

РЕЗУЛЬТАТЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КЕРАМИКИ И КРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

Алисин В.В.

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

Ключевые слова: керамика, кристалл, трение, износ, триботехнические испытания.

Аннотация. При создании узлов трения работающих в экстремально тяжелых условиях часто применяют керамику и кристаллы на основе стабилизированного диоксида циркония. При одинаковом химическом составе эти материалы трудно различимы, но отличаются по трибологическим свойствам. Проведены сравнительные триботехнические испытания в условия трения скольжения без смазки по стали и керамическому контртелу. Установлены характеристики износостойкости пар трения и проведено сравнение с механическими свойствами часто применяемых керамических материалов триботехнического назначения.

RESULTS OF TRIBOTECHNICAL TESTS OF CERAMICS AND CRYSTALS BASED ON ZIRCONIUM DIOXIDE COMPARATIVE

Alisin V.V.

Institute of mechanical engineering named after A.A. Blagonravov RAS, Moscow

Keywords: ceramics, crystal, friction, wear, tribotechnical tests.

Abstract. Ceramics and crystals based on stabilized zirconium dioxide are often used to create friction units operating in extremely severe conditions. With the same chemical composition, these materials are difficult to distinguish, but differ in tribological properties. Comparative tribotechnical tests were carried out in conditions of sliding friction without lubrication on steel and ceramic counterbody. The characteristics of the wear resistance of friction pairs are established and compared with the mechanical properties of frequently used ceramic materials for tribotechnical purposes.

Введение. Ресурс работы узлов трения, содержащих циркониевые керамики и кристаллы, а также их надежность и коэффициент полезного действия полностью определяется триботехническими характеристиками материалов пары трения. Керамики и кристаллы из диоксида циркония могут иметь одинаковый химический состав и цвет, но изготавливаются по совершенно различным технологиям: керамики получают формовкой и спеканием порошков, кристаллы синтезируются из расплава. Эти материалы существенно отличаются по механическим свойствам. Тенденции к существенному улучшению эксплуатационных свойств технической керамики в узлах трения связаны с применением нанокристаллических материалов. 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]. Эффективным направлением улучшения механических свойств (прочности, износостойкости, трещиностойкости) является [2] создание трансформационно-упрочненных керамических материалов введением стабилизирующих добавок

оксида (в основном CeO_2 , MgO , Y_2O_3). Лучшие показатели механических свойств имеют керамические материалы полученные спеканием из ультрадисперсных порошков. Эти материалы имеют повышенную вязкость разрушения и износостойкость. По микроструктурному признаку эти материалы представляют поликристаллический тетрагональный диоксид циркония [3] с ультрадисперсной структурой.

Для задач трибологии интерес представляют кристаллы диоксида циркония частично стабилизированного оксидом иттрия (кристаллы ЧСЦ), получаемые направленной кристаллизацией расплава в холодном контейнере при использовании прямого высокотемпературного нагрева. В процессе роста кристалла реализуется эффект трансформационного упрочнения и получается структура, содержащая наноразмерные кристаллические элементы в диапазоне от 5 до 100 нм, ориентированные в направлении роста, что позволяет резко сократить стоимость производства материала. Метод позволяет получать материалы практически без пор, обладающие более высокой вязкостью разрушения в сравнении с керамиками.

Анализ работ показывает, что наиболее распространенной схемой триботехнических испытаний керамик на основе диоксида циркония (как и других керамик) является схема «диск-палец» [4]. Существенным моментом при проведении триботехнических испытаний является выбор материала контр - тела, работающего в паре с исследуемым образцом. Наиболее распространены испытания диоксид - циркониевых керамик в паре с углеродистыми инструментальными сталями, а также в паре с керамическими материалами.

Целью данной работы является сравнительная оценка интенсивности изнашивания и коэффициентов трения керамик и кристаллов, перспективных для применения в узлах трения.

Материалы. Объектами исследования являлись: образцы наноструктурированного кристалла $\text{ZrO}_2 + 3$ мол.% Y_2O_3 , количество стабилизирующей добавки обосновано работами; спеченные циркониевые керамические материалы с добавками церия, магния и Y_2O_3 . Образцы изготавливались в виде коротких стержней (пальчиков) с квадратным сечением $5 \cdot 5 \cdot 10^{-3}$ м и длиной $5 \dots 15 \cdot 10^{-3}$ м. Торцевые рабочие поверхности пальчиковых образцов плоские с шероховатостью $Ra=0,8$. Контртело выполнено в виде диска диаметром $12 \cdot 10^{-2}$ м, изготовленного из закаленной инструментальной стали У10А, HRC 49-52 и из керамики $\text{ZrO}_2 + 17$ мол.% CeO_2 .

