

УДК 666.3-16, 666.3.017

## СТОЙКОСТЬ К МЕХАНИЧЕСКОМУ ИЗНОСУ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ И ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ

© Канд. техн. наук *В.А. Фомченко*, канд. техн. наук *Э.В. Чайка*, *А.В. Сапрыкина*

*Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина НАН Украины,  
г. Донецк, Украина  
ООО «Керамика», г. Донецк, Украина*

Исследована износостойкость разработанных керамических материалов из оксида алюминия и частично стабилизированного диоксида циркония в процессе истирания мелющих тел при помоле различных абразивных материалов и при сухом трении образцов о сталь без смазки. Проведено сравнение с современными керамическими материалами, широко используемыми для изготовления износостойких деталей и мелющих тел. Показано преимущество в износостойкости разработанных материалов при помоле кварцевого песка и глинозема. Показано, что при разработке и применении износостойкой керамики необходимо учитывать различие в свойствах материалов, предназначенных для изготовления мелющих тел, и материалов, предназначенных для работы в парах трения.

**Ключевые слова:** оксидная керамика, оксид алюминия, диоксид циркония, стойкость, повреждению.

**In this paper authors considered the problem of resistance to mechanical wear of oxide ceramics based on aluminum oxide and zirconium dioxide.**

**Keywords:** oxide ceramics, aluminum oxide, zirconium dioxide, resistance, wear.

### Введение

Конструкционные керамические материалы из оксида алюминия и частично стабилизированного диоксида циркония (ЧСДЦ) отличаются комплексом высоких физико-механических свойств, а именно большой прочностью, твердостью и износостойкостью. Они успешно применяются в качестве триботехнического материала для изготовления пар трения, износостойких элементов футеровки, помольных агрегатов и мелющих тел [1, 2].

Имеются многочисленные данные, в том числе и из нашего опыта, об успешном использовании ЧСДЦ и оксида алюминия для изготовления износостойких элементов запорной арматуры, подшипников скольжения, профилирующего и режущего инструмента, подвижных элементов хирургических имплантатов и других изделий [3–5].

Однако, несмотря на имеющийся положительный опыт использования этих материалов для изготовления износостойкой керамики, иногда в процессе эксплуатации имеет место интенсивный износ, который приводит к неудовлетворительной работе изделий [6]. Так, испытание на

предприятии «Донбасскабель» (г. Донецк) керамических фильер для волочения медной проволоки из ЧСДЦ марки TZ-3Y фирмы Tosoh показало низкую стойкость инструмента по сравнению с ожидаемой, несмотря на высокие прочностные свойства этой керамики. Стойкость керамических фильер оказалась на уровне стандартного инструмента из твердого сплава, тогда как по данным других производителей (Dynamic-Ceramic) работоспособность фильер из ЧСДЦ может быть в 4–5 раз выше обычной [7, 8].

Причиной этого является то, что стойкость в процессе трения зависит как от свойств материала, так и условий эксплуатации (нагрузки, скорости скольжения, рабочей среды) [9]. Так, например, эксплуатация лунетов специализированных фрезерных станков на Криворожском ГТМК, показала, что работоспособность керамических вкладышей — подшипников скольжения, изготовленных нами из ЧСДЦ, может отличаться в 2–4,5 раза в зависимости от технологических режимов [10]. Керамика, изготовленная по разной технологии, также показывает разные результаты.

Изложенное выше приводит к необходимости изучения изнашивания керамики

ческих материалов и определения факторов, оказывающих влияние на этот процесс, в том числе и условий эксплуатации.

Цель данной работы — исследовать износостойкость при истирании в различных средах керамических материалов, разработанных в ДонФТИ НАН Украины: керамики на основе оксида алюминия и ЧСДЦ. Для сравнения выбраны керамические материалы, широко используемые для изготовления мелющих тел: керамика на основе оксида алюминия — *БК-94* и *Alubit-90* фирмы Industrie Bitossi, керамика из ЧСДЦ — *TZ-3Y* фирмы Tosoh.

### Материалы для исследования

Объектами исследования были керамические материалы из ЧСДЦ — *TZP-900* и *TZP-1000*, изготовленные из нанокристаллического порошка  $ZrO_2$  — 3 мол. %  $Y_2O_3$ , а также материал *У1* на основе оксида алюминия с добавками оксидов  $MgO$  и  $TiO_2$  по составу аналогичный известной керамике *Уралит*.

