

УДК 539.538: 666.3-16: 666.3.017: 66.018.2

## Зависимость триботехнических характеристик от механических свойств и фазовых превращений композиционной керамики на основе диоксида циркония

А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, Г.В. Григорьев, В.М. Васюков, П.Н. Овчинников

Тамбовский государственный университет имени Г.Р. Державина,  
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов 392036, Россия

Поступила в редакцию 22.02.2024.

После доработки 08.08.2024.

Принята к публикации 12.08.2024.

Исследовано влияние добавки диоксида кремния (в интервале концентраций  $C_{\text{SiO}_2}$  от 0 до 6 мол. %) в циркониевую керамику (стабилизированную в тетрагональной фазе оксидом кальция), упрочненную оксидом алюминия, на ее коэффициент трения и интенсивность износа. Обнаружено, что с повышением концентрации  $\text{SiO}_2$  обе характеристики испытывают немонотонные изменения с общей тенденцией к увеличению. Проведен сравнительный анализ зависимостей механических свойств (микротвердости, вязкости разрушения и индекса хрупкости), трансформируемости тетрагональной фазы  $t\text{-ZrO}_2$  и интенсивности износа от содержания  $\text{SiO}_2$  в исследуемой композиционной керамике. Показано, что немонотонный характер зависимости интенсивности износа от концентрации  $\text{SiO}_2$  обусловлен конкурентным влиянием изменений микротвердости, вязкости разрушения и трансформируемости  $t\text{-ZrO}_2$ , вызванных введением диоксида кремния в керамику. Выдвинуто предложение о целесообразности изготовления кремнийсодержащей керамики (обладающей повышенными значениями вязкости разрушения и предела прочности на сжатие, а также запасом пластичности при комнатных температурах) с приповерхностным слоем, не содержащим  $\text{SiO}_2$ , сохраняющим предпочтительные значения микротвердости, коэффициента трения и интенсивности износа.

**Ключевые слова:** композиционная циркониевая керамика, коэффициент трения, интенсивность износа, индекс хрупкости, фазовые превращения.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

**Адрес для переписки:**

А.А. Дмитриевский  
Тамбовский государственный университет  
имени Г.Р. Державина,  
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов 392036, Россия  
e-mail: aadmitr@yandex.ru

**Address for correspondence:**

A.A. Dmitrievskiy  
Derzhavin Tambov State University,  
Internatsionalnaya Street, 33, Tambov 392036, Russia  
e-mail: aadmitr@yandex.ru

**Для цитирования:**

А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, Г.В. Григорьев,  
В.М. Васюков, П.Н. Овчинников.  
Зависимость триботехнических характеристик от механических  
свойств и фазовых превращений композиционной керамики на  
основе диоксида циркония.  
Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 4. – С. 279–288.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

**For citation:**

A.A. Dmitrievskiy, N.Yu. Efremova, G.V. Grigoriev, V.M. Vasyukov,  
and P.N. Ovchinnikov.  
[Dependence of Tribotechnical Characteristics on Mechanical  
Properties and Phase Transformations of Zirconia Composite  
Ceramics].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 279–288 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

# Dependence of Tribotechnical Characteristics on Mechanical Properties and Phase Transformations of Zirconia Composite Ceramics

A.A. Dmitrievskiy, N.Yu. Efremova, G.V. Grigoriev, V.M. Vasyukov, and P.N. Ovchinnikov

Derzhavin Tambov State University,  
Internatsionalnaya Street, 33, Tambov 392036, Russia

Received 22.02.2024.

Revised 08.08.2024.

Accepted 12.08.2024.

