

06.4;06.5

## Фрактальный анализ эволюции топографии поверхности гомогенных и двойных композитов $ZrB_2-TaB_2-SiC$ при абразивном изнашивании

© В.В. Шмаков, А.С. Буяков, С.П. Буякова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Россия  
E-mail: vvshmakov@ispms.ru

Поступило в Редакцию 3 июня 2024 г.

В окончательной редакции 9 июля 2024 г.

Принято к публикации 15 июля 2024 г.

Исследована эволюция фрактальной размерности поверхности композитов системы  $ZrB_2-TaB_2-SiC$ , подверженной абразивному изнашиванию. Исследуемые керамические композиты представлены двумя типами структурной организации: композит с гомогенным характером распределения компонентов в объеме и двойной композит, сформированный по принципу композитных включений в композитной матрице. Обнаружено, что композит с гомогенной структурой и двойные композиты проявляют различный характер абразивного изнашивания, что отражено в изменении зависимости величины фрактальной размерности от потери объема материалом в процессе износа. Показано, что величина фрактальной размерности композита с гомогенной структурой растет по мере изнашивания, в то время как фрактальная размерность поверхности двойных композитов снижается до достижения некоторого критического значения потери объема. В дальнейшем происходит снижение стойкости к абразивному износу, увеличивается величина потери объема, а характер зависимости фрактальной размерности меняется на обратный.

**Ключевые слова:** фрактальная размерность, шероховатость, абразивный износ, керамики, двойные композиты.

DOI: 10.61011/PJTF.2024.22.59128.20008

Сложность поверхности композиционных материалов может быть измерена характеристическим числом — фрактальной размерностью. Величина фрактальной размерности представляет собой меру скорости добавления дополнительных деталей при переходе от одного масштаба к следующему. Принято считать, что фрактальная размерность — это коэффициент, описывающий геометрически сложные формы, для которых детали являются более важными, чем полный рисунок [1]. Фрактальная размерность — количественная мера неидеальности объектов, которыми являются поверхностные структуры реальных композиционных материалов. Она чувствительна к развитости межфазных границ, наличию и размеру трещин, пор и т. п. В отличие от топологической размерности на идеальных объектах фрактальная размерность обладает более высокой чувствительностью к несовершенствам реальных объектов, что позволяет их различать и индивидуализировать. Использование фрактальной размерности в качестве численной характеристики изменения поверхности композиционных материалов в результате каких-либо механических воздействий можно рассматривать как дополнение к широко используемым методам анализа изменений поверхности твердых тел. Шугуров с соавторами [2] применили фрактальный анализ для количественной оценки профиля изношенной поверхности на различных стадиях эксперимента и выявления механизма разрушения гальванических покрытий AuNi. Хоровистис [3] применил фрактальный анализ для описания поверхности разрушения вдоль фронта зоны растяжения в алюминиевом сплаве, характеризующемся

сложной морфологией и неоднородной зеренной структурой.

В настоящей работе фрактальная размерность использована в качестве характеристики, отражающей изменения поверхности сложноорганизованных керамических композитов при абразивном воздействии. Известно, что процесс абразивного изнашивания керамик реализуется преимущественно путем образования поверхностных микротрещин под воздействием ударных нагрузок, оказываемых на поверхность частицами абразива [4]. Формируемая при такого рода воздействии структура существенно образом определяется трещиностойкостью изнашиваемого материала. Поверхность подверженной абразивному изнашиванию износостойкой керамики может характеризоваться высокой шероховатостью при относительно низкой потере объема, или, наоборот, низкая износостойкость может привести к формированию заметных углублений, характеризующихся, однако, низкой шероховатостью. Увеличение комплексности и неоднородности структуры и фазового состава керамики может привести к неоднородному поведению в процессе изнашивания, а критическое накопление микроповреждений — к резкой потере макроструктурной стабильности.