Для испытаний по истиранию использовали образцы, изготовленные по разной технологии. Образцы из ЧСДЦ изготавливали с помощью холодного изостатического прессования (ХИП) и последующего спекания. Давление прессования равнялось 0,3 ГПа. Спекание образцов проводили по режиму, рекомендованному фирмой *Tosoh* для своего материала при максимальной температуре спекания 1350 °С (время спекания — 2 ч).

Образцы из керамики *У1* образцы получали методом пластического формования и спекания при температуре 1320—1350 °С.

Образцы керамик *БК-94* и *Alubit-90* (Industrie Bitossi) были вырезаны из готовых изделий — мелющих тел.

Плотность изготовленных керамических образцов определяли методом гидростатического взвешивания. Твердость  $H_V$  и трещиностойкость  $K_{IC}$  измеряли методом микроиндентирования. Индентирование осуществлялось четырехгранной алмазной пирамидой при нагрузке  $F = 98$  Н в соответствии с методикой, описанной в работе [11]. Последующие измерения диагонали отпечатка  $d$  и длины радиальной трещины  $c$  позволили с помощью соотношения (1) определить твердость  $H_V$  [9], а с помощью соотношения (2) трещиностойкость  $K_{IC}$  [12]:

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

$$K_{IC} = 0,018 \left( \frac{E}{H_V} \right)^{0,5} \frac{F}{c^{1,5}}, \quad (2)$$

где  $E$  — модуль упругости керамики.

### Методика эксперимента

Испытания по истиранию мелющих тел из исследуемых материалов проводились на планетарной мельнице «САНД» одновременно для четырех материалов при ускорении 6g в полиуретановых барабанах в условиях сухого и мокрого помола. В качестве абразивного материала использовали кварцевый песок или глинозем. Мелющие тела изготавливались в виде цилиндров с высотой и диаметром 8 мм. Износ материала определяли по потере массы мелющих тел.

Также исследовали износ керамики при трении по стали. Испытание проводили по схеме «палец—диск» в соответствии с методикой, изложенной в работе [13]. Использовали цилиндрические образцы диаметром 8 мм. Поверхность трения образцов и контртела перед экспериментом шлифовали и полировали. При трении в качестве контртела использовался шлифованный диск из стали 40ХН, закаленный до твердости 55HRC. Скорость скольжения керамического образца по стали равнялась 2,5 м/с. Движение осуществлялось по окружности диаметром 50 мм. Давление прижима керамического образца к контртелу равнялось 1 МПа. Износ образцов определяли взвешиванием через каждые 10 мин трения.

### Результаты и обсуждение

Проведенные эксперименты по истиранию мелющих тел показали, что наибольшей износостойкостью среди исследованных материалов при сухом и мокром помоле кварцевого песка обладает керамика *Alubit-90* и разработанная нами на основе оксида алюминия керамика *У1* (рис. 1). Эти материалы показали большую износостойкость, чем керамика *БК-94*. В следующем эксперименте при мокром помоле глинозема было обнаружено преимущество керамики *У1*. Наш материал показал износостойкость превышающую износостойкость керамики *Alubit-90* почти

Свойства керамики

Материал	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Твердость HV, ГПа	Трещино- стойкость $K_{IC}$ , МПа · м <sup>1/2</sup>
Керамика на основе оксида алюминия			
У1 (ДонФТИ)	3,20	15,5	3,9
ВК-94	3,70	12,4	3,7
Alubit-90 (Industrie Bitossi)	3,67	10,4	4,0
Керамика из ЧСДЦ			
ЧСДЦ-1000 (ДонФТИ)	5,95	13,2	4,4
ЧСДЦ-900 (ДонФТИ)	6,00	13,1	5,0
TZ-3У (Tosoh)	6,05	13,3	4,6

в два раза (рис. 2). Следует отметить, что по сравнению с материалом *Alubit-90* разработанный нами материал *У1* обладает также и рядом технологических преимуществ. Он отличается более низкой температурой спекания 1320–1350 °С по сравнению с температурой спекания *Alubit-90* равной 1520 °С, а также более простым и производительным способом формования изделий. Изделия из *У1* можно получать методом пластического формования, тогда как мелящие тела из керамики *Alubit-90* получают сухим квазигидростатическим прессованием.

