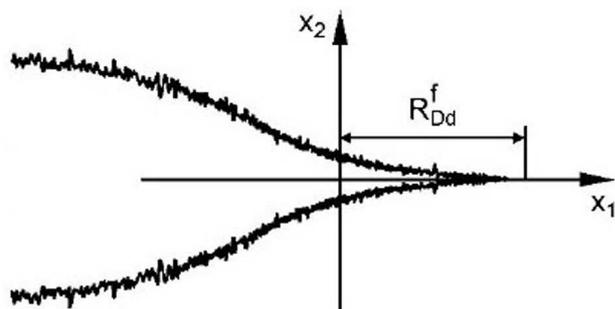


Рис. 7. Область вблизи кончика трещины, представленная фрактальной когезионной дискретной моделью [5].

ность, эти реально чрезвычайно изрезанные поверхности материала замедляют образование и распространение трещин, а, следовательно препятствуют разрушению материала.

Этот вывод позволяет нам привлечь дискретную фрактальную модель в металлических материалах [5] и объяснить такой разброс в размерностях. Автор [5] вводит эквивалентную длину  $R_{Dd}^f$  когезионной зоны, которая связывается с явлением исчезновения когезии на атомном уровне при заданной приложенной нагрузке. Результаты нашей работы хорошо согласуются с предложен-

ной моделью [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные данные позволили построить модель поверхностного разрушения фрактальной структуры карбида кремния в процессе его эксплуатации в подшипниках скольжения герметичных насосов. Модель дает информацию о произошедших структурных изменениях материала. Наблюдаемый процесс изменения МФП характеризует переход от адаптации к деградации структуры РКК.

Процессы самоорганизации фрактальных структур в приповерхностных слоях протекают быстрее, чем во внутренних объемах материала, повышается однородность фрактальной структуры (например, МФП  $f_{200}$ ). Результаты работы говорят об универсальности методики [2] и дают достоверную информацию о произошедших структурных изменениях фрактального материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Практические методы в электронной микроскопии / Под ред. Одри М. Глоэра; перевод с англ. под ред. В.Н. Верцнера. — Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. — 355 с.
- [2] Иванова В.С. Мультифрактальный метод тестирования устойчивости структур в материалах / В.С. Иванова, Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков и др. — М.: Интерконтакт Наука, 2000. — 54 с.
- [3] Встовский Г.В. Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов / Г.В. Встовский, А.Г. Колмаков, И.Ж. Бунин. — Москва; Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. — 116 с.
- [4] Попова И.А. Модель структуры поверхности карбида кремния на основе мультифрактальной параметризации/ И.А. Попова, В.Н. Гунькин, А.Е. Гриднев и др. // ФАГРАН 2012: Сб. тезисов. — Воронеж, 2012. — С. 357.
- [5] Внук М.П. Новые математические модели разрушения материалов на мезо- и наноуровне / М.П. Внук // Физическая мезомеханика. — 2009. — № 4. — С. 71–77.

*Попова И. А., кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет*

*E-mail: gorozhanka@yandex.ru*

*Тел.: (473)-220-82-81*

*Popova I. A., Candidate of Physics and Mathematics, Associated Professor, Department of General Physics, Voronezh State University*

*E-mail: gorozhanka@yandex.ru*

*Tel.: (473)-220-82-81*

*Гунькин В.Н., инженер кафедры физики твердого тела и наноструктур, Воронежский государственный университет*

*E-mail: kof134@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473)-220-83-63*

*Goonkin V. N., engineer, Department of Solid State and Nanostructures, Voronezh State University*

*E-mail: kof134@phys.vsu.ru*

*Tel.: (473)-220-83-63*

*Черенкова М.В., студент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет*

*E-mail: kof134@phys.vsu.ru*

*Тел.: (473)-220-82-81*

*Cherenkova M. V., student, Department of General Physics, Voronezh State University*

*E-mail: kof134@phys.vsu.ru*

*Tel.: (473)-220-82-81*

*Гриднев А.Е., ассистент кафедры общей физики, Воронежский государственный университет*

*E-mail: aegridnev@mail.ru*

*Тел.: (473)-220-82-81*

*Cridnev A. E., assistant, Department of General Physics, Voronezh State University*

*E-mail: aegridnev@mail.ru*

*Tel.: (473)-220-82-81*