Количественная оценка абразивного износа керамик может быть осуществлена путем измерения потери массы или объема на основе определения изменения шероховатости изношенной поверхности либо анализа профиля поперечного сечения поверхности износа. Вместе с тем интерес вызывает возможность применения

фрактального анализа к изучению поведения керамических композитов при абразивном изнашивании. Целью настоящей работы является исследование характера абразивного изнашивания керамических композитов  $ZrB_2-TaB_2-SiC$ , сформированных по принципу гомогенного распределения компонентов в объеме материала и с применением подхода „композит в композите“ [5], где композиционная матрица наполнена композитными включениями, на основе анализа эволюции фрактальной размерности поверхности как интегральной морфологической характеристики.

Композиты с гомогенным распределением компонентов в объеме (НС) были получены совместной механической активацией в планетарном смесителе компонентов с последующим их спеканием в вакууме при температуре  $1800^\circ C$  под давлением 150 МПа. Образцы с двойной композиционной структурой (DC $x$ , где  $x$  отражает объемное содержание включений в матрице) были наполнены композитными включениями, полученными методом распылительной сушки и спеканием в вакууме при  $1600^\circ C$ . Средний размер включений  $TaB_2-SiC$  после спекания составлял  $167.3 \pm 11.5 \mu m$ . В дальнейшем была подготовлена порошковая смесь компонентов матрицы и включений, подвергнутая спеканию под давлением в условиях, аналогичных спеканию НС. Фазовый состав исследуемых композитов представлен в таблице. Более подробно процедура получения исследуемых материалов была представлена ранее в работе [6].

Испытания на абразивное изнашивание проводились с использованием кварцевого песка в качестве свободного контртела, подаваемого в область контакта прижимаемого к торцу вращающегося резинового ролика керамического образца, в соответствии с ASTM G65–04. Шероховатость ( $R_a$ ) поверхности износа определена с помощью лазерного профилометра Uniscan OSP 100A. Фрактальная размерность ( $D$ ) поверхности износа была

оценена следующим образом: с помощью лазерного профилометра сканировалась область на поверхности износа размером  $100 \times 100 \mu m$ . Результатом профилометрического исследования являлся рисунок в виде монохромной двумерной таблицы  $100 \times 100$  ячеек, где цвет каждой ячейки отражал высоту: белый — наиболее высокая область относительно детектора отраженного излучения профилометра, черная — наиболее удаленная. Полученный рисунок был преобразован в числовой вид с учетом данных о высоте, определенных с помощью профилометрии, и представлен в виде трехмерной поверхности (рис. 1). С целью минимизации ошибки, вносимой критерием выбора линейного участка обратной S-образной кривой, для линеаризации выбирался участок, занимающий 60% от высоты кривой, равноудаленной от верхней и нижней точек кривой для всех исследуемых материалов. В дальнейшем данная поверхность была построена с различной величиной масштабного шага  $n$ . Фрактальная размерность этой поверхности определена как коэффициент аппроксимации линейной области обратной S-образной кривой зависимости отношения площади, определенной с шагом  $n$  ( $S_n$ ), к площади проекции этой поверхности ( $S_1$ ), равной  $100 \times 100 \mu m$ , от величины шага  $n$ , построенной в двойных логарифмических координатах.

Исследование поверхности износа показало, что шероховатость DC $x$  заметно растет с увеличением содержания композитных включений. Однако, несмотря на схожее поведение обеих кривых на рис. 2, а, зависимость фрактальной размерности изношенной поверхности от содержания включений имеет минимум, соответствующий DC10. Кроме того, увеличение содержания включений также сопровождается снижением общей износостойкости. Несмотря на большую глубину локальных следов износа на поверхности DC $x$ , чем в случае НС, композит DC10 демонстрирует наибольшую износостой-

