

DOI 10.31483/r-22125

Алисин Валерий Васильевич

ЦИРКОНИЕВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Ключевые слова: циркониевая керамика, кристаллы диоксида циркония, трение, износ, триботехнические испытания.

Проблема повышения надежности и ресурса узлов трения, работающих в экстремальных условиях эксплуатации, особенно при высоких температурах, в основном решается с применением керамических материалов. В работе проведен анализ триботехнических свойств керамических материалов на основе частично стабилизированного диоксида циркония и формулируются предложения по оптимальному подбору пар трения, основывающиеся на экспериментальных данных.

Keywords: zirconium ceramics, zirconium dioxide crystals, friction, wear, tribotechnical tests.

The problem of improving the reliability and service life of friction units operating in extreme operating conditions, especially at high temperatures, is mainly solved by the use of ceramic materials. The paper analyzes the tribotechnical properties of ceramic materials based on partially stabilized zirconium dioxide and formulates proposals for the optimal selection of friction pairs based on experimental data.

Современные машины и механизмы включают в себя большое количество различных трибосопряжений, которые дают возможность этим машинам совершать различной сложности кинематические движения и выполнять полезную работу. Процессы, развивающиеся в зонах контакта трибосопряжений, относятся к области физико-химической механики контактного взаимодействия деформируемых твердых тел в присутствии смазочных материалов и внешней газовой среды [8, с. 129]. Изучение этих процессов осложняется тем, что они протекают в закрытых, чрезвычайно малых по размерам ($10^{-3} - 10^{-1}$ мм) площадках фактического контакта твердых тел, во временных отрезках порядка $10^{-3} - 10^{-6}$ с, при

температурах до 1000⁰С и выше [6, с. 199]. Степень влияния этих процессов на работоспособность машин исключительно велика и выражается через основные интегральные показатели качества машин – КПД и ресурс их работы [20, с. 92].

Качество узлов трения в значительной мере зависит от материалов, из которых они изготавливаются. Материалы триботехнического назначения должны сочетать в себе высокую поверхностную прочность с пластичностью, достаточно высокие теплофизические свойства для обеспечения эффективного отвода тепла из зоны фрикционного контакта. Помимо этого материалы пары трения должны обладать хорошей прирабатываемостью, совместимостью со смазочными материалами для прочного удержания граничных смазочных слоев. Они должны также обладать по возможности высокой конструктивной удельной прочностью σ_b/γ , где σ_b и γ – предел прочности при разрыве и удельный вес материала соответственно.

Последние годы трибоинженерная практика все чаще обращается к использованию в узлах трения различного назначения композиционных высокопрочных материалов с повышенной вязкостью разрушения. К материалам такого класса относятся керамики – химические соединения металлов с кислородом, углеродом, азотом, бором, кремнием и всевозможные их сочетания: Me (O₂, C, N₂, B, Si) [11, с. 243]. Керамические композиционные материалы обладают высокой твердостью, способностью сохранять механическую прочность до температур выше 1000⁰С [3, с. 136] в сочетании с химической инертностью по отношению к различным средам (газовым, жидкостным, биологическим). Это делает перспективным их применение в узлах трения механизмов авиационно-космической, атомно-энергетической, химической промышленности, медицинской техники (уплотнения, упорные подшипники скольжения, детали насосов для работы в гидроабразивной среде, пластинки режущего инструмента для металлообработки, кулачки, эндопротезы тазобедренных суставов и т. д.) [22, р. 150]. Керамические материалы на основе диоксида циркония включают: собственно керамики, получаемые из порошков по технологии формообразования и высокотемпературного спекания и кристаллы, получаемые из расплава. Керамики и

кристаллы могут иметь одинаковый состав и внешний вид, но совершенно разные структуры и механические свойства. Общей характеристикой для этих материалов является набор уникальных механических и физико-химических свойств и, в том числе, наиболее высокой из керамических материалов вязкостью разрушения. Обладая высокой температурой плавления и лучшими антифрикционными свойствами, они перспективны для применения в высокотемпературных узлах трения [5, с. 136]. Свойства керамик даже одного и того же химического состава существенно зависят от технологических режимов их изготовления [13, с. 322]. Качество смешивания, режимы прессования, температура спекания, исходные размеры частиц порошка влияют на пористость, размер зерна, микроструктуру межзеренных границ, твердость, вязкость разрушения, а значит и на износостойкость этих материалов.

