

Машиностроение и машиноведение

УДК 666.3/7

Выбор износостойкого покрытия для высокотемпературного щеточного уплотнения

В.В. Алисин, А.Ю. Албагачиев, М.Н. Ерофеев, В.Ф. Юдкин

Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук

Choosing a wear-resistant coating for a high-temperature brush seal

V.V. Alisin, A.Y. Albagachiev, M.N. Yerofeyev, V.F. Yudkin

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Перетечки в газовом тракте авиационных газотурбинных двигателей отрицательно влияют на их эффективность. Снижение перетечек газа относится к наиболее значимым проблемам. Для уменьшения перетечек газа широко применяются щеточные уплотнения, совершенствованию которых уделяется много внимания. В целях увеличения ресурса на щеточные уплотнения наносят покрытия, уменьшающие их износ. К наиболее перспективным из них относятся керамические покрытия. Однако они имеют очень низкую трещиностойкость, что отрицательно влияет на стойкость к износу, особенно в условиях термоциклических воздействий. Исследована возможность применения композиционного покрытия на основе частично стабилизированного диоксида циркония для повышения трещиностойкости щеточного уплотнения. Преимуществом такого композита перед другими керамическими покрытиями триботехнического назначения является более высокая трещиностойкость и возможность ее повышения микролегированием редкоземельными элементами. Методом кинетического микроиндентирования показана эффективность легирования для увеличения показателей трещиностойкости.

EDN: VKCJBD, <https://elibrary/vkcjbd>

Ключевые слова: авиационные газотурбинные двигатели, щеточное уплотнение, трещиностойкость, триботехнические характеристики, циркониевая керамика, износостойкое покрытие

Leakage in the gas path of aircraft engines negatively affects operational efficiency. The problem of reducing leakage is among the most significant. Brush seal devices are widely used to reduce leakage, and considerable attention is paid to their improvement. To increase the service life of brush seals, coatings are applied that reduce seal wear. The use of ceramic coatings is promising; however, they have very low fracture toughness, which negatively affects wear resistance, especially under thermal cycling conditions. This article investigates the possibility of using a composite coating based on partially stabilized zirconia. The advantage of this coating over other ceramic coatings for tribotechnical purposes is its highest fracture toughness and the possibility of increasing it through microalloying with rare-earth

elements. The effectiveness of alloying on fracture toughness indicators has been demonstrated by the kinetic microindentation method.

EDN: VKCJBD, <https://elibrary/vkcjbd>

Keywords: aircraft gas turbine engines, brush seal, crack resistance, tribotechnical characteristics, zirconium ceramics, wear-resistant coating

Щеточное уплотнение (ЩУ), представляющее собой контактное лабиринтное уплотнение, обеспечивает более высокую степень защиты от утечек газа, чем бесконтактное лабиринтное уплотнение. Эффективность контактного ЩУ в авиационных газотурбинных двигателях (ГТД), несмотря на высокую износостойкость, привлекает внимание исследователей к его совершенствованию.

По мере улучшения рабочих параметров авиационных ГТД получило распространение многоступенчатое ЩУ. Установлено, что выделение теплоты на границе трения между щетинками и ротором является основной причиной выхода ЩУ из строя. Конструкции ЩУ, используемых в ГТД, отличаются большим разнообразием [1]. Совершенствование ЩУ ведется по разным направлениям. Широко применяются аналитические подходы, особенно численное моделирование работы ЩУ.

В работе [2] предложена трехмерная модель трубного пучка для изучения изменения теплового потока на поверхности трения между ступенями, распределения внутренней температуры щетинок в зависимости от характеристик ЩУ. Численным методом проанализировано увеличение высоты опорной пластины ротора, уменьшение осевой ширины пакета щетинок, а также взаимодействие щетинок и ротора. Изучено распределение теплового потока, формируемого в результате фрикционного взаимодействия ЩУ с контртелом. Показано, что теплота трения на кончиках щетинок в основном зависит от теплоты, выделяемой в результате трения между кончиками щетинок и ротором, передачи теплоты от верхней ступени к нижней и рассеивания теплоты потоком воздуха, проходящего через ЩУ.

