

ПОЛУЧЕНИЕ ПАР ТРЕНИЯ ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА СИСТЕМЫ TiC-SiC

OBTAINING FRICTION PAIRS OF MECHANICAL SEALS MADE OF COMPOSITE MATERIAL OF THE TiC-SiC SYSTEM

М.Н. КАЧЕНЫК, К.Т.Н.

А.А. СМЕТКИН, К.Т.Н.

О.В. СОМОВ, К.Т.Н.

ФГБОУ ПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь, Россия, max@pm.pstu.ru

M.N. KACHENYUK, PhD in Engineering

A.A. SMETKIN, PhD in Engineering

O.V. SOMOV, PhD in Engineering

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, max@pm.pstu.ru

Разработка новых материалов и покрытий с повышенной износостойкостью, применяемых в парах трения является актуальной задачей, решение которой направлено на обеспечение надежности и безотказности работы в процессе эксплуатации. Одним из новых и перспективных функциональных материалов для изготовления плотных и прочных деталей и изделий, подвергающихся интенсивному износу в процессе эксплуатации, является порошковый материал системы TiC-SiC, получаемый энергосберегающим и более производительным, чем горячее прессование, способом – плазменно-искровым спеканием.

Цель работы заключалась в получении и исследовании экспериментальных образцов пар трения, изготовленных из композиционного материала системы TiC-SiC методом механоактивации и ПИС. Поставленная цель направлена на решение задач по повышению ресурса работы торцевого уплотнения центробежного насоса 16-08-140СП системы охлаждения дизеля Д-160 (180) для трактора Т10. Исследованы процессы консолидации порошковых смесей, в т.ч. содержащих оксид алюминия. Установлено, что введение оксида алюминия препятствует уплотнению при спекании и повышает пористость материала. Оптимальная температура спекания соответствует 1350 °С. Полученный материал обладает высокой твердостью и износостойкостью. Изготовлены и испытаны детали пары трения торцевого уплотнения насоса. Стендовые испытания деталей показали, что интенсивность износа при сухом трении составляет $4,49 \cdot 10^{-9}$ мм износа / мм пути трения. При работе в охлаждающей жидкости наблюдается приработка деталей, что снижает износ, коэффициент трения и повышает герметичность торцевого уплотнения. Разработанный материал обладает прирабатываемостью, т.е. поверхность сглаживается в процессе эксплуатации, что нехарактерно для другой керамики данного назначения.

Ключевые слова: механоактивация, плазменно-искровое спекание, карбид титана, карбид кремния, пара трения, износостойкость, плотность, пористость, микротвердость.

The development of new materials and coatings with increased wear resistance, used in friction pairs, is an urgent task. Its solution is aimed at ensuring reliability and dependability of work during operation. One of the new and promising functional materials for the manufacture of dense and durable parts and products subjected to intensive wear during operation is the powder material of the TiC-SiC system, obtained by an energy-saving and more productive than hot pressing method – spark plasma sintering (SPS). The aim of the work was to obtain and study experimental samples of friction pairs made of a composite material of the TiC-SiC system by the method of mechanical activation and SPS. The goal is aimed at solving problems of increasing the service life of the mechanical seal of the centrifugal pump 16-08-140SP diesel engine cooling system D-160 (180) for the tractor T10. The processes of consolidation of powder mixtures, including containing aluminum oxide. It has been established that the introduction of aluminum oxide prevents compaction during sintering and increases the porosity of the material. The optimum sintering temperature corresponds to 1350 °C. The resulting material has high hardness and wear resistance. Parts of a friction pair for a pump mechanical seal were manufactured and tested. Bench tests of parts showed that the wear rate with dry friction is $4,49 \cdot 10^{-9}$ mm of wear / mm of the friction path. When working in the coolant, there is an additional burn-in, which reduces wear, friction coefficient and increases the tightness of the mechanical seal. The developed material has an earnability, so the surface is smoothed during operation, which is not typical of other ceramics of this purpose.

Keywords: mechanical activation, spark plasma sintering, titanium carbide, silicon carbide, friction pair, wear resistance, density, porosity, microhardness.

Введение

Современный уровень развития техники выдвигает все более сложные требования к материалам изделий добывающей, химической, автомобильной и тракторной промышленности, работающих в условиях высоких температур и давлений, износа и коррозии в различных агрессивных средах.