Оборудование и методика эксперимента. Исследование износостойкости материалов проводилось на универсальной машине трения УМТ-1 по схеме диск-палец с непрерывной регистрацией момента трения. Перед испытанием образцы (пальчики и диск) обезжиривались, промывались (спирт, ацетон) и высушивались на воздухе. Плавное увеличение нагрузки до расчетной образцы прирабатывались, установившийся режим контролировался по изменению момента сил трения. На приработанных образцах-пальчиках на оптическом микрометре ИКВ-1 определялись базовые размеры для последующего измерения толщины изношенного слоя. По завершению испытания измерялась толщина изношенного слоя на пальчиковых образцах, а с дорожки трения на образце-диске на

профилографе-профилометре модель Калибр-201 снималась поперечная профилограмма, по которой измерялась глубина дорожки.

Микромеханические свойства (микротвердость, упругость и трещиностойкость поверхности) материалов, определялись на кинетическом микротвердомере МТИ-3М методом вдавливания индентора в испытываемую поверхность по методике [5]. Выходные параметры результатов испытания отображаются в форме первичных кинетических диаграмм внедрения в координатах “Сила (F) и глубина отпечатка (h). В настоящей работе использована алмазная четырехгранная пирамида Викерса.

Результаты экспериментов. С целью сравнительной оценки триботехнических свойств кристаллов $ZrO_2+3\text{мол.}\% Y_2O_3$ проведено изучение зависимостей коэффициентов трения f от среднего контактного давления p для керамики на основе диоксида циркония с добавкой 17% церия, полученной методом спекания – $ZrO_2+17\text{ мол.}\% CeO_2$; спеченный. Для этих испытаний из указанных материалов были изготовлены пальчиковые образцы. В качестве контр- тела использовался диск У10А, HRC 49-52. Режимы испытаний: диапазон изменений среднего контактного давления $2,5 < p < 25$ МПа; скорость скольжения $v = 0,2$ м/с; режим трения – без смазки.

Для исследованных трибосопряжений с ростом среднего контактного давления величины f составили: кристалл $ZrO_2+3\text{мол.}\% Y_2O_3$ - У10А - коэффициент трения снижается от $f = 0,45$ до $f = 0,32$; $ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный - У10А - коэффициент трения снижается от $f = 0,5$ до $f = 0,36$; алмаз поликристаллический - У10А - коэффициент трения практически постоянен $f \approx 0,32$. В исследованном диапазоне средних контактных давлений p коэффициенты трения f для кристаллов $ZrO_2+3\text{мол.}\% Y_2O_3$ несколько меньше, чем для керамики $ZrO_2+17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный.

Для оценки влияние материала контртела на величину f . испытания проводились при тех же самых режимах, что и в предыдущем эксперименте, но контр- тело (диск) было изготовлено из керамики $ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$; спеченный. Установлено, что во всем диапазоне средних контактных давлений значения коэффициентов трения для трибосопряжения кристалл $ZrO_2+3\text{мол.}\% Y_2O_3$ - $ZrO_2+17\text{мол.}\% CeO_2$; спеченный меньше, чем для трибосопряжения $ZrO_2+17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный - $ZrO_2+ 17\text{мол.}\% CeO_2$; спеченный. Величины коэффициентов трения для трибосопряжений керамика – керамика в 2...3 раза меньше, чем для трибосопряжений керамика – У10А, HRC 49-52 (инструментальная сталь). Отчетливо проявляется взаимосвязь коэффициента трения f с твердостью поверхностей H_v - чем выше твердость материалов, тем ниже величина f . Это соответствует представлениям молекулярно-механической теории трения, согласно которой $f \sim (\tau_a/H)$, где τ_a - прочность адгезионной связи в контакте сопряженных тел, H - твердость поверхности материала.

Сочетание керамических материалов в трибосопряжениях, а также значения интенсивностей изнашивания J и относительной износостойкости ε для них представлены в табл. 1. Относительная износостойкость $\varepsilon_1 = J_d/J_p$, где J_d и J_p -

интенсивности изнашивания для материалов диска и пальчика одного и того же трибосопряжения.

Табл. 1. Значения интенсивностей изнашивания J и относительной износостойкости ε для материалов $ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный и кристалл $ZrO_2 + 3\text{мол.}\% Y_2O_3$

Пальчиковый образец	Диск	$J_{\text{п}} \cdot 10^7$ палец	$J_{\text{д}} \cdot 10^7$ диск
$ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный $H_v = 11540$ МПа	$ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный $H_v = 11540$ МПа	6,0	6,5
кристалл ЧСЦ+ 3мол.% Y_2O_3 $H_v = 13070$ МПа	$ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный $H_v = 11540$ МПа	1,5	21
Относительная износостойкость керамических материалов для двух испытанных материалов $\varepsilon_1 = J_{\text{п, спеч.}} / J_{\text{п, кристалл}}$, $\varepsilon_2 = J_{\text{д, спеч.}} / J_{\text{д, кристалл}}$		$\varepsilon_1 = 4$	$\varepsilon_2 = 0,31$