Анализ опубликованных работ показывает, что наиболее распространенной схемой триботехнических испытаний керамик на основе диоксида циркония (как и керамик других классов) является схема «диск-палец» (сфера-плоскость) [10, с. 59]. При этом для испытаний используются как стандартные машины трения типа УМТ-1 [9, с. 495], так и изготовленные или модифицированные специально под требуемый диапазон режимов испытания. Диаметр дискового образца может колебаться от 20 до 120 мм, а размеры шарика или штифта – от 2,0 мм и более. При этом указанные размеры, как правило, определяются не какими-то принципиальными соображениями, а реальными техническими и технологическими возможностями изготовления образцов из керамики. Известно также использование схемы испытания типа «колодочка – вращающийся ролик» [7, с. 494], торцевая схема трения «кольцо – диск», моделирующая работу упорного подшипника в условиях гидроабразивного изнашивания ($v_{ск} = 1-15$ м/с, $p =$ до 2000 МПа) [15, с. 306]. В зависимости от конкретно поставленной задачи испытания керамик осуществляются в атмосфере воздуха, в углеводородных смазочных материалах и газах, в воде, в вакууме, при комнатных, повышенных и низких температурах. Минимальная температура, при которой исследовалась керамика на основе ZrO_2 , составляла 4,2 К [10] [21, р. 30], максимальные температуры на

поверхности трения в условиях трения без смазки достигали 2000°C [5] [9, с. 497]. Существенным моментом при проведении триботехнических испытаний является выбор материала контртела, т.е. материала, работающего в паре с керамикой. Наиболее распространены испытания диоксид-циркониевых керамик в паре с углеродистыми, нержавеющими сталями, быстрорежущими сталями типа P9, P18 [17, р. 30], а также в паре с керамическими материалами, в том числе в виде одноименных пар. При этом, если при испытании используется диск, изготовленный из керамики, то контробразец (штифт, палец), также изготавливается из керамики. При использовании металлических дисков контробразец также изготавливается из керамики. Некоторые режимы испытаний, а также результаты испытаний ряда распространенных керамических материалов, включая материалы на основе диоксида циркония, приведены в таблице 1.

Таблица 1

Режимы испытания керамик на основе ZrO_2 схеме «диск-палец» [18, р. 965]

Материал образца	Скорость, м/с	Нагрузка, Н	p_{max} , МПа
Al_2O_3	0,1–0,5	3–12	700–1250
SiC	0,1–0,6	5–15	950–1350
Si_3N_4	0,05–0,4	5–15	890–1290
YTZP	0,02–0,08	5–10	800–1000
ZYS	0,02–0,07	5	1230

В работе [17, р. 17] исследовалось поведение при трении диоксида циркония, стабилизированного оксидами магния и иттрия. Испытания проводились по схеме «шарик-диск». Испытания выполнялись на воздухе и в среде воды. Проводились замеры диэлектрической постоянной Π до и после испытаний. Результаты испытаний по схеме «шарик-диск» приведены в таблице 2. Показано, что обе рассматриваемые группы керамик на основе диоксида циркония при испытаниях по схеме «шарик-диск» ведут себя аналогичным образом, при этом присутствие моноклинной фазы способствует увеличению износа. Образование слоя вторичных структур способствует стабилизации износа. Показано, что увеличение диэлектрической постоянной способствует увеличению износа.

Таблица 2

Результаты испытаний керамик на основе ZrO₂ на воздухе и в воде [17, p. 17]

Материал диска	П 100°С перед исп.	П 100°С после исп.	K _{1с} , МПа·м ^{1/2}	Износ, 10 ⁻² мм ⁻³ (вода)	Износ, 10 ⁻² мм ⁻³ (воздух)
MgPSZ1	0,8	0,8	5,61	11,2	13,2
MgPSZ2	0,45	0,5	6,21	3,3	10,78
YTZP1	0,4	0,5	6,87	8,08	8,74
YTZP2	0,2	0,2	5,84	7,7	2,64
YTZP3	0	0	10,17	0,62	2,07
YTZP4	0	0	11,06	0,93	1,85
YTZP5	0,2	0,15	6,45	3,38	1,76
YTZP6	0	0	5,73	2,33	0,31

Следует отметить тенденцию к использованию гибридных керамических материалов, в частности, на основе ZrO₂ и Al₂O₃ [16, p. 1298]. В работе [18, p. 968] исследованы структура поверхностей трения и триботехнические характеристики (табл. 3) керамики ZrO₂ – 3 мол% Y₂O₃, состоящей из тетрагональной фазы ZrO₂, плотностью ≈ 95%, средний размер зерна – 0,8 мкм, HV 9 ГПа, K_{1с}=9МПа·м^{1/2}, прочность на изгиб – 600 МПа, полученной спеканием в вакууме при 1600°С в течение 3 час. Схема трения: диск – палец, контртело – быстрорежущая сталь (диск). Режим испытаний: p = 1 – 10 МПа, v_{ск} = 9,4 м/с, время испытаний – 10 мин.

Таблица 3

Триботехнические характеристики образцов керамики ZrO₂-3 мол% Y₂O₃ при трении по диску из быстрорежущей стали

Давление p, МПа	Износ J _v , мм ³ /м	h, мкм	C, мас. %
1	0,003 ± 0,0006	12 ± 3	32 ± 1
5	0,014 ± 0,0028	22 ± 16	18 ± 1
10	0,011 ± 0,0022	17 ± 3	27 ± 1

Примечание: h – средняя глубина распространения трещин в материале; C – количество материала контртела, перенесенного на поверхность диска; J_v = V/L, где V – объем изношенного материала на пути трения L.