Поиск новых материалов для пар трения является актуальной задачей, решение которой направлено на снижение потерь энергии в узлах трения, снижение износа деталей пар трения и повышение ресурса работы узлов и механизмов различного оборудования. В настоящее время применяют различные материалы для пар трения. В большинстве современных конструкций пар трения торцевых уплотнений зарубежного производства, в частности, в торцевых уплотнениях центробежных насосов системы охлаждения дизельных двигателей в тракторостроении, используется техническая керамика на основе карбида кремния (пара трения: SiC-SiC). Детали пар трения из технической керамики обладают высокой износостойкостью и коррозионной стойкостью, но при повышенных оборотах (более 3500 об/мин) и, особенно, в момент «сухого трения» возрастает риск растрескивания их рабочей поверхности, что приводит к появлению «течи» торцевого уплотнения и потере его работоспособности. Кроме того, получение изделий из карбида кремния является трудоемким и энергоемким процессом, а, при этом они обладают повышенной хрупкостью и низкой ударной прочностью [1].

В конструкции центробежного насоса 16-08-140СП системы охлаждения дизеля Д160 (180) отечественного трактора Т10 применяется торцевое уплотнение с парой трения сталь (бронза) – графит (силицированный графит). Применение пары «мягкая – по твердой» не всегда обеспечивает ресурс работы торцевого уплотнения в связи с влиянием мелких абразивных частей на износ «мягкой» поверхности, что приводит к течу охлаждающей жидкости в контакте пары трения. Более твердые тела в паре трения внедряются в мягкое контртело и выводят пару из строя при перегрузках. Кроме того, производство изделий из силицированного графита экологически вредно.

Тугоплавкие материалы и покрытия с высокой прочностью и износостойкостью рассматриваются в настоящее время как перспектив-

ные для экстремальных условий эксплуатации [2]. Одним из новых и перспективных функциональных материалов для изготовления плотных и прочных деталей и изделий, подвергающихся интенсивному износу в процессе эксплуатации, является материал системы TiC-SiC-Al₂O₃. Выбор композиции обусловлен возможностью формирования многофазной системы из твердых карбидных зерен, соединенных между собой квазипластичным тернарным соединением Ti₃SiC₂, которое может сформироваться в процессе получения композиционного материала. При этом оксид алюминия увеличивает износостойкость всей композиции [3].

В настоящее время для получения плотных изделий применяют горячее прессование, которое требует высоких энерго- и трудозатрат. Перспективным энергосберегающим и более производительным способом получения плотных, прочных и износостойких изделий является механоактивация в высокоэнергетической мельнице порошковой смеси и ее последующее плазменно-искровое спекание (ПИС) [4–8].

Механоактивация позволяет создавать активные состояния в порошковой композиции и ускорения химических реакций между твердыми телами при получении материалов в высоко неравновесном состоянии. При плазменно-искровом спекании через порошковый материал, находящийся под давлением в пресс-форме, пропускают электрические импульсы большой мощности, формируемые с помощью генератора постоянного тока, в свою очередь, вызывающие выделение тепла, которое разогревает спекаемый материал. Одновременное воздействие давления и высокой температуры, как и при горячем прессовании, приводит к интенсивному уплотнению материала. Однако, поскольку происходит внутренний разогрев порошкового материала, скорость нагрева может быть значительной, что снижает продолжительность обработки и затраты энергии.

Цель работы

Цель работы заключалась в получении и исследовании экспериментальных образцов пар трения, изготовленных из композиционного материала системы TiC-SiC методом механоактивации и ПИС. Поставленная цель направлена на решение задач по повышению ресурса работы торцевого уплотнения центробежного насоса 16-08-140СП системы охлаждения дизеля Д-160(180) для трактора Т10.

Материалы, методы эксперимента и исследований

В качестве исходных материалов для пар трения использовали порошки титана ТПП-7 фракции менее 325 мкм, порошок технического карбида кремния фракции менее 10 мкм, порошок углерода С-1, порошок измельченного глинозема фракции менее 0,3 мкм с преимущественной фазой $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ в необходимом соотношении и в количестве, не превышающем массу загрузки мельницы.

