

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФРАКТАЛЬНОЙ РАЗМЕРНОСТИ КОМПОЗИТОВ
СИСТЕМЫ ZrB_2 -SiC-TaB₂ ПРИ АБРАЗИВНОМ ИЗНАШИВАНИИ**

В.В. ШИМАКОВ^{1,2}, А.С. БУЯКОВ^{1,2}, С.П. БУЯКОВА^{1,2}

¹Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет

E-mail: vvshmakov@ispms.ru

Многие исследования керамики системы ZrB_2 -SiC свидетельствуют о перспективе таких композитов в трибологических применениях. Авторами [1] показано, что в условиях высокоскоростного трения на поверхности композитов ZrB_2 -SiC образуется трансферный слой боросиликатного стекла, который позволяет снизить коэффициент трения до 0,16. В то же время исследованиям стойкости к абразивному изнашиванию керамических композитов посвящено небольшое количество работ, хотя в некоторых функциональных применениях именно стойкость к абразивному воздействию может являться более наглядной характеристикой материала.

Однако в исследовании, приведенном выше, характеристике поверхности износа уделяется крайне мало внимания, поскольку целью работы являлось изучение стойкости к абразивному изнашиванию керамических композитов, а количественная оценка шероховатости не может описать состояние поверхности материала в целом. Одним из методов интегрального описания поверхности является фрактальный анализ, который позволяет количественно оценить структуру поверхности с помощью стационарной нецелочисленной размерности, называемой фрактальной [2].

В работе [3] авторами проведено исследование морфологии поверхности эрозийного износа с помощью фрактального анализа. Показано, что описание поверхности износа при визуальном осмотре коррелируют с измеренными фрактальными значениями. Таким образом, фрактальное значение поверхности износа представляет собой количественный параметр, который может использоваться для описания механизма износа.

Целью настоящего исследования является изучение поверхности керамических композиционных материалов со структурой «композит в композите» и гомогенным распределением компонентов, подвергнутых абразивному изнашиванию, методом фрактального анализа.

В настоящей работе исследованы керамические композиционные материалы со структурой «композит в композите». Матрица была представлена системой 80 об. % ZrB_2 - 20 об. % SiC, а включения 80 об. % TaB₂ - 20 об. % SiC. Исходные порошки подвергали высокоэнергетической активации в планетарной мельнице в среде аргона. Композиционные гранулы были получены методом распылительной сушки с последующим спеканием для удаления органического связующего. После чего композиционные включения смешивали с матричным порошком и спекали под давлением. Соотношение композиционных гранул варьировалось от 10 до 50 об. %. Двойные композиты обозначали аббревиатурой ДК с указанием объемного содержания включений. В качестве контрольного образца использовали композит с гомогенным распределением компонентов, который обозначали аббревиатурой ГК.

После проведения испытания на абразивное изнашивание, согласно ASTM G65-04, определяли шероховатость поверхности износа с помощью лазерного профилометра, который также использовали для оценки фрактальной размерности композитов. В результате исследования получали таблицу размером 100×100 ячеек, в которой каждое значение от 0 до 255 соответствовало пикселю на снимке, где 0 – наиболее высокая область относительно детектора отраженного излучения профилометра, а 255 – наиболее удаленная. После чего построена зависимость шероховатости от длины линии вертикального профиля сечения «n» в двойных логарифмических координатах. Линейная аппроксимация полученных значений позволяет определить фрактальную размерность D.

В работе [4] было показано, что шероховатость керамики со структурой «композит в композите» повышается с увеличением объемного содержания включений. Однако, несмотря на большую глубину локальных следов износа на поверхности ДК композитов, по сравнению с ГК, композит ДК10 обладал большей стойкостью к абразивному изнашиванию. В то же время, исследование фрактальной размерности керамики, после абразивного изнашивания, показывает, что для ДК10 включений характерен минимум, рисунок 1.

