Vol. 30, № 5

FRICTION AND WEAR

УДК 666.3-16:666.3.017:66.018.2:536.424.1

ИЗНОС КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ МАГНИЯ И ЦЕРИЯ, ПРИ ТРЕНИИ ПО СТАЛИ БЕЗ СМАЗОЧНОГО МАТЕРИАЛА

Г. Я. АКИМОВ⁺, Э. В. ЧАЙКА, В. М. ТИМЧЕНКО, Г. А. МАРИНИН, В. В. БУРХОВЕЦКИЙ.

Изучен износ двух керамических материалов на основе частично стабилизированного диоксида циркония при трении без смазочного материала по стали. Диоксид циркония стабилизировали оксидом магния (керамика Mg-PSZ) и оксидом церия (керамика Ce-TZP). Установлено, что скорость изнашивания керамики Mg-PSZ в 1,5 раза ниже, чем керамики Ce-TZP. Показано, что это различие связано с тем, что изнашивание керамики Ce-TZP происходит путем отрыва от поверхности трения больших блоков зерен, в то время как изнашивание керамики Mg-PSZ осуществляется истираним ее зерен.

Ключевые слова: керамика, частично стабилизированный диоксид циркония, износ, трещиностойкость, изостатическое прессование.

Введение. Ранее в работе авторов, посвященной изучению износа керамики на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (Y-TZP, yttria tetragonal zirconia polycrystals), при трении по стали без смазочного материала, было показано, что износ пористой керамики может быть меньше износа плотной керамики [1]. Было установлено, что уменьшение размера зерна приводит к существенному снижению износа исследованной керамики [2]. Также было обнаружено, что износ данной керамики тем больше, чем выше ее коэффициент трещиностойкости [3]. Наряду с керамикой Y-TZP в мировой практике для изготовления подшипников скольжения и фильер для волочения цветных металлов применяют также керамики на основе диоксида циркония с высокими физико-механическими свойствами: диоксид циркония, стабилизированный оксидом магния Mg-PSZ (magnia partially stabilized zirconia) и диоксид циркония, стабилизированный оксидом церия Ce-TZP (ceria tetragonal zirconia polycrystals) [4, 5].

В данном сообщении приведены результаты изучения износа керамик Mg-PSZ и Ce-TZP при трении по стали без смазочного материала.

Материалы и методы испытаний. Исследованные керамики имели следующий состав: ZrO_2-9 мол.% MgO (Mg-PSZ) и $ZrO_2-12,5$ мол.% CeO₂ (Ce-TZP). Для изготовления керамик использовали порошки, полученные методом совместного осаждения. Образцы изготавливали холодным изостатическим прессованием с последующим спеканием. Давление прессования порошков составляло 0,3 ГПа. Спекание полученных прессовок проводили по следующим режимам: образцы Mg-PSZ спекали при температуре T = 1823 К в течение 6 ч, а образцы Ce-TZP — при этой же температуре в течение 4 ч.

Свойства спеченных керамических материалов приведены в табл. 1. Плотность керамик ρ измеряли методом гидростатического взвешивания. Размер зерна, морфологию и химический состав поверхности трения керамик определяли с помощью сканирующего микроскопа JEOL JSM-6490LV. Твердость и трещиностойкость измеряли методом индентирования. Индентирование выполняли четырехгранной алмазной пирамидой при нагрузке F = 98 H в соответствии с методи-

Донецкий физико-технический институт им. А. А. Галкина НАН Украины. Украина, 83114, г. Донецк, ул. Р. Люксембург, 72.

Автор, с которым следует вести переписку. e-mail: gencer47@mail.ru.

кой, описанной в [6]. Последующие измерения диагонали отпечатка d и длины радиальной трещины c позволили с помощью соотношения (1) определить твердость по Виккерсу HV [6], а с помощью соотношения (2) — трещиностойкость K_{IC} [7]:

$$HV = 1,854 \frac{F}{d^2};$$
 (1)

$$K_{\rm IC} = 0,018 \left(\frac{E}{HV}\right)^{0.5} \frac{F}{c^{1.5}},$$
(2)

где *Е* — модуль упругости керамики.

В табл. 1 представлены средние значения НV и К_{IC}, полученные по данным шести измерений.

Керамика	Размер зерна D, мкм	Плотность р, г/см ³	Прочность на изгиб σ, ΜΠа	Твердость по Виккерсу <i>HV</i> , ГПа	Трещиностойкость <i>К</i> _{IC} , МПа⋅м ^{1/2}
Mg-PSZ	45	5,74	340	10,4±0,1	4,0±0,2
Ce-TZP	2,5	6,10	1070	10,6±0,1	6,5±0,1

I donniga I. Whohat meranin tecane ebone iba nechegobannok kebami	Таблица 1.	Физико-механические	свойства	исследованных	керамия
---	------------	---------------------	----------	---------------	---------

Примечание. Приведенные в таблице значения плотности соответствуют теоретической плотности для данных материалов.

