

УДК 622.268.8:621.4

А.П. Вержанский, проф., докт.техн.наук, Островский М.С., проф., докт.техн.наук, Шубина Н.Б., к.т.н., МГГУ

5. Износостойкость конструкционной керамики в горном оборудовании.

Рассмотрено применение конструкционных керамик для деталей высоко нагруженных узлов трения горных машин и оборудования; приведены свойства и современные способы повышения износостойкости, прочности и трещиностойкости.

Ключевые слова: конструкционная керамика, применение, износостойкость, трещиностойкость, перспективные материалы

Using of the constructional ceramic and ceramic composites for high loading pair of friction of mining machines and equipment is considered; promising methods for increase of strength property, wear-resistance and crack resistance are presented.

Key words: constructional ceramic, using, wear resistance, crack resistance, perspective materials.

Долговечность, безопасность горных машин и оборудования, работающих в тяжелых условиях (высокие нагрузки, агрессивные среды), в значительной степени определяется работоспособностью узлов пар трения, для которых, в свою очередь, определяющим фактором является правильный выбор материала и его обработки.

Материал для этих деталей должен обладать высокой прочностью, трещиностойкостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью, технологичностью и экономичностью.

Одним из наиболее перспективных классов материалов, обеспечивающих указанные требования эксплуатации, являются конструкционные керамические материалы.

В узлах трения наиболее часто используют нитрид кремния Si_3N_4 , карбид кремния SiC , оксид алюминия Al_2O_3 , оксид циркония ZrO_2 и др.

Перспективность применения керамики обуславливают следующие факторы:

- возможность обеспечивать различные свойства деталей в соответствии с требованиями условий эксплуатации благодаря способности работать в условиях высоких давлений, температур, агрессивных сред;
- низкий коэффициент трения, пониженный удельный вес и, соответственно, меньшая масса изделий;

- меньшая энергоемкость и более высокая экологичность процесса получения керамики по сравнению с металлическими материалами.:

- широкая доступность сырья.

Применение конструкционных керамик в горнодобывающей промышленности и горном машиностроении приведено в табл. 1.

Таблица 1.

Применение конструкционных керамик.

<i>Детали</i>	<i>Керамика</i>	<i>По данным</i>
Детали двигателя: выхлопной клапан, гильза, головки поршней, гильза цилиндра, рычаг, ротор турбокомпрессора	Si ₃ N ₄ SiC	[2]
Детали насосов: клапана и уплотнения	SiC	[3]
Подшипники высокооборотных машин (компрессоров, обрабатывающих центров), работающие при повышенной температуре и недостатке смазки	SiC Si ₃ N ₄	[17]
Торцевые уплотнения погружных насосов и мешалок	ZrO ₂	
Детали дизельного двигателя: цилиндры (облицовка) и др.	ZrO ₂	[4]
Торцевые уплотнения центробежных насосов для перекачки абразивосодержащих жидкостей горнодобывающих производств	Si ₃ N ₄ , SiC Самосвязанный SiC, ZrO ₂ частично стабилизированный	[5]
Подшипники скольжения и подпятники центробежных насосов горнодобывающих производств	SiC Si ₃ N ₄	[5]
Шаровые краны, вентили, заслонки	Al ₂ O ₃ Б6 (96% Al ₂ O ₃)	[5]

Детали поршневых двигателей: накладки поршня, вставки гильзы цилиндра, детали клапанного механизма	ZrO ₂ SiC, Si ₃ N ₄ , Горячепрессованный Si ₃ N ₄ с уплотняющими оксидами	[5]
Насадки для промывочных узлов буровых долот, горловины насосов	МВ-2 (30% WC, 40% TiC, связка Ni,Mo)	[5, 7]
Фильтры	Композиты на основе Al ₂ O ₃ , SiC	[6]
Плунжеры и кольца для шахтных насосов, торцевые уплотнения, подшипники скольжения Si ₃ N ₄ .	Al ₂ O ₃ , SiC; Композиты, содержащие MoO ₃ , Si ₃ N ₄	[5]
Плунжеры маслостанции	ZrO ₂ + 3% Y ₂ O ₃	[7]
В горнодобывающей промышленности в конвейерах, подшипниках, ножах скреперов. Седла клапанов, поршней, головок поршней	90% ZrO ₂ , 10% Y ₂ O ₃ Si ₃ N ₄	[12]