В статье [3] методом математического моделирования исследовано течение газа в области кончика щетинки ЩУ. Анализ полученных результатов подтвердил, что эффективность уплотнения значительно зависит от наклона щетинки.

В открытой литературе данных о ресурсе ЩУ почти нет. Для оценки износостойкости ЩУ применяют расчетные методики.

В публикациях [4, 5] предложена теоретическая модель расчета объема износа, учитывающая теплопроводность материалов и тепловыделение вследствие контактного трения. Отмечено, что на износостойкость ЩУ влияют механические свойства волокон и материала основы. Подробно рассмотрена конструкция ЩУ.

В работе [6] показано, что на эффективность ЩУ влияет износ его отдельных элементов под действием таких факторов, как тепловые расширения, осевые (радиальные смещения и эксцентриситеты вращающихся компонентов), триботехнические характеристики материалов и покрытий. Экстремальные условия работы ЩУ в авиационных ГТД характеризуются широким диапазоном параметров. Ожидается, что ЩУ будут работать со скоростями скольжения до 450 м/с и нагрузками на наконечники до 70 кПа при температуре внешней среды до 800 °С, т. е. в условиях, которые трудно воспроизвести в лаборатории. Поэтому получили распространение методы численного и физического моделирования процессов, протекающих в области контактного взаимодействия поверхностей трения. Проводятся экспериментальные исследования ЩУ в области трибологии.

Статьи [7, 8] посвящены изучению долговечности ЩУ из углеродного волокна в условиях, имитирующих работу в камере подшипника. На основе результатов экспериментов разработана полуэмпирическая модель прогнозирования утечек газа. Установлено, что износ ЩУ зависит от сил контакта щетины с поверхностью скользящего вала.

В работе [9] отмечено, что выбор материала волокон, как правило, определяет технологичность изготовления ЩУ. Разрушение поверхности ротора происходит под действием кончиков щетинок, вследствие чего на ней образуются небольшие канавки. Для защиты от износа использованы покрытия. Однако на всех покрытиях были обнаружены микротрещины и различные другие механизмы, включая абразивный и адгезионный износ.

Нанесение покрытий на ЩУ является перспективным направлением повышения их ре-

сурса. В целях уменьшения коэффициента трения используют [10] мягкие приработочные покрытия. Чтобы защитить от износа ЩУ в авиационных ГТД, на поверхность трения вращающегося вала или малоподвижное контртело наносят твердые покрытия, чаще выполняют хромирование или азотирование [11].

Существует [12] опыт применения керамических покрытий. Однако в процессе работы ЩУ на них появляются трещины вследствие циклического термического воздействия. Так как керамические материалы имеют очень низкую трещиностойкость, образуются трещины и отслоения, приводящие к увеличению утечек газа. Публикаций по совершенствованию керамических покрытий для высокотемпературных ЩУ очень мало.

Цель статьи — разработка композиционного керамического покрытия, обеспечивающего увеличение надежности и ресурса ЩУ при температуре внешней среды до 800 °С.

Материалы. Для модельных экспериментов по трению ЩУ выбраны следующие материалы: для волокон — сталь 40Х13, для покрытия контртела — композиционный материал на основе керамической матрицы из диоксида циркония ZrO_2 частично стабилизированного (ЧСЦ) оксидом иттрия Y_2O_3 . Этот материал удовлетворяет требованиям к покрытию по характеристикам прочности, износостойкости, химической инертности и высокой стойкости в окислительной среде в широком температурном интервале.

Образцы для испытаний изготавливали в виде прямоугольных пальчиков размером 5×5×8 мм методом направленной кристаллизации из расплава [13]. Керамическое покрытие на основе диоксида циркония содержало 2,8 мол. % оксида иттрия и примесей редкоземельных элементов.

Оборудование и технологии. Механические свойства образцов определяли на кинетическом микротвердомере MNT_Z_AE_000 фирмы CSM Instruments (Швейцария) согласно стандарту ISO/DIS 14577 с четырехгранным индентором Виккерса по методике, изложенной в работе [14].

