

РАСЧЕТ ИЗНАШИВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОЙ КЕРАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕОРЕТИКО-ИНВАРИАНТНОГО МЕТОДА

© 2006 Ю.Н. Дроздов, Т.М. Савинова

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

Предложена расчетная зависимость для прогнозирования износа керамических материалов, работающих в сухую или в режиме граничной смазки при скольжении.

Введение. Во многих случаях применение традиционных материалов не отвечает современным требованиям, предъявляемым к эксплуатационным свойствам деталей машин, работающих при высоких скоростях, температурах, нагрузках, в агрессивных средах. Одним из наиболее перспективных классов материалов для задач машиностроения являются конструкционные керамические материалы.

Использование при создании технической керамики веществ, отличающихся наиболее высокими температурами плавления, модулями упругости, химической стабильностью и высокотемпературной прочностью позволяет получить комплекс свойств, который принципиально недостижим в металлических сплавах.

В узлах трения наиболее часто используются нитрид кремния (Si_3N_4), карбид кремния (SiC), окись алюминия (Al_2O_3), окись циркония (ZrO_2) и др. Высокая твердость, жаропрочность, коррозионная и абразивная стойкость, низкий удельный вес, а также высокая (до $30 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$) вязкость разрушения отдельных типов керамик обеспечили разнообразное применение этих материалов в технике.

Из керамических материалов изготавливают детали газотурбинных двигателей и двигателей внутреннего сгорания, подшипников шаровых и вибрационных мельниц, механических уплотнений, химического оборудования, а также трубы, сопла, валы, передаточные механизмы, режущие инструменты. При эксплуатации узлов из керамики в условиях высоких и низких температур, вакуума применяют твердые смазки в качестве покрытия и наполнителя сепараторов (серебро, свинец, дисульфид молибдена, PTFE и др.).

Проблемы широкого использования керамики в качестве конструкционного материала обуславливают необходимость проведения работ по прогнозированию ее трибологических характеристик.

В зависимости от условий трения керамики механизм износа может быть различным: абразивным, адгезионным, усталостным, эрозионным и др., с хрупким и пластическим разрушением. Прогнозирование трибологических характеристик керамических материалов представляет сложную проблему. Износ керамики зависит от геометрии контакта, свойств материала, шероховатости поверхности, особенностей микроструктуры, параметров нагружения, смазки и окружающей среды. Значительную трудность представляет поиск теоретических моделей, учитывающих сложный механизм изнашивания керамики и компонент хрупкого контактного разрушения.

Существующие на сегодняшний день теоретические модели изнашивания либо остаются слишком упрощенными, не отражающими многообразия процессов, происходящих при изнашивании технической керамики, либо не могут быть доведены до конкретных расчетных выражений. Поэтому большинство исследователей посвящают свои работы изучению качественных и количественных закономерностей, опираясь на эксперимент.

Обобщенные факторы изнашивания керамики. При исследовании трибологических характеристик узла трения необходимо учитывать, что процесс изнашивания материалов представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных физических, химических и механических явлений, протекающих на поверхностях взаимодействующих тел. При разработке алгоритмов

расчета на износ необходимо учитывать: влияние смазочного слоя, стохастический характер поверхностных факторов, наличие значительных градиентов полей напряжений, деформаций, температур, диффузионных процессов массопереноса, изменение микрогеометрии трущихся тел и т.д.

Вследствие отсутствия исходных уравнений, содержащих связи всех перечисленных величин, для процесса моделирования используем методы теории подобия и анализа размерностей физических параметров, характеризующих трение и изнашивание тел. Анализ размерностей исходных параметров, определяющих процесс, оказывается полезным, когда физическая сложность механизма явлений и недостаточная изученность основных закономерностей не позволяют получить достаточно полное математическое описание процесса. Данный подход базируется на уравнениях эластогидродинамической теории смазки, химической кинетики, контактной задачи теории упругости и теории прочности. Он учитывает теплофизические, адсорбционные и диффузионные процессы [1, 2].