Однако широкое применение конструкционной керамики ограничивается ее сравнительно высокой хрупкостью и пониженной трещиностойкостью. Дефекты поверхности, неоднородность структуры способствуют образованию и распространению трещин в керамических материалах. Увеличивают опасность хрупкого разрушения увеличение размеров деталей, понижение температуры, концентраторы напряжений, динамические нагрузки, развитие процессов усталости и другие факторы.

Прогнозированию интенсивности изнашивания керамики посвящено большое количество работ. На основании теоретических методов и экспериментальных исследований разработаны зависимости определения интенсивности изнашивания от шероховатости поверхности [12], от твердости, нагрузки на абразивную частицу и длину ее пути [13], от максимальных растягивающих напряжений и температуры в контакте [14].

Более полно учитывают весь комплекс взаимосвязанных физических, химических и механических явлений, протекающих на поверхностях взаимодействующих тел в процессе

износа керамических материалов, учитывают обобщенные характеристики изнашивания [15,16]:

$$I_V = \alpha * \left(\frac{f_p}{HV}\right)^a * \left(\frac{E\sqrt{Ra}}{K_{1c}}\right)^b * \left(\frac{d\sigma_H^2}{K_{1c}^2}\right)^c * \left(\frac{RT}{E_X}\right)^d * \left(\frac{q\delta_T}{\lambda T_{кр}}\right)^e \quad (1)$$

Обобщенные зависимости позволяют учитывать механические, физико-химические и геометрические факторы изнашивания:

E – модуль упругости, K_{1c} – вязкость разрушения, Ra – среднеарифметическое отклонение профиля, d – размер зерна, σ_H – прочность на изгиб, T – температура в контакте, R – универсальная газовая постоянная, p – среднее контактное давление, f – коэффициент трения, HV – твердость по Виккерсу, q – плотность теплового потока, δ – толщина теплового пограничного слоя, λ – коэффициент теплопроводности, $T_{кр}$ – критическая температура, h – толщина смазочного слоя, χ – размер режущей абразивной частицы.

Из приведенной зависимости очевидно весьма существенное влияние на износ керамики: твердости HV , вязкости разрушения K_{1c} , прочности на изгиб σ_H , размера зерна d и шероховатости Ra .

Повышению твердости, прочности на изгиб, вязкости разрушения и снижению размера зерна, шероховатости способствуют совершенствование технологии производства и обработки керамики:

- использование композиционных материалов с керамической матрицей, или армированных керамическими волокнами либо дисперсными частицами, что обеспечивает существенное повышение вязкости разрушения;

- формование методом горячего изостатического прессования и трансформационное упрочнение (старение);

- применение ультрадисперсных порошков исходных материалов;

- сухое компактирование нанопорошков с применением ультразвукового воздействия при прессовании, магнитно-импульсное прессование и алмазное шлифование изделий, обеспечивающие получение бездефектных поверхностей;

- обработка поверхности изделий различными методами, включая нанесение керамических покрытий и синтез металлокерамического защитного слоя на поверхности трения.

Таким образом строение и свойства керамики формируются на всех стадиях технологии, от синтеза исходных порошков до окончательной термической обработки и шлифования.

В табл.2 приведены сравнительные данные характеристик прочности, трещиностойкости и размера зерна, в значительной мере определяющие износостойкость существующих и полученных по современным технологиям изготовления и обработки конструкционных керамик.