Механоактивацию смесей Ti-16,7%SiC-16,7% С (А0) и Ti-16,7 % SiC-16,7 % С-10 % Al_2O_3 (А10) проводили на планетарной мельнице «САНД» при следующем режиме:

- частота вращения барабана мельницы – 240 мин⁻¹;
- частота вращения кювет 615 мин⁻¹;
- суммарное время размола 3 ч (прерывистый режим для охлаждения оснастки: 20 мин размола, 60 мин охлаждения);
- соотношение масс мелющих тел и обрабатываемого материала 7,5 : 1.

Плазменно-искровое спекание проведено на установке SPS-1050b (Dr. Sinter) в следующих условиях. Нагрев велся за счет ступенчатого увеличения тока через оснастку со скоростью 100 А/мин, что соответствовало скорости нагрева 80 °С/мин. В участках образования контактных перешейков между частицами спекаемого материала концентрировалась энергия высокой плотности, которая обеспечивает пространственную точность прессовки и однородность компактного материала. После достижения нужной температуры производится выдержка. Высокотемпературная выдержка составляла 5 и 10 мин. После окончания высокотемпературной выдержки нагрузка снималась, образец охлаждался вместе с оснасткой в камере установки.

Микротвердость определяли на микротвердомере ПМТ-3 по стандартной методике при нагрузке 0,1 и 1,0 кгс.

Значения температурной усадки образцов определяли по изменению расстояния между токоподводами установки SPS-1050b в процессе сжатия порошковой смеси и ПИС.

Предварительные испытания поверхности образцов на износ проводили на машине трения СМЦ-2 по схеме «колодка – диск».

Результаты и обсуждение

Материал колец должен обеспечивать работоспособность пары трения центробежного

насоса системы охлаждения дизеля Д-160 при следующих условиях эксплуатации торцевого уплотнения:

- частота вращения, мин⁻¹: 500 (min) – 2285 (max);
- усилие прижатия колец, Н: 175;
- удельное давление, МПа: 0,12;
- работа в жидкости ОЖ-40 (ОЖ-65) или тосол А-40 (65).

Эскиз деталей пар трения представлен на рис. 1.

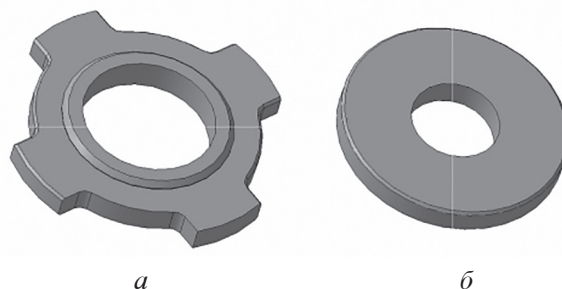


Рис. 1. Эскиз деталей пар трения:

а – кольцо 35x24x5,8; б – кольцо 41,8x16,8x4

Конструкция прессовой оснастки для ПИС с целью получения экспериментальных образцов выбрана исходя из принципов устройства прессформ для двустороннего одноосевого прессования порошковых материалов и с учетом усадки смеси при ПИС. Разработанная оснастка предназначена для ПИС на установке с площадью токоподводов не менее 50 см², током не менее 4000 А, усилием прессования не менее 50 кН.

В качестве материала всех деталей прессформы выбран графит МПГ-6. Графит используется для изготовления высокотемпературных пресс-форм, поскольку не подвержен высокотемпературной текучести и с увеличением температуры только увеличивает прочность в отличие от металлических материалов. Графит легко подвергается механической обработке, обладает хорошей электропроводностью, что является необходимым условием при разработке оснастки для ПИС. Среди различных марок графита выбирали МПГ-6 как мелкозернистый графит высокой прочности.

Для разработки оснастки проводили расчет обоймы на прочность. Обойма представляет собой кольцо, нагруженное внутренним давлением на его внутреннюю поверхность. Осевое усилие прессования, кН, определяли по формуле (1):

$$P = q \cdot S, \quad (1)$$

где q – удельное давление прессования, МПа; S – площадь сечения прессовки, расположенная перпендикулярно направлению прессования, m^2 .

