



Повышение надёжности подшипника скольжения с керамической вкладкой

И.М. Панова^{1✉}, Ю.В. Сеницына²

^{1,2}Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Резюме. Цель – поиск конструктивного решения, обеспечивающего надёжную и долговременную работу узла трения с керамическим подшипником скольжения, которая достигается с помощью анализа и оптимизации напряженно-деформированного состояния керамической вкладки подшипника с учетом реальных условий нагружения подшипника скольжения. Конструирование подшипникового узла проводилось с учетом особенностей свойств керамических материалов, обладающих низкой прочностной надёжностью при действии напряжений растяжения. Для повышения точности решения проводился учет неравномерности нагрузки в подшипнике скольжения и определение реальной площади контакта. Также учитывается то, что поверхность вкладыша находится в сложном напряженном состоянии, и поэтому расчет идет по эквивалентным напряжениям. Критерием является минимизация эквивалентных напряжений, что соответствует оптимальному натягу и обосновывает его выбор. Для анализа использован дискретно-континуальный способ метода конечных элементов с использованием вариационного принципа по методу Лагранжа. Программа для расчета позволяет получить значения эквивалентных напряжений в зависимости от натяга и выбрать его оптимальное значение. Анализ полученных результатов приводит к оптимизации геометрической формы керамической вкладки. Установлено, что в предложенной оригинальной конструкции подшипника скольжения возможно преодоление (в значительной степени) хрупкости, присущей керамическим материалам за счет минимизации растягивающих напряжений. Надёжность работы подшипника скольжения и его долговечность повышены. Предложена оригинальная конструкция подшипника скольжения с керамической вкладкой. Данная конструкция позволяет использовать усовершенствованные керамические конструкционные материалы в подшипниках скольжения, что расширяет параметры эксплуатации узлов трения современных устройств. Преодоление хрупкости керамических материалов требует разработки специальных конструктивных приемов – по преодолению растягивающих напряжений за счет оптимально выбранных натягов, создающих напряжения сжатия во вкладке. Выбор оптимальных натягов может быть выполнен с помощью применения численных методов анализа напряженно-деформированного состояния, в частности метода конечных элементов.

Ключевые слова: триботехника, подшипник скольжения, керамические материалы, износ керамики, разрушение керамики, контактные напряжения

Для цитирования: Панова И.М., Сеницына Ю.В. Повышение надёжности подшипника скольжения с керамической вкладкой // iPolytech Journal. 2025. Т. 29. № 3. С. 336–344. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-336-344>. EDN: SRHOPU.

MECHANICAL ENGINEERING

Original article

Improving the reliability of a ceramic plain bearing

Irina M. Panova^{1✉}, Yulia V. Sinitsyna²

^{1,2}Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract. In this study, we search for a design solution to ensure a reliable and long-term operation of a friction unit with a ceramic plain bearing. To that end, the stress-strain state of the ceramic insert is optimized with respect to actual loading conditions. The bearing unit is designed accounting for the properties of ceramic materials, which show low strength reliability under the action of tensile stresses. To improve the solution accuracy, we determine the actual contact area, taking into account the load unevenness in the bearing. In addition, since the insert surface is assumed to be complexly stressed, the calculation is based on equivalent stresses. The criterion is to minimize equivalent stresses, which corresponds to the optimal tension justifying the bearing application. The analysis involves the discrete-continuous option of the finite element method with the variational principle according to the

Lagrange method. The calculation software provides for the values of equivalent stresses depending on tension and selects its optimal value. As a result of the performed analysis, the geometric shape of the ceramic insert is optimized. In the proposed design, the brittleness inherent in ceramic materials can almost be compensated by minimizing tensile stresses. Thus, the reliability and durability of the plain bearing increase. An original design of a plain bearing with a ceramic insert is proposed. This design allows advanced ceramic structural materials to be used in plain bearings, which extends the operational range of friction units. In order to overcome the fragility of ceramic materials, special design techniques should be developed to withstand tensile stresses through optimally selected tensions creating compressive stresses in the insert. Optimal tension parameters can be selected using numerical methods of stress-strain state analysis, in particular, the finite element method.