Таблица 2

<i>Материал</i>	<i>$\sigma_{и}$, МПа</i>	<i>K_{Ic}, МПа·м^{1/2}</i>	<i>По данным</i>
Si ₃ N ₄	450-600	3 - 5	[1]
Реакционносвязанный Si ₃ N ₄	200	2,5	[16]
Уплотненный Si ₃ N ₄	500	5,5	[16]
Горячепрессованный Si ₃ N ₄	830	7,9	[16]
Si ₃ N ₄ модифицированный MgO	690	6,5	[16]
Композиционный материал (КМ) на основе Si ₃ N ₄ армированный SiC (35%)	600-1200	9 - 11	[11]
SiC	250	4	[11]
Спеченный SiC	370	5,4	[16]
Самосвязанный SiC	500	4	[5]
SiC, полученный горячим изостатическим прессованием	800	5,5 - 7	[5]
КМ на основе SiC, армированный волокнами SiC	450	10	[11]
КМ на основе SiC модифицированный Si ₃ N ₄	260	2,5	[16]
Al ₂ O ₃	450	1 -2,5	[1]
КМ на основе Al ₂ O ₃ упрочненный дисперсными частицами ZrO ₂ (до 30%)	1500	До 15	[1, 6]
Наноккомпозит на основе Al ₂ O ₃ / SiC	1520	4,8	[10]
ZrO ₂	450	5	[1]
Нанокристаллический ZrO ₂ стабилизи-рованный 5% Y ₂ O ₃	900	14	[1]
КМ трансформационно упрочненный на основе ZrO ₂ частично стабилизированный MgO	До 690	7 – 15	[11]
КМ на основе ZrO ₂ + 30% ZrO ₂ (дисперс-ная фаза)	До 1500	15	[1]

ZrO ₂ частично стабилизированный Y ₂ O ₃ с размером зерна 100мкм	500 -700	8 - 10	[18]
ZrO ₂ стабилизированный Y ₂ O ₃ , с размером зерна 15 нм	900 -1500	15 - 20	[1, 18]

Как следует из табл.2, наиболее высокой прочностью на изгиб и трещиностойкостью и, как следует из (1), более высокой износостойкостью обладают нанокерамические материалы. Высокая стоимость этих материалов и достаточно сложное прогнозирование интенсивности изнашивания (1) не позволяет однозначно решить вопрос выбора материала для конкретных пар трения, несмотря на широкий выбор конструкционных керамик. Не маловажным фактором является широкая доступность и невысокая стоимость исходных материалов для производства керамики.

Поэтому для принятия решения по выбору материала необходимо проводить стендовые и промышленные испытания сборочных единиц.

В горном машиностроении проблема повышения износостойкости пар трения весьма актуальна. На простой забоев из-за отказов гидросистем оборудования приходится более 30% потерь рабочего времени. Наиболее изнашиваемыми сборочными единицами, лимитирующими ресурс всего насоса, является плунжерная пара и подшипниковые опоры скольжения кривошипно – шатунного механизма.

Для решения проблемы повышения долговечности этого оборудования были выполнены следующие работы:

- выбрана номенклатура деталей, подлежащих изготовлению из керамики;
- разработаны технические требования на технологию изготовления силовых элементов гидросистем шахтной механизированной крепи из керамики;
- разработана рациональная конструкция уплотнительных узлов высоконапорных насосов кривошипно-шатунного типа;
- испытаны пары трения погружных насосов типа ЭЦН и пары трения плунжерной системы насосов серии Н-200К, применяемых для разрыва нефтяных пластов для повышения нефтеотдачи скважин;
- изготовлены из керамики втулки плунжеров шахтных насосов высокого давления типа УНП 55 – 250;
- разработана технология изготовления и сборки клапанной пары РМ1 из керамики и изготовлено несколько комплектов клапанных пар из керамики.

С целью приближения испытаний на износ к реальным условиям эксплуатации пар трения подшипников скольжения погружных насосов, изготовленных из различных материалов (применяемых и рекомендуемых), испытания проводились по разработанному в МГГУ вибрационному методу оценки триботехнических свойств. Методика предусматривает испытания в условиях граничного режима трения, который является более жестким, чем гидродинамический режим. Граничный режим, при котором трущиеся поверхности оказываются разделенными тонкой пленкой смазки (порядка сотых долей мкм), требует минимизации скорости относительного движения при испытаниях. Результаты испытаний, представленные на рис.1, свидетельствуют о преимуществах керамических материалов.