Для анализа поверхности использовали электронный микроскоп SNE-4500M Plus. Высокотемпературные испытания выполняли на установке [15] по схеме диск — пальчик.

Результаты исследования. Основной проблемой применения керамических покрытий в ЩУ для защиты от износа является низкая трещиностойкость. У циркониевой керамики трещиностойкость выше, чем у других керамических покрытий, но и ее характеристики могут оказаться недостаточными для предотвращения образования трещин. В связи с этим исследовано влияние добавления редкоземельных элементов в состав образцов. Установлено, что на поверхности матрицы отсутствуют микротрещины (рис. 1).

Для оценки трещиностойкости образцов методом кинетического микроиндентирования использован радиальный тип трещин, образующихся в окрестности отпечатка. Количество отпечатков (число диаграмм) для каждой поверхности различных образцов составляло от 3 до 10. Для сравнительной оценки трещиностойкости образцов этого количества повторных опытов оказалось достаточным.

Критический коэффициент интенсивности напряжений определяли по формуле

$$K_C = 0,015 \left(\frac{a}{l} \right)^{1/2} \left(\frac{E_{IT}}{H_{IT}} \right)^{2/3} \left(\frac{F}{c^{3/2}} \right),$$

где a — длина полудиagonали отпечатка, мкм; l — длина радиальной трещины, мкм; E_{IT} — модуль упругости при индентировании, ГПа; H_{IT} — твердость индентирования, ГПа; F — максимальная нагрузка на индентор; c — длина трещины, отсчитанная от центра отпечатка, мкм.

Результаты испытаний легированных образцов ЧСЦ на трещиностойкость и прочность при сжатии [16] приведены в табл. 1.

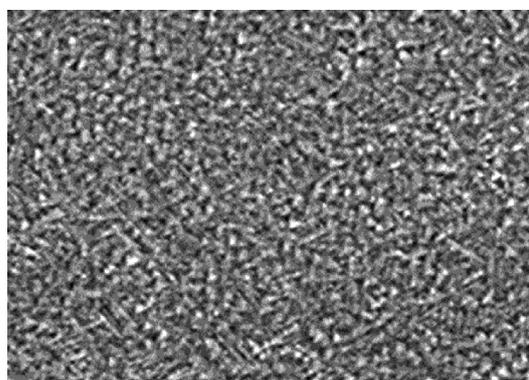


Рис. 1. Микроструктура поверхности образца, выполненного из диоксида циркония с добавлением 2,8 мол. % оксида иттрия (при увеличении ×1900)

Таблица 1

Результаты испытаний легированных образцов ЧСЦ на трещиностойкость и прочность при сжатии

| Легированный элемент | Весовая доля, % | Цвет образца | Ионный радиус, нм | Прочность σ , МПа | Коэффициент K_C , МПа·м ^{1/2} |
|----------------------|-----------------|------------------|-------------------|--------------------------|--|
| Mn | 0,3 | Темно-серый | 0,091 | 2340 | 8,5 |
| Co | 0,3 | Фиолетовый | 0,082 | 2531 | 8,2 |
| Er | 0,3 | Розовый | 0,104 | 2461 | 7,7 |
| Nd | 0,5 | Сиреневый | 0,115 | 1752 | 7,5 |
| Pr | 0,5 | Желтый | 0,100 | 2094 | 6,5 |
| Ce | 0,6 | Оранжево-красный | 0,118 | 1702 | 9,9 |

Из табл. 1 следует, что микролегирование церием существенно улучшает трещиностойкость образца. В целях оптимизации химического состава образцов методом кинетического микроиндентирования проведены испытания трех композиций. Характеристиками механических свойств поверхностных слоев трущихся деталей являются твердость, модуль упругости и коэффициент необратимых потерь энергии, учитывающий затраты энергии на пластические деформации и образование трещин.