Существует диапазон температур (325°С или 200°С в зависимости от скорости скольжения), где износ MgPSZ увеличивается на три порядка. Феноменологическую модель, объясняющую такой скачок износа фазовым превращением

вследствие фрикционного разогрева экспериментально изучена в работе [14, р. 255]. Стаховиак и др [19, р. 224] показали, что при трении MgPSZ и YTZP керамик основной механизм изнашивания является износ отслаиванием. При этом в условиях мягкого износа доминируют механизмы изнашивания, связанные с микрорезанием. Превалирующий механизм сильного изнашивания при высокоскоростных режимах испытания – хрупкое разрушение, обусловленное тепловым ударом. Возможная дестабилизация YTZP, обусловленная воздействием влаги, особенно наглядно проявляется при смазке водой. Износ тетрагонального ZrO_2 уменьшается с уменьшением размера зерна. Для зерен с размером, равным или менее 0,7 мкм, соблюдается соотношение Холла-Петча между износостойкостью и размером зерна. При наличии крупного зерна фазовое превращение препятствует образованию трещин, но ослабляет границы зерен. Это приводит к увеличению количества отделившихся частиц. Изнашивание керамик на основе диоксида циркония определяется при данных режимах испытания в основном двумя факторами:

- 1 – адгезионным взаимодействием керамики с поверхностью стального контртела, которое интенсифицируется с ростом температуры в контакте;
- 2 – изменением упругопластических свойств поверхностных слоев керамических материалов.

Различное сочетание и наложение указанных факторов на различных этапах испытания обуславливает различное поведение образцов. Равномерное распределение слоя адгезионного переноса по поверхности трения керамики и малое расстояние между поверхностными трещинами соответствуют умеренному износу керамики. В противоположность этому, неравномерное распределение слоя переноса и большое расстояние между трещинами приводят к повышенному изнашиванию керамики. В работе [15, р. 297], исследовались характеристики трения и изнашивания одноименных пар из композита на основе муллита, упрочненного диоксидом циркония, армированного оксидом алюминия (ZTM-A). Трение осуществлялось по схеме штифт – диск при различных смазках и различных нагрузках. Введение Al_2O_3 может повышать сопротивление рассматриваемых

материалов разрушению. Испытания в среде воды могут привести к отрицательному эффекту вследствие возможной реакции $Y_2O_3 + 3H_2O \rightarrow 2Y(OH)_3$. Это может вызвать потерю Y_2O_3 , и, как результат, дестабилизировать тетрагональную фазу диоксида циркония.

Среди циркониевых керамических материалов по механическим свойствам выделяются наноструктурированные кристаллы частично стабилизированного диоксида циркония (кристаллы ЧСЦ), технология синтеза которых существенно отличается от традиционных способов получения керамик методами порошковой металлургии [4, с. 735]. Она позволяет создавать практически беспористые материалы, обладающие высокой вязкостью разрушения, а значит и более высокими триботехническими свойствами. Наиболее полное представление о триботехнических и прочностных свойствах кристаллов ЧСЦ представлено в работах [1, с. 9], легированных редкоземельными элементами в работах [2, с. 22].

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников по керамическим материалам показал:

– триботехнические характеристики керамик на основе диоксида циркония, полученных методами порошковой металлургии, зависят от их физико-химических свойств, материала контртела, схемы узла трения, условий приложения нагрузки и внешней среды, в которой находится трибосопряжение;

– крайне малое количество публикаций по изучению триботехнических свойств синтезированных кристаллов ЧСЦ.

Поэтому актуально проведение исследования по сопоставлению триботехнических свойств полученных в одинаковых условиях испытаний керамик и кристаллов диоксида циркония. Разработанная методика исследования трибологических свойств материалов базируется на современных представлениях о взаимодействии поверхностей при трении, в основе которых положены модель дискретного контакта твердых тел и гипотеза о двойственной адгезионно – деформационной природе внешнего трения. В качестве основных трибологических характеристик принимаются безразмерные параметры: f – коэффициент трения, J –

интенсивность изнашивания, ε – относительная износостойкость испытываемых материалов:

$f = F / P$; $J = \Delta h / L$; $\varepsilon = J_3 / J_i$ где F – сила трения, P – нагрузка; Δh – величина изношенного материала на пути трения L ; J_3 – интенсивность изнашивания образца, выбранного в качестве эталона из числа испытанных n образцов, J_i – интенсивность изнашивания i -го образца ($i = 1 \dots n$, n – число испытанных образцов).

На указанные выше параметры влияют три группы факторов.

1. Величины, определяющие уровень внешнего воздействия на трибосистему: p – контактное давление, МПа; v – скорость скольжения, м/с; θ – температура, °С и др.

2. Физико-механические свойства материалов, из числа которых наибольшее значение имеют те величины, которые определяют свойства поверхностных слоев контактирующих материалов: модуль упругости E , твердость H , относительная деформация образцов при разрыве δ , а для хрупких материалов типа керамик – коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} .