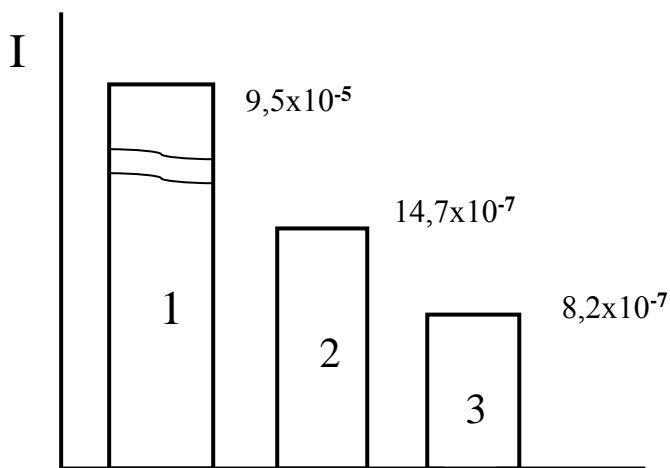


Рис.1. Интенсивность изнашивания

- 1 - стали 95X18,
- 2 - керамики $Al_2O_3 + MgO$,
- 3 - керамики $Al_2O_3 + ZrO_2$,

Сравнительные ресурсные испытания гидрораспределительной аппаратуры (клапанная пара, состоящая из клапана и седла) проводились на экспериментальном стенде в лаборатории гидропривода Гипроуглемаша.

Выполненные испытания позволили сделать следующие выводы:

1. Долговечность изготовленных и испытанных плунжеров с керамическими поверхностями в 50 раз выше, чем у плунжеров изготовленных из высоколегированной стали 95X18.
2. Коэффициент трения керамики на основе Al_2O_3 по керамике без смазки составил $f=0,33$; в тех же условиях сталь по стали имеет $f=0,5$, т.е. имеется явное преимущество керамики в плунжерных узлах.
3. Исследование качества поверхности (отсутствие дефектов, трещин, пор, величина шероховатости) показало наилучшие свойства у оксидной керамики.
4. Наиболее высокую твердость из исследованных керамик ЦМ – 322 ($Al_2O_3+0,2...0,4\%MgO$), 22XC ($Al_2O_3+0,5...1\%MgO$), Si_3N_4 , $Al_2O_3+ZrO_2$ имеет керамика $Al_2O_3+ZrO_2$, ее твердость близка к твердости рубина и составляет 2500 HV.

5. Наиболее износостойкой является керамика $Al_2O_3+ZrO_2$, однако это весьма дорогой материал и его применение оправдано для деталей, работающих при высоких температурах.

6. Интенсивность изнашивания пары трения керамика – керамика составляет $3,84 \times 10^{-8}$, а пары сталь – керамика – $23,5 \times 10^{-8}$.

7. Керамики имеют хорошую стойкость против коррозии, высокую теплостойкость и низкий удельный вес.

8. Стоимость керамики из диоксида алюминия ниже по сравнению со сталью 95Х18 в 5 раз. Однако получение деталей из тонкокристаллической керамики со стабильными механическими свойствами требует тщательно отработанной технологии. Сложность представляют процессы соединения с другими материалами и контроля.

9. Однако, отсутствие пластичности, чувствительность к надрезу, предрасположенность к хрупкому излому, низкая трещиностойкость, высокие затраты на финишную обработку поверхности и проблемы техники соединения керамики с другими материалами заставляют в каждом конкретном случае всесторонне рассматривать проблему.