Коэффициент необратимых потерь энергии определяется как

$$K_n = \eta_{IT} = W_{пл} / W_{общ},$$

где η_{IT} — упругая составляющая работы индентирования,

$$\eta_{IT} = W_{упр} / W_{общ} \cdot 100 \%;$$

$W_{упр}$ — работа при упругой деформации индентирования (энергия упругого восстано-

вления отпечатка после разгрузки), Н·м; $W_{пл}$ — работа при пластической деформации индентирования (энергия, поглощенная в цикле нагружение — разгрузка), Н·м; $W_{общ}$ — общая (полная) механическая работа индентирования, Н·м,

$$W_{общ} = W_{упр} + W_{пл}.$$

Коэффициент K_n отражает необратимые потери энергии при вдавливании индентора, которые состоят из потерь энергии на совершение пластических деформаций и потерь энергии, затрачиваемой на хрупкое разрушение (трещинообразование).

Результаты испытаний неориентированных образцов ЧСЦ с двухкомпонентной стабилизирующей добавкой, в сумме составляющей 2,8 мол. %, при нагрузке $F = 3Н$ приведены в табл. 2, где HV — микротвердость.

При увеличении содержания оксида иттрия (с 1,0 до 2,5 мол. %) и соответствующем умень-

Таблица 2

Результаты испытаний неориентированных образцов ЧСЦ при нагрузке $F = 3Н$

| Номер образца | Содержание химических элементов в образце, мол. % | | | HV, МПа | E_{IT} , ГПа | $W_{общ}$, мкДж | $W_{пл}$, мкДж | K_n | HV K_n , кгс/мм ² |
|---------------|---|-------------------------------|------------------|---------|----------------|------------------|-----------------|-------|--------------------------------|
| | ZrO ₂ | Y ₂ O ₃ | CeO ₂ | | | | | | |
| 1 | 97,2 | 1,0 | 1,8 | 10 310 | 176 | 4,40 | 2,68 | 0,61 | 6280 |
| | | | | 9870 | 171 | 4,56 | 2,86 | 0,63 | 6180 |
| | | | | 9700 | 171 | 4,55 | 2,84 | 0,62 | 6060 |
| 2 | 97,2 | 2,0 | 0,8 | 14 210 | 169 | 4,13 | 2,15 | 0,52 | 7400 |
| | | | | 13 960 | 170 | 4,13 | 2,14 | 0,51 | 7240 |
| | | | | 13930 | 167 | 4,10 | 2,13 | 0,52 | 7240 |
| 3 | 97,2 | 2,5 | 0,3 | 14 430 | 187 | 3,96 | 2,09 | 0,52 | 7540 |
| | | | | 17 650 | 206 | 3,95 | 2,04 | 0,51 | 9120 |
| | | | | 15 160 | 188 | 3,95 | 1,89 | 0,52 | 7850 |

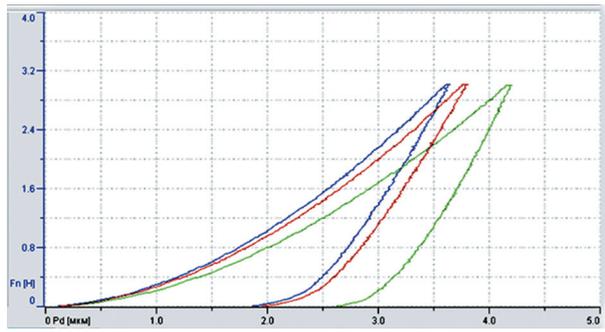


Рис. 2. Диаграммы испытаний методом кинетического микроиндентирования первого (—), второго (—) и третьего (—) образцов

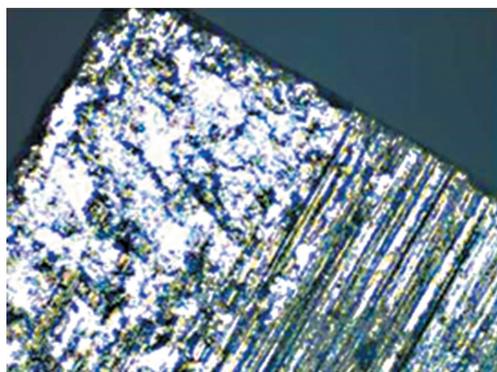
шении оксида церия (с 1,8 до 0,3 мол. %) происходит повышение микротвердости HV и модуля упругости образцов. Образец № 3 имеет наибольшие значения микротвердости и модуля упругости. Диаграммы испытаний методом кинетического микроиндентирования трех образцов разного состава приведены на рис. 2, где F_n — нагрузка на индентор; P_d — глубина отпечатка.