Keywords: tribotechnics, plain bearing, ceramic materials, ceramic wear, ceramic failure, contact stress

For citation: Panova I.M., Sinitsyna Yu.V. Improving the reliability of a ceramic plain bearing. *iPolytech Journal*. 2025;29(3):336-344. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2025-3-336-344>. EDN: SRHOPU.

ВВЕДЕНИЕ

Безотказность и долговечность машин и механизмов напрямую связаны с работоспособностью подшипников. Подшипники скольжения часто эксплуатируются в тяжелых условиях: без смазки, в агрессивных средах и при повышенных температурах, а также высоких частотах вращения. Все эти факторы способствуют разрушению и увеличению коррозионно-механического износа подшипников и, следовательно, ведут к снижению показателей надежности и ресурса.

Однако, благодаря появлению новых видов износостойких материалов, в частности керамических, диапазон параметров эксплуатации подшипников расширяется.

Техническая керамика из материалов на основе карбидов, нитридов, оксидов металлов и неметаллов в ряде случаев является конкурентом традиционных металлических материалов, используемых в узлах трения. Вместе с тем отметим, что использование керамических материалов может быть успешным только при соблюдении ряда условий, выявлению и учету которых и посвящена данная работа. Самым решающим условием можно считать поиск конструктивного решения, обеспечивающего долговременную работу узла трения. В данной статье представлена оригинальная конструкция подшипника скольжения с керамической вкладкой, разработанная с учетом напряженно-деформированного состояния керамической вкладки.

Известно, что керамические материалы отличаются высокими показателями характеристик твердости и жесткости, имеют низкий коэффициент трения в паре со сталью и высокую устойчивость к коррозионно-механическому износу, а также обладают диэлектрическими свойствами и отсутствием намагничивания. Отметим, что эти харак-

теристики сохраняются как при максимально высоких температурах, так и при максимально низких. Кроме того, следует отметить высокую коррозионную стойкость в разных агрессивных средах и возможность работы при высоких скоростях вращения.

Реализация перечисленных свойств в узлах трения многих устройств могла стать возможной при отсутствии существенного недостатка технической керамики – низкой прочностной надежности [1–22]. Повышенная хрупкость керамики связана с неспособностью выдерживать незначительные растягивающие напряжения, поскольку на распространение трещины в керамике требуется примерно в тысячу раз меньше энергии, чем в металлах. Керамика относится к материалам, которые по-разному сопротивляются напряжениям растяжения и сжатия; так напряжения сжатия в керамике могут быть в 2-3 раза больше напряжений растяжения, но при этом не будет признаков разрушения. Указанной особенностью поведения керамических материалов под нагрузкой и следует воспользоваться.

Можно сделать вывод, что при работе детали в близких к всестороннему сжатию условиях является возможным в значительной мере преодоление существенного ограничения при использовании технической керамики [2].

Целью настоящей работы является разработка оригинальной конструкции подшипника скольжения, обладающего повышенной нагрузочной способностью за счет создания преобладающих напряжений сжатия в керамическом вкладыше подшипника.

УЧЕТ СВОЙСТВ КЕРАМИКИ

Отметим, что в настоящее время известно о применении целого ряда относительно новых керамических материалов в узлах трения. Материалы на основе карбида и

нитрида кремния (SiC , Si_3N_4), являющиеся представителями традиционной неоксидной, химически инертной керамики, предпочтительно использовать для работы в агрессивных средах. Согласно данным, приведенным в работе [3], где описаны некоторые преимущества керамических материалов, они обладают достаточной прочностью при изгибе 300–500 МПа при достаточно малой плотности – 3,0–3,25 г/см³. Однако низкая трещиностойкость этого вида материалов не позволяет использовать их в высоконагруженных узлах трения.

Лучшими триботехническими характеристиками и более высокой нагрузочной способностью обладают гибридные керамические материалы на основе ZrO_2 и Al_2O_3 с добавками Y_2 [4].

Безусловно, перспективными являются циркониевые керамические материалы с наноструктурированными кристаллами, частично стабилизированными диоксидом циркония, которые легируют с редкоземельными элементами, что позволяет получать материалы с очень низкой пористостью. Благодаря данному свойству повышаются триботехнические характеристики и, что особенно значимо, вязкость разрушения, а также нагрузочная способность.