Дальнейшую работу по замене металлических материалов для деталей пар трения в горных машинах и оборудовании целесообразно вести по следующим направлениям:

- использование композиционных материалов с керамической матрицей либо армированных керамическими волокнами или дисперсными включениями, что обеспечивает существенное повышение вязкости разрушения;

- применение ультрадисперсных порошков;

- применение силикатно-керамической композиции *форсан*, вводимой между трущимися поверхностями с помощью масла или пластичной смазки, образующей в процессе эксплуатации на поверхности трения слой металлокерамики, составляющий с поверхностью детали единое целое. Полученное покрытие имеет аномально низкий коэффициент трения (0,003 – 0,005) и обладает отличными защитными свойствами от *фреттинг-коррозии* [9].

- стендовые и промышленные испытания деталей горных машин и оборудования из керамик на основе нитрида и карбида кремния, изготовленных по прогрессивным технологиям.

Универсальной керамики не существует. Различия в ее составе, размере зерна, способов получения и обработки обуславливают значительное изменение свойств. Можно сказать, что нет предела совершенствованию материалов и керамических материалов, в

частности. И работы по применению керамических материалов для деталей горных машин, безусловно, должны быть продолжены.

Список литературы:

1. **Кульметьева В.Б., Порозова С.Е.** Керамические материалы: получение, свойства, применение. Пермь. 2009. - 237с.
2. What's ahead for ceramic in engine? Adv. mater and processing. Metal Progr. 1989, vol 134, 2, p. 11 – 14.
3. Snake pump made of fine ceramic. New technol. Japan, 1988, dec, p. 18.
4. **Poppes P.** Eng. Ceramic in West Germany. New mater and their appl. Proc. Just.. Phys. Conf. Warwick, 1987, 22 – 25, sept.
5. **Гаршин А.П. и др.** Машиностроительная керамика. СПб. 1997.-796с.
6. **Лукин Е.С. и др.** Современная оксидная керамика и области ее применения. «Конструкции из композиционных материалов».2007, №1.
7. **Даниленко И.А. и др.** Нанопорошки из оксида циркония и износостойкая керамика на их основе. «Конструкции из композиционных материалов». 2007, №1.
8. Тонкая техническая керамика. Под ред. Янагида Х. Пер. с японск. Под ред. Карклита А.К. М,1986.- 276с.
9. **Денисова Н.Е. и др.** Триботехнические материалы. Пенза, 2006. -264с.
10. **Баринов С.М., Шевченко В.Я.** Прочность технической керамики. М.,1996, - 159с.
11. Новые материалы. /Под ред. Ю.С.Карабасова. М. 2002, - 736с.
12. **Kim S.S., Kato K., Hokkirigawg K., Abe H.** Wear mechanism of ceramic materials in dry rolling friction //J. of Tribology. Trans. Of the ASME.- 1986, 108, 552-526.
13. **Evans A.G., Wilshaw T.R.** Quasi-static solid particle damage in brittle solids-1. Observations, analysis and implications // Acta Met. 1976. V24.-№10. – Pp.939-956.
14. **Hsu S.M., Ming Shen.** Wear prediction of ceramics // Wear. - 2004.- V.256.-Pp.867-878.
15. **Дроздов Ю.Н., Савинова Т.М.** Получение расчетных уравнений на изнашивание технической керамики на основе теоретико-инвариантного метода // Проблемы машиностроения и надежности машин. №2. 2006. С. 60-68.
16. **Ю.Н. Дроздов, Е.Г. Юдин, А.И. Белов.** Прикладная трибология (трение, износ, смазка)// Под. ред. Ю.Н. Дроздова. – М.: Эко-Пресс, 2010.-604с.
17. **Брагин В.Б., Иванов В.В., Хрустов В.Р. и др.** Износостойкость керамик с тонкой структурой на основе Al_2O_3 , допированного магнием, титаном или цирконием. // Перспективные материалы. – 2004. - №6. С48-56.

18. **Альмяшева О.В. и др.** Синтез и свойства нанокристаллических порошков на основе диоксида циркония. Сб. науч.тр. «Химия поверхности и синтез низкоразмерных систем» / Под ред. А.А. Малыгина. СПб.: СПб ГТИ. 2002. С.13-20.