Также проведены контрольные испытания образцов на трещиностойкость с определением фактического содержания в них легирующих элементов при нагрузке $F = 10$ Н. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

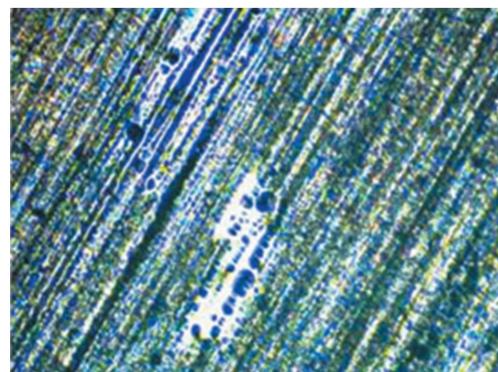
Таблица 3

Результаты испытаний образцов на трещиностойкость при нагрузке $F = 10$ Н

| Номер образца | Содержание химических элементов в образце, мол. % | | | HV, МПа | $K_C, \text{МПа}\cdot\text{м}^{-1/2}$ |
|---------------|---|-------------------------------|------------------|--------------|---------------------------------------|
| | ZrO ₂ | Y ₂ O ₃ | CeO ₂ | | |
| 1 | 97,129 | 2,798 | 0,073 | 13 580 ± 230 | 12 |
| 2 | 96,775 | 2,788 | 0,437 | 13 570 ± 170 | 14 |
| 3 | 96,494 | 2,780 | 0,726 | 13 730 ± 200 | 12 |



а



б

Рис. 3. Микроструктура поверхностей трения после (а) и до (б) испытания

Увеличение утечек газа через ШУ является следствием разрушения керамического покрытия и переноса частиц стальной проволоки на поверхность керамики, что вызывает резкое увеличение сил трения. Для проверки этих допущений выполнен модельный эксперимент по сухому трению циркониевой керамики по стали. Опыты проведены по схеме диск — пальчик. Пальчик изготавливали из циркониевой керамики. Размер поверхности трения составлял 5×5 мм, контактное давление — 14 МПа, скорость скольжения — 22,6 м/с.

Параметры трения определяли расчетом и корректировали с учетом технической возможности машины трения УМТ-1. Керамический образец разрушился через 5 мин, однако на оставшейся части поверхности трения наблюдался перенос железа на керамику. Фотографии микроструктуры поверхностей трения сделаны микроскопом в составе микротвердомера (рис. 3).

Перенос металла на керамику подтвержден элементным анализом, выполненным на электронном микроскопе. Полученная спектрограмма пятна на поверхности трения после испытания приведена на рис. 4, где по оси абсцисс отложены значения характеристической энергии E , эВ, уникальной для атома каждого элемента, а по оси ординат — отношение характе-

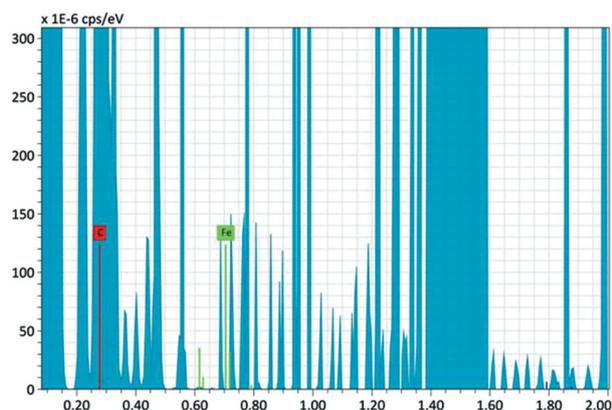


Рис. 4. Спектрограмма пятна на поверхности трения после испытания

ристических линий к стандартному эталону, характеризующее концентрацию элемента.