В качестве актуальных на сегодняшний день следует отметить керамоматричные композиты (КМК), в которых керамическая матрица армирована высокопрочными углеродными волокнами, успешно применяемыми ООО «Virial» для подшипников.

На рис. 1 показан подшипник скольжения с керамической вкладкой компании Virial, специализирующейся на выпуске износостойких подшипников скольжения из современных керамических материалов. Данные материалы отличаются высокой стойкостью к тепловым ударам, которая примерно в пять раз больше, чем у вышеупомянутых материалов. Ударная вязкость составляет 14–17 кДж/м, в то время как у SiC она всего 3–4 кДж/м. В работе [5] также отмечается, что пористая структура матрицы материала может удерживать смазку и способствует охлаждению КМК при работе в условиях повышенного трения. Вариантом использования КМК является материал с покрытием из монолитной керамики Virial. Для повышения износостойкости применяют нанесение покрытий,

легирование и модификацию поверхностного слоя. Следует отметить, что уже при изготовлении керамики в нее можно добавить твердые смазки, улучшающие работу подшипника скольжения. Для улучшения триботехнических свойств керамических материалов применяют формирование слоистой структуры поверхностного слоя. В работе [6] предложено насыщать поверхность трения парами селена (Se) и политетрафторэтилена (ПТФЭ) на основе теплостойкого тетрафторэтилена, что осуществляют при температуре 820°C в защитной камере. Такая обработка позволила снизить момент трения в подшипнике на 26–40%. Чаще всего разница в коэффициентах трения в металлических подшипниках и в подшипниках с применением керамических материалов может достигать 20–25%.

Особое внимание следует уделить точности изготовления и чистоте обработки поверхностей вала и вкладыша, что существенно снижает износ.

Таким образом, можно заключить, что на сегодняшний день существует целый ряд керамических конструкционных материалов, обладающих хорошими триботехническими свойствами, по многим показателям превосходящих традиционные подшипниковые материалы.

Подшипники скольжения бывают разными по конструкции, при этом величина зазора между валом и вкладышем влияет на положение вала [6] и его центрирование, значит,



Рис. 1. Подшипник скольжения с керамической вкладкой Virial

Fig. 1. Plain bearing with Virial ceramic insert

и на точность работы механизма. В случае использования керамических материалов зазор может быть минимальным. Проанализируем особенности трения в подшипнике скольжения. Трение в подшипнике сопровождается совокупностью поверхностных явлений в тонких слоях вала и керамической вкладки. Поверхность трения разрушается от многократно повторяющихся циклов деформирования, приводящих к зарождению усталостных трещин. Вместе с тем сохраняется положительный градиент механических свойств вглубь от поверхности, что и позволяет дольше сохранять работоспособность материала. Также отметим, что напряжения сжатия препятствуют развитию усталостных трещин. Сила трения в подшипнике может быть оценена по выражению:

$$F_{TP} = f(R + A_0 p_0) \quad (1)$$

где f – коэффициент трения в паре сталь–керамика; R – радиальная нагрузка в подшипнике; A_0 – реальная площадь контакта в начальный момент; p_0 – удельная сила молекулярного сцепления по выступам микронеровностей. Понятно, что эти параметры носят приближенный характер.

Как уже отмечено, поверхность керамического вкладыша разрушается от повторяющихся циклов деформирования, что является следствием циклически изменяющихся напряжений сдвига. В работе [7] отмечается, что хорошая износостойкость керамики обусловлена наличием перенесенного слоя (transfer layer), защищающего керамическую втулку при высоких скоростях скольжения. Это обстоятельство, а также наличие зазора в подшипнике позволяют пренебрегать силами межмолекулярного, адгезионного взаимодействия. В работе [8] установлено, что основной причиной износа являются напряжения сдвига, возникающие в локальных областях. Определение реальной площади зоны контакта затруднительно. Известны работы Штаермана [9] и других ученых, посвященные этой теме. Точных результатов получить в данный момент не удастся, т.к. исследование в данной области продолжается, однако можно воспользоваться приближенными оценками. На рис. 2 показано, что зона контакта ограничена некоторыми значениями углов контакта, а эпюра контактных напряжений носит серповидный характер.