В результате проведенных экспериментов установлено, что пальчиковые образцы из материала кристалл $ZrO_2 + 3\text{мол.}\% Y_2O_3$ изнашивались в 4 раза меньше, чем пальчиковые образцы из материала $ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный ($\varepsilon_1 = 4$), а износ сопряженного диска из $ZrO_2 + 17\text{мол.}\% CeO_2$, спеченный] был в 3,23 раз больше, чем износ такого же диска в трибосопряжении из одинаковых спеченных материалов ($\varepsilon_2 = 0,31$). В табл.2 представлены интенсивности изнашивания для кристаллических материалов кристалл $ZrO_2 + 3\text{мол.}\% Y_2O_3$, и кристалл $ZrO_2 + 4\text{мол.}\% Y_2O_3$.

Табл. 2. Значения интенсивностей изнашивания J и относительной износостойкости ε для материалов кристалл $ZrO_2 + 3\text{мол.}\% Y_2O_3$ и кристалл $ZrO_2 + 4\text{мол.}\% Y_2O_3$

Пальчиковый образец	Диск	$J \cdot 10^9$, палец	$J \cdot 10^8$, диск
Кристалл $ZrO_2 + 3\text{мол.}\% Y_2O_3$ $H_v = 13070$ МПа	У 10 А HRC 49-52	4,3	5,7
Кристалл $ZrO_2 + 4\text{мол.}\% Y_2O_3$ $H_v = 11800$ МПа	У 10 А HRC 49-52	2,7	5,7
Относительная износостойкость для двух испытанных материалов $\varepsilon = J_{3\%} / J_{4\%}$		1,59	1,0

Образцы отличаются друг от друга лишь на 1% содержания Y_2O_3 . Величины коэффициентов трения для этих материалов мало отличаются друг от друга и находятся в пределах $f = 0,45 \dots 0,32$, при этом с ростом среднего контактного давления f снижается. Интенсивность изнашивания материала

кристалл $ZrO_2+4\text{мол.}\% Y_2O_3$ составила $J_{4\%} = 2,7 \cdot 10^{-9}$ по сравнению с $J_{3\%} = 4,3 \cdot 10^{-9}$ для материала кристалл ЧСЦ+3мол.% Y_2O_3 , т.е. износостойкость материала повысилась в $J_{3\%} / J_{4\%} = 4,3 \cdot 10^{-9} / 2,7 \cdot 10^{-9} = 1,59$ раза. В таблице 3 приведено сравнение механических характеристик керамических материалов перспективных для применения в узлах трения механических модулей приборов.

Табл. 3. Механические характеристики керамических материалов

Материал	Модуль упругости (ГПа)	Плотн. (н/м ³)	Твердость (ГПа)	Вязкость разрушения (МПа*м ^{1/2})	Прочность на сжатие (МПа)	Прочность на изгиб (МПа)
ZrO_2 +3мол.% Y_2O_3 (кристалл)	353	60,2	15	10	2700	924
ZrO_2 + 17мол.% CeO_2 (керамика)	310	58	12	7	-	650
SiC	430	32	29	4	-	-
Si_3N_4	300-320	31-32	15	5-8	3500	800
Al_2O_3	380-390	39	22	2,3-3,5	4000	450-700

Результаты проведенных испытаний показывают, что применение в кристаллов ЧСЦ в узлах трения точных приборов предпочтительно практически по всем параметрам.

Список литературы

1. Семченко Г.Д. Современные процессы в технологии керамики. Часть 1. Харьков: НТУ, ХПИ, 2002. 79с.
2. J. Chevalier, L. Gremillardw, A.V. Virkar, D.R. Clarke, The tetragonal-monoclinic transformation in zirconia: lessons learned and future trends, J. Am. Ceram. Soc. 92 (2009) 1901–1920.
3. M.A. Borik, V.T. Bublik, A.V. Kulebyakin. et other. Phase composition, structure and mechanical properties of PSZ (partially stabilized zirconia) crystals as a function of stabilizing impurity content, J. Alloy. Comp. 586 (2014) 231–235.
4. Куксенова Л.И. Методы испытания на трение и износ / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова – М.: Интермет инжиниринг, 2001. 152.
5. Y. Gaillard, M. Anglada, E. Jimenez et other. Nanoindentation of yttria doped zirconia: effect of crystallographic structure on deformation mechanisms, J. Mater. Res. 24–3 (2009) 719–727.

Сведения об авторе:

Алисин Валерий Васильевич – к.т.н., ведущий научный сотрудник, ИМАШ РАН, г.Москва.