Обсуждение результатов. В основном перенос металла связан с локальным нагревом от фрикционного взаимодействия поверхностей трения. Температура является значительным фактором, способствующим проявлению схватывания. Для защиты поверхностей трения от температурного воздействия целесообразно применять керамические покрытия. Однако они имеют очень низкую трещиностойкость. Среди керамических материалов выделяются композиты с керамической матрицей на основе ЧСЦ, которые обладают наибольшей трещиностойкостью. Проведенные эксперименты показали, что легирование редкоземельными элементами позволяет еще больше повысить трещиностойкость.

На износостойкость ЩУ влияет материал волокон. Стальные волокна из жаропрочных сталей, при всех достоинствах, создают высокие

контактные давления на площадях фактического контакта с валом, что присуще взаимодействию деталей очень малых размеров, как в приборах точной механики. Конструкции ЩУ допускают использование неметаллических волокон. Для снижения контактных давлений на микрощадках взаимодействия волокон с контртелом представляется целесообразным изготовление ЩУ с волокнами из кремнеземных нитей, работающих при температуре до 1000 °С, что подтверждено их применением в высокотемпературных кольцевых подвижных уплотнениях.

Выводы

1. Для повышения ресурса ЩУ при трении волокон уплотнения по валу предложено наносить на вал керамическое покрытие на основе диоксида циркония.

2. Установлено, что при увеличении содержания в керамическом покрытии оксида иттрия (с 1,0 до 2,5 мол. %) и соответствующем уменьшении содержания оксида церия (с 1,8 до 0,3 мол. %) происходит повышение микротвердости и модуля упругости неориентированных образцов. Наибольшие значения микротвердости и модуля упругости оказались у образца, имеющего следующий химический состав, мол. %: ZrO_2 — 97,2; Y_2O_3 — 2,5; CeO_2 — 0,3.

3. Полученные результаты свидетельствуют о том, что микролегирование ЧСЦ кристаллов оксидами редкоземельных элементов является эффективным технологическим приемом повышения трещиностойкости композиционных материалов и покрытий с керамической матрицей на основе диоксида циркония.

Литература

- [1] Темис Ю.М., Селиванов А.В. Перспективные уплотнения для газотурбинных двигателей. *Авиационные двигатели*, 2021, № 2, с. 43–60, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2021_2_43
- [2] Sun D., Yang Y., Zhao H. et al. Influence factors of frictional heat between bristles and rotor for a multi-stage brush seal. *Tribol. Int.*, 2024, vol. 198, art. 109841, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109841>
- [3] Chew J.W., Guardino C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004, vol. 25, no. 4, pp. 649–658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.12.001>
- [4] Fan J., Ji H., Wang Q. et al. A combined theoretical and experimental study of wear model of brush seal. *Tribol. Int.*, 2021, vol. 154, art. 106696, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106696>

