

УДК 666.3-16:666.3.017:66.018.2:536.424.1

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НА ИЗНОС КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ ПРИ ЕЕ ТРЕНИИ БЕЗ СМАЗКИ О СТАЛЬ

© Д-р физ.-мат. наук Г.Я. Акимов, Э.В. Чайка

Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины, г. Донецк,  
Украина



АКИМОВ Г.Я.

Исследовано влияние скорости на износ при трении о сталь без смазки мелкозернистой Y-TZP и крупнозернистой Mg-PSZ керамик. Установлено, что увеличение скорости движения керамического образца по стали при одинаковых давлениях прижима увеличивает величину износа. На основании того, что увеличение скорости приводит к повышению температуры трибологического контакта сделан вывод, что износ связан с размягчением границы зерна, которое приводит к более интенсивному отрыву фрагментов керамики с поверхности трения

**Ключевые слова:** керамика, износ, граница зерна, металлокерамика.

Speed effect on wear rate of fine-grained Y-TZP or coarse-grained Mg-PSZ ceramics at dry friction against steel was studied. It was established that the increase in friction speed of the ceramic specimen against steel makes the wear faster under the same application pressure. Based on the observation that the increase in friction speed results also in the temperature rise near the friction contact, it was supposed that the wear is caused by the grain boundary softening, which induces more intensive fragment tearing off the friction surface.

**Key words:** ceramics, wear, grain boundary, metal-ceramics.

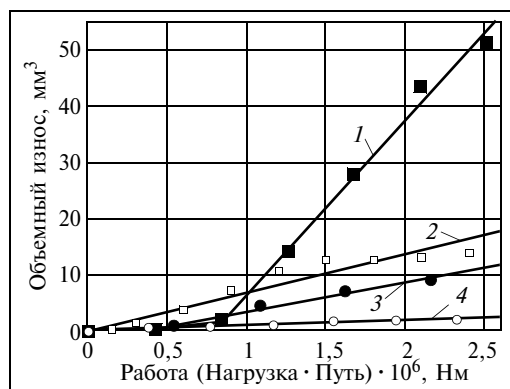
Ранее в работах [1—7] авторами было показано, как происходит износ керамики на основе диоксида циркония при ее трении о сталь. При этом скорость движения керамического образца относительно неподвижного металлического контр тела всегда была практически одинаковой. Во всех этих работах приведены варианты объяснения наблюдаемых эффектов. В основном объяснения сводилось к тому, что износ керамики реализуется за счет откалывания кусочков керамики. При этом это откалывание, в случае материала с относительно небольшим размером зерна (0,2—2,5 мкм), происходило путем зарождения и распространения трещин по границам зерна [4, 6]. В случае, когда зерно достигало размера порядка 40—60 мкм, износ практически отсутствовал [7], хотя трещины наблюдались и также локализовались на границах зерна. Кроме того, проводимый рентгенофазовый анализ показывал наличие существенных фазовых превращений, регистрируемых на поверхности трения керамики. Несмотря на настойчивые попытки, найти достаточно

убедительную связь между фазовыми превращениями и износом керамики авторам не удалось. Хотя, безусловно, происходящее под действием сдвиговых напряжений превращение в керамике тетрагональной фазы в моноклинную, сопровождающееся увеличением объема почти на 9 % и создающее при этом сжимающие напряжения, затрудняет процесс откалывания и, как следствие, снижает величину износа. Спекание керамики на основе диоксида циркония всегда осуществляется преимущественно за счет того, что неизбежно присутствующие, сопутствующие примеси образуют жидкую фазу, которая может возникать при достаточно низких температурах (700—1000 °С). Вязкость этой фазы вначале достаточно высока, но по мере роста температуры она, естественно, падает. Одним из доказательств справедливости сказанного выше являются результаты работы [8], где керамика состава  $ZrO_2 - 3 \text{ mol. \% } Y_2O_3$  была достаточно успешно спечена уже при температуре 1100 °С, а это значит, что спекание было жидкофазным. Температура плавления диоксида цирко-

ния равна  $2700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . И, наконец, необходимо напомнить хорошо известный факт, свидетельствующий о том, что при трении трущиеся поверхности нагреваются. В случае диоксида циркония, коэффициент теплопроводности которого чрезвычайно низкий ( $1\text{--}3\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ ), такой нагрев может быть достаточно сильным. Согласно измерениям, представленным в работе [9], температура в районе трибологического контакта может достигать  $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплопроводность стали равна  $40\text{--}70\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

В настоящем сообщении приводятся результаты изучения влияния скорости трения на износ керамики в системе  $\text{ZrO}_2\text{—}3\text{ mol. \% Y}_2\text{O}_3$  (Y-TZP) с размером зерна порядка  $180\text{--}200\text{ нм}$  и керамики  $\text{ZrO}_2\text{—}9\text{ mol. \% MgO}$  (Mg-PSZ) с размером зерна  $4500\text{--}5000\text{ нм}$ . Идея исследования заключается в том, что повышение скорости неизбежно повысит температуру трущихся поверхностей, а, следовательно, изменит вязкость границ зерен и, как следствие, их прочность. Это обстоятельство должно повлиять на величину износа керамики.