Объемную интенсивность изнашивания технической керамики $I_V = dV/dS$ (где V – объемный износ, m^3 ; S – путь трения, м) с учетом физико-химического воздействия смазочного материала (окружающей среды) можно представить выражением

$$I_V = \alpha \Phi_1^a \Phi_2^b \Phi_3^c \Phi_4^d \Phi_5^e \Phi_6^g, \quad (1)$$

где $\Phi_1 = fp/HV$ – фактор, характеризующий напряженное состояние контакта и безразмерную площадь фактического касания тел (здесь f – коэффициент трения; p – нормальное напряжение сжатия; HV – твердость по Виккерсу менее твердого из контактирующих материалов). Данный фактор успешно используется при оценке абразивного и адгезионного изнашивания.

$\Phi_2 = E(R_a)^{1/2}/K_{1c}$ – фактор, характеризующий хрупкость керамики, влияние шероховатости и модуля упругости (здесь E – модуль упругости керамики; R_a – среднеарифметическое отклонение профиля более твердого тела; K_{1c} – вязкость разрушения керамики).

$\Phi_3 = d\sigma_{II}^2/K_{1c}^2$ – фактор, характеризую-

ющий влияние размера зерна, пластической зоны в области трещины и вязкость разрушения (здесь d – средний размер зерна керамики; σ_{II} – прочность на изгиб керамики). Чем он больше, тем ближе разрушение к хрупкому, чем меньше – к вязкому.

$\Phi_4 = RT/E_x$ – фактор, характеризующий химическую модификацию поверхностей трения (здесь T – абсолютная температура в контакте; R – универсальная газовая постоянная; E_x – энергия активации распада межатомных связей поверхностных соединений). Химическая модификация поверхностей препятствует схватыванию и повышенному изнашиванию в тяжелых режимах трения. Износостойкость будет зависеть от соотношения скорости истирания модифицированных слоев и их образования в процессе трения, от их физико-механических свойств, размеров.

$\Phi_5 = q\delta_T/(\lambda T_{кр})$ – комплекс, характеризующий влияние температурного градиента и теплового пограничного слоя (здесь q – плотность теплового потока; δ_T – толщина теплового пограничного слоя; λ – коэффициент теплопроводности материала; $T_{кр}$ – критическая температура).

$\Phi_6 = h/\chi$ – комплекс, характеризующий относительную толщину смазочного слоя в контакте (здесь h – толщина смазочного слоя; χ – характерный размер режущей абразивной частицы или приведенный размер шероховатости).

α, a, b, c, d, e, g – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Однако определение значений реальных контактных напряжений в узлах трения представляет значительную трудность. В связи с этим, при прогнозировании износостойкости керамики вместо напряжения сжатия p будем рассматривать параметр среднего контактного давления

$$\bar{p} = \frac{N}{A_c},$$

где N – нормальная нагрузка; A_c – контурная площадь.

В литературных источниках достаточно широко представлены данные по износу керамических материалов, работающих всухую или в режиме граничной смазки, что

позволяет рассматривать выражение для объемной интенсивности изнашивания керамики (1), работающей при таких режимах в виде (2):

$$I_V = \alpha \left(\frac{f\bar{P}}{HV} \right)^a \left(\frac{E\sqrt{R_a}}{K_{lc}} \right)^b \left(\frac{d\sigma_{II}^2}{K_{lc}^2} \right)^c \left(\frac{RT}{E_x} \right)^d \left(\frac{q\delta_T}{\lambda T_{кр}} \right)^e$$

На основе обработки экспериментальных данных по износу 4-х типов керамических материалов (Al_2O_3 , Si_3N_4 , SiC , ZrO_2), работающих всухую или в режиме граничной смазки, были получены следующие коэффициенты:

$$a = 0,8; b = 0,64; c = 0,18; d = 1; e = 0,14.$$

Величина коэффициента α будет зависеть от вида керамического материала, технологии его получения и обработки, схемы испытаний.

Сопоставление расчетного выражения (2) с некоторыми экспериментальными данными и соответствующие значения коэффициентов корреляции и коэффициентов α представлены ниже.