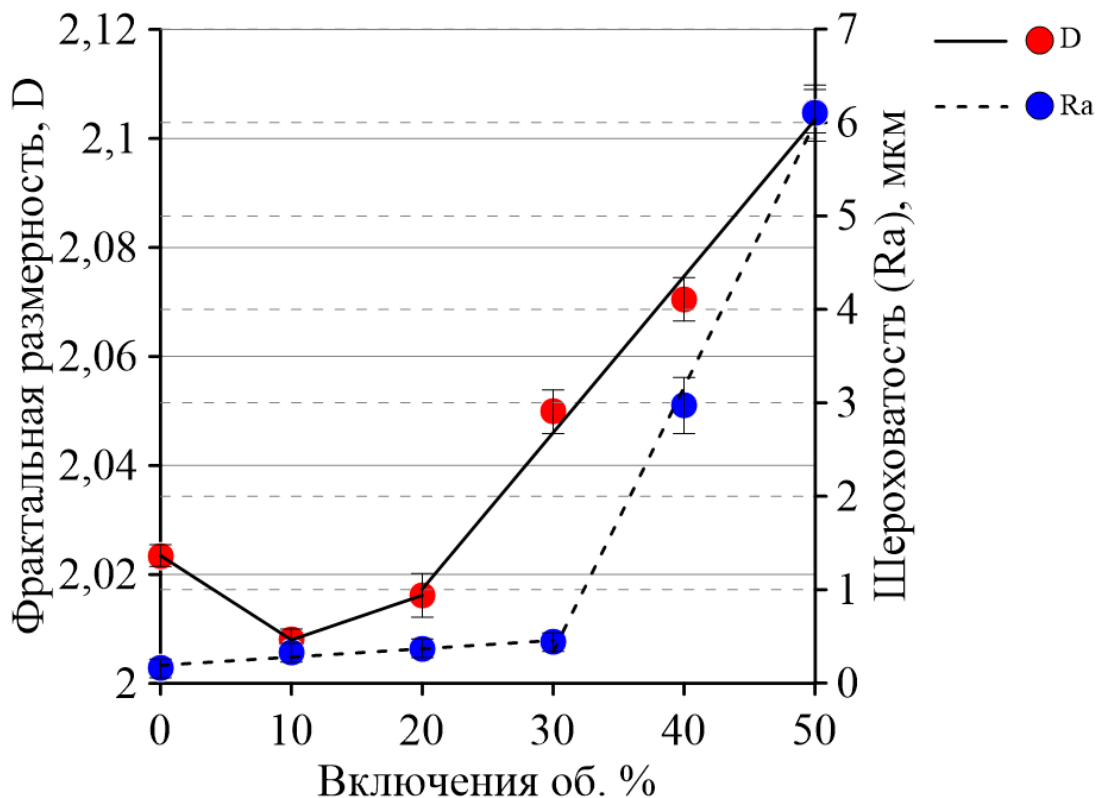


Рисунок 1. График зависимости шероховатости и фрактальной размерности изношенной поверхности от количества композитных включений

Абразивное изнашивание ГК, который обладает большей потерей объема по сравнению с ДК10, характеризуется образованием следа износа малой глубины с достаточно низкой шероховатостью поверхности, а фрактальная размерность изменяется медленно, относительно композитов ДК, рисунок 2, а. Фрактальная размерность ДК, во время абразивного изнашивания, изменяется по другому механизму. Изначально более высокая фрактальная размерность композитов ДК, обусловленная остаточной пористостью в композиционных включениях и большей изначальной шероховатостью после полировки, снижается до некоторого критического значения потери объема. Для двойных композитов с содержанием 20–50 об. % включений увеличения фрактальной размерности характерно на последнем участке проведения испытания, рисунок 2, б.

