

Трибологические свойства наноструктурированного кристалла диоксида циркония, легированного церием

Алисин В.В.

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

Ключевые слова: трибологические свойства материалов, кристаллы диоксида циркония, легирование кристаллов, церий, трибологические испытания, критерии износостойкости, микротвердость.

Аннотация. В статье приводятся результаты экспериментального исследования трения и износа наноструктурированных кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония легированного церием в условиях скольжения без смазки по стали. Изучено влияние легирования церием на микротвердость кристалла. Трибологические испытания проведены на лабораторной машине трения по схеме диск-палец. Выполнен сравнительный анализ критериев износостойкости легированного и не легированного кристаллов. Установлено, что легирование церием повышает износостойкость кристалла и стального контртела.

TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF A NANOSTRUCTURED CERIUM-DOPED ZIRCONIUM DIOXIDE CRYSTAL

Alisin V.V.

A.A. Blagonravov Institute of Machine Science of the RAS, Moscow, Russia

Keywords: tribological properties of materials, zirconium dioxide crystals, crystal alloying, cerium, tribological tests, wear resistance criteria, microhardness.

Abstract. The article presents the results of an experimental study of friction and wear of nanostructured crystals of partially stabilized zirconium dioxide doped with cerium under sliding conditions without lubrication on steel. The effect of cerium doping on crystal microhardness has been studied. Tribological tests were carried out on a laboratory friction machine according to the disk-finger scheme. A comparative analysis of the wear resistance criteria of doped and non-doped crystals is performed. It was found that cerium alloying increases the wear resistance of the crystal and steel counterbody.

Введение. В последние годы в технике все более широкое применение находят керамические материалы. Сочетание высокой механической прочности и химической инертности делает перспективным применение керамик в качестве конструкционных и триботехнических материалов механизмов авиационно-космической, атомной, химической, электронно-вакуумной, металлургической, микрокомпьютерной техники. Одним из наиболее перспективных высокопрочных, высоковязких, химически и износостойких, конструкционных материалов является керамика на основе частично стабилизированного диоксида циркония (кристаллы ЧСЦ). Экстремальные условия работы новой техники, повышение ее надежности, прочности, ресурса работы, а также экономические показатели предъявляют высокие требования к применяемым керамическим материалам. Кристаллы синтезируются из расплава. При выращивании из расплава монокристалл

ЧСЦ имеет изначально кубическую структуру, а фазовые превращения происходят в нем при охлаждении твердой фазы. Переход кубической в тетрагональную фазу сопровождается образованием в кристаллах структуры из наноразмерных кристаллических доменов тетрагональной фазы с характерными размерами от десятков до нескольких сотен нанометров, что приводит к получению наноструктурированного композиционного материала с высокими механическими характеристиками. Циркониевые материалы представляют повышенный интерес для применения в узлах трения [1], потому что меньше схватываются при трении. Эффективным методом улучшения механических свойств кристаллов ЧСЦ является легирование редкоземельными элементами [2], среди которых выделяется церий, позволяющий существенно повысить твердость и трещиностойкость [3]. При применении кристаллов ЧСЦ следует учитывать их низкую теплопроводность [4]. Однако трибологические свойства кристаллов ЧСЦ легированных церием изучены мало.

Цель работы изучить трение и износ кристаллов ЧСЦ легированных церием применительно к условиям работы подшипников скольжения.

Материалы. Для проведения испытаний были изготовлены образцы из кристаллов ЧСЦ состава $ZrO_2+3\%Y_2O_3$ и легированных кристаллов ЧСЦ состава $ZrO_2+3\%Y_2O_3+Ce$. Образцы выполнены в форме пластин $10\times 10\times 4$ мм. Характеристики испытываемых образцов приведены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты исследования образцов керамических и кристаллических материалов на основе диоксида циркония

Образец			
Состав	σ , кг/мм ²	ρ , г/см ³	Пористость, %
$ZrO_2+3\%Y_2O_3$	60	6,0	0%
$ZrO_2+3\%Y_2O_3+Ce$	60	6,0	0%

В связи с тем, что настоящие исследования проводили применительно к парам трения стальная проволока – волока контрообразец выполнялся из стали У10А, закаленной до твердости HRC 57-60.

Оборудование. Измерения микротвердости рабочих поверхностей керамических и кристаллических образцов проводились по ГОСТ 9450-76 на приборе ПМТ-3 при нагрузке 200 г.

Трибологические испытания выполнены на машине трения УМТ-1 по схеме диск-пальчик.

Параметры дорожки трения измеряли профилографе-профилометре мод.201 завода «Калибр».

Результаты. Оценку значений микротвердости проводили как среднюю величину из ~10 измерений, при этом исключались минимальные и максимальные значения диагонали отпечатков, как случайные величины. Эти случайные величины вызваны неоднородностью структуры образцов, обусловленной режимами технологии, и не зависят от способа обработки

результатов измерений диагоналей отпечатка. Результаты измерений показали, что образцы материалов на основе ЧСЦ обладают высокой микротвердостью, значения которой практически не зависят от состава и в среднем изменяются в диапазоне $H_{вср} = 16,2 \pm 0,4$ ГПа.