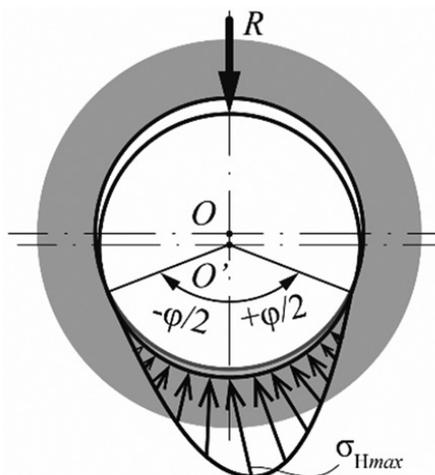


Рис. 2. Эпюра распределения контактных напряжений
 Fig. 2. Contact stress distribution diagram

Контактные напряжения, действующие на керамическую вставку в локальных областях контакта в радиальном направлении, а также сопутствующие им касательные напряжения создают сложное напряженное состояние в поверхностных слоях материала. Приведенный здесь анализ позволяет лишь приближенно оценить величину действующих напряжений. Расчет по формуле Ламе основан на уподоблении керамического вкладыша толстостенной трубе. Учитывая повышенную хрупкость керамических материалов, целесообразно иметь более точную картину напряженно-деформированного состояния, что позволит разработать конструкцию вкладыша и выбрать оптимальный натяг. Такой анализ может быть выполнен с применением численных методов теории упругости, в частности метода конечных элементов (МКЭ).

При этом потеря прочности поверхностного слоя наступает при достижении эквивалентным напряжением значений, близких к допусжаемому, согласно выражению:

$$\sigma_{экв} = \frac{1-\gamma}{2} \sigma_H + \frac{1+\gamma}{2} \sqrt{(\sigma_H^2 + 4\tau^2)} \leq [\sigma], \quad (2)$$

где σ_i – контактные напряжения, МПа; τ – касательные напряжения, МПа; $[\sigma]$ – допусжаемое контактное напряжение, МПа; γ – отношение:

$$\gamma = \frac{\sigma_{изг}}{\sigma_{сж}},$$

где $\sigma_{изг}$ – изгибающие напряжения, МПа; $\sigma_{сж}$ – напряжения сжатия, МПа.

Определить допускаемое напряжение можно по приближенной зависимости:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{сж}}{2,9} \quad (3)$$

Учитывая то обстоятельство, что усталостное разрушение начинается с поверхности керамической вставки, можно утверждать, что допускаемое напряжение зависит от твердости поверхности. Таким образом, механическая прочность керамических изделий, подвергаемых износу, помимо чистоты обработки поверхности, в значительной мере определяется твердостью поверхности [9]. Как правило, твердость керамики определяется по методу Виккерса с ограничением давления индентора, однако более приемлемым с целью исключения образования микротрещин следует считать метод Кнупа. При этом в качестве индентора используют алмазную пирамиду с ромбическим основанием, благодаря чему получается отпечаток, у которого продольная диагональ в 7 раз больше, чем поперечная, ее можно измерить достаточно точно; глубина внедрения меньше, что позволяет применить метод Кнупа для определения твердости покрытий из керамики. Заметим, что испытание на твердость керамики – это косвенная оценка стойкости поверхности к абразивному износу³⁻⁵. Поэтому допускаемое напряжение в формуле (1) рекомендуем также определять через твердость по Кнупу (3):

$$[\sigma] = C_1 C_2 HK, \quad (4)$$

где коэффициенты C_1 и C_2 зависят от вида керамики и условий смазки; HK – значение твердости по Кнупу. Из результатов выражений (3) и (4) будем ориентироваться на меньшее значение.

КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ХРУПКОСТИ

Ресурс работы подшипника может быть существенно повышен за счет правильно

выбранного натяга, с которым керамическая втулка установлена в стальную обойму, так как снижается усталостное трещинообразование, а контактное давление становится более равномерным. На рис. 3 представлена конструкция подшипника скольжения, в котором керамическая вставка установлена с натягом в стальную обойму и зажимается стальными клиньями с двух сторон.

