

## ТРИБОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИТА С МАТРИЦЕЙ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

*Алисин В.В.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН, Москва*

**Ключевые слова:** керамический композит, циркониевая керамика, диоксид циркония, трибологические свойства, трение и износ, испытания материалов на износ.

**Аннотация.** Статья посвящена изучению влияния добавки оксида алюминия в матрицу диоксида циркония на трибологические свойства композита. Проведены трибологические эксперименты на лабораторной машине трения по схеме диск-палец в условиях сухого трения. Перед проведением экспериментов пары трения приработывались. В каждом эксперименте керамические образцы в форме пластин устанавливались на неподвижном диске соединенным с силоизмерителем. В процессе скольжения измерялся коэффициент трения. Износ керамического образца определялся весовым способом. Установлено, что добавка в композит оксида алюминия увеличивает износостойкость пары трения. Рекомендуется циркониевую керамику с добавкой оксида алюминия использовать для изготовления втулок в тяжело нагруженных подшипниках скольжения машин.

## TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF CERAMIC COMPOSITE WITH ZIRCONIUM DIOXIDE MATRIX

*Alisin V.V.*

*A.A. Blagonravov Institute of Mechanical Engineering of the RAS, Moscow*

**Keywords:** ceramic composite, zirconium ceramics, zirconium dioxide, tribological properties, friction and wear, wear tests of materials.

**Abstract.** The article is devoted to the study of the effect of the addition of aluminum oxide to the zirconium dioxide matrix on the tribological properties of the composite. Tribological experiments were carried out on a laboratory friction machine according to the disk-finger scheme under dry friction conditions. Before conducting the experiments, the friction pairs were worked out. In each experiment, ceramic samples in the form of plates were mounted on a fixed disk connected to a force meter. During the sliding process, the coefficient of friction was measured. The wear of the ceramic sample was determined by the weight method. It was found that the addition of aluminum oxide to the composite increases the wear resistance of the friction pair. It is recommended to use zirconium ceramics with the addition of aluminum oxide for the manufacture of bushings in heavy-loaded sliding bearings of machines.

**Введение.** Применение керамических материалов в узлах трения машин перспективно для увеличения ресурса работы. Композиты с керамической матрицей на основе диоксида циркония обладают повышенной трещиностойкостью, благодаря мартенситным превращением метастабильной тетрагональной фазы в стабильную моноклинную под воздействием приложенных напряжений. Изучению керамических материалов уделяется много внимания. В работе [1] проведены испытания на усталость и износ керамических изделий из стабилизированной иттрием тетрагональной поликристаллической керамики с матрицей диоксида циркония (3Y-TZP). Подтверждены высокие показатели механических свойств. В работе [2] проведены испытания на износ

при сухом скольжении керамических материалов на основе диоксида циркония по схеме диск-палец. Во всех экспериментах было отмечено образование микротрещин. Для описания механизмов износа были использованы численные расчеты. Методом наноиндентирования изношенных поверхностей было обнаружено значительное снижение твердости поверхностного слоя. Установлен механизм изнашивания поверхностей трения. Повышение износостойкости керамики может быть реализовано путем создания материала с однородной структурой. На трибологические характеристики циркониевой керамики влияет много факторов. В частности изучено влияние количества стабилизатора [3], влияние технологии спекания [4], а в работе [5] оценивалась эффективность применения наноструктурированных порошков диоксида циркония, получаемых по золь-гель технологии. В работе [6] порошок  $ZrO_2$ -20 мас.%  $Al_2O_3$  был использован для матрицы в процессе синтеза нового керамического материала с наполнителем карбида вольфрама. Было установлено, что получаемый композит обладает высокой износостойкостью за счет улучшенных механических свойств материала. Использование наноструктурированных порошков в сочетании с методами компактирования дает возможность снизить температуру спекания керамики на 100-200°C, что, в свою очередь, позволяет синтезировать керамический материал с размерами кристаллитов в диапазоне 200-1000 нм при нулевой пористости и иметь однородную структуру, необходимую для материалов, применяемых в узлах трения. Трибологические критерии износостойкости циркониевых керамик изучены мало.

Целью испытаний является определение влияния состава керамики на основе ЧСЦ на триботехнические характеристики применительно к деталям машиностроительного назначения.

Задача – апробирование технологии изготовления материала на основе диоксида циркония, способной обеспечить высокую износостойкость и антифрикционность в нагруженном контакте со сталью. Определение интенсивности изнашивания образцов сухом трении по стали У10А.

**Материалы.** Керамические материалы двух составов:  $ZrO_2 + 6\% Y_2O_3$  и  $ZrO_2 + Y_2O_3 + Al_2O_3$ , полученных методом горячего литья при  $T_{cn}=1600^\circ C$ , применительно к волокнам-заготовкам при работе без смазки. Контрольный образец – вращающийся диск диаметром  $12 \times 10^{-2}$  м из закаленной инструментальной стали У10А (ГОСТ 5950-73), HRC 49-52.

**Оборудование и технологии.** Трибологические испытания проводились на машине трения УМТ-1 по методике [3] по схеме диск-палец. Образцы имели форму пластин размером  $10 \times 10 \times 4$  мм.