Из ЧСДЦ керамики наибольшую износостойкость продемонстрировал материал *TZP-1000*. Среди всех исследованных материалов эта керамика выделяется наименьшей скоростью объемного износа при мокром помоле глинозема и обладает хорошей износостойкостью при сухом и мокром помоле кварцевого песка. При этом следует отметить, что эффективность помола малюющими телами из этого материала (ЧСДЦ), вероятно, будет выше, чем у материалов на основе оксида алюминия вследствие большего удельного веса (см. табл.).

Также проведенный эксперимент показал, что износостойкость мелющих тел из материалов на основе оксида алюминия при помоле кварцевого песка выше, чем при помоле глинозема, а износостойкость керамики из ЧСДЦ наоборот — ниже.

Вторым исследованием в данной работе было определение величины износа керамических материалов в условиях сухого трения скольжения по стали.

На рис. 3 представлены результаты исследования истирания исследуемых керамических материалов при трении по стали.

Максимально износостойкой оказалась керамика *ВК-94* и *Alubit-90*. К сожалению, материал *У1*, который показал высокую износостойкость в процессе помола абразивных материалов, при трении по стали оказался наименее износостойким из материалов на основе оксида алюминия.

Износ разработанного керамического материала *TZP-1000* в начальные 50 мин трения не превышал износа керамики *TZ-3У* фирмы Tosoh. Затем, как и у керамики

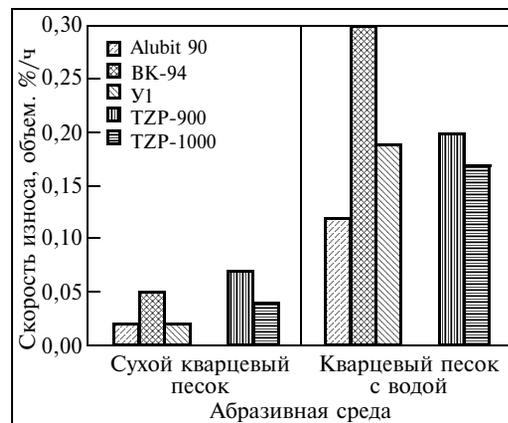


Рис. 1. Скорость объемного износа мелющих тел из исследуемых материалов при сухом и мокром помолах кварцевого песка в планетарной мельнице

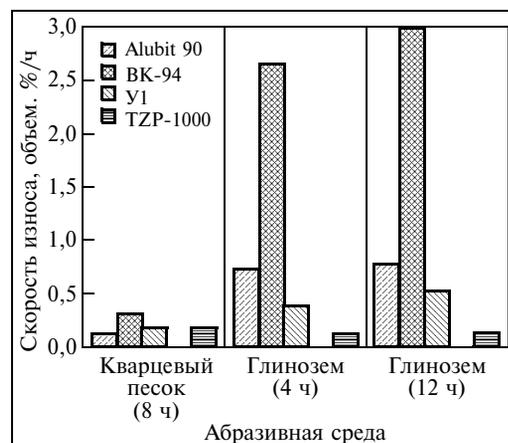
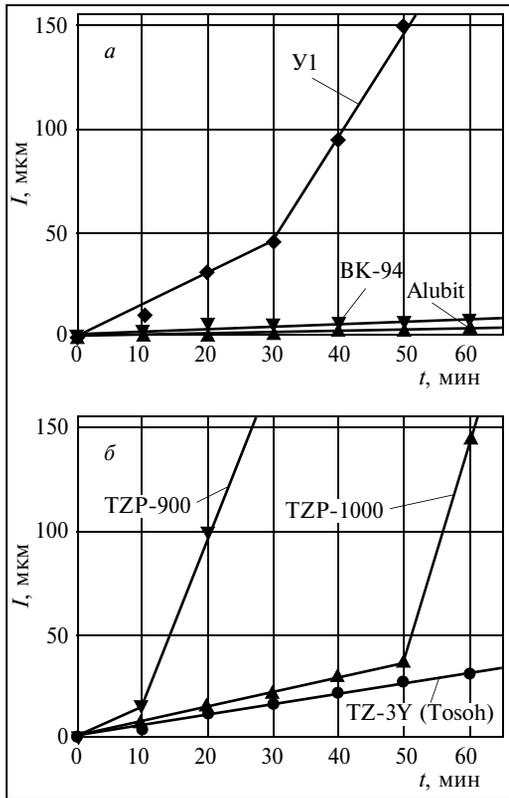
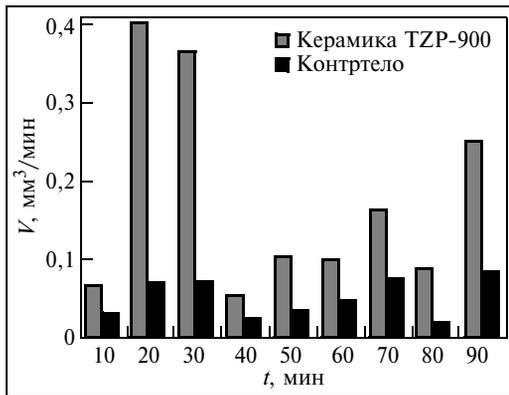