Исследования на трение и износ керамических материалов в паре с металлическими при скольжении в среде минерального масла [3]. Эксперименты проводились при трении плоского керамического образца по стальному ролику в моторном масле М-10-Г₂к с температурой $95 \pm 5^\circ$. Материалом ролика служила сталь 18ХГТ, плоские образцы изготавливались из карбида и нитрида кремния. Путь трения составлял 1,8 км, скорость скольжения $v_{ск} = 0,25$ м/с. Эксперимент проводился на 3-х уровнях нагрузки: 1338,25 Н; 1725,15 Н; 1976,9 Н. Износ плоских образцов фиксировался путем снятия профилограмм поперек дорожки трения. Сопоставление экспериментальных данных по величинам интенсивности изнашивания испытанной керамики и результатов расчета по выражению (2) представлено на рис. 1.

Испытания на изнашивание покрытий из циркониевой керамики при сухом скольжении [5]. Эксперименты проводились по схеме «шарик-диск». Материал шарика: SiC , материал диска: алюминиевый сплав с покрытием ZrO_2 , нанесенным методом плазменного напыления.

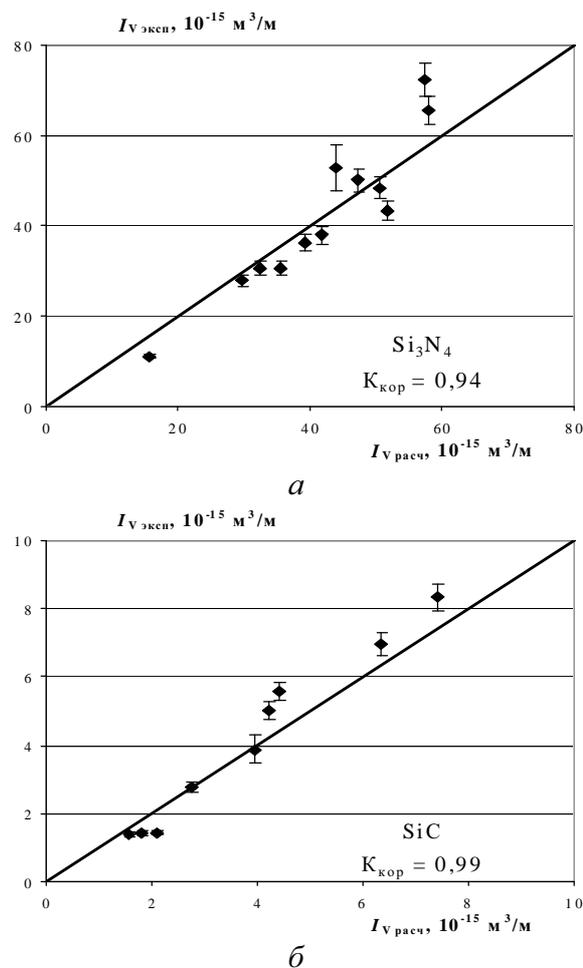


Рис.1. Сопоставление экспериментальных данных по интенсивности изнашивания керамики и результатов расчета по выражению (2). Коэффициент $\alpha = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{м}$ (а); $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^3/\text{м}$ (б)

Исследования Метселара (H.S.C. Metselaar) на изнашивание циркониевой керамики при сухом скольжении [4]. Эксперименты проводились по схеме «шарик-диск». Материал шарика: Al_2O_3 , материал диска: ZrO_2 . Нагрузка изменялась от 3 до 12 Н, скорость скольжения $v_{ск}$ от 0,1 до 0,5 м/с. Величина объемного износа определялась профилографированием дорожки трения на диске.

Толщина покрытий составляла 350 мкм. Эксперимент проводился на 3-х уровнях нагрузки: 30 Н; 50 Н; 80 Н. Скорость скольжения $v_{ск} = 0,1$ м/с.

Величина объемного износа определялась профилографированием дорожки трения на диске. Сопоставление экспериментальных данных по величинам интенсивности изнашивания керамического покрытия и результатов расчета по выражению (2) представлено на рис. 2.

