

## НОВЫЕ НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫЕ КРИСТАЛЛЫ И КЕРАМИКИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ПРИБОРОВ

*Алисин В.В.*

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук,  
Москва*

**Ключевые слова:** коэффициент трения, интенсивность изнашивания, опоры притрибологические испытания, кристаллы диоксида циркония, композиты с керамической матрицей, приборные опоры осей.

**Аннотация.** Работа посвящена исследованию трибологических свойств керамик и кристаллов на основе диоксида циркония применительно к опорам приборов точной механики. Методом кинетического микро индентирования определены показатели упругих и пластических свойств базовых кристаллов и керамик на основе частично стабилизированного диоксида циркония. Проведены эксперименты по трению керамических образцов по инструментальной стали в условиях скольжения без смазки. Опыты проведены по схеме диск-палец. Результаты испытания показали, что трибологические характеристики материалов на основе диоксида циркония не уступают нанокompозиту на основе корунда, легированного лантаном, и более дешевы в производстве. Проведено сравнение механических свойств кристаллов диоксида циркония с кремнием и показана перспективность применения кристаллов диоксида циркония в производстве микроэлектронных механических систем.

## NEW NANOSTRUCTURED CRYSTALS AND CERAMICS TO INCREASE THE RELIABILITY OF MECHANICAL MODULES OF DEVICES

*Alisin V.V.*

*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,  
Moscow*

**Keywords:** coefficient of friction, wear intensity, supports, tribological tests, zirconium dioxide crystals, composites with ceramic matrix, instrument axis supports.

**Abstract.** The work is devoted to the study of tribological properties of ceramics and crystals based on zirconium dioxide in relation to the supports of precision mechanics devices. The parameters of elastic and plastic properties of base crystals and ceramics based on partially stabilized zirconium dioxide were determined by kinetic micro-indentation. Experiments on the friction of ceramic samples on tool steel under sliding conditions without lubrication were carried out. The experiments were carried out according to the disk-finger scheme. The test results showed that the tribological characteristics of zirconium dioxide-based materials are not inferior to lanthanum-doped corundum-based nanocomposite and are cheaper to produce. The mechanical properties of zirconium dioxide crystals with silicon are compared and the prospects of using zirconium dioxide crystals in the production of microelectronic mechanical systems are shown.

**Введение.** Повышение ресурса работы и надежности механических модулей приборов и микроэлектронных механических систем в основном лимитируется трибологическими и прочностными свойствами материалов подвижных сопряжений деталей. В часовых механизмах и аналогичных приборах точной механики вследствие малых размеров контактных площадей имеют место

высокие контактные давления и для обеспечения параметрической надежности и точности механизмов применяются опоры, содержащие керамики и кристаллы. Основной путь улучшения механических свойств этих материалов состоит в формировании наноразмерных зерен керамик и доменов кристаллов, в частности к ним относятся тугоплавкие оксиды алюминия и циркония.

Экспериментальных данных по трибологическим свойствам наноструктурных керамик очень мало и в основном они получены в условиях сильного форсирования режимов трения, при которых плотность теплового потока, образующегося в процессе диссипации работы трения, столь значительна, что механизм их изнашивания существенно отличен от того, который имеет место в реальных условиях трения в машинах [1]. Поэтому получаемые трибологические характеристики не могут служить основанием для проектирования узлов трения. В данной работе изучаются трибологические свойства в основном наноструктурированных кристаллов диоксида циркония и циркониевых керамик, интерес к которым обусловлен наиболее высокой трещиностойкостью в сравнении с другими керамическими материалами триботехнического назначения [2, 3].

Эффективным направлением улучшения механических свойств (прочности, износостойкости, трещиностойкости) является [4] создание трансформационно-упрочненных керамических материалов, которые стабилизируются путем введением добавок оксида (в основном  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ).

Целью данной работы является сравнительная оценка интенсивности изнашивания и коэффициентов трения новых кристаллов и керамических материалов на основе диоксида циркония, перспективных для применения в узлах трения.

**Материалы.** Объектами исследования являлись: образцы наноструктурированного кристалла диоксида циркония состава  $\text{ZrO}_2 + 3$  мол.%  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Оптимальное количество стабилизирующей добавки обосновано работами [4, 5]; спеченные циркониевые керамические материалы с добавками оксидов церия, магния и иттрия; нанокерамический композит корунд-гексаалюминат лантана, полученный по золь-гель технологии.

Образцы изготавливались в виде пальчиков с квадратным сечением  $5 \times 5 \cdot 10^{-3}$  м и длиной  $7,5 \cdot 10^{-3}$  м. Торцевые рабочие поверхности пальчиковых образцов плоские с шероховатостью Ra 0,8. Контртело выполнено в виде диска диаметром  $12 \times 10^{-2}$  м, изготовленного из закаленной инструментальной стали У10А, HRC 49-52 и из керамики  $\text{ZrO}_2 + 17$  мол.%  $\text{CeO}_2$ .

**Оборудование и технологии.** Микромеханические свойства (микротвердости, упругих и пластических характеристик поверхности) материалов, определялись на кинетическом микротвердомере МТИ-3М методом вдавливания индентора Виккерса в испытываемую поверхность. Выходные параметры результатов испытания отображаются в форме первичных кинетических диаграмм внедрения в координатах "Сила (сН) и глубина отпечатка (мкм), по которым определяются параметры механических свойств поверхностного слоя образцов.

Исследование износостойкости материалов проводилось по методике [4] на универсальной машине трения УМТ-1 по схеме диск-палец с непрерывной регистрацией момента трения.

Износ образцов определялся на оптическом микрометре ИКВ-1 методом измерения базовых точек на поверхности трения, для последующего пересчета толщины изношенного слоя.

