

УДК 666.6

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗНОСОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМ

© Канд. техн. наук *О.А. Сергиевич*<sup>1</sup>, канд. техн. наук *Т.В. Колонтаева*<sup>2</sup>, канд. техн. наук *Е.М. Дятлова*<sup>1</sup>, *О.Д. Канафьев*<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный технологический университет (БГТУ),

г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский национальный технический университет (БНТУ),

г. Минск, Республика Беларусь

В статье приведены результаты исследования показателей качества поверхностных характеристик износостойких керамических материалов на основе различных кристаллических фаз, формирующихся в системах  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$ ,  $\text{TiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$ . Исследования трибологических свойств разработанных материалов проводились на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 с коэффициентом жесткости зонда  $k = 0,3$  Н/м. Показатели шероховатости поверхности для образца рутиловой керамики составляют:  $R_a - 73,7$ ,  $R_q - 98,4$ , коэффициент трения — 0,68; образца, механически обработанного полиролью на основе тонкодисперсного корунда:  $R_a - 34,9$ ,  $R_q - 45,4$ , коэффициент трения — 0,39; для образца самоглазующейся анортитовой керамики:  $R_a - 17,3$ ,  $R_q - 22,8$ , коэффициент трения — 0,27; для образца алумосиликатной керамики, покрытого износостойкой цирконийсодержащей глазурью:  $R_a - 2,1$ ;  $R_q - 2,73$ , коэффициент трения — 0,19.

**Ключевые слова:** износостойкая керамика, фазовый состав, оксиды-модификаторы, водопоглощение, пористость, прочность, твердость, плотность, температурный коэффициент линейного расширения, шероховатость, коэффициент трения.

The article presents the results of a study of the quality indicators of the surface characteristics of wear-resistant ceramic materials based on various crystalline phases formed in the  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$ , and  $\text{TiO}_2-\text{R}_x\text{O}_y$  systems. Investigations of the tribological properties of the developed materials were carried out on an NT-206 atomic force microscope with a probe stiffness coefficient  $k = 0.3$  N/m. The surface roughness indices for a rutile ceramic sample are:  $R_a - 73.7$ ,  $R_q - 98.4$ , friction coefficient — 0,68; a sample mechanically treated with polish based on finely divided corundum:  $R_a - 34.9$ ,  $R_q - 45.4$ , friction coefficient — 0.39; for a sample of self-glazing anorthite ceramic:  $R_a - 17.3$ ,  $R_q - 22.8$ , friction coefficient — 0.27; for a sample of aluminosilicate ceramics coated with wear-resistant zirconium-containing glaze:  $R_a - 2.1$ ;  $R_q - 2.73$ , the coefficient of friction — 0.19.

**Keywords:** wear-resistant ceramics, phase composition, modifying oxides, water absorption, porosity, strength, hardness, density, linear expansion temperature coefficient, roughness, friction coefficient.

**Введение.** Износостойкость — это свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания [1, 2].

Важными свойствами материалов пары трения являются твердость и микротвердость материала. Твердость — сопротивление материала местной пластической деформации, возникающей при

внедрении в него более твердого тела, которая определяется различными методами [3].

Исследование и разработка эффективных износостойких (триботехнических) материалов являются одним из основных путей решения технических проблем, связанных со снижением потерь на трение и износа в машинах. Основным направлением данной области является разработка многофунк-

циональных материалов, адаптированных к определенным условиям эксплуатации, возникающим в конкретных трибосопряжениях современной техники. К числу таких материалов могут быть отнесены, как традиционные металлы и их сплавы, полимеры, керамика, так и новые материалы с особыми триботехническими свойствами, в том числе материалы с «памятью», меняющие свои физико-механические свойства в зависимости от внешних воздействий [3].

Главное преимущество керамических материалов (по сравнению с лучшими сталями и сплавами) состоит в большей стойкости к износу, особенно в интенсивных условиях эксплуатации. Однако наличие структурных дефектов и хрупкость керамики могут значительно снизить это преимущество. Развитие исследований в области трибологии керамических материалов позволяет определить оптимальные условия их эксплуатации во взаимосвязи со структурой и свойствами.

Трение и изнашивание можно рассматривать как поверхностные явления, протекающие в достаточно тонких слоях контактирующих материалов. Ужесточение требований к структуре и свойствам поверхностных слоев стимулировало развитие новых методов их модификации различными видами технологической обработки. К методам управления свойствами поверхности керамических материалов относятся нанесение покрытий, легирование или модификация поверхностного слоя. Среди указанных методов самым распространенным является нанесение покрытий. При этом на поверхности изделия формируется дополнительный слой материала, по своему составу в большинстве случаев отличающийся от основного материала детали. Габаритные размеры детали при этом увеличиваются на толщину слоя покрытия, что дает возможность использовать методы нанесения покрытий не только при изготовлении новых, но и при восстановлении изношенных деталей и конструкций.