Химическую реакцию осуществляли в реакционном аппарате GR-15 фирмы «Buchi AG» (Швейцария) с автоматическим контролем технологических параметров (температура, pH среды, скорость перемешивания и концентрация растворов солей). Порошки состава  $ZrO_2 + 6 \text{ мол.} \% Y_2O_3$  получали методом совместного химического осаждения гидроксидов из растворов хлористых солей: цирконий хлорокись и иттрий хлорид. Процесс компактирования порошка проводили методом термопластичного литья под давлением

**Результаты.** Перед каждым экспериментом пара трения прирабатывалась при давлении  $N = 70$  Н в течение 3 минут. Испытания проходили в двух режимах силы прижима образца-пластины к диску  $N$  при  $p = 5$  МПа или  $p = 2$  МПа. Выбор данной методики испытаний обусловлен проверкой влияния эквивалентных режимов трения по критерию удельной тепловой нагруженности контакта, т.е. произведения давления на скорость ( $p\nu$ ). Подбор соответствующей скорости скольжения осуществлялся выбором радиуса дорожки трения и времени испытания. Перед испытаниями и после испытаний измеряли величины массы образцов-пластин на лабораторных аналитических весах с точностью 0,1 мг, которые пересчитывались на линейную интенсивность износа керамики ( $I_1$ ). Износ стального диска определялся профилографированием дорожки трения, который пересчитывался в линейную интенсивность износа стального контртела ( $I_2$ ). Результаты экспериментов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты триботехнических испытаний образцов из керамики состава  $ZrO_2+6\% Y_2O_3$  при трении по диску из стали У10А

№	$V$ , м/с	$P$ , МПа	$I_1 \cdot 10^9$	$T$ , мин	$I_2 \cdot 10^9$	$f$
1	2	5	12,7	6	44,6	0,24
2			4,8	6	32,7	0,21
3			3,8	9	33,1	0,24
4	5	2	5,3	12	14,1	0,39
5			2,5	18	15	0,33
6			4,4	15	10,1	0,35
Среднее			5,58		24,9	0,29

При возрастании скорости скольжения до 5 м/с изнашивание материалов при трении без смазки осталось таким же, как при  $V=2$  м/с. В таблице 2 приведены результаты испытания керамики состава  $ZrO_2+Y_2O_3+ Al_2O_3$ .

Табл. 2. Результаты триботехнических испытаний образцов из керамики состава  $ZrO_2+Y_2O_3+Al_2O_3$  при трении по диску из стали У10А

№	$V$ , м/с	$P$ , МПа	$I_1 \cdot 10^9$	$T$ , мин	$I_2 \cdot 10^9$	$f$
1	2	5	0,6	9	22,7	0,24
2			1	6	18,8	0,21
3			1,1	13	27,2	0,24
4	5	2	1,15	9	21	0,39
5			1,15	6	20,3	0,33
6			1,53	6	61,6	0,35
Среднее			1,1		28,6	0,2

**Выводы.** Введение оксида алюминия в керамическую матрицу на основе диоксида циркония эффективно увеличивает износостойкость керамики. Экспериментально установлено, что в режиме сухого трения по стали износостойкость пары трения увеличивается практически в 5 раз, лишь незначительно увеличивая износ стального контртела.

**Список литературы**

1. Roulet J-F, Sinhoreti M. A. C., Pontes S., Rocha M.G. Two-body wear resistance and fatigue survival of new Y-TZP and ATZ ceramics made with a new slip-casting method // *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2022, vol. 136, p. 105535. doi.org/10.1016/j.jmbbm.2022.105535.
2. Sciti D., Guicciardi S., Zoli L., Failla S, Melandri C. Dry sliding wear behaviour of ZrB<sub>2</sub>-based ceramics: Self-mated and cross coupling with alumina // *Journal of the European Ceramic Society*. 2022, vol. 42, no. 14, pp. 6335-6346. doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.07.022.
3. Алисин В.В. Влияние стабилизирующей добавки на трибологические свойства циркониевой керамики // *Journal of Advanced Research in Natural Science*. – 2020. – №9. – С. 23-25. – doi: 10.26160/2572-4347-2020-9-23-25.
4. Yakushkina V.S., Korableva E.A., Savanina N.N., Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Alisin V.V . The influence of agglomeration technology on the durability of ceramics made from nanostructured psz powders // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2010, vol. 39, no. 1, pp.73-77. doi: 10.3103/S1052618810010115.
5. Алисин В.В. Триботехнические свойства циркониевых керамик из ультрадисперсных порошков // *Машиностроение: инновационные аспекты развития. Материалы международной научно-практической конференции*. – СПб.: НИЦ МС, 2019. – №2. – С. 20-22. – doi: 10.26160/2618-6810-2019-2-20-22.
6. Sun N., Cheng Y., Zhu T., Wang H., Pan L., Liao N, Li Y., Xie Z. Tribological properties and wear resistance mechanism of WC-ZrO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics // *Journal of Alloys and Compounds*. 2023, vol. 960, p. 171069. doi.org/10.1016/j.jallcom.2023.171069.

Сведения об авторе:

*Алисин Валерий Васильевич* – к.т.н., ведущий научный сотрудник.