Рис. 2. Скорость объемного износа мелющих тел из исследуемых материалов при мокром помоле кварцевого песка и глинозема в планетарной мельнице

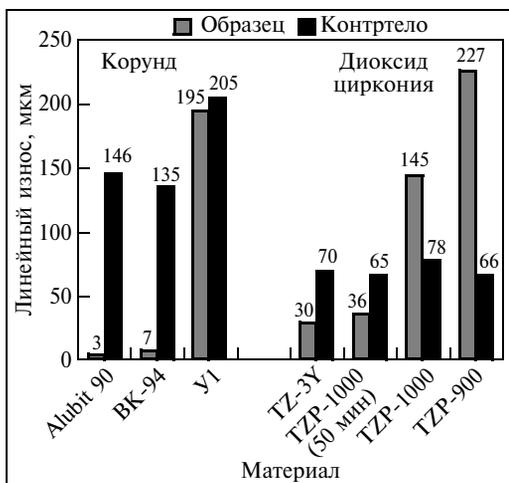
**Рис. 3.** Износ образцов керамики на основе оксида алюминия — а и диоксида циркония — б при трении о сталь



**Рис. 4.** Соотношение скорости износа керамического образца из TZP-900 и стального контртела



**Рис. 5.** Износ образцов керамики и материала контртела при трении в течение 60 мин



TZP-900 после 10 мин, начался катастрофический износ. Причиной его является выкрашивание керамики в результате происходящих в процессе трения фазовых превращений, шаржирование поверхности контртела продуктами износа керамики и, как следствие, более интенсивный износ образцов при трении о такую шаржированную поверхность [6]. Следует заметить, что керамика TZ-3Y также оказалась подверженной катастрофическому износу. После увеличения скорости скольжения до 3,5 м/с катастрофический износ TZ-3Y начался через 60 мин трения, а после увеличения усилия прижима образца к контртелу до 1,5 МПа — через 10 мин.

При изготовлении изделий выбор того или иного износостойкого материала определяется предназначением изделия и условиями его эксплуатации. Для правильного выбора износостойкой керамики, с целью создания оптимальных пар трения или эффективных мелющих тел, наряду с изучением процесса истирания материала трения необходимо исследование изнашивания контртела. Эксперимент показал, что при трении изменение скорости износа материала образцов и контртела оказывается примерно одинаковым (см. рис. 4). Из данных, представленных на рис. 5, следует, что при трении по стали одна часть исследуемых материалов (BK-94 и Alubit-90) демонстрирует низкий износ и при этом сильно истирает материал контртела. Другая часть материалов (TZ-3Y и TZP-1000) при несколько большем собственном износе меньше истирает контртело. При этом суммарный износ образцов и контртела у TZ-3Y и TZP-1000 меньше.

Из этого следует, что при разработке износостойкой керамики следует различать материалы с высокой истирающей способностью, предназначенные для изготовления мелющих тел, и материалы для работы в парах трения, которые хотя и не обладают высокой износостойкостью, обеспечивают низкий суммарный износ всей пары трения.