## Abstract

The influence of silica addition (in the range of SiO<sub>2</sub> concentrations from 0 to 6 mol. %) in alumina-toughened zirconia (stabilized in tetragonal phase by calcium oxide) on its friction coefficient and wear rate has been studied. It is found that with elevation of SiO<sub>2</sub> concentration, both characteristics experience non-monotonic changes with an overall increasing trend. The dependences comparative analysis of mechanical properties (microhardness, fracture toughness and brittleness index), tetragonal phase *t*-ZrO<sub>2</sub> transformability and wear rate on SiO<sub>2</sub> concentration in the investigated composite ceramics has been carried out. It is shown that the non-monotonic character of wear rate dependence on SiO<sub>2</sub> concentration is due to the competitive influence of changes in microhardness, fracture toughness and *t*-ZrO<sub>2</sub> transformability caused by the silica addition into ceramics. A proposal has been made on the feasibility of manufacturing silicon-containing ceramics (possessing increased values of fracture toughness and compressive strength, as well as plasticity reserve at room temperatures) with a near-surface SiO<sub>2</sub>-free layer retaining the preferred values of microhardness, friction coefficient and wear rate.

**Keywords:** composite zirconia ceramics, friction coefficient, wear rate, brittleness index, phase transformations.

**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

---

### Адрес для переписки:

А.А. Дмитриевский  
Тамбовский государственный университет  
имени Г.Р. Державина,  
ул. Интернациональная, 33, г. Тамбов 392036, Россия  
e-mail: aadmitr@yandex.ru

### Для цитирования:

А.А. Дмитриевский, Н.Ю. Ефремова, Г.В. Григорьев,  
В.М. Васюков, П.Н. Овчинников.  
Зависимость триботехнических характеристик от механических  
свойств и фазовых превращений композиционной керамики на  
основе диоксида циркония.  
Трение и износ.  
2024. – Т. 45, № 4. – С. 279–288.  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

---

### Address for correspondence:

A.A. Dmitrievskiy  
Derzhavin Tambov State University,  
Internatsionalnaya Street, 33, Tambov 392036, Russia  
e-mail: aadmitr@yandex.ru

### For citation:

A.A. Dmitrievskiy, N.Yu. Efremova, G.V. Grigoriev, V.M. Vasyukov,  
and P.N. Ovchinnikov.  
[Dependence of Tribotechnical Characteristics on Mechanical  
Properties and Phase Transformations of Zirconia Composite  
Ceramics].  
*Trenie i Iznos*.  
2024, vol. 45, no. 4, pp. 279–288 (in Russian).  
**DOI:** 10.32864/0202-4977-2024-45-4-279-288

## Список использованных источников

1. **Garvie R.C., Hannink R.H.J., and Pascoe R.T.** Ceramic Steel? // *Nature*. — 1975 (**258**), 703—704. DOI: 10.1038/258703a0
2. **Hannink R.H.J., Kelly P.M., Muddle B.C.** Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2000 (**83**), 461—874. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x
3. **Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A. et al.** Zirconia Ceramics with Additions of Alumina for Advanced Tribological and Biomedical Applications // *Ceram. Int.* — 2017 (**43**), 9746—9752. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.150
4. **Калинина М.В., Ковалько Н.Ю., Суслов Д.Н. и др.** Влияние высокопористой биокерамики на основе системы  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$  на биологические ткани экспериментальных животных // *Перспективные материалы*. — 2020, № 7, 29—39. DOI: 10.30791/1028-978X-2020-7-29-39
5. **Olhero S.M., Torres P.M.C., Mesquita-Guimaraes J. et al.** Conventional Versus Additive Manufacturing in the Structural Performance of dense Alumina-Zirconia Ceramics: 20 Years of Research, Challenges and Future Perspectives // *J. Manuf. Process.* — 2022 (**77**), 838—879. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.041
6. **Chevalier J., Liens A., Reveron H. et al.** Forty Years After the Promise of «Ceramic Steel?»: Zirconia-Based Composites with a Metal-Like Mechanical Behavior // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2020 (**103**), 1482—1513. DOI: 10.1111/jace.16903
7. **Калинина М.В., Федоренко Н.Ю., Арсентьев М.Ю., Тихонов П.А., Шилова О.А.** Получение керамики  $ZrO_2$ -3 мол. %  $Y_2O_3$  с различной степенью тетрагональности и исследование низкотемпературной деградации // *Физика и химия стекла*. — 2021 (**47**), № 4, 456—467. DOI: 10.31857/S0132665121040090
8. **Turon-Vinas M., Zhang F., Vleugels J., and Anglada M.** Effect of Calcia Co-Doping on Ceria-Stabilized Zirconia // *J. Eur. Ceram. Soc.* — 2018 (**38**), 2621—2631. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.053
9. **Дмитриевский А.А., Жигачева Д.Г., Ефремова Н.Ю., Умрихин А.В.** Стойкость фазового состава и механических свойств наноструктурированных композиционных керамик на основе  $CaO$ - $ZrO_2$  к гидротермальным воздействиям // *Российские нанотехнологии*. — 2019 (**14**), № 3-4, 39—45. DOI: 10.21517/1992-7223-2019-3-4-39-45
10. **Овчинников П.Н., Ефремова Н.Ю., Жигачева Д.Г. и др.** Пластификация циркониевой керамики, упрочненной оксидом алюминия, при добавлении диоксида кремния // *Вестник Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. — 2023 (**106**), № 1, 117—128. DOI: 10.18698/1812-3368-2023-1-117-128
11. **Дмитриевский А.А., Жигачев А.О., Жигачева Д.Г., Родаев В.В.** Влияние диоксида