3. Микрогеометрия поверхностей трения.

На характер протекания трибологических процессов в зоне контакта влияют тип узла трения (подшипник скольжения, подшипник качения, зубчатая передача и т. д.) и его макрогеометрия. В связи с этим, при постановке экспериментальных исследований размеры и конфигурация образцов модельных узлов трения, а также параметры внешнего нагружения должны определяться таким образом, чтобы обеспечить физическое подобие трибологических процессов в зоне трения модельного и натурального узлов. Указанный вид подобия может быть осуществлен при одновременном соблюдении механического подобия (подобие напряженно-деформированного состояния материалов), кинематического подобия (скоростей скольжения, качения и т. п.) и теплового подобия (подобие температурных полей). Из этого следует, что при разработке методики испытаний, которые позволили бы судить об изменениях коэффициента трения и интенсивности изнашивания образцов материалов в зависимости от технологических

условий их получения, необходим учет конструктивных особенностей узла трения испытательной установки. Необходимо также, чтобы эта методика обеспечивала возможность сопоставления получаемых результатов с уже известными экспериментальными данными по трибологическим свойствам керамик на основе диоксида циркония. Это позволяет провести сравнительный анализ трибологических свойств материалов на основе ZrO_2 , полученных как методом спекания, так и синтезированных из расплава, а также дополнить уже накопленный в отечественной и зарубежной литературе опыт собственными экспериментальными данными.

Цель исследований:

- установление закономерности изменения коэффициента трения скольжения f от времени испытаний t и выбор представительных значений f , характеризующих физико-химические процессы контактного взаимодействия в сопряженных деталях;
- предварительная оценка влияния продуктов износа на протекание процессов трения;
- определение влияния величины нагрузки (контактного давления) и скорости скольжения на коэффициент трения скольжения.

Механическая модель узла трения и алгоритм испытаний. Для проведения трибологических испытаний в качестве основного испытательного оборудования выбрана серийная сертифицированная Госстандартом РФ универсальная машина трения УМТ-1 (Рис. Е1). Она позволяет проводить испытания образцов по различным схемам трения, в том числе по схеме «диск-палец». Методика проведения испытаний по ГОСТ

В качестве модельного узла трения принимается сопряжение диск-палец. Указанная схема трения позволяет использовать стандартную испытательную установку (УМТ-1); упрощает изготовление образцов для испытаний, что особенно важно для трудно обрабатываемых кристаллических материалов на основе диоксида циркония; обеспечивает постоянство средних контактных давлений и

скорости скольжения в процессе испытаний, а также свободный доступ газовой или смазочной среды в зону трения.

Образцы из синтезированных кристаллов ЧСЦ изготавливались в виде коротких стержней (пальчиков) с квадратным сечением 5 x 5 мм и длиной 5...15 мм. Торцевые рабочие поверхности пальчиковых образцов плоские с шероховатостью $Ra = 0,8$. Конструктивная схема испытания обеспечивает возможность одновременного исследования трех пальчиковых образцов, расположенных симметрично по окружности под углом 120° . Пальчиковые образцы торцевыми поверхностями трутся по плоскости вращающегося диска (контр тело) диаметром 12×10^{-2} м. Диск изготовлен из закаленной инструментальной стали У10А, HRC 49–52. Такое сочетание материалов возможно использовать в перспективе в высокоточных нагруженных узлах трения двигателей внутреннего сгорания, авиационных двигателей, механизмах химической, атомной техники и др.

Перед проведением основных испытаний осуществлялась приработка образцов. Ее продолжительность T_n определяется экспериментально по стабилизации коэффициента трения. Приработка является одним из важных показателей трибологических свойств материалов, в процессе которой происходит оптимизация микрогеометрии и физико-механических свойств поверхностных слоев контактирующих материалов. Это в свою очередь приводит к стабилизации коэффициента трения и интенсивности изнашивания.

Влияние времени испытаний на коэффициент. В течение первых ~10 мин. испытаний происходила стабилизация трибологических процессов в зоне контакта сопряженных тел. Среднее значение коэффициента трения скольжения плавно повышалось от начальной величины $f_0 = 0,29$ до $f_{yc} = 0,39$ и оставалось стабильным в течение всего последующего времени испытаний. Отклонения значений коэффициента трения от f_{cp} находились в пределах $\Delta f = \pm 0,11$. После первых 3...5 мин испытаний наблюдалось образование и выделение из зоны контакта мелкодисперсных продуктов износа в виде тонких чешуек черно-синего цвета со среднестатистическими размерами 0.5...3 мкм. Эти чешуйки, по-

видимому, окислы железа, оседали на стальной поверхности диска, в котором располагались керамические образцы, и удерживались на нем магнитными силами вследствие его некоторой остаточной намагниченности. Остаточная намагниченность диска связана с технологией его изготовления – при шлифовании диск удерживался на подвижном столе шлифовального станка магнитными держателями.