При легировании поверхности улучшение свойств поверхностного слоя происходит вследствие изменения его химического состава или структурного состояния. С этой целью проводится механическая и химическая полировка поверхности, а также обработка с помощью лазера и плазмы. При этом практически сохраняются размеры изделий. Главное назначение модифика-

ции поверхности — снижение коэффициента трения за счет уменьшения ее шероховатости. Для характеристики шероховатости поверхности используют несколько десятков параметров, основными из которых являются:

- среднее арифметическое отклонение профиля  $R_a$  — среднее арифметическое абсолютных значений отклонений профиля в пределах базовой длины;

- высота неровностей профиля по десяти точкам  $R_z$  — сумма средних арифметических (абсолютных) отклонений точек пяти наибольших максимумов и пяти наибольших минимумов профиля в пределах базовой длины;

- наибольшая высота неровностей профиля  $R_{max}$  — расстояние между линией выступов профиля в пределах базовой точки;

- средний шаг неровностей  $S_m$  — среднее арифметическое значение шага неровностей профиля в пределах базовой длины [4].

На кафедре технологии стекла и керамики БГТУ разработаны составы и технология получения керамических износостойких материалов для изготовления изделий, применяемых в текстильной и машиностроительной отраслях промышленности. Керамические материалы синтезированы на основе различных оксидных систем с выделением высокопрочных кристаллических фаз корунда, рутила, анортита, муллита. Основные физико-технические характеристики разработанных материалов представлены в табл. 1.

С целью снижения коэффициента трения разработанных износостойких материалов, предназначенных для работы в условиях длительных истирающих нагрузок, проводилась модификация их поверхности различными методами. Образцы рутиловой керамики (состав 3) подвергались механической полировке, на мулито-корундовую керамику (состав 2) наносилось покрытие цирконийсодержащей износостойкой глазури. Для анортитовой керамики использован эффект самоглазурования поверхности. Для этого в состав порошкообразной смеси вводились растворы гидроксида натрия и буры, которые при сушке мигрировали на поверхность, а при обжиге при взаимодействии с основными компонентами способствовали образованию стекловидного покрытия на поверхности материала [5, 6].

**Методология работы.** Исследования морфологии и трибологических свойств

Характеристики износостойких керамических материалов

Наименование показателя	Номер состава		
	1	2	3
Система оксидов	CaO—Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> —SiO <sub>2</sub> —R <sub>x</sub> O <sub>y</sub>	TiO <sub>2</sub> —R <sub>x</sub> O <sub>y</sub>
Фазовый состав	анортит, волластонит, кристобалит	корунд, муллит	рутил
Температура синтеза, °С	1170	1350	1275
Водопоглощение, %	0,2	0,15	0,46
Кажущаяся плотность, кг/м <sup>3</sup>	2240	2530	3553
Механическая прочность при сжатии, МПа	103	370	525
Твердость по шкале Мооса	6,5	8,0	7,5
Микротвердость, МПа	10800	13530	12442

разработанных износостойких керамических материалов проводились на атомно-силовом микроскопе модели NT-206 с использованием кремниевой консоли NSC11A с коэффициентом жесткости зонда  $k = 0,3$  Н/м. При сканировании поверхности зонд изгибается в вертикальном направлении на микрошероховатостях. Изгиб зонда регистрируется в виде смещения отраженного от зонда лазерного луча на фотодетекторе. Таким образом, формируется трехмерное изображение участка сканирования — топография или морфология поверхности. Гистограмма высот характеризует распределение размеров (высот) микронеровностей и дает качественное представление о шероховатости поверхности всего участка сканирования [7, 8].

Для определения силы и коэффициента трения АСМ-зонд сканирует поверхность в двух направлениях: прямом и обратном. Движение осуществляется в направлении перпендикулярном продольной оси балки кантилевера. В процессе сканирования регистрируется величина изгиба (кручения) балки под действием силы трения с поверхностью исследуемого образца. Скорость трения зависит от размеров области сканирования. Для областей  $20 \times 20$  мкм скорость составила 14 мкм/с. Нормальная нагрузка стандартного кремниевго зонда на поверхность во время трения составляла около 140 нН. На первом этапе зонд АСМ приводят в контакт с поверхностью исследуемого образца и нагружают до значения силы  $F_{норм}$ . Перед началом движения луч лазера падает на верхнюю отражающую поверхность зонда, отражается и попадает в центральное положение четырехсегментного фотодетектора. Скани-

рование осуществляется путем перемещения образца по линии в прямом и обратном направлении с заданной длиной линии и шагом между ними.