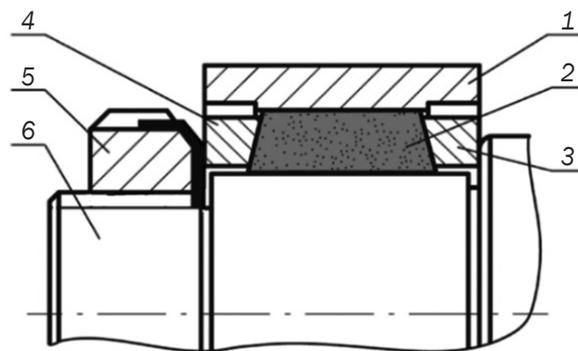


Рис. 3. Подшипник скольжения с керамической вставкой
Fig. 3. Plain bearing with ceramic insert

На рис. 3 в стальную обойму 1 установлена керамическая вставка 2 с оптимальным, рассчитанным натягом. Упомянутая вставка 2 сжимается с двух сторон клиньями 3 и 4 с помощью регулировочной шлицевой гайки 5, навинченной на резьбовой участок вала 6.

Учитывая действие контактного давления со стороны вала, можно ожидать, что при оптимальном натяге во вкладыше будут преобладать напряжения сжатия. Критерием оптимальности натяга является минимизация эквивалентных напряжений в поверхностном слое. Эквивалентные напряжения зависят от рабочих нагрузок, вызывающих действие контактных напряжений в локальных областях поверхности керамического вкладыша.

Для решения задачи нахождения оптимального натяга в зависимости от рабочих нагрузок следует использовать МКЭ. При использовании МКЭ наибольшее распространение имеет дискретно-континуальный подход. Керамическая втулка разбивается на систему некоторых элементов, контак-

³Проблемы определения твердости керамических материалов. Режим доступа: <https://www.qatm.com/ru/> (дата обращения: 10.05.2025).

⁴Преимущества технической керамики и твердых сплавов при применении в подшипниках. Режим доступа: <https://www.virial.ru/upload/medialibrary/48e/CerBearing.pdf> (дата обращения: 18.05.2025).

⁵Все о керамических подшипниках. Режим доступа: <https://www.bearing-spb.ru/articles/news/keramicheskie?ysclid=mf2t4jymxr356331224> (дата обращения: 18.05.2025).

тирующих друг с другом в дискретном множестве узловых точек. Материал при этом представляется изотропным. Можно представить втулку в виде набора торообразных элементов с меридиональным сечением в виде треугольников. Не останавливаясь на детальном изложении применения МКЭ для анализа напряженно-деформированного состояния керамического вкладыша, отметим, что согласно принципу минимума потенциальной энергии (\mathcal{E}_n) системы вектор перемещений \bar{U} , относящийся к равновесному состоянию и принимающий на поверхности вкладыша заданные значения, сообщает минимум функционалу энергии \mathcal{E}_n .

Из курса сопротивления материалов известно определение функционала энергии деформирования твердых тел, согласно которому полная энергия равна сумме потенциальной энергии деформации внутренних объемных сил и энергии внешних поверхностных сил. Полную энергию деформированного тела можно рассматривать как функционал, зависящий от функций, определяющих перемещения точек тела. Согласно вариационному принципу возможных перемещений Лагранжа, сумма работ внешних сил на малых перемещениях равна нулю.

Отсюда следует, что из всех возможных перемещений удовлетворяют условиям только те, при которых функционал энергии принимает минимальное значение. При этом необходимым условием минимума является равенство нулю частных производных по компонентам перемещений. Получаем систему линейных уравнений, количество которых в два раза превышает число узлов. После анализа результатов решения можно определить оптимальный натяг, уточнить размеры и форму керамического вкладыша исходя из характеристик механических свойств выбранного материала.

Таким образом, повышение надежности предложенного подшипника достигается за счет повышения вероятности безотказной работы при повышении износостойкости поверхности керамического вкладыша, по-

скольку в нем минимизированы растягивающие напряжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальность применения керамических материалов в подшипниках скольжения связана с повышением требований к условиям эксплуатации узлов трения, в частности, при высоких температурах и в агрессивных средах. В статье приведены сведения о современных керамических материалах и их преимуществах перед традиционными металлическими материалами.