Состав и свойства исследуемых композитов

Композит	Состав				$K_{IC}$ , МПа · м <sup>1/2</sup> [6]	$E$ , GPa	
	vol.%		ZrB <sub>2</sub> , vol.%	SiC, vol.%			TaB <sub>2</sub> , vol.%
НС	100	Матрица	72	20	8	$3.22 \pm 0.16$	$480.9 \pm 24.0$
DC10	90	Матрица	80	20	—	$4.16 \pm 0.1$	$480.9 \pm 24.0$
	10	Включения	—	20	80		$525.5 \pm 26.3$
DC20	80	Матрица	80	20	—	$5.2 \pm 0.1$	$480.9 \pm 24.0$
	20	Включения	—	20	80		$525.5 \pm 26.3$
DC30	70	Матрица	80	20	—	$9.3 \pm 0.2$	$480.9 \pm 24.0$
	30	Включения	—	20	80		$525.5 \pm 26.3$
DC40	60	Матрица	80	20	—	$10.8 \pm 0.3$	$480.9 \pm 24.0$
	40	Включения	—	20	80		$525.5 \pm 26.3$
DC50	50	Матрица	80	20	—	$11.2 \pm 0.2$	$480.9 \pm 24.0$
	50	Включения	—	20	80		$525.5 \pm 26.3$

Примечание.  $K_{IC}$  — трещиностойкость,  $E$  — модуль упругости.

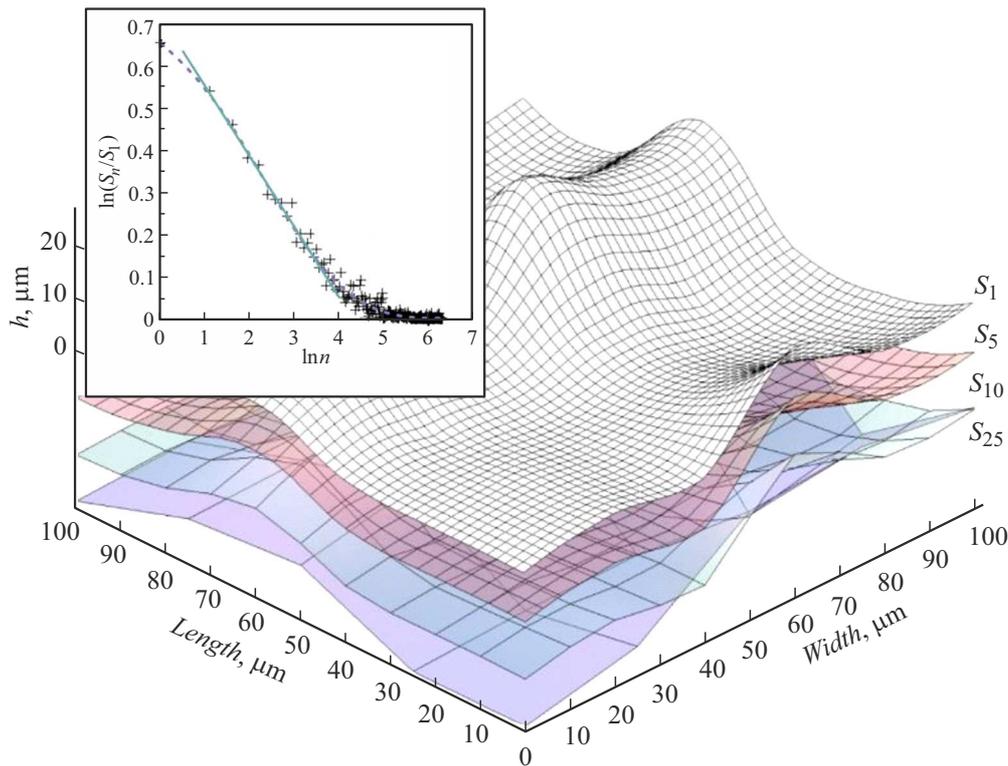


Рис. 1. Трехмерная поверхность НС, построенная с различным шагом масштабирования  $n$ .