- [5] Qin X., Qin Y., Wang G. et al. Experimental study and numerical simulation of the balling effect and melt flow dynamics during the process of laser cutting of bristles. *Opt. Laser Technol.*, 2024, vol. 179, art. 111391, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111391>
- [6] Thakare M.R., Mason J.F., Owen A.K. et al. Effect of sliding speed and counterface properties on the tribo-oxidation of brush seal material under dry sliding conditions. *Tribol. Int.*, 2016, vol. 96, pp. 373–381, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.010>
- [7] Outirba B., Hendrick P. Experimental characterization of friction and heat generation of carbon fibre brush seals for aero-engines. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 151, art. 106448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106448>
- [8] Outirba B., Hendrick P. Operating life assessment of a carbon fibre brush seal through endurance testing. *Tribol. Int.*, 2023, vol. 179, art. 108076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108076>
- [9] Каминская Л.Л., Кондратюк Э.В., Зиличихис С.Д. и др. Элементы технологии изготовления щеточного уплотнения ГТД и его экспериментальные исследования в статическом положении. *Вестник двигателестроения*, 2008, № 1, с. 71–74.
- [10] Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. *Газотурбинные двигатели*. Пермь, Авиадвигатель, 2006. 1204 с.
- [11] Пугачев А.О., Равикович Ю.А. Применение щеточных уплотнений в конструкциях современных турбомашин. *Вестник МАИ*, 2013, т. 20, № 3, с. 67–75.
- [12] Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (обзор). *Труды ВИАМ*, 2022, № 10. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1928
- [13] Xu X., Fan S., Zhang L. et al. Comparison of the structure and physicochemical properties of ZrO₂ based crystals partially stabilized with Y₂O₃, Gd₂O₃ and Sm₂O₃. *Mod. Electron. Mater.*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 3–10, doi: <https://doi.org/10.3897/j.moem.10.1.122043>
- [14] Алисин В.В., Борик М.А., Кулебякин А.В. и др. Исследование механических свойств кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония методом кинетического микроиндентирования. *Неорганические материалы*, 2015, т. 51, № 6, с. 609–613.
- [15] Roshchin M.N. High-temperature installation for testing composite ceramic materials on the friction and wear behaviour. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1515, art. 042050, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042050>
- [16] Москвитин Г.В., Мельшанов А.Ф., Пугачев М.С. Оценка прочности нового нанокристаллического материала на основе диоксида циркония, частично стабилизированного оксидом иттрия. *Вестник научно-технического развития*, 2010, № 11, с. 21–25.

References

- [1] Temis Yu.M., Selivanov A.V. Advanced seals for gas-turbine engines. *Aviatsionnye dvigateli* [Aviation Engines], 2021, no. 2, pp. 43–60, doi: https://doi.org/10.54349/26586061_2021_2_43 (in Russ.).
- [2] Sun D., Yang Y., Zhao H. et al. Influence factors of frictional heat between bristles and rotor for a multi-stage brush seal. *Tribol. Int.*, 2024, vol. 198, art. 109841, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109841>
- [3] Chew J.W., Guardino C. Simulation of flow and heat transfer in the tip region of a brush seal. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2004, vol. 25, no. 4, pp. 649–658, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2003.12.001>
- [4] Fan J., Ji H., Wang Q. et al. A combined theoretical and experimental study of wear model of brush seal. *Tribol. Int.*, 2021, vol. 154, art. 106696, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106696>
- [5] Qin X., Qin Y., Wang G. et al. Experimental study and numerical simulation of the balling effect and melt flow dynamics during the process of laser cutting of bristles. *Opt. Laser Technol.*, 2024, vol. 179, art. 111391, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2024.111391>
- [6] Thakare M.R., Mason J.F., Owen A.K. et al. Effect of sliding speed and counterface properties on the tribo-oxidation of brush seal material under dry sliding conditions. *Tribol. Int.*, 2016, vol. 96, pp. 373–381, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.02.010>