Вместе с тем широкому применению этих материалов препятствует их недостаточно высокая надежность, поскольку ее главным показателем является вероятность безотказной работы, которая напрямую связана с такими критериями работоспособности подшипника, как прочность и износостойкость. Низкая прочность изделий из керамики связана с хрупкостью под действием напряжений растяжения. Однако сопротивление керамики разрушению при напряжениях сжатия достаточно ощутимое.

В предложенной оригинальной конструкции подшипника скольжения керамический вкладыш находится в сложном напряженном состоянии с преобладанием напряжений сжатия. Анализ напряженно-деформированного состояния по методу МКЭ позволяет выбрать диапазон значений оптимального натяга при заданных значениях контактного давления в подшипнике и характеристиках выбранного материала, который обеспечит преобладание напряжений сжатия над напряжениями растяжения.

Таким образом, за счет минимизации растягивающих напряжений во вкладыше в предложенной конструкции при расчетном оптимальном натяге мы обеспечиваем преобладание напряжений сжатия над растяжением, тем самым повышается надежность подшипника за счет увеличения вероятности безотказной работы по главному критерию работоспособности подшипника скольжения – износостойкости.

Список источников

1. Панов А.Д., Панова И.М. Определение срока службы гибридных подшипников // Главный механик. 2019. № 2. С. 17–25. EDN: YWAIST.
2. Панова И.М. Особенности конструирования изделий из керамических материалов // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 4. С. 45–50. EDN: PYMCPB.

3. Куличков С.В. Применение керамических материалов для повышения надежности узлов трения технологического оборудования // Техническая эксплуатация водного транспорта: проблемы и пути развития: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Петропавловск-Камчатский, 26 ноября 2020 г.). Петропавловск-Камчатский: Камчатский государственный технический университет, 2021. С. 93–95. EDN: GAVGOP.
4. Алисин В.В. Циркониевые керамические материалы триботехнического назначения // Развитие науки и образования: монография. Чебоксары: Среда, 2019. Вып. 4. С. 5–16. <https://doi.org/10.31483/r-22125>. EDN: ZBSRYL.
5. Кулик В.И., Нилов А.С. Перспективы применения керамических материалов в узлах трения оборудования горнодобывающей промышленности // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 9. С. 52–57. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-52-57>. EDN: GNVXEZ.
6. Нуралин Б.Н., Куанышев С.М., Куанышев К.М., Куанышев М.К. Применение твёрдого антифрикционного композитного материала в конструкции подшипников скольжения // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2016. № 6. С. 61–64. EDN: XSLAHP.
7. Рощин М.Н. Исследование возможности уменьшения момента трения в подшипниках скольжения из циркониевой керамики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 6. С. 11–14. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJJS.
8. Савченко Н.А., Саблина Т.Ю., Кульков С.Н. Особенности трибологического поведения керамики на основе диоксида циркония в условиях высокоскоростного трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Т. 13. № 4-3. С. 857–862. EDN: PCLSVR.
9. Панова И.М., Синицына Ю.В. Анализ факторов, влияющих на ресурс керамических подшипников скольжения // Вестник науки. 2024. Т. 4. № 4. С. 697–708. EDN: CGYTVE.
10. Шевченко В.Я., Терещенко Г.Ф. Исследования, разработки и инновации в области керамических и стекло-материалов // Вестник Российской академии наук. 2000. Т. 70. № 1. С. 50–56.
11. Гаршин А.П. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 384 с.
12. Шаталин А.С., Ромашин А.Г. Новые конструкционные материалы на основе керамики и композитов с керамической матрицей. Ч. 1. Конструкционные керамические материалы // Перспективные материалы. 2001. № 4. С. 5–16.
13. Лукин Е.С., Попова Н.А., Ануфриева Е.В., Сафина М.Н., Горелик Е.И., Сабурова И.Н. [и др.] Современная оксидная керамика и области ее применения // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. 2014. № 2. С. 30–39. EDN: TDOTYP.
14. Баринов С.М., Шевченко В.Я. Прочность технической керамики. М.: Наука, 1996. 159 с.
15. Эванс А.Г., Лэнгдон Т.Г. Конструкционная керамика: монография / пер. с англ. Л.П. Карпиловского, Б.И. Поляка; под ред. А.С. Власова. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
16. Вовк М.Ю., Кулалаев В.В., Свонин П.А., Зюлькова М.В. Облик матричного керамического подшипника скольжения с пористой структурой для опоры ротора перспективного газотурбинного двигателя // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции (г. Самара, 23–25 июня 2021 г.). Самара: Самарский нац. исследовательский ун-т им. акад. С.П. Королева, 2021. Т. 1. С. 207–208. EDN: DHJDWP.
17. Чернавский С.А. Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963. 245 с.
18. Зубко А.И., Донцов С.Н. Исследование условий работоспособности и разработка диагностики керамических подшипников нового поколения // Электронный журнал «Труды МАИ». 2014. № 74. С. 16. EDN: SDZCFL.
19. Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing // Journal of Engineering Tribology. 2010. Vol. 224. Iss. 1. P. 81–89. <https://doi.org/10.1243/13506501JET570>.
20. Рощин М.Н. Исследование возможности уменьшения момента трения в подшипниках скольжения из циркониевой керамики // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. 2020. № 6. С. 11–14. <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJJS.
21. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов: монография / пер. с англ. А.А. Шестакова; под ред. Б.Е. Победри. М.: Мир, 1979. 392 с.
22. Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация / пер. с англ. Б.И. Квасова; под ред. Н.С. Бахвалова. М.: Мир, 1986. 318 с.