кремния на стабильность фазового состава и механические свойства керамики на основе диоксида циркония, упрочненной оксидом алюминия // *ЖТФ*. — 2020 (**90**), № 12, 2108—2117. DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50128.84-20

12. **Liao Y.-I., Zhang F.-I., Pan X.-Yi. et al.** A Comparative Study on Tribological Behavior of  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $Si_3N_4$  and  $ZrO_2$  Ceramics Sliding Against Polycrystalline Diamond Ball // *Wear*. — 2023 (**530-531**), 205067. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205067
13. **Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A. et al.** Zirconia Ceramics with Additions of Alumina for Advanced Tribological and Biomedical Applications // *Ceram. Int.* — 2017 (**43**), no. 13, 9746—9752. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.150
14. **Duntu S.H., Agyapong J., Ahmad I., Islam M., and Boakye-Yiadom S.** Combined Effect of Low  $ZrO_2$  Content and Carbon Nanostructures on Mechanical and Wear Properties of Hot-Pressed  $Al_2O_3/ZrO_2$  Hybrid Nanocomposites // *Ceram. Int.* — 2022 (**48**), 34803—34816. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.069
15. **Акимов Г.Я., Чайка Э.В., Тимченко В.М., Маринин Г.А., Бурховецкий В.В.** Износ керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидами магния и церия, при трении по стали без смазочного материала // *Трение и износ*. — 2009 (**30**), № 5, 511—515

## References

1. **Garvie R.C., Hannink R.H.J., and Pascoe R.T.** Ceramic Steel? // *Nature*. — 1975 (**258**), 703—704. DOI: 10.1038/258703a0
2. **Hannink R.H.J., Kelly P.M., and Muddle B.C.** Transformation Toughening in Zirconia-Containing Ceramics // *J. Am. Ceram. Soc.* — 2000 (**83**), 461—874. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01221.x
3. **Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A. et al.** Zirconia Ceramics with Additions of Alumina for Advanced Tribological and Biomedical Applications // *Ceram. Int.* — 2017 (**43**), 9746—9752. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.150
4. **Kalinina M.V., Kovalko N.Yu., Suslov D.N. et al.** Effect of Highly Porous Bioceramics Based on  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$ - $CeO_2$  System on the Biological Tissues of Experimental Animals // *Inorganic Materials: Applied Research*. — 2021 (**12**), 370—376. DOI: 10.1134/S2075113321020209
5. **Olhero S.M., Torres P.M.C., Mesquita-Guimaraes J. et al.** Conventional Versus Additive Manufacturing in the Structural Performance of dense Alumina-Zirconia Ceramics: 20 Years of Research, Challenges and Future Perspectives // *J. Manuf. Process.* — 2022 (**77**), 838—879. DOI: 10.1016/j.jmapro.2022.02.041
6. **Chevalier J., Liens A., Reveron H. et al.** Forty Years after the Promise of «Ceramic Steel?»: Zirconia-Based Composites with a Metal-Like