**Результаты.** Трибологические свойства материалов в большой мере зависят от механических свойств, а именно упругости и пластичности, которые определялись испытаниями на кинетическую микротвердость. В таблице 1 приведены результаты обработки диаграмм вдавливания.

Табл. 1. Результаты испытаний образцов на кинетическую микротвердость

Параметры поверхностей А и В	ZrO <sub>2</sub> + +3 мол.% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (кристалл)	ZrO <sub>2</sub> + +17 мол.% CeO (керамика)
Работа упругопластической деформации, A (сН·мкм)	540,5	434,0
Работа упругой деформации, A <sub>e</sub> (сН·мкм)	213,5	203,0
Работа пластической деформации, A <sub>p</sub> (сН·мкм)	326,94	230,99
Упругость, K <sub>e</sub>	0,395	0,468
Пластичность, K <sub>p</sub>	0,605	0,532

Характеристикой антифрикционных свойств материалов является коэффициентов трения  $f$ . Проведены сравнительные трибологические испытания. Кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСЦ кристаллы) отличаются лучшей антифрикционностью и износостойкостью (табл. 2).

Табл. 2. Результаты испытания образцов на износ ( $P = 5$  МПа,  $V = 2$  м/с)

№	материал	Осн. состав, атомн.%	$f$	$I \cdot 10^{-9}$
1	Кристалл ZrO <sub>2</sub> + 3 мол.% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Zr-83,1 Y-10,1	0,35	2,5
2	Этот же кристалл отожженный в вакууме	–	0,30	1,8
3	Керамика ZrO <sub>2</sub> + 17мол.% CeO <sub>2</sub>	Zr-36,5 Ce-50	0,52	2,9
4	Керамика ZrO <sub>2</sub> + 5%MgO	Zr-70,1 Y-17,3 Mg- не опред.	0,38	3,3
5	Наноккомпозит на основе корунда	Al - основа La-91,3 Y-6,9	0,56	3,2

В исследованном диапазоне средних контактных давлений  $p$  коэффициенты трения  $f$  для кристаллов [ZrO<sub>2</sub>+3мол.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>] несколько меньше, чем для керамики [ZrO<sub>2</sub>+17мол.% CeO<sub>2</sub>, спеченный], и близки по значениями коэффициентов трения  $f$  алмаза. Ранее было установлено, что кристаллы ЧСЦ обладают значительно более высокой трещиностойкостью [4]. В большей мере эти преимущества относятся к отожженным кристаллам.

**Заключение.** Экспериментально установлено, что с наноструктурированные кристаллы диоксида циркония обладают лучшими

трибологическими свойствами по сравнению с керамическими образцами, полученными спеканием из ультрадисперсных порошков и перспективны при решении задач микротрибологии, особенно в микроэлектронике и механических модулях приборов. Совершенствование характеристик микроэлектронных механических систем (МЭМС) будущего в большой мере определяется более высокими значениями характеристик механических и трибологических свойств нового конструкционного материала. Проведенные эксперименты дают основания утверждать, что альтернативой кристаллам кремния являются наноструктурированные кристаллы ЧСЦ. Сравнение свойств кристаллов кремния с кристаллами ЧСЦ показывает следующее.

1. Модуль упругости кремния (190 ГПа) близок к стали, никелю и намного выше, чем у кварца, а также у многих щелочных боросиликатных стекол, однако почти в два раза меньше, чем модуль упругости кристаллов ЧСЦ (350-400 ГПа).

2. Микротвердость кремния (8,5 ГПа) близка к кварцу и существенно выше стекла (5,3 ГПа), но почти в 1,5 раза уступает микротвердости кристалла ЧСЦ (12-15 ГПа).

3. Характеристики вязкости и пластичности кристаллов ЧСЦ значительно выше, чем у любых других керамических материалов, а также кристаллов кремния, которые являются хрупким материалом. Вследствие хрупкости кристаллов кремния в технологии производства МЭМС необходимо, чтобы все механические процессы, такие как резка, точение и полировка, должны быть минимизированы или устранены. В результате механической обработки получают хрупкие кромки и поверхностные дефекты, которые могут привести к сколам и/или создать внутренние напряжения с последующими последствиями к поломке.

4. Кристаллы кремния плохо выдерживают испытания на изгиб, а кристаллы ЧСЦ имеют наибольшую прочность на изгиб из керамических материалов.

5. По трибологическим свойствам (коэффициенту трения и износостойкости) кристаллы ЧСЦ уступают только алмазу.

#### **Список литературы**

1. Kvatchadze V., Bairamashvili I., Mikeladze A., Gventsadze D., Mestvirishvili Z., Chkhartishvili L. Boron carbide based ceramics for dry friction units // Solid State Sciences. 2023, vol. 42, p. 107244. doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2023.107244.
2. 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.
3. Belichko D.R., Konstantinova T.E., Volkova G.K., Mirzayev M.N., Maletsky A.V., Burkhovetskiy V.V., Doroskevich A.S., Mita C., Mardare D.M., Janiska B., Nabiyev A.A., Lyubchik A.I., Tatarinova A.A., Popov E. Effects of YSZ ceramics doping with silica and alumina on its structure and properties // Materials Chemistry and Physics. 2022, vol. 287, p. 126237. doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.126237.
4. Осико В.В., Алисин В.В., Вишнякова М.А., Игнатьева З.В., Ломонова Е.Е., Павлов В.Г. Трибологические свойства нанокристаллического материала нового поколения на основе диоксида циркония // Трение и износ. – 2005. – Т. 26, № 3. – С. 285-289.

#### Сведения об авторе:

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