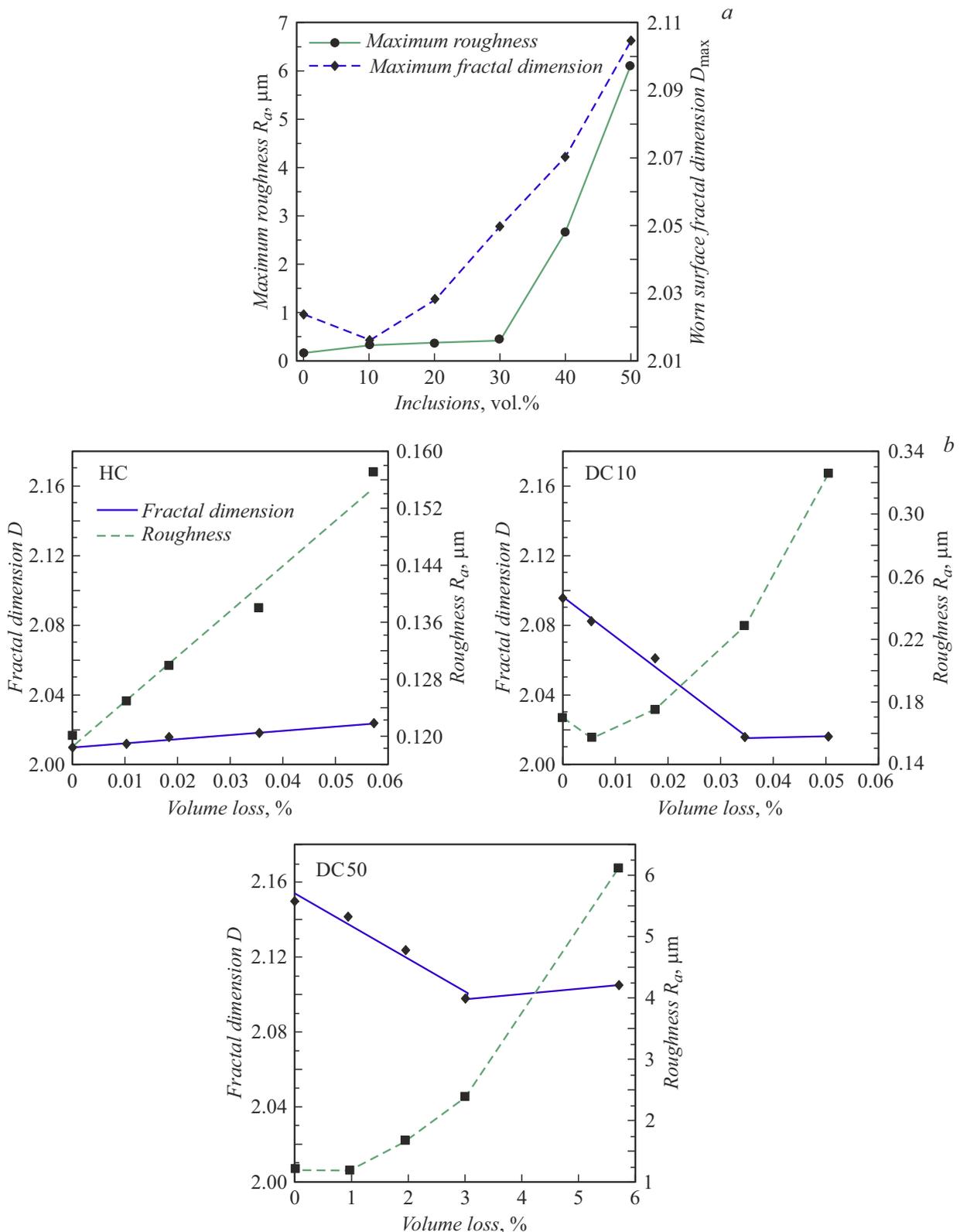
кость при наименьшей потере объема. Анализ изменения фрактальной размерности поверхности в процессе изнашивания показал, что фрактальная размерность НС растет относительно медленно (рис. 2, *b*).