Влияние скорости скольжения на коэффициент трения. Изучение влияния скорости скольжения на коэффициент трения f проводился при ступенчатом повышении скорости в диапазоне $v = 0,7 \dots 1,65$ м/с; нагрузке $P = 500$ Н ($p = 10$ МПа), (рисунок 1) ; режим трения – без смазки.

При увеличении скорости скольжения коэффициент трения снижался: при $P = 500$ Н – в 1,53 раза с $f_{yc} = 0,52$ м/с до $f_{yc} = 0,34$ м/с. В процессе проведения эксперимента происходил фрикционный разогрев трибосопряжения и при $v = v_{кр}$, $P = 500$ Н ($p = 10$ МПа) кристаллический образец начинал светиться. Нагрузке $P = 500$ Н ($p = 10$ МПа) соответствовала критическая скорость $v_{кр} = 1,41$ м/с; нагрузке $P = 936$ Н ($p = 18,6$ МПа) – $v_{кр} = 0,23$ м/с. Для этих режимов трения плотности тепловых потоков составляют:

$$P = 500 \text{ Н } (p = 10 \text{ МПа}), f = 0,52, v = 1,41 \text{ м/с} \rightarrow q = fpv = 7,33 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$$

$$P = 936 \text{ Н } (p = 18,6 \text{ МПа}), f = 0,63, v = 0,23 \text{ м/с} \rightarrow q = fpv = 2,69 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

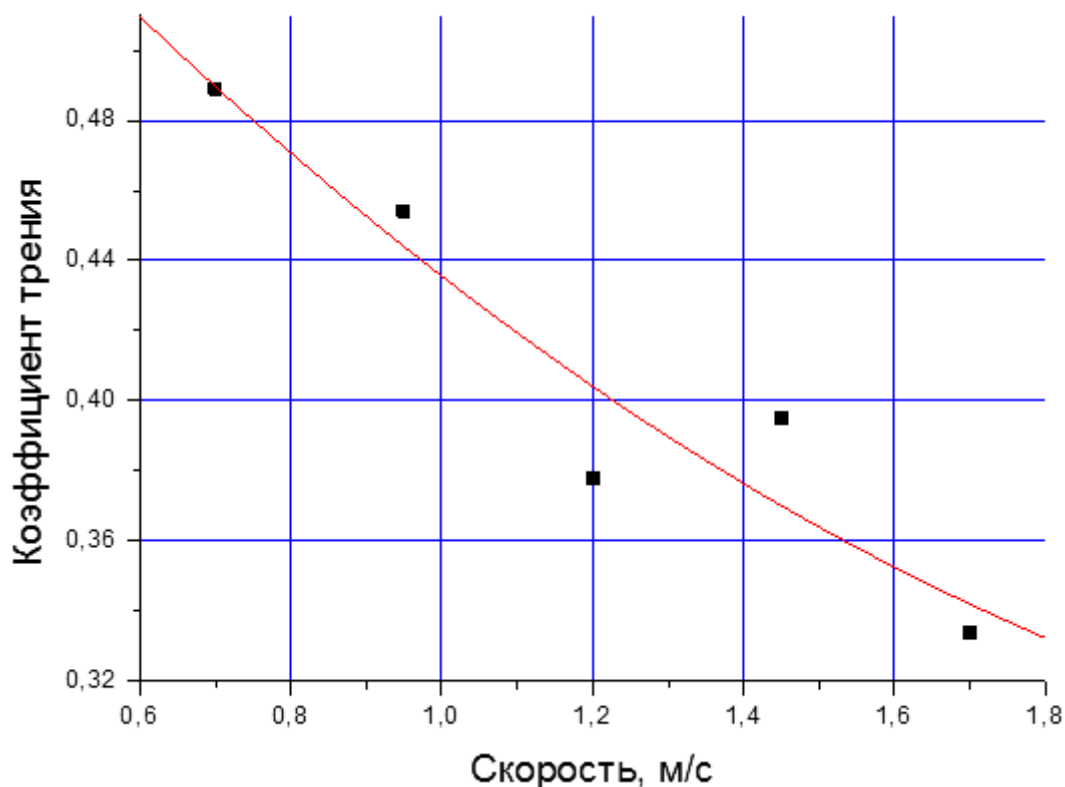


Рис. 1. Зависимость коэффициента трения f кристалла $ZrO_2-3 \text{ мол}\%Y_2O_3$ от скорости скольжения v при постоянном среднем контактном давлении $p=10 \text{ Мпа}$

Результаты испытаний:

- с ростом скорости скольжения в диапазоне $v = 0,7 - 1,65 \text{ м/с}$ коэффициент трения f снижается в $\sim 1,5 \dots 2$ раза;
- общий диапазон изменения коэффициента трения $0,32 < f < 0,63$.