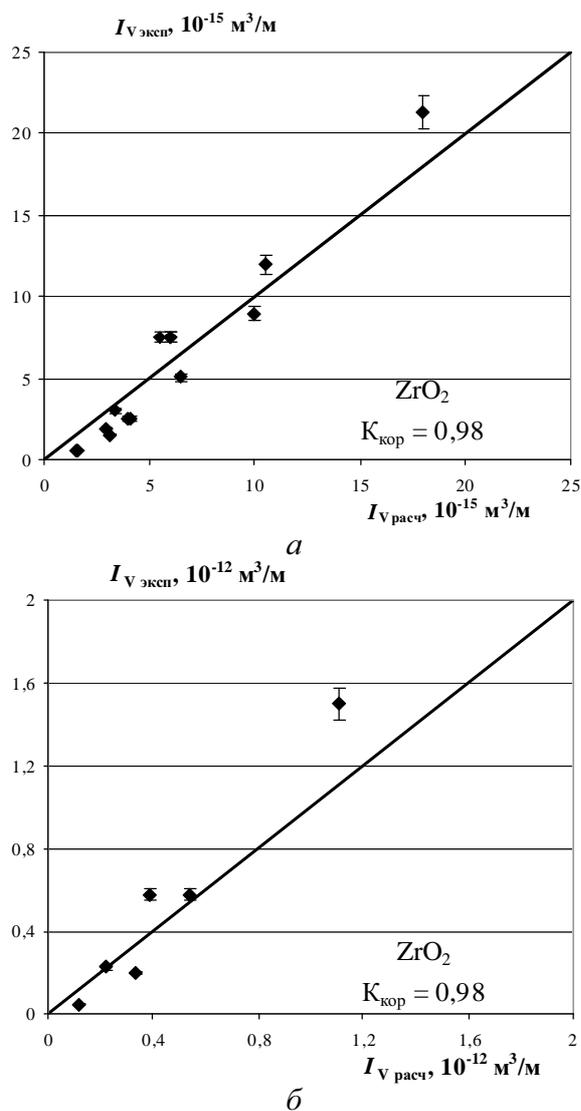


Рис.2. Сопоставление экспериментальных данных по интенсивности изнашивания керамики (а) и керамического покрытия (б) с результатами расчета по выражению (2).
 $\alpha = 3,51 \cdot 10^{-8} \text{ м}^3/\text{м}$ (а); $\alpha = 5,5 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{м}$ (б)

Согласие экспериментов с расчетными данными, полученными из представленного выражения для интенсивности изнашивания технической керамики (2), свидетельствует об адекватности методического подхода, и позволяет рекомендовать предложенную расчетную зависимость для прогнозирования износа керамических материалов, работающих всухую или в режиме граничной смазки при скольжении.

Список литературы

1. Дроздов Ю.Н. Ключевые инварианты в расчетах интенсивности изнашивания при трении // Машиноведение. 1980. №2. С. 93-98.
2. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин: Учеб. Пособие для машиностр. спец. Вузов. – М.: Высш. Шк., 1991. – 319 с.
3. Дроздов Ю.Н., Хуршудов А.Г., Панин В.И. Метод выбора керамических материалов для пары трения кулачок-толкатель // Трение и износ. – 1991. – Т. 14. – №3. – С. 479-486.
4. Metselaar H.S.C., Winnubst A.J.A., Schipper D.J. Thermally induced wear of ceramics // Wear. – 1999. – V. 225-229. – Pp. 857-861.
5. Le T.H., Kim S.S., Chae Y. Sliding wear behavior of plasma sprayed Zirconia coating. International Symposium on High-Performance Tribo-system. Daegu, Korea, 2004.

TECHNICAL CERAMICS WEARING CALCULATION BASED ON INVARIANT-THEORETIC METHOD

© 2006 Y.N. Drozdov, T.M. Savinova

Advanced ceramic materials are increasingly being used in practice. Forecasting of tribological performance of ceramics is a very complicated problem due to the sophisticated wear mechanisms of ceramics and its fracture behavior. This paper develops wear prediction method for this class of materials on the basis of theoretical – invariant method.