В соответствие с методикой испытания неподвижный испытуемый образец 1 прижимается к вращающемуся диску 2. Контробразец – вращающийся. Испытания проводятся на трех образцах-пластинах из одного вида материала на основе ЧСЦ, размещенных на неподвижном диске под углом 120^0 . Образцы-пластины испытывали при давлениях $p = 5$ МПа и $p = 2$ МПа соответственно при скорости скольжения $V = 2$ м/с и $V = 5$ м/с без смазки в течение 6-9 минут по не работавшей ранее поверхности диска. Перед испытаниями пары трения подвергали приработке при нагрузке $N = 70$ Н в течение 3 минут. Измеряли площадь трения образца-пластины F и рассчитывали необходимые значения нормальной силы прижима образца-пластины к диску N при $p = 5$ МПа или $p = 2$ МПа. Перед испытаниями и после испытаний измеряли величины массы образцов-пластин на лабораторных аналитических весах с точностью 0,1 мг. Суммарный износ контробразцов дисков определялся профилометрированием дорожек трения. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Для кристалла, легированного церием (состав $ZrO_2+3\%Y_2O_3+Ce$) наблюдались меньшие значения изнашивания сопряженного диска. Значения коэффициента трения $<0,3$.

Табл. 2. Трибологические параметры образцов из кристаллов ЧСЦ при трении по диску из стали У10А

Состав	№ обр.	Время, мин	Радиус дорожки, мм	ЧСЦ, $I_1 \cdot 10^9$	У10А, $I_2 \cdot 10^9$	f
$ZrO_2+3\%Y_2O_3$	1	9	51	11,1	23,1	0,46
	2	6	27	9,2	58,8	0,17
	3	6	15	25	32,7	0,16
	среднее			15.1	38.2	0.26
$ZrO_2+3\%Y_2O_3+Ce$	4	9	62	5,2	20,8	0,22
	5	6	39	23,3	27,0	0,23
	6	9	51	11,1	23,1	0,31
	среднее			13,2	23,6	0,25

Выводы. При трении по стали У10А кристалла ЧСЦ состава $ZrO_2+3\%Y_2O_3$ износостойкость кристалла можно увеличить микролегированием церием. В результате износостойкость кристалла увеличится на 12%, а износостойкость стального контртела увеличится на 39%. Можно рекомендовать кристалл ЧСЦ состава $ZrO_2+3\%Y_2O_3+Ce$ для применения в качестве втулки подшипника скольжения в узлах сухого трения, например в подшипнике узла поворота лопаток направляющего

аппарата компрессора осевого двигателя, где по температурному условию применение смазочных материалов не эффективно.

Список литературы

1. Dong M., Zhu Y., Li J. Effect of amorphous phases induced by friction on wear resistance for TaN/ZrN coatings in thermal oxygen environment // *Materials Characterization*. 2023, vol. 198, p. 112745. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129037.
2. Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Tabachkova N.Y., Chislov A.S., Ryabochkina P.A., Sidorova. N.V. Partially yttria-stabilized zirconia crystals co-doped with neodymium, cerium, terbium, erbium or ytterbium oxides // *Crystals*. 2021, vol. 11, no. 12, p. 1587. DOI: 10.3390/cryst11121587.
3. Алисин В.В. Влияние ориентирования кристаллов диоксида циркония на твердость // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. – 2019. – №14-1. – С. 31-34. – DOI: 10.26160/2474-5901-2019-14-31-34.
4. Борик М.А., Волкова Т.В., Кулебякин А.В., Курицына И.Е., Ломонова Е.Е., Мызина В.А., Милович Ф.О., Рябочкина П.А., Табачкова Н.Ю., Зенцова А.И., Попов П.А. Теплопроводность кубических монокристаллов ZrO₂, стабилизированных оксидом иттрия // *Физика твердого тела*. – 2020. – Т. 62, № 1. – С. 191-195. – DOI: 10.21883/FTT.2020.01.48759.571.

References

1. Dong M., Zhu Y., Li J. Effect of amorphous phases induced by friction on wear resistance for TaN/ZrN coatings in thermal oxygen environment // *Materials Characterization*. 2023, vol. 198, p. 112745. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129037.
2. Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Milovich F.O., Myzina V.A., Tabachkova N.Y., Chislov A.S., Ryabochkina P.A., Sidorova. N.V. Partially yttria-stabilized zirconia crystals co-doped with neodymium, cerium, terbium, erbium or ytterbium oxides // *Crystals*. 2021, vol. 11, no. 12, p. 1587. DOI: 10.3390/cryst11121587.
3. Alisin V.V. Influence of orientation of zirconium dioxide crystals on hardness // *Journal of Advanced Research in Technical Science*. 2019, iss. 14-1, pp. 31-34. DOI: 10.26160/2474-5901-2019-14-31-34.
4. Borik M.A., Kulebyakin A.V., Lomonova E.E., Myzina V.A., Tabachkova N.Y., Volkova T.V., Ryabochkina P.A., Kuritsyna I.E., Milovich F.O., Zentsova A.I., Popov P.A. Thermal conductivity of cubic ZrO₂ single crystals stabilized with yttrium oxide // *Physics of the Solid State*. 2020, vol. 62, no. 1, pp. 235-239, DOI: 10.21883/FTT.2020.01.48759.571.

Алисин Валерий Васильевич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник	Alisin Valery Vasilyevich – candidate of technical sciences, leading researcher
vva-imash@yandex.ru	

Received 19.09.2023