Для однослойных обоек должно выполняться условие прочности:

$$\sigma_{\text{эквивал}} \leq [\sigma_{\text{растяж.}}], \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{эквивал}}$ рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{\text{эквивал}} = \frac{2q}{1 - \frac{r_{\text{внутр}}^2}{r_{\text{наружн}}^2}}, \quad (3)$$

где $[\sigma_{\text{растяж.}}]$ – допускаемое напряжение растяжения для материала обоймы, $[\sigma_{\text{растяж.}}] = 32$ МПа для графита МПГ-6; $p_{\text{боков}}$ – внутреннее давление на боковую стенку матрицы, $p_{\text{боков}} = (0,2 \dots 0,4)q$, МПа; $r_{\text{внутр}}$ – внутренний радиус обоймы, мм; $r_{\text{наружн}}$ – наружный радиус обоймы, мм.

Результаты расчета прочности обоймы представлены в таблице 1.

Из полученных данных следует, что для данных давлений прессования $\sigma_{\text{эквивал}}$ меньше допустимой прочности графита. Следовательно, для всех видов оснастки выполняется условие прочности матрицы. Давление прессования выбирается исходя из прочности матрицы и составляет 10–11 МПа. На рис. 2 представлен эскиз пресс-формы в сборе для получения колец экспериментальных образцов пар трения.

Изучение процессов консолидации экспериментальных образцов при ПИС показало, что введение Al_2O_3 не влияет на общий характер спекания (рис. 3). При сравнении консолидации образцов без добавки и содержащих 10 % Al_2O_3 видно, что усадка протекает в одних тех же температурных интервалах. На начальной стадии (до 570 °С) спекания происходит усадка образца, обусловленная испарением остаточной влаги и началом образования шеек между частицами. На второй стадии (570–775 °С)

усадка образца практически не наблюдается, т.к. происходит диффузионный обмен и массоперенос между частицами. Третья стадия (775–1100 °С) отличается значительной усадкой образца, связанной с релаксацией напряжений, полиморфным превращением в титане и, возможно, образованием новых фаз. И наконец, при температурах более 1100 °С происходят фазовые превращения, приводящие к формированию карбида титана. В конечном продукте композиционный материал состоит из карбида титана, карбида кремния и в небольшом количестве карбосилицида титана. Добавка Al_2O_3 , как видно из рис. 3, препятствует усадочным процессам. Это хорошо видно также при анализе усадки в процессе окончательного плазменно-искрового спекания (рис. 4).

В зависимости от состава и времени выдержки усадка заканчивается при различных температурах (рис. 4). При 5 минутах выдержки при температуре выше 1350 °С усадка образца А10 незначительна, а при 10 минутах (при такой же температуре) наблюдается не-

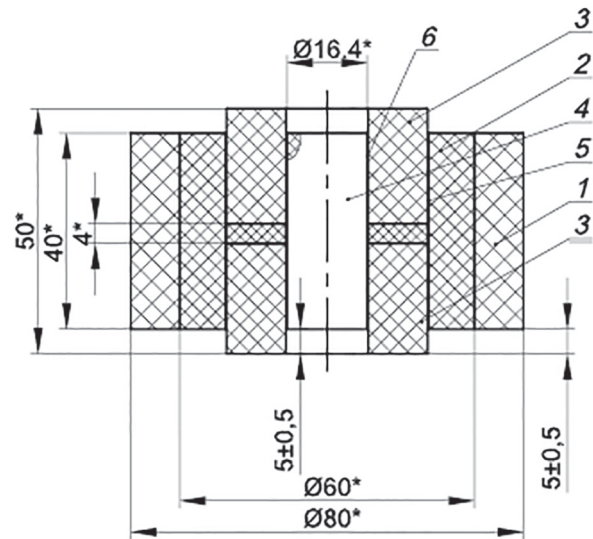


Рис. 2. Эскиз пресс-формы в сборе для получения кольца 41,8x16,8x4:

- 1 – обойма; 2 – матрица; 3 – пуансон;
- 4 – центральный стержень; 5, 6 – обечайка;
- * – размеры для справок

Таблица

Результаты расчета прочности обоймы

Деталь	Площадь поперечного сечения, cm^2	Боковое давление, МПа	Внутренний радиус обоймы, $r_{\text{внутр}}$, мм	Наружный радиус обоймы, $r_{\text{наружн}}$, мм	$\sigma_{\text{эквивал}}$, МПа
Кольцо 35x24x5,8 мм	16,3	10	27,5	45	$31,9 < [s_{\text{растяж.}}]$
Кольцо 41,8x16,8x4 мм	11,5	11	25	45	$31,8 < [s_{\text{растяж.}}]$