Сила трения  $F_{тр}$  и исследуемых материалов при использовании зонда V-образной формы определялась по формуле (1):

$$F_{три} = \frac{\Delta Z_i / k}{3s(1 + \vartheta)}, \quad (1)$$

где  $\Delta Z_i = \frac{|z_{пi}| - |z_{oi}|}{2}$  — разность между отклонениями зонда при движении в прямом и обратном направлении, деленная на два, м;  $l$  — длина балки сканирующего зонда;  $k$  — жесткость зонда сканирующего зонда (зонд NCS11A с  $k = 0,48$  Н/м);  $s$  — высота иглы зонда;  $\vartheta$  — коэффициент Пуассона материала зонда.

Коэффициент трения определяется (согласно теории Амонтона) из отношения силы трения  $F_{тр}$  к нормальной силе  $F_n$ , приложенной к острию:

$$k_{тр} = \frac{F_{тр}}{F_n}. \quad (2)$$

**Экспериментальная часть.** Результаты исследования поверхности опытных образцов разработанных керамических материалов на АСМ представлены на рис. 1, 2. Полученные данные позволяют определить качественные и некоторые количественные характеристики поверхности керамики. Внешний вид поверхности образцов можно определить по микрофотографиям, выполненным на участке  $10 \times 10$  мкм под разными углами падения луча, а также на 3Д-изображении, где указаны среднее

арифметическое абсолютных значений отклонений профиля ( $R_a$ ) и средне-квадратичный показатель  $R_q$ . Величина неровностей в мкм для сравнения показана на профилограммах, которые делаются по трем линиям в разных местах поверхности образца (на рисунках представлено по одной профилограмме). На гистограммах изображено распределение по размерам в виде разности между максимальной и минимальной высотой неровности, а также ориентация их плоскостей по поверхности. Чем шире «пятно» на второй гистограмме, тем более развита поверхность, тем больше участков (неровностей) повернуты в разные стороны.

Опытный образец рутиловой керамики (рис. 1 а) имеет необработанную поверхность, которая сформировалась в процессе обжига и инерционного охлаждения. Визуально поверхность образца ровная и гладкая, без дефектов, характеризуется неравномерным блеском. Топография поверхности и 3Д-изображение свидетельствуют о микрогетерогенной структуре, наличии кристаллов неизометрической формы, обуславливающих шероховатость поверхности, что подтверждается приведенными профилограммой и профилем неровностей. Показатели шероховатости поверхности (3Д-изображение) для синтезированного образца рутиловой керамики составляют:  $R_a = 73,7$ ;  $R_q = 98,4$ .

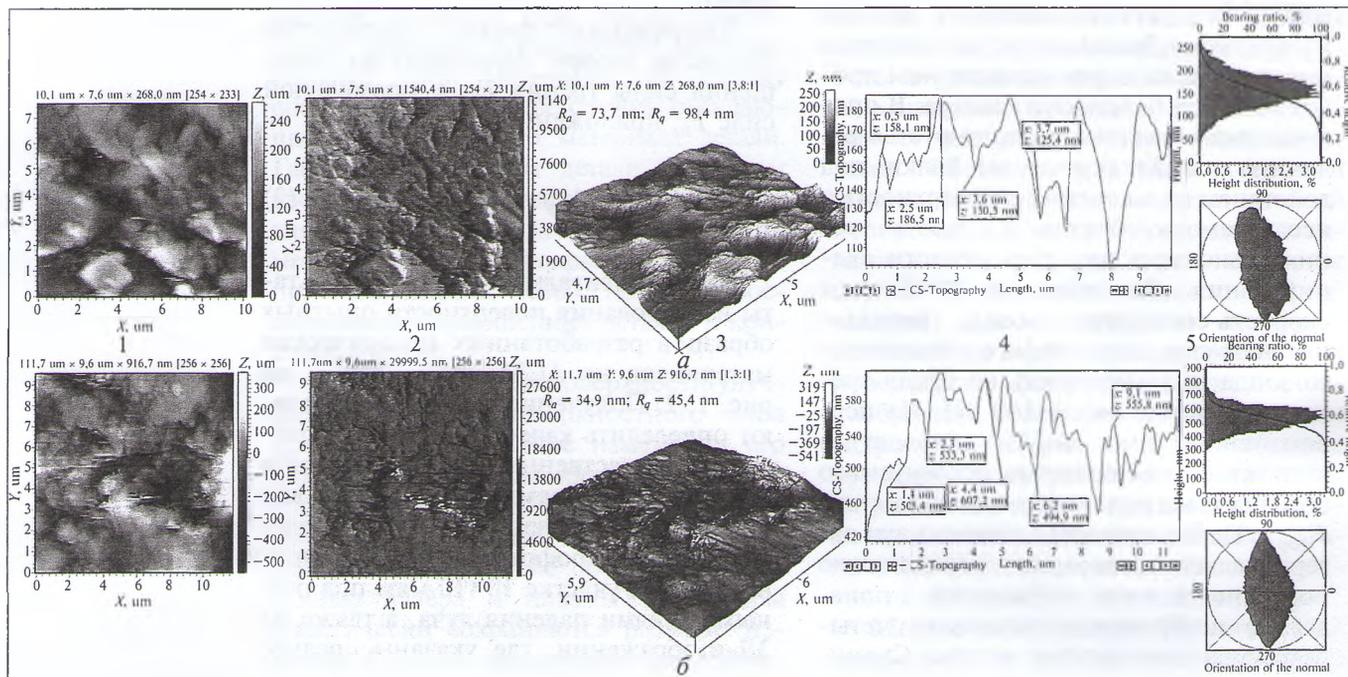
На рис. 1 б представлен образец того же состава, но его поверхность под-