«Падающий» характер зависимости $v = \varphi(v)$ можно объяснить влиянием температурного фактора. По мере увеличения скорости скольжения в контакте сопряженных тел происходит фрикционный разогрев образцов, снижение механической прочности поверхностных слоев и как следствие снижение прочности адгезионных связей на участках фактического касания сопряженных тел.

Влияние коэффициента взаимного перекрытия $K_{ВЗ}$ на коэффициент трения. Параметр $K_{ВЗ}$ – отношение поверхностей трения сопряженных деталей трения. Для выбранного нами модельного узла он равен $K_{ВЗ} = (\pi \cdot d^2/4)/(\pi \cdot D \cdot d) = d/4D$, где d – диаметр пальчикового образца, D – диаметр дорожки трения на дисковом образце. Этот параметр оказывает влияние на протекание тепловых процессов

при трении, а значит и на триботехнические характеристики исследуемых материалов. В нашем случае ($d = 8$ мм, $D = 30 \dots 102$ мм) в зависимости от выбора дорожки трения D , $K_{ВЗ}$ может изменяться в пределах $0,066 \leq K_{ВЗ} \leq 0,019$, т.е. в 3,47 раза.

Проведенные испытания по определению величины f на различных по диаметру дорожках трения диска D показали, что коэффициент трения f изменяется на 2...3%. Это означает, что для наших условий параметр $K_{ВЗ}$ не оказывает существенного влияния на проведение экспериментальных исследований.

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% диоксида церия, полученной методом спекания – $[(ZrO_2 + 17 \text{ мол}\% CeO_2); \text{спеченный}]$. Для этих испытаний из указанных материалов были изготовлены пальчиковые образцы: кристалл $ZrO_2 + 3 \text{ мол}\% Y_2O_3$ твердостью 13,1 ГПа; керамика $ZrO_2 + 17 \text{ мол}\% CeO_2$ твердостью 11,5 ГПа. В качестве контртела использовался диск [У 10 А, HRC 49–52]. Результаты испытаний приведены на рисунке 1а. Режимы испытаний: диапазон изменений среднего контактного давления $2,5 < p < 25$ МПа; скорость скольжения $v = 0,2$ м/с; режим трения – без смазки.

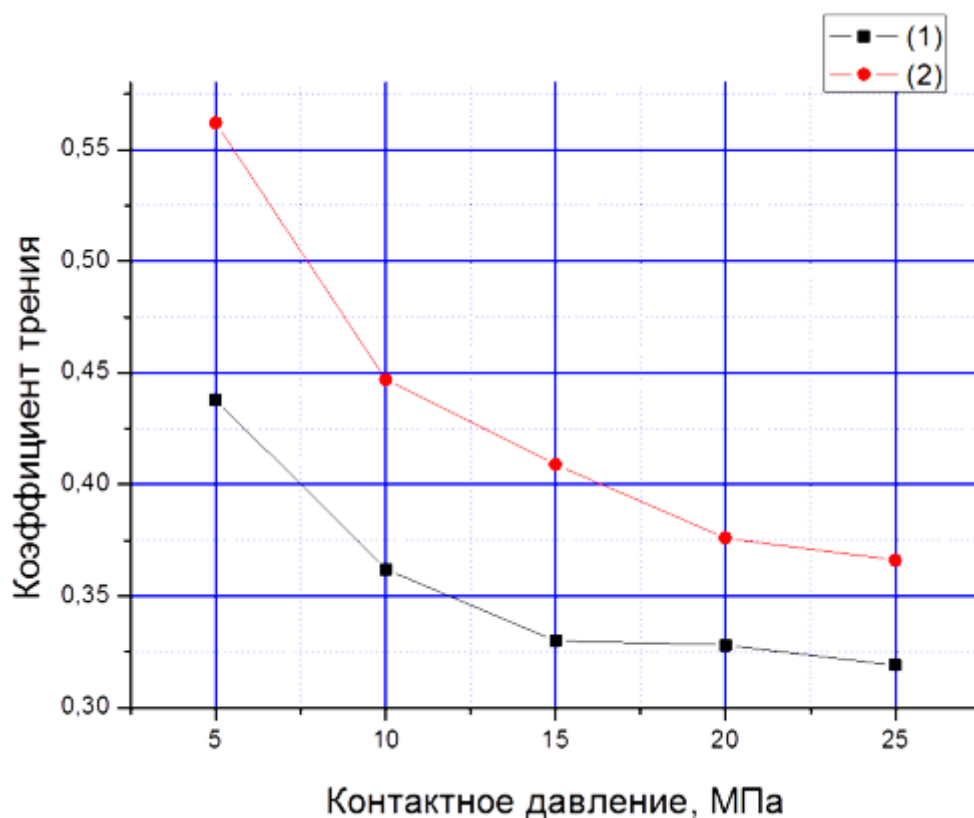


Рис. 1а. Зависимость коэффициента трения f от контактного давления p :
1 – кристалл; 2 – керамика. Контртело (диск) – Контртело (диск) – У 10 А

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 сравнении с лейкосапфиром [22, с. 46] антифрикционность кристаллов ЧСЦ существенно выше. 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], и практически совпадают со значениями f для алмаза поликристаллического (в диапазоне $5 < p < 25$ МПа).