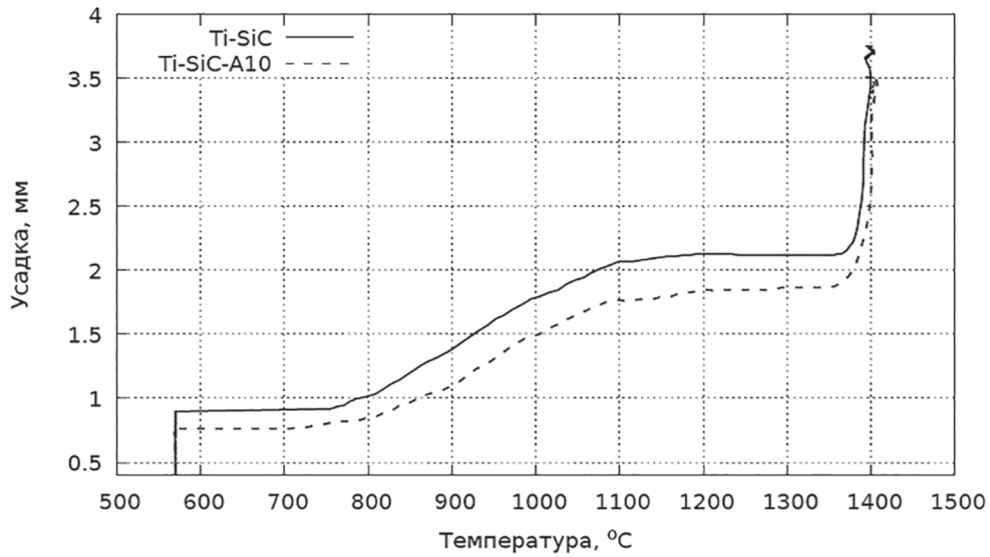


Рис. 3. Зависимость усадки от температуры при ПИС для материалов с 10 % Al_2O_3 и без добавки

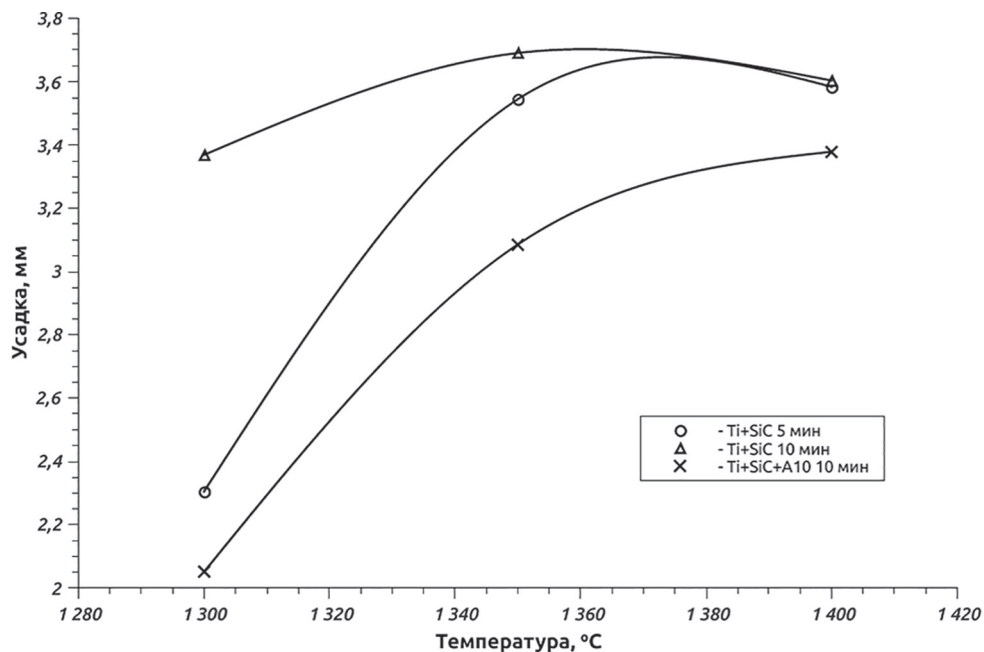


Рис. 4. Зависимость усадки КМ при различных температурах окончательного плазменно-искрового спекания

большое расширение образцов. Образец А10 демонстрирует усадку вплоть до 1400 °С. Следовательно, для образцов, содержащих Al_2O_3 , необходима более высокая температура ПИС для получения минимальной пористости.