Результаты рентгенофазового анализа, выполненного на дифрактометре ДРОН-3М, показали, что керамика Ce-TZP практически на 100% состоит из тетрагональной (Л) фазы (табл. 2). В структуре Mg-PSZ наряду с T-фазой присутствуют моноклинная (М) и кубическая (Г) фазы.

Таблица 2. Результаты рентгенофазового анализа исследованных керамик до и после трения

Мотериол	Фазовый состав, об.%							
материал	М	T	R	F				
Исходное состояние								
Mg-PSZ	-	100	-	-				
Ce-TZP	-	83	-	17				
После трения								
Mg-PSZ	10	65	25	-				
Ce-TZP	-	33	62	5				

Примечание. *R* – орторомбическая фаза.

Изнашивание керамики исследовали в соответствии с методикой, изложенной в работе [8]. Образцы для испытаний были изготовлены в виде цилиндров диаметром 8 мм. Поверхности трения образцов перед экспериментами полировали. В качестве контртела использовали шлифованный диск из стали 40ХН (ГОСТ 4543—71), закаленной до твердости 55 HRC. После каждых 30 мин

испытаний поверхность контртела шлифовали заново. Движение образца осуществлялось по окружности диаметром 100 мм со скоростью скольжения 2,5 м/с при давлении 1,4 МПа. Линейный износ образцов определяли микрометрированием и по изменению массы образцов в пересчете через плотность керамики. Измерения износа проводили через каждые 30 мин испытаний.

Результаты эксперимента и их обсуждение. На рис. 1 представлены данные по линейному износу керамик Mg-PSZ и Ce-TZP, а на рис. 2 и 3 — РЭМ-изображения поверхностей этих материалов после испытаний на изнашивание в течение 3 ч. Обращает на себя особое внима-



Рис. 1. Зависимость линейного износа керамик от продолжительности испытаний: *I* – Mg-PSZ; *2* – Ce-TZP

ИЗНОС КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ МАГНИЯ

ние то, что на поверхности трения керамики Mg-PSZ отсутствуют следы вырыва материала. В то же время, на поверхности трения керамики Ce-TZP такие области занимают достаточно большую площадь. Анализ морфологии поверхности трения в данных областях показывает, что отделение материала происходит практически полностью по границам зерен. Области между трещинами на поверхности трения в керамике Ce-TZP охватывают значительное количество зерен, в то время как в керамике Mg-PSZ их площади практически совпадают с размером зерна этого материала.



Рис. 2. РЭМ-изображения поверхности трения керамики Mg-PSZ: *а* – при малом увеличении; *б* – при большом увеличении



Рис. 3. РЭМ-изображения поверхности трения керамики Се-ТZР: а – при малом увеличении: б – при большом увеличении

Учитывая сказанное, можно сделать вывод о том, что изнашивание керамики Ce-TZP происходит следующим образом. Вначале на поверхности трения под действием сдвиговых напряжений возникают трещины, способствующие релаксации этих напряжений. Они распространяются на некоторую глубину, а затем под действием тех же сдвиговых напряжений развиваются вдоль поверхности трения, что в итоге приводит к отрыву фрагмента керамики. Совокупность таких элементарных актов отделения материала приводит к его износу. Поскольку отрыв происходит по границам зерен, что иллюстрируется рис. 3, δ , износ данной керамики, по-видимому, определяется ее прочностными свойствами на границах зерен. В керамике Mg-PSZ отделения фрагментов поверхностного слоя не обнаружено, однако незначительный износ зарегистрирован. Следовательно, изнашивание керамики Mg-PSZ обусловлено не вырыванием отдельных ее зерен, а их истиранием.

Данное различие в механизмах изнашивания исследованных керамических материалов, возможно, обусловлено различиями в размерах их зерен. Вырывание зерна керамики Mg-PSZ как целого означает удаление с ее поверхности фрагмента со средними размерами 45 мкм не только в

Г. Я. АКИМОВ, Э. В. ЧАЙКА, В. М. ТИМЧЕНКО, Г. А. МАРИНИН, В. В. БУРХОВЕЦКИЙ

длину и ширину, но и в глубину. Анализ изображения поверхности керамики Ce-TZP (рис. 3) позволяет заключить, что с поверхности отделяются фрагменты шириной порядка 30 мкм и длиной до 70 мкм. Однако невозможно сделать вывод о глубине вырываемых фрагментов. При этом невозможно установить корреляцию между прочностью материала (прочностью на границе зерен) и его износом: керамика Mg-PSZ демонстрирует прочность в 3 раза меньшую (табл. 1), чем Ce-TZP, но ее скорость изнашивания в 1,5 ниже, хотя из самых общих соображений следует, что более высокой прочности должна соответствовать более низкая скорость изнашивания.