Влияние материала контртела на коэффициент трения. Испытания проводились при тех же самых режимах, что и в предыдущем эксперименте ($2,5 < p < 25$ МПа; $v = 0,2$ м/с; режим трения – без смазки), но контр – тело (диск) было

изготовлено из керамики $ZrO_2 + 17\text{мол}\%CeO_2$ Результаты испытаний проиллюстрированы на рисунке 2.

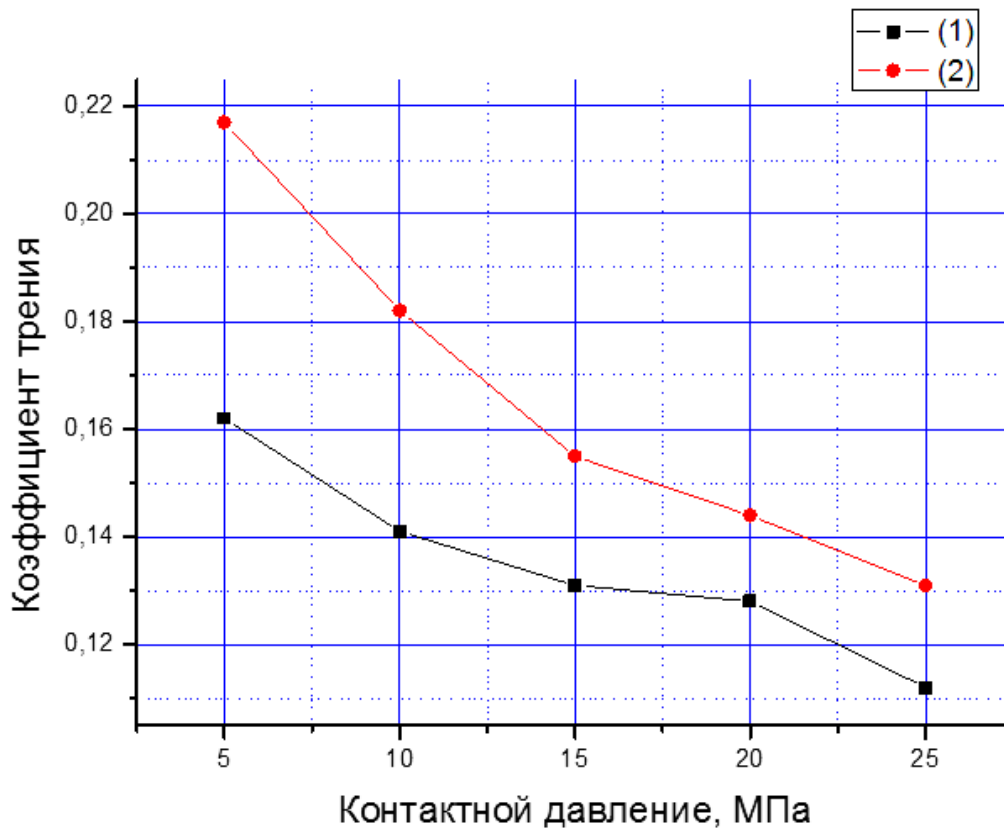


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения f от контактного давления p :

1 – кристалл; 2 – керамика. Контртело (диск) – керамика

Установлено, что с ростом среднего контактного давления коэффициенты трения f для обоих трибосопряжений снижаются:

$[ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный}] - [ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный}]$ – от $f = 0,25$ до $f = 0,135$;

$[\text{кристалл } (ZrO_2 + 3 \text{ мол}\%Y_2O_3)] - [ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный}]$ – от $f = 0,26$ до $f = 0,125$.

Выводы

1. Практически во всем диапазоне средних контактных давлений значения коэффициентов трения для трибосопряжения $[ZrO_2 + 3 \text{ мол}\%Y_2O_3] - [(ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный})]$ несколько ниже, чем для трибосопряжения $[ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный}] - [ZrO_2 + 17 \text{ мол}\%CeO_2, \text{ спеченный}]$. 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.

2. Основные перспективы применения наноструктурированных кристаллов ЧСЦ видятся в замене в опорах на камнях широко применяемых кристаллов лейкосапфира (точное приборостроение, часовая промышленность, микромеханические устройства в микроэлектронике, где наибольший размер менее 30 мм), что обеспечит повышение точности и ресурса работы прецизионных приборов. Керамика ЧСЦ получаемая методами порошковой металлургии перспективна для относительно больших деталей узлов трения (наибольший размер более 30 мм).

Список литературы

1. Алисин В.В. Новые конструкционные материалы на основе наноструктурированных кристаллов диоксида циркония // Развитие науки и образования: Коллективная монография (Чебоксары, 28 авг. 2018 г.) / Гл. ред. Э.Н. Рябина. – Чебоксары: ИД «Среда», 2018. – С. 5–15.