Исходя из анализа процессов консолидации материала, далее при изготовлении натуральных образцов температура ПИС была не ниже 1350 °С. На рис. 5 представлены полученные экспериментальные образцы пары трения «Кольцо 41,8x16,8x4» – «Кольцо 35x24x5,8».

Материал, который использован для изготовления колец, обладает следующими механическими характеристиками:

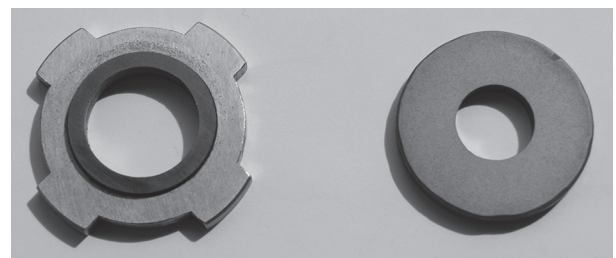


Рис. 5. Экспериментальные образцы деталей пар трения:
а – «Кольцо 35x24x5,8»; б – «Кольцо 41,8x16,8x4»

– твердость по Виккерсу 14 ГПа;
– интенсивность износа при сухом трении $4,49 \cdot 10^{-9}$ мм износа/мм пути трения.

Анализ поверхности детали «Кольцо 35x24x5,8» после испытаний на износ показал, что шероховатость поверхности уменьшается в процессе работы пары трения за счет приработки поверхностей (рис. 6).

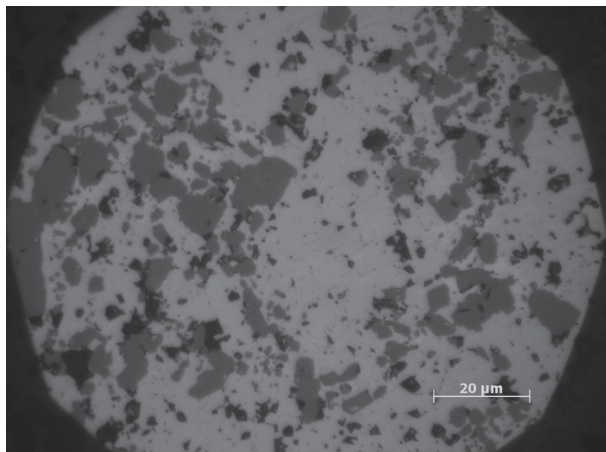


Рис. 6. Микроизображение поверхности детали «Кольцо 35x24x5,8» после испытаний на износ

На микроскопических снимках детали после испытаний наблюдается гладкая, практически зеркальная поверхность, где отчетливо видна матрица карбида титана с зёрнами карбида кремния. Наиболее темные области представляют собой поры размером до 5 мкм.

Заключение

Предложен материал системы TiC-SiC для пар трения, полученный методами механоактивации и плазменно-искрового спекания. Исследованы закономерности его консолидации и влияния добавки оксида алюминия на плотность конечного продукта.

Установлено, что введение оксида алюминия препятствует усадке материала. Из зависимости усадки от температуры спекания следует, что оптимальной температурой спекания материала TiC-SiC является 1350 °С. Полученный материал обладает твердостью HV 14 ГПа.

На основе разработанных чертежей деталей центробежного насоса системы охлаждения дизеля Д-160 трактора Т10 изготовлены прессоснастка и экспериментальные образцы деталей пары трения. Испытания деталей на машине трения показали, что интенсивность износа при сухом трении составляет

$4,49 \cdot 10^{-9}$ мм износа/мм пути трения. При работе в паре трения наблюдается приработка деталей, что приведет к снижению коэффициента трения и уменьшению износа, к повышению герметичности торцевого уплотнения.