Изнашивание керамики исследовалось в соответствии с методикой, изложенной в работах [4, 5]. Керамика Y-TZP истиралась при скоростях  $2,5$  и  $3,5\text{ м/с}$ , давление прижима к стальному контртелу было  $1,34$  и  $1,43\text{ МПа}$  соответственно. Керамика Mg-PSZ истиралась при скоростях  $2,5$  и  $3,5\text{ м/с}$ , давление прижима к стальному контртелу было  $2,68$  и  $2,75\text{ МПа}$  соответственно. Керамика Y-TZP имела твердость  $\text{HV} = 12,24\text{ ГПа}$ , а у Mg-PSZ  $\text{HV} = 10,4\text{ ГПа}$ . В качестве контртела использовалась сталь 40ХН, твердость которой была  $\text{HV} = 6,0\text{ ГПа}$ . Результаты проведенных измерений приведены на рис. 1. Видно, что увеличение скорости существенно повысило величину износа, при этом это явление более ярко выражено в случае керамики Y-TZP. Для выяснения возможной причины увеличения износа, вызванного повышением скорости, все поверхности трения керамических образцов, сформированные к концу измерений, были изучены с помощью сканирующего микроскопа JEOL JSM 6490LV. На рис. 2 приведены характерные микрофотографии этих поверхностей. Обращает на себя внимание поверхности трения керамики Mg-PSZ. Если при малой скорости отрывов поверхности не наблюдается, то увеличение скорости вызывает появление вырывов, размер и форма которых совпадает с размером и формой одного или не-



**Рис. 1.** Износ керамики при ее трении без смазки о сталь: 1 — Y-TZP, 3 — Mg-PSZ — высокая скорость; 2 — Y-TZP, 4 — Mg-PSZ — низкая скорость

скольких зерен. Для керамики Y-TZP особого изменения поверхности трения не наблюдается. При обеих скоростях регистрируются достаточно большие вырывы поверхности. Возникает вопрос, чем можно объяснить различия в износе при большой скорости Y-TZP и Mg-PSZ керамик. Очевидно, это обусловлено следующим процессом, происходящим при трении керамики о сталь. Ранее, в работе [9] было высказано разумное предположение о том, что в процессе трения, в течение некоторого времени продукты износа керамики внедряются в сталь. Этому, наряду с разницей в твердостях стали и керамики, решающим образом способствует достаточно высокая температура поверхностей трения. Чем больше температура, тем результативнее идет процесс насыщения поверхности стали керамическими частицами. По завершению этого начального этапа трения поверхность контртела становится металлокерамическим композитом, созданным путем механического внедрения (втирания) керамических частиц-продуктов износа в поверхность контртела. Дальнейшее трение керамики идет о поверхность металлокерамического композита. Это существенно меняет процесс износа. Можно, опираясь на значения твердости керамик, а также на величины зерен, предположить, что металлокompозит на основе Y-TZP керамики существенно более износостоек, чем металлокompозит на основе Mg-PSZ. Дело в том, что зерно Mg-PSZ само по себе обладает очень низкими механическими свойствами. Достаточно высокие механические свойства керамики Mg-PSZ связаны с тем, что технология ее изготовления предполагает формирование в зернах выделений в виде доменов тетрагональной фазы, которые при разрушении переходят в моноклинную фазу и упрочняют материал [10]. Зер-