При трении изменяется фазовый состав материала поверхности (табл. 2). Появление орторомбической и моноклинной фаз за счет уменьшения количества тетрагональной и кубической фаз может быть одной из причин низкого износа этих керамик по сравнению с керамикой Y-TZP, т. к. превращение тетрагональной фазы в моноклинную сопровождается увеличением объема материала до 9%, а возникновение орторомбической фазы, также сопровождаемое изменением объема, приводит к появлению сжимающих напряжений, способствующих снижению износа.

Заключение. Изучено изнашивание двух керамических материалов на основе диоксида циркония: диоксида циркония, стабилизированного оксидом магния (Mg-PSZ), и диоксида циркония, стабилизированного оксидом церия (Ce-TZP). Оба материала были спечены до плотности, близкой к теоретической. Определены их физические (плотность, фазовый состав, средний размер зерна), механические (прочность на изгиб) и триботехнические (износостойкость при трении по стали без смазочного материала) характеристики. Установлено, что керамика Ce-TZP имеет размер зерна в 20 раз меньше, прочность в 3 раза больше и скорость изнашивания в 1,5 раза выше, чем керамика Mg-PSZ. Анализ морфологии поверхностей трения показал, что различие в износостойкости исследованных керамик обусловлено разными механизмами их изнашивания. При трении керамики Mg-PSZ происходит истирание ее зерен, а при трении Ce-TZP — вырывание зерен и даже их конгломератов. Данное различие в механизмах изнашивания керамик может быть обусловлено различиями в размерах их зерен.

Обозначения

D — размер зерна керамики; T — температура спекания; F — нагрузка при индентировании; d — диагональ отпечатка; c — длина радиальной трещины; ρ — плотность; σ — прочность на изгиб; $K_{\rm IC}$ — трещиностойкость; HV — твердость; L — линейный износ; t — время.

Литература

- Акимов Г. Я., Маринин Г. А., Чайка Э. В. Роль пористости в эволюции фазового состава и формировании текстуры на поверхности трения керамики из частично стабилизированного диоксида циркония // Письма в ЖТФ. – 2006 (32), вып. 3, 49–54
- 2. Акимов Г. Я., Маринин Г. А., Чайка Э. В., Варюхин В. Н. Влияние размера зерна на формирование нанофазной структуры и трибологические свойства поверхности трения керамики из частично стабилизированного диоксида циркония // ЖТФ. – 2007 (77), вып. 10, 114–117
- Акимов Г. Я., Чайка Э. В., Маринин Г. А. Износ и трещиностойкость керамики из частично стабилизированного диоксида циркония при трении по стали без смазочного материала // Трение и износ. — 2009 (30), № 2, 109—112
- Van den Berg P. H. J., de With G. Wear and strength of Mg-PSZ, worn on hardened steel // J. Eur. Ceram. Soc. - 1991 (8), N 2, 123-133
- Sun Y., Li B., Yang D. et al. Unlubricated friction and wear behaviour of zirconia ceramics // Wear. 1998 (215), N 1-2, 232-236
- 6. ГОСТ 9450-76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников
- Miyoshi T., Sagawa N., Sassa T. Study on fracture toughness evaluation for structural ceramics // Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. - 1985 (51), N 471, 2487-2489

ИЗНОС КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ, СТАБИЛИЗИРОВАННОГО ОКСИДАМИ МАГНИЯ

8. Чайка Э. В., Акимов Г. Я., Тимченко В. М. Износ керамики на основе диоксида циркония в условиях сухого трения скольжения в паре со сталью: роль пористости // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005, № 9, 10—12

Поступила в редакцию 10.03.09.

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.

The wear of two ceramic materials based on partially stabilized zirconia is studied during dry friction against steel. Zirconia was stabilized by magnia (ceramics Mg-PSZ) and ceria (ceramics Ce-TZP). The wear rate of ceramics Mg-PSZ is found to be 1.5 times less than that of ceramics Ce-TZP. It is show that the difference results from the fact that the wear of Ce-TZP occurs as the separation of coarse grain blocks from the surface while Mg-PSZ wears out through the abrasion of their grains.