2. Алисин В.В. Трибологические свойства легированных наноструктурированных кристаллов диоксида циркония // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы Международной научно-практической конф. – СПб.: СПбФ НИЦ МС, 2018. – С. 20–23.

3. Алисин В.В. Трибологические свойства циркониевой керамики в области высоких температур // Современные тенденции развития естествознания и технических наук: Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции 29 марта 2018 г. / Под общ. ред. Е.П. Ткачевой. – Белгород: ООО Агентство перспективных научных исследований (АПНИ), 2018. – С. 134–138.

4. Борик М.А. Структура и свойства кристаллов твердых электролитов $(zrO_2)_{1-x-y}(sc_2O_3)_x(y_2O_3)_y$ ($x = 0.035-0.11$; $y = 0-0.02$), полученных направленной кристаллизацией расплава / М.А. Борик, С.И. Бредихин, В.Т. Бублик [и др.] // Электрохимия. – 2016. – Т. 52. – №7. – С. 733–740.

5. Высокотемпературные исследования триботехнических материалов перспективных для долговременной работы на поверхности Венеры / В.В. Алисин, М.Н. Рошин, А.И. Лукьянов А.И [и др.] // Перспективные методы поверхностной обработки деталей машин. – М.: Ленанд, 2019. – С. 385–392.
6. Герасимов С.А. Структура и износостойкость азотированных конструкционных сталей и сплавов / С.А. Герасимов, Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 518 с.
7. Дроздов Ю.Н. Метод выбора керамических материалов для пары трения кулачок-толкатель / Ю.Н. Дроздов, А.Г. Хуршудов, В.И. Панин // Трение и износ. – 1993. – №14. – С. 494–500.
8. Дроздов Ю.Н. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов. – М.: Эко-Пресс, 2010. – 604 с.
9. Королев П.В. Структурные изменения на поверхности трения и триботехнические характеристики керамики ZrO₂-Y₂O₃ / П.В. Королев, Н.Л. Савченко, Е.В. Быков [и др.] // Трение и износ. – 2000. – №21. – С. 494–500.
10. Методы испытания на трение и износ: Справ. изд. / Л.И. Куксенова, В.Г. Лаптева, А.Г. Колмаков, Л.М. Рыбакова. – М.: Интернет нжиниринг, 2001. – 152 с.
11. Новые материалы / Под ред. Ю.С. Карабасова. – М.: Мисис, 2002. – 736 с.
12. Хандельсман Ю.М. Камневые опоры. – М.: Машиностроение, 1973. – С. 152.
13. Borik M.A. Features of the local structure and transport properties of zro₂-y₂o₃-eu₂o₃ solid solutions / M.A. Borik, E.E. Lomonova, V.A. Myzina, et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2019. – Т. 770. – P. 320–326.
14. Fisher T.E. Influence of fracture toughness on the wear resistance of yttria-doped zirconium oxide / T.E. Fisher, M.P. Anderson, S. Jahanmir // J. Amer. Ceram. Soc., 1989, – №2. – P. 252–257.
15. Ho-Chieh Wong. Frictional characteristics of ceramics under water-lubricated conditions / Ho-Chieh Wong, Noritsugu Umehara, Koji Kato // Tribology letters. – 1998. – №5. – P. 303–308.

16. Kerkwijk B. Tribological properties of nanoscale alumina-zirconia composites / B. Kerkwijk, A.J.A. Winnubst, H. Werweij et al. // *Wear*. – 1990. – №225–229. – P. 1293–1302.

17. Medevielle A., Tevenot F., Treheux F. Wear resistance of zirconias. Dielectrical approach / A. Medevielle, F. Tevenot, F. Treheux // *Wear*. – 1997. – №213. – P. 13–20.

18. Metselaar H.C.S. Wear of ceramics due to thermal stresses: a thermal severity parameter / H.C.S. Metselaar, B. Kerkwijk, E.J. Mulder et al. // *Wear*. – 2002. – №249. – P. 962–970.

19. Stachowiak G.B. Wear and friction characteristics of ion-implanted zirconia ceramics/ G.B. Stachowiak, G.W. Stachowiak, P. Evans // *Wear*. – 2000. – №241. – P. 220–227.

20. Tribology – Lubrication, Friction and Wear / ed. by. I.V. Kragelsky and V.V. Alisin. – London: Mir Publisher and Professional Engineering Publishing Limited, 2001. – 948 p.

21. Ye R. Transformation and fracture of ZrO₂-based ceramics at low temperatures / R.Q. Ye, J.H. Zhao, Z. Zhang, L.F. Li // *Material Letters*. – 1998. – №36. – P. 29–32.

22. Yusuke Morita. Wear properties of zirconia/alumina combination for joint prostheses/ Yusuke Morita, Kenichi Nakata, Ken Ikeuchi // *Wear*. – 2003. – 254. – P. 147–153.

Алисин Валерий Васильевич – канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУН «Институт машиноведения им А.А. Благонравова РАН», Россия, Москва.