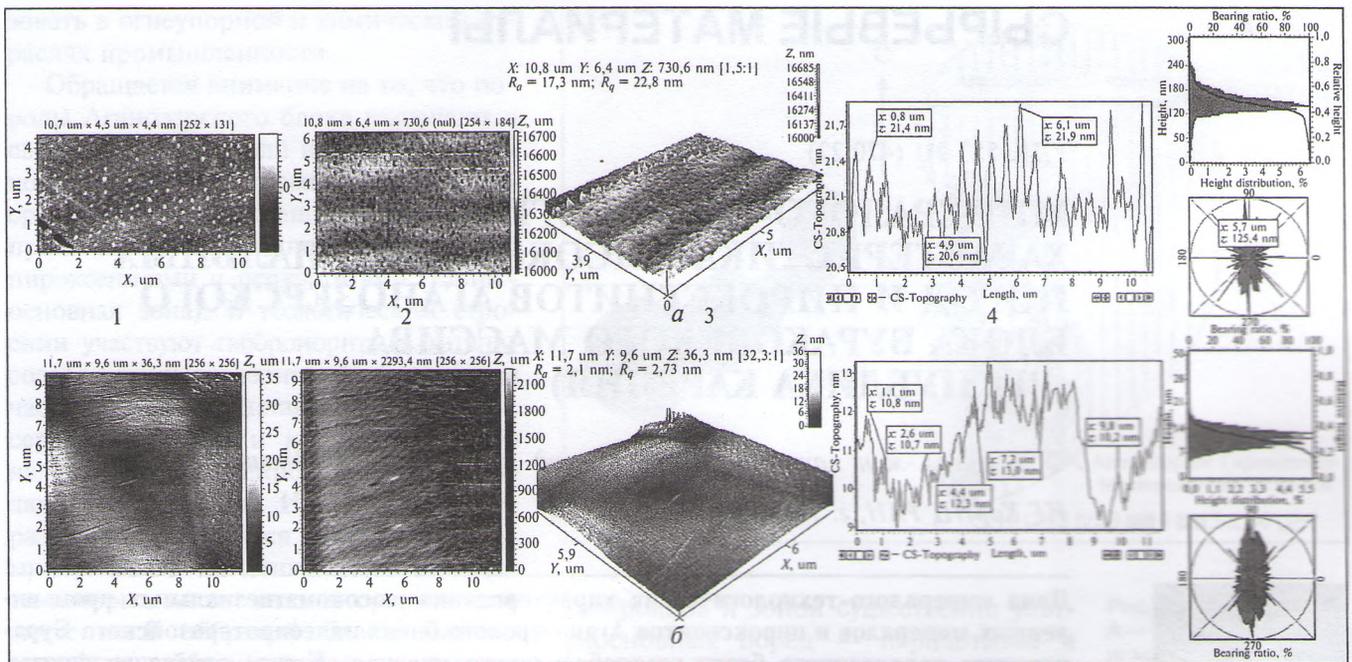
вергнута механической обработке с помощью полировального порошка на основе тонкодисперсного корунда. Как видно из приведенных данных, поверхность полированного образца более однородная, разброс значений базовых величин, определенных с использованием кангилеверов в контактном режиме, значительно меньше. Значительно снижаются показатели шероховатости:  $R_a = 34,9$ ;  $R_q = 45,4$  по сравнению с необработанным образцом, которые оказывают влияние на коэффициент трения материала. Рассчитанный по формуле (1) коэффициент трения для исходной рутиловой керамики составляет 0,68, полировка поверхности позволяет снизить его до 0,39, что значительно улучшает эксплуатационные свойства материала и увеличивает срок службы в условиях постоянных истирающих нагрузок.