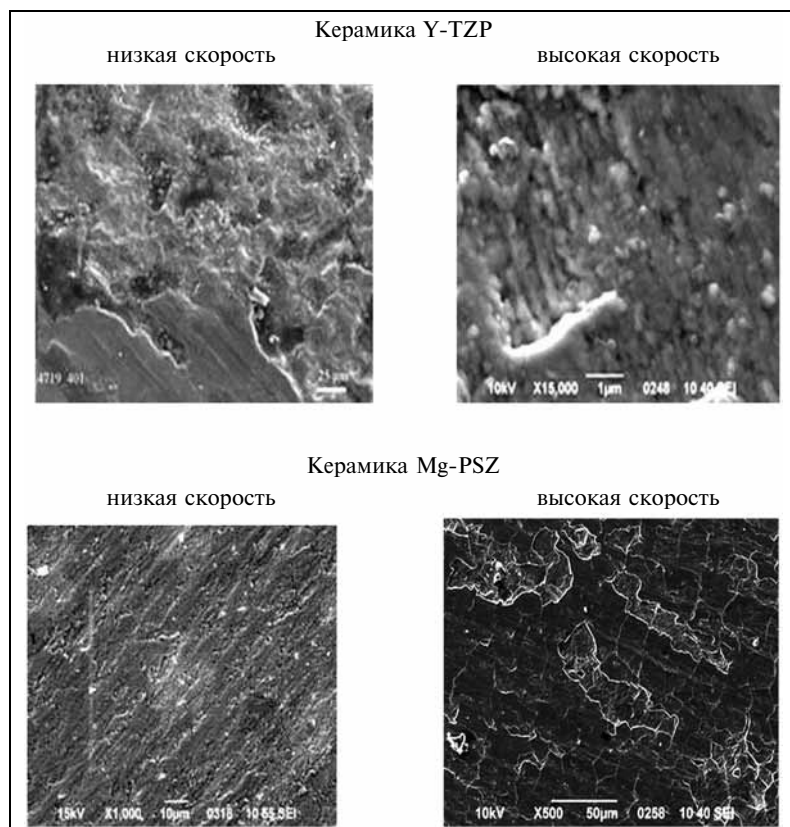


Рис. 2. Характерные микрофотографии поверхностей истирания керамических образцов при разных скоростях скольжения

но, вырванное из керамической матрицы, распадается под действием напряжений, вызванных тетрагональными доменами. Внедряемые в металл частицы не способны существенно повысить износостойкость данной металлокерамики. В случае Y-TZP керамики всего этого не происходит. Отдельное зерно этой керамики сохраняет свойства керамики и после отделения от матрицы. Кроме того, после охлаждения (тетрагональная фаза стабильна при температуре 700–800 °С и выше) внедренное в металл зерно Y-TZP может перейти из тетрагональной в моноклинную фазу и, таким образом, существенно упрочнить поверхность металла за счет увеличения объема на 9 %, сжав поверхностные слои металла.

Изложенное выше позволяет сделать следующий вывод. Износ керамики на основе диоксида циркония, твердость которой существенно выше твердости стали при ее трении без смазки о сталь, определяется главным образом свойствами материала границ зерна керамики.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Акимов Г.Я., Чайка Э.В., Маринин Г.А. Износ керамики на основе диоксида циркония в условиях сухого трения скольжения со сталью: роль размера зерна Огнеупоры и техническая керамика. № 6, 2006, С. 19–20.
2. Акимов Г.Я., Маринин Г.А., Чайка Э.В. Роль пористости в эволюции фазового состава и формировании текстуры на поверхности трения керамики и частично стабилизированного диоксида циркония. Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32, № 3. С. 49–54.
3. Акимов Г.Я., Чайка Э.В., Тимченко В.М. Особенности механических и трибологических свойств нанокристаллической керамики состава 97 мол. %  $ZrO_2$  — 3 мол. %  $Y_2O_3$ . В книге «Наноструктурные материалы» Харьковская нанотехнологическая Ассамблея—2007. 23–27 апреля 2007 г. Украина, Харьков. С. 170–173.
4. 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. Т. 77, вып. 10. С. 114–117.
5. Акимов Г.Я., Маринин Г.А., Чайка Э. Износ и изменение фазового состава ЧСДЦ керамики, полученной горячим изостатическим прессованием, при ее трении о сталь Огнеупоры и техническая керамика № 8, 2008. С. 14–16.
6. 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, № 2. С. 31–36.
7. Akimov G.Ya., Chaika E.V., Timchenko V.M., Marinin G.A., Burkhovetskii V.V. Wear of Ceramics Based on Magnesia- and Ceria-Stabilized Zirconia in Dry Friction Against Steel, Journal of Friction and Wear, 2009, Vol. 30, No. 5, pp. 373–376.
8. Акимов Г.Я., Тимченко В.М. Механические свойства керамики, изготовленной из нанокристаллического порошка  $ZrO_2$  — 3 mol. %  $Y_2O_3$ . Огнеупоры и техническая керамика. 2003, № 10. С. 2–5.
9. Савченко Н.Л., Королев П.В., Тарасов С.Ю., Кульков С.Н. Структурные изменения поверхности трения и износостойкость керамики  $ZrO_2$ — $Y_2O_3$  Письма в ЖТФ, 2000, том 26, вып. 11. С. 29–35.
10. Joon Hyuk, Jang Jaehyung Lee. Microstructure and Mechanical Properties of Fine-Grained Magnesia-Partially-Stabilized Zirconia Containing Titanium Carbide Particles Journal of the American Ceramic Society 2004, Volume 83, Issue 7, Pages 1873–1815.