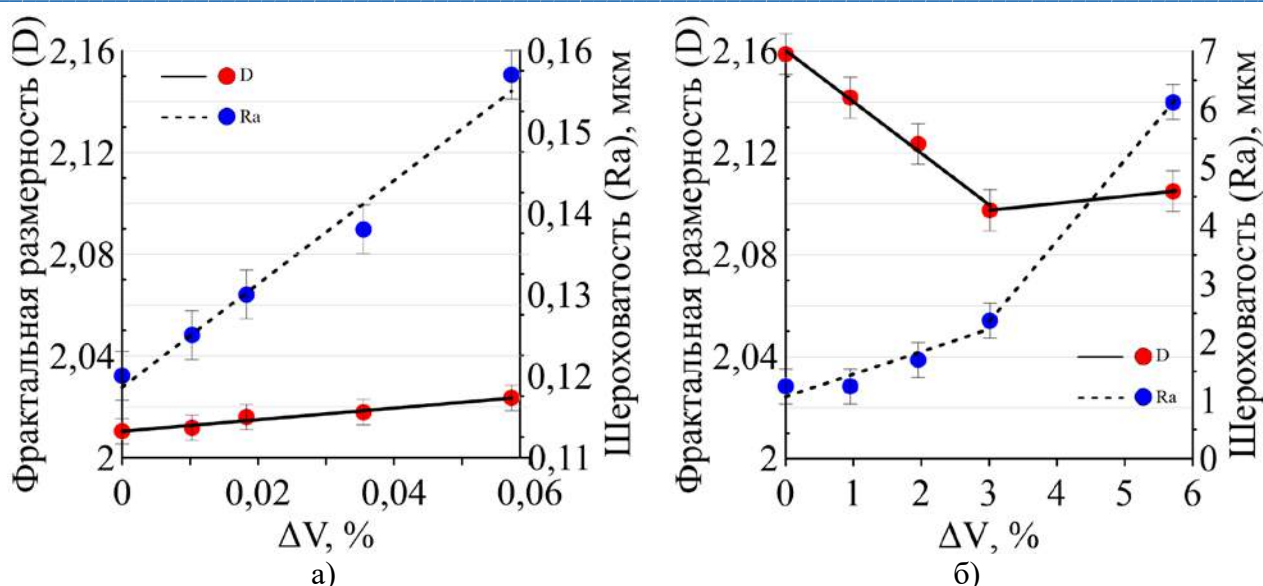


Рисунок 2. Графики зависимости шероховатости и фрактальной размерности изношенной поверхности от потери объема: а – ГК; б – ДК

Ранее проведенные исследования [4] показали, что абразивное изнашивание композитов ГК происходит с образованием и ростом подповерхностных трещин, в то время как структура «композит в композите», обладающая большей трещиностойкостью, обеспечивает изнашивание по схеме сухой эрозии, что при содержании композиционных включений до 20 об. % приводит к увеличению стойкости к абразивному изнашиванию.

Таким образом, абразивное изнашивание керамики с гомогенным распределением компонентов и со структурой «композит в композите» происходит по разным механизмам, что также отражается в изменении зависимости фрактальной размерности от величины потери объема. Фрактальная размерность композита ГК увеличивается во время испытания на абразивное изнашивания, а при изнашивании композитов ДК снижается до некоторого критического значения потери объема, после чего характер зависимости меняется на противоположный. Изменение фрактальной размерности при проведении испытания на абразивное изнашивание отражает поведение композита при износе.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0009.

Список литературы

1. Savchenko N., Mirovoy Y., Burlachenko A., Sevostyanova I., Buyakov A., Rudmin M., Vorontsov A., Buyakova S., Tarasov S. Subsurface multilayer evolution of ZrB₂–SiC ceramics in high-speed sliding and adhesion transfer conditions // *Wear*. – 2021. – Vol. 482. – P. 203956.
2. Jin S., Zhang J., Han S. Fractal analysis of relation between strength and pore structure of hardened mortar // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 135. – P. 1–7.
3. Rawers J., Tylczak J. Fractal characterization of wear-erosion surfaces // *Journal of materials engineering and performance*. – 1999. – Vol. 8. – P. 669–676.
4. Buyakov A., Shmakov V., Buyakova S. Dual composite architectonics: Behavior of ZrB₂–SiC–TaB₂ composites under abrasive conditions // *Ceramics International*. – 2024. – Vol. 50. – № 1. – P. 1849–1856.