- [7] Outirba B., Hendrick P. Experimental characterization of friction and heat generation of carbon fibre brush seals for aero-engines. *Tribol. Int.*, 2020, vol. 151, art. 106448, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106448>
- [8] Outirba B., Hendrick P. Operating life assessment of a carbon fibre brush seal through endurance testing. *Tribol. Int.*, 2023, vol. 179, art. 108076, doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.108076>
- [9] Kaminskaya L.L., Kondratyuk E.V., Zilichikhis S.D. et al. Elements of technology of manufacture of GTE brush seal and its experimental research in static position. *Vestnik dvigatelestroeniya* [Herald of Aero Engine Building], 2008, no. 1, pp. 71–74. (In Russ.).
- [10] Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. *Gazoturbinnnye dvigateli* [Gas-turbine engines]. Perm, Aviadvigatel Publ., 2006. 1204 p. (In Russ.).
- [11] Pugachev A.O., Ravikovich Yu.A. Application of brush seal technology in modern turbomachines. *Vestnik MAI* [Aerospace MAI Journal], 2013, vol. 20, no. 3, pp. 67–75. (In Russ.).
- [12] Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P. Modern aspects tribotechnical materials science of heavy-loaded dry friction units the development (review). *Trudy VIAM* [Proceedings of VIAM], 2022, no. 10. URL: http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1928 (in Russ.).
- [13] Xu X., Fan S., Zhang L. et al. Comparison of the structure and physicochemical properties of ZrO₂ based crystals partially stabilized with Y₂O₃, Gd₂O₃ and Sm₂O₃. *Mod. Electron. Mater.*, 2024, vol. 10, no. 1, pp. 3–10, doi: <https://doi.org/10.3897/j.moem.10.1.122043>
- [14] Alisin V.V., Borik M.A., Kulebyakin A.V. et al. Mechanical properties of partially stabilized zirconia crystals studied by kinetic microindentation. *Neorganicheskie materialy*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 609–613. (In Russ.). (Eng. version: *Inorg. Mater.*, 2015, vol. 51, no. 6, pp. 548–552, doi: <https://doi.org/10.1134/S0020168515060011>)
- [15] Roshchin M.N. High-temperature installation for testing composite ceramic materials on the friction and wear behaviour. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2020, vol. 1515, art. 042050, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042050>
- [16] Moskvitin G.V., Melshanov A.F., Pugachev M.S. Strength evaluation of a new nanocrystalline material based on zirconium dioxide partially stabilized with yttrium oxide. *Vestnik nauchno-tekhnicheskogo razvitiya*, 2010, no. 11, pp. 21–25. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.02.2025

Информация об авторах

АЛИСИН Валерий Васильевич — кандидат технических наук, зав. лабораторией «Физические методы упрочнения поверхностей трения». Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: vva-imash@yandex.ru).

АЛБАГАЧИЕВ Али Юсупович — доктор технических наук, профессор, зав. отделом «Трение, износ, смазка». Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: albagachiev@yandex.ru).

Information about the authors

ALISIN Valery Vasilyevich — Candidate of Science (Eng.), Head of the Laboratory Physical Methods of Hardening Friction Surfaces. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: vva-imash@yandex.ru).

ALBAGACHIEV Ali Yusupovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of Department Friction, Wear, Lubrication. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: albagachiev@yandex.ru).

ЕРОФЕЕВ Михаил Николаевич — доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: erofeeff2007@yandex.ru).

YEROFEYEV Mikhail Nikolaevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Deputy Director for Scientific Work. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: erofeeff2007@yandex.ru).

ЮДКИН Владимир Федорович — кандидат технических наук, ученый секретарь. Институт машиноведения им А.А. Благонравова Российской академии наук (101000, Москва, Российская Федерация, Малый Харитоньевский пер., д. 4, e-mail: vfyudkin@mail.ru).

YUDKIN Vladimir Fedorovich — Candidate of Science (Eng.), Scientific Secretary. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: vfyudkin@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Алисин В.В., Албагачиев А.Ю., Ерофеев М.Н., Юдкин В.Ф. Выбор износостойкого покрытия для высокотемпературного щеточного уплотнения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 12, с. 3–11.

Please cite this article in English as:

Alisin V.V., Albagachiev A.Y., Yerofeyev M.N., Yudkin V.F. Choosing a wear-resistant coating for a high-temperature brush seal. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 12, pp. 3–11.



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

**«Физические основы материаловедения.
Курс лекций»**

**Авторы: Ю.А. Курганова, Р.С. Фахуртдинов,
Л.П. Фомина**

Рассмотрены теоретические основы и прикладные аспекты материаловедения, предусмотренные образовательным стандартом, представлен широкий спектр конструкционных материалов. В конце каждого модуля приведены контрольные вопросы и задания для самоконтроля.

Учебное пособие разработано в соответствии с учебными планами и программой дисциплины «Физические основы материаловедения» МГТУ им. Н.Э. Баумана для студентов бакалавриата, обучающихся по направлению подготовки: 16.03.01 «Техническая физика», а также может представлять интерес для студентов всех специальностей, изучающих дисциплину «Материаловедение».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; <https://press.bmstu.ru>