### Выводы

К настоящему времени создано достаточно большое количество износостойких керамических материалов, которые могут быть использованы для изготовления мелющих тел или в конструкционных целях для создания различных пар трения. Тем не менее, требования к свойствам и пот-

ребности в таких материалах постоянно возрастают.

Сравнительное исследование износостойкости существующих и разработанных нами керамических материалов показало, что материал *У1*, созданный на основе оксида алюминия, показал высокую износостойкость размольных тел при сухом помоле кварцевого песка и глинозема. Материал обладает более высокой износостойкостью по сравнению с широко используемой в Европе в качестве размольных тел керамикой *Alubit 90*, а также керамикой *ВК-94*. В тоже время износостойкость *У1* при сухом трении по стали оказалась низкой.

При мокром помолу глинозема максимальную износостойкость среди всех материалов продемонстрировала износостойкая керамика из ЧСДЦ *TZP-1000*. При трении по стали износостойкость этого материала равна износостойкости керамики из диоксида циркония *TZ-3Y* японской фирмы *Tosoh*.

Также исследование показало, что при разработке и применении износостойкой керамики следует различать материалы, предназначенные для изготовления мелющих тел, и материалы, предназначенные для работы в парах трения. Первые при низком собственном износе обладают высокой истирающей способностью. Вторые — обеспечивают низкий износ всей пары трения. Подходы к разработке таких материалов будут различными.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Jahanmir S.* Friction and wear of ceramics. — М. Dekker, 1994. — 429 p.
2. Керамика для машиностроения / *Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С.* — М.: ООО Издательство «Научтехлитиздат», 2003. — 384 с.
3. *Макаров Н.А., Лукин Е.С., Попова Н.А., Сидорин В.А.* Использование корундовой керамики для тонкого измельчения материалов различной природы // *Стекло и керамика*. — 2005. — № 1. — С. 17—18.

4. *Makarov N.A., Lukin E.S., Popova N.A. and Sidorin V.A.* Use of corundum ceramics for fine milling of various materials // *Glass and Ceram.* — 2005. — Vol. 62. — № 1—2. — P. 19—20.
5. *Акимов Г.Я., Тимченко В.М., Чайка Э.В. и др.* Использование керамического инструмента из диоксида циркония в трубном производстве // *Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. научных трудов*. — Донецк: ДонГТУ. — 2000. — Вып. 11. — С. 289.
5. *Бублик Л.А., Митюшин И.И., Чайка Э.В., Чайка В.А.* Подвижный протез межпозвоночных дисков для шейного отдела позвоночника // *Сборник тезисов XV съезда ортопедо-травматологов Украины*. 16—18 сентября 2010 г. Днепропетровск. — 2010. — С. 44.
6. *Чайка Э.В.* Увеличение скорости изнашивания керамики из частично стабилизированного диоксида циркония в процессе трения // *Огнеупоры и техническая керамика*. — 2008. — № 10. — С. 8—21.
7. *Hanger Bearings for Abrasive Applications: Dynamic-Ceramic Technical Information Series*. — Dynamic-Ceramic Ltd. — 1 p.
8. *Wire Industry Applications For Advanced Ceramics: Dynamic-Ceramic Technical Information Series*. — Dynamic-Ceramic Ltd. — 2 p.
9. *Керамические инструментальные материалы* / Г.Г. Гнесин, И.И. Осипова, Г.Д. Ронталь и др.; Под ред. Г.Г. Гнесина. — Киев: Техника, 1991. — 388 с.
10. *Чайка Э.В.* Исследование процесса деформирования ультрадисперсных оксидных порошков при холодном изостатическом прессовании с целью получения высокопрочной керамики: Дис... канд. техн. наук: 05.03.05 / НАН Украины; Донецкий физико-технический ин-т им. А.А. Галкина. — Донецк, 2005. — 191 с.
11. ГОСТ 9450—76. Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. — М.: Изд-во стандартов, 1993. — 33 с.
12. *Miyoshi T., Sagawa N., Sassa T.* Study on fracture toughness evaluation for structural ceramics // *Trans. Jap. Soc. Mech. Eng.* — 1985. — Vol. 51. — N 471. — P. 2487—2489.
13. *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. — С. 10—12.