На рис. 2 представлены образцы износостойких керамических материалов составов 1 и 2, на поверхности которых имеются глазурные покрытия. В первом образце покрытие сформировалось на поверхности образца при однократном обжиге при оплавлении поверхности за счет взаимодействия компонентов массы. Во втором образце глазурная суспензия наносилась на предварительно обожженный материал, который затем подвергался повторному обжигу для формирования покрытия.

Как видно на рис. 2 а, поверхность самоглазующейся анортитовой кера-

**Рис. 1.** Изображение поверхности:  
1 — топография ( $10 \times 10$  мкм);  
2 — торшин;  
3 — 3D-изображение)  
профилограмма (4) и гистограмма (5) профиля поверхности образца 3:  
а) — после синтеза;  
б) — после механической полировки





мики характеризуется микронеоднородностью. Отчетливо видны очень мелкие включения кристаллического или ликвационного происхождения, которые равномерно распределены по поверхности образца (3Д-изображение). Поверхность имеет невысокие показатели шероховатости ( $R_a - 17,3$ ;  $R_q - 22,8$ ), а также небольшой разброс базовых величин по поверхности образца. Согласно приведенным данным профилограммы и гистограммы, коэффициент трения самоглазующейся керамики составляет 0,27.

Поверхность образца алюмосиликатной керамики состава 2, покрытого износостойкой цирконийсодержащей глазурью, характеризуется высокой однородностью. Согласно микрофотографиям ее структура аморфизированная, без видимых включений с минимальной шероховатостью ( $R_a - 2,1$ ;  $R_q - 2,73$ ). Минимальный разброс неровностей обеспечивает низкий коэффициент трения, который, согласно расчетам, составляет 0,19.

**Заключение.** В результате проведенного исследования разработаны износостойкие керамические материалы с модифицированной поверхностью, обладающие низким коэффициентом трения, которые рекомендованы для изготовления нитеводителей, применяемых в текстильной промышленности.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Чичинадзе А.В.* Основы трибологии (трение, износ, смазка) / А.В. Чичинадзе, Э.Д. Браун, Н.А. Буше. М.: Машиностроение, 2001. 664 с.

2. *Брыков М.Н.* О проблемных терминах трибологии / М.Н. Брыков, В.Г. Ефременко // Проблемы трибологии. 2013. № 1. С. 94–99.

3. *Триботехническое материаловедение и триботехнология* / Н.Е. Денисова [и др.]; под ред. Н.Е. Денисовой. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2006. 248 с.

4. *Пенкин Н.С.* Основы трибологии и триботехники / Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин. М.: Машиностроение, 2008. 206 с.

5. *Дятлова Е.М.* Особенности структуро- и фазообразования при синтезе самоглазующихся керамических материалов / Е.М. Дятлова, О.А. Сергиевич, И.А. Алексеевко, А.А. Шевченко, Т.В. Колонтаева // Материалы 11-й Международной научно-технической конференции «Приборостроение — 2018»: сб. материалов конференций. — Минск, БНТУ, 2018 г. С. 269–271.

6. *Сергиевич О.А.* Керамические материалы с повышенной износостойкостью для машиностроительной и легкой промышленности / О.А. Сергиевич, И.А. Алексеевко, Е.А. Артемьев // Труды Кольского научного центра. Химия и материаловедение. Выпуск 1. г. Апатиты, 2017. № 5/2017. С. 167–172.

7. *Миронов В.Л.* Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. Ниж. Новгород: РАН Институт физики микроструктур, 2004. 110 с.

8. *Арутюнов П.А.* Атомно-силовая микроскопия в задачах проектирования приборов микро- и нанозлектроники // П.А. Арутюнов, А.Л. Толстихина. — В 2 ч. / Микроэлектроника, 2000. Т. 28–29. № 6. С. 13–414.

**Рис. 2.** Изображение поверхности: 1 — топография (10×10 мкм); 2 — торшин; 3 — 3Д-изображение) профилограмма (4) и гистограмма (5) профиля поверхности образцов состава 1 с самоглазующейся поверхностью и состава 2 с нанесенным глазурным покрытием