Литература

1. Годжаев З.А., Зайцев С.Д., Суминов И.В., Сомов О.В. Долговечность торцевого уплотнения центробежного насоса с нанокерамическими композиционными покрытиями по технологии МДО // Тракторы и сельхозмашины: 2013, № 8. С. 44–47.
2. Анциферов В.Н., Дудкин Ю.П., Сметкин А.А. Износостойкое тугоплавкое покрытие для пар трения топливрегулирующего агрегата // Вопросы материаловедения. 2013. № 1 (73). С. 81–87.
3. Cai Y., Yin H., Pan L., Chen P., Sun G. Microstructures and mechanical properties of Ti₃SiC₂/TiC–Al₂O₃ composites synthesized by reactive hot pressing // Materials Science and Engineering: A. V. 571. № 1. 2013, pp. 137–143. Doi: org/10.1016/j.msea.2013.02.017
4. V.N. Antsiferov, M.N. Kachenyuk, A.A. Smetkin. Features of compaction and phase formation in the Ti–Si–C system during plasma-arc sintering // Refractories and Industrial Ceramics Vol. 56, No. 2, July, 2015, pp. 168–171. DOI:10.1007/s11148-015-9806-4.
5. M.N. Kachenyuk, O.V. Somov, N.B. Astashina, K.E. Andrakovskaya, N.V. Morozova A study of the wear resistance of a TiC–SiC composite ceramic material prepared by spark plasma sintering // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2017, Vol. 53, No. 5, pp. 401–406. DOI: 10.3103/S1068375517050064.
6. Jung-Hye Eom, Yu-Kwang Seo and Young-Wook Kim Mechanical and Thermal Properties of Pressureless Sintered Silicon Carbide Ceramics with Alumina–Yttria–Calcium // J. Am. Ceram. Soc., Volume 99, Issue 5, May 2016, Pages 1735–1741. DOI: 10.1111/jace.14114.
7. Yupeng Xie, Laifei Cheng, Hui Mei and Litong Zhang Effect of SiC Particles on Mechanical Properties of Laminated (SiC_w+SiC_p)/SiC Ceramic Composites // International Journal of Applied Ceramic Technology, Volume 12, Issue 3, May/June 2015, Pages 535–541. DOI: 10.1111/ijac.12255.
8. Xinpo Lu and Yanchun Zhou Pressureless Sintering and Properties of Ti₃AlC₂ // International Journal of Applied Ceramic Technology, Volume 7, Issue 6, November/December 2010, Pages 744–751. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02403.

References

1. Godzhaev Z.A., Zajcev S.D., Suminov I.V., Somov O.V. Durability of the mechanical seal of a centrifugal pump with nanoceramic composite coatings according to PEO technology. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2013. No 8, pp. 44–47 (in Russ.).
2. Anciferov V.N., Dudkin YU.P., Smetkin A.A. Wear resistant refractory coating for friction pairs of fuel control unit. *Voprosy materialovedeniya*. 2013. No 1 (73), pp. 81–87 (in Russ.).
3. Cai Y., Yin H., Pan L., Chen P., Sun G. Microstructures and mechanical properties of Ti₃SiC₂/TiC–Al₂O₃ compo-sites synthesized by reactive hot pressing // *Materials Science and Engineering: A*. V. 571. No 1. 2013, pp. 137–143 Doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.017
4. V.N. Antsiferov, M.N. Kachenyuk, A.A. Smetkin. Features of compaction and phase formation in the Ti–Si–C system during plasma-arc sintering // *Refractories and Industrial Ceramics* Vol. 56, No. 2, July, 2015, pp. 168–171. DOI:10.1007/s11148-015-9806-4.
5. M.N. Kachenyuk, O.V. Somov, N.B. Astashina, K.E. Andrakovskaya, N.V. Morozova A study of the wear resistance of a TiC–SiC composite ceramic material prepared by spark plasma sintering // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2017, Vol. 53, No. 5, pp. 401–406. DOI: 10.3103/S1068375517050064.
6. Jung-Hye Eom, Yu-Kwang Seo and Young-Wook Kim Mechanical and Thermal Properties of Pressureless Sintered Silicon Carbide Ceramics with Alumina–Yttria–Calcium // *J. Am. Ceram. Soc.*, Volume 99, Issue 5, May 2016, Pages 1735–1741. DOI: 10.1111/jacc.14114
7. Yupeng Xie, Laifei Cheng, Hui Mei and Litong Zhang Effect of SiC Particles on Mechanical Properties of Laminated (SiCw+SiCp)/SiC Ceramic Composites // *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Volume 12, Issue 3, May/June 2015, Pages 535–541. DOI: 10.1111/ijac.12255
8. Xinpo Lu and Yanchun Zhou Pressureless Sintering and Properties of Ti₃AlC₂ // *International Journal of Applied Ceramic Technology*, Volume 7, Issue 6, November/December 2010, Pages 744–751. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02403.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ, грант № 17-48-590547 p_a.