Несмотря на меньшую стойкость НС к абразивному изнашиванию по сравнению с таковой для DC10 [7], износ НС сопровождается формированием углубления большой площади с довольно низкой шероховатостью поверхности. Изменения фрактальной размерности поверхности износа DC имеют иной характер. Изначально высокая (в сравнении с НС) фрактальная размерность может являться следствием остаточной пористости во включениях, которая была различима на исходных профилограммах, и большей изначальной шероховатости после предварительной шлифовки образцов, обусловленной значительной разницей в величине твердости матрицы и включений. По-видимому, в процессе изнашивания воздействие абразивных частиц оказывает полирующее действие на поверхность DCx [8]. Однако по достижении некоторого критического значения величины потери объема при износе происходит изменение характера зависимости величины фрактальной размерности от величины потери объема. Несмотря на то что измерения фрактальной размерности и потери объема осуществлялись после каждых 1000 м линейного расстояния контактного износа образец—вращающийся резиновый ролик, для двойных композитов DC20—DC50 на последнем участке (3000—4000 м) наблюдался наиболее интенсивный износ, приведший уже к росту фрак-

тальной размерности изношенной поверхности. В работе [6] показано, что для композитов  $ZrB_2-TaB_2-SiC$ , обладающих „двойной“ структурой, более интенсивному абразивному изнашиванию подвержена матрица. Однако при достижении некоторой критической величины площади контакта включение—матрица в процессе износа происходит заметная потеря объема, сопряженная с отрывом композиционных включений.

При исследовании характера формирования поверхности в процессе абразивного изнашивания с помощью растровой электронной микроскопии было обнаружено, что изнашивание НС осуществлялось путем образования микротрещин и откалывания частиц с поверхности, в то время как изнашивание DCx имело характер сухой эрозии. Менее твердая по сравнению с включениями матрица больше подвергалась износу, что продолжалось до тех пор, пока площадь контакта включения и матрицы не достигала некоего минимально критического значения, за чем следовал уже отрыв включений (рис. 3, *a*). Если на НС по мере изнашивания образуется углубление на всей площади контакта композита с резиновым роликом, то на DCx формируются локализованные очаги износа с большей глубиной.

В работах [6,7] было показано, что DCx проявляют заметно большую трещиностойкость по сравнению с НС, а также имеют более высокие значения модулей упругости для матрицы и включений, рассчитанных по правилу смеси с использованием литературных данных по модулю упругости  $ZrB_2$ ,  $SiC$ ,  $TaB_2$ : 489, 423.5



**Рис. 2.** *a* — зависимости шероховатости и фрактальной размерности изношенной поверхности от количества композитных включений. *b* — зависимости шероховатости и фрактальной размерности от потери объема на разных стадиях износа.

и 551 GPa [9–11] соответственно (см. таблицу). Это обусловлено двумя факторами: формированием полей

остаточных упругих напряжений, возникающих из-за разницы в величине коэффициентов теплового расши-

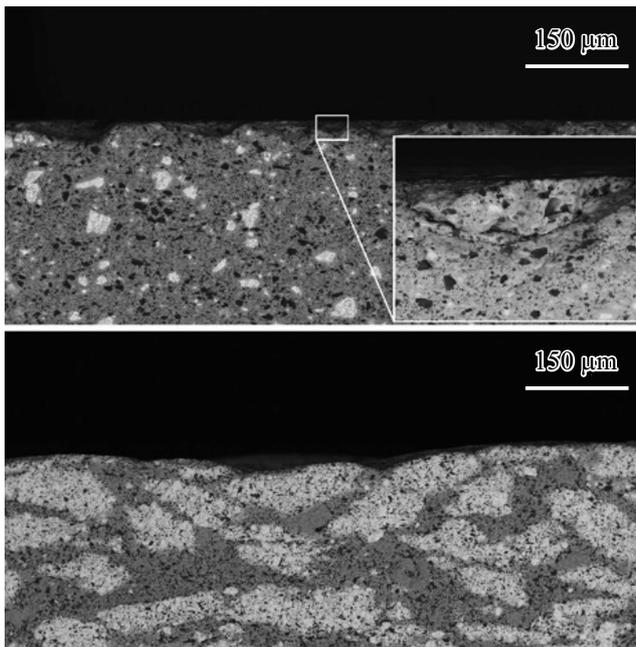


Рис. 3. Вид в поперечном сечении изношенной поверхности.