- Mechanical Behavior // J. Am. Ceram. Soc. — 2020 (103), 1482—1513. DOI: 10.1111/jace.16903
7. **Kalinina M.V., Fedorenko N.Y., Arsent'ev M.Y., Tikhonov P.A., and Shilova O.A.** Obtaining  $ZrO_2$ -3 mol %  $Y_2O_3$  Ceramics with Various Degrees of Tetragonality and Studying Low Temperature Degradation // Glass Physics and Chemistry. — 2021 (47), no. 4, 382—389. DOI: 10.1134/S108765962104009X
  8. **Turon-Vinas M., Zhang F., Vleugels J., and Anglada M.** Effect of Calcia Co-Doping on Ceria-Stabilized Zirconia // J. Eur. Ceram. Soc. — 2018 (38), 2621—2631. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2017.12.053
  9. **Dmitrievskii A.A., Zhigacheva D.G., Efremova N.Y., and Umrikhin A.V.** Phase Composition Stability of Nanostructured Composite Ceramics Based on  $CaO$ - $ZrO_2$  under Hydrothermal Impact // Nanotechnologies in Russia. — 2019 (14), nos. 3–4, 125—131. DOI: 10.1134/S1995078019020058
  10. **Ovchinnikov P.N., Efremova N.Yu., Zhigacheva D.G. et al.** Plasticization of Alumina Strengthened Zirconia Ceramics with the Silica Addition // Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences. — 2023 (106), no. 1, 117—128. DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2023-1-117-128> (in Russian)
  11. **Dmitrievskii A.A., Zhigachev A.O., Zhigacheva D.G., and Rodaev V.V.** The Influence of Silicon Dioxide on the Stability of the Phase Composition and Mechanical Properties of Alumina-Toughened Zirconia-Based Ceramics // Tech. Phys. — 2020 (65), no. 12, 2016—2025. DOI: 10.1134/S1063784220120075
  12. **Liao Y.-l., Zhang F.-l., Pan X.-Yi. et al.** A Comparative Study on Tribological Behavior of  $Al_2O_3$ ,  $AlN$ ,  $Si_3N_4$  and  $ZrO_2$  Ceramics Sliding Against Polycrystalline Diamond Ball // Wear. — 2023 (530-531), 205067. DOI: 10.1016/j.wear.2023.205067
  13. **Ghaemi M.H., Reichert S., Krupa A. et al.** Zirconia Ceramics with Additions of Alumina for Advanced Tribological and Biomedical Applications // Ceram. Int. — 2017 (43), no. 13, 9746—9752. DOI: 10.1016/j.ceramint.2017.04.150
  14. **Duntu S.H., Agyapong J., Ahmad I., Islam M., and Boakye-Yiadom S.** Combined Effect of Low  $ZrO_2$  Content and Carbon Nanostructures on Mechanical and Wear Properties of Hot-Pressed  $Al_2O_3/ZrO_2$  Hybrid Nanocomposites // Ceram. Int. — 2022 (48), 34803—34816. DOI: 10.1016/j.ceramint.2022.08.069
  15. **Akimov G.Ya., Chaika E.V., Timchenko V.M., Marinin G.A., and Burkhovetskii V.V.** Wear of Ceramics Based on Zirconia Stabilized by Magnia and Ceria at Dry Friction Against Steel // Friction and Wear. — 2009 (30), no. 5, 373—376. DOI: 10.3103/S1068366609050122

Для приобретения полного текста статьи, обращайтесь в редакцию журнала.  
Адрес редакции: 246050, ул. Кирова 32а, г. Гомель, Беларусь. Телефон/факс: +375 (232) 34 06 36 / 34 17 11  
Full text of articles can be purchased from the editorial office.  
Address: 32a Kirov Street, Gomel, Belarus, 246050. Phone: +375 (232) 34 06 36. Fax: +375 (232) 34 17 11  
E-mail: [FWJ@tut.by](mailto:FWJ@tut.by)