рения матрицы и включений, и разной жесткостью матрицы и включений. Это создает благоприятные условия для распространения трещин вблизи включений и соответственно увеличивает работу их распространения. Синергизм описанных выше факторов обеспечил ДСх не только большую трещиностойкость, но и иной характер абразивного изнашивания и формирования структуры поверхности в процессе износа.

Таким образом, композиты с двойной и гомогенной структурой демонстрируют различное поведение при абразивном износе, что отражается в изменении зависимости фрактальной размерности от величины потери объема. Фрактальная размерность поверхности гомогенного композита увеличивается по мере износа, в то время как фрактальная размерность двойных композитов уменьшается до достижения критической потери объема. В дальнейшем стойкость к абразивному изнашиванию снижается, а характер зависимости фрактальной размерности от потери объема меняется на противоположный. Изменение фрактальной размерности поверхности в зависимости от потери объема отражает поведение композита при износе: от полирования и сглаживания абразивными частицами до активного образования углублений и ямок.

### Финансирование работы

Работа выполнена в рамках комплексного проекта „Организация высокотехнологичного производства роторных управляемых систем для вскрытия сложных пластов и бурения скважин с большим отходом от вертикали в сложных геологических условиях, Арктике“

(соглашение о предоставлении субсидии № 075-11-2022-019 от 06.04.2022 г.), реализуемого ИФПМ СО РАН при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010 г.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] B. Mandelbrot, *Science*, **156** (3775), 636 (1967). DOI: 10.1126/science.156.3775.636
- [2] А.Р. Шугуров, А.В. Панин, А.О. Лязгин, Е.В. Шестериков, Письма в ЖТФ, **38** (10), 70 (2012). [A.R. Shugurov, A.V. Panin, A.O. Lyazgin, E.V. Shesterikov, *Tech. Phys. Lett.*, **38** (5), 484 (2012). DOI: 10.1134/S106378501205029X].
- [3] A.L. Horovistiz, L.R.O. Hein, *Mater. Lett.*, **59** (7), 790 (2005). DOI: 10.1016/j.matlet.2004.11.022
- [4] B.R. Lawn, O. Borrero-Lopez, H. Huang, Y. Zhang, *J. Am. Ceram. Soc.*, **104** (1), 5 (2021). DOI: 10.1111/jace.17502
- [5] F. Monteverde, C. Melandri, S. Failla, R.J. Grohsmeyer, G.E. Hilmas, W.G. Fahrenholtz, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **38** (8), 2961 (2018). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2018.02.003
- [6] A. Buyakov, V. Shmakov, S. Buyakova, *Ceram. Int.*, **49** (9), 13648 (2023). DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.12.241
- [7] A. Buyakov, V. Shmakov, S. Buyakova, *Ceram. Int.*, **50** (1), 1849 (2024). DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.10.284
- [8] A.A. Alhabdan, A.A. El-Hejazi, *J. Dent. Health Oral Disord. Ther.*, **2** (3), 101 (2015). DOI: 10.15406/jdhodt.2015.02.00050
- [9] X. Zhang, G.E. Hilmas, W.G. Fahrenholtz, *Mater. Lett.*, **62** (27), 4251 (2008). DOI: 10.1016/j.matlet.2008.06.052
- [10] E. Zapata-Solvas, D.D. Jayaseelan, H.T. Lin, P. Brown, W.E. Lee, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **33** (7), 1373 (2013). DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2012.12.009
- [11] W.W. Xu, F. Xia, L. Chen, M. Wu, T. Gang, Y. Huang, *J. Alloys Compd.*, **768**, 722 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2018.07.299