References

1. Panov A.D., Panova I.M. Determining service life of hybrid bearings. *Chief Mechanical Engineer*. 2019;2:17-25. (In Russ.). EDN: YWAIST.
2. Panova I.M. Design characteristics of ceramic materials products. *Proceedings of Higher Educational Institutions*. 2013;4:45-50. (In Russ.). EDN: PYMCPB.
3. Kulichkov S.V. Application of ceramic materials to improve the reliability of friction units of technological equipment. In: *Tekhnicheskaya ekspluatatsiya vodnogo transporta: problemy i puti razvitiya: materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Technical operation of water transport: problems and development trends: Proceedings of the 3^d International scientific and technical conference*. 26 November 2020, Petropavlovsk-Kamchatskii: Kamchatka State Technical University; 2021, p. 93-95. (In Russ.). EDN: GAVGOP.
4. Alisin V.V. Zirconium ceramic materials for tribotechnical purposes. In: *Razvitie nauki i obrazovaniya = Development of science and education*. Cheboksary: Sreda; 2019, iss. 4, p. 5-16. (In Russ.). <https://doi.org/10.31483/r-22125>. EDN: ZBSRYL.

5. Kulik V.I., Nilov A.S. Prospects for the use of ceramic materials in friction units of equipment in the mining industry. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;9:52-57. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-9-52-57>. EDN: GNVXEZ.
6. Nuralin B.N., Kuanyshev S.M., Kuanyshev K.M., Kuanyshev M.K. Application of solid antifriction composite material in the design of slide bearings. *Izvestia Orenburg State Agrarian University*. 2016;6:61-64. (In Russ.). EDN: XSLAHP.
7. Roshchin M.N. Investigation of the possibility of reducing the friction moment in sliding bearings made of zirconium ceramics. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;6:11-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
8. Savchenko N.L., Sablina T.Yu., Kulkov S.N. Wear behavior of zirconia-based ceramics under high-speed friction. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2011;13(4-3):857-862. (In Russ.). EDN: PCLSVR.
9. Panova I.M., Sinitsyna Yu.V. Analysis of factors affecting service life of ceramic plain bearings. *Vestnik nauki*. 2024;4(4):697-708. (In Russ.). EDN: CGYTVE.
10. Shevchenko V.Ya., Tereshchenko G.F. Research, development and innovation in the field of ceramic and glass materials. *Herald of the Russian Academy of Sciences*. 2000;70(1):50-56. (In Russ.).
11. Garshin A.P. *Ceramics for mechanical engineering*. Moscow: Nauchtekhizdat; 2003, 384 p. (In Russ.).
12. Shatalin A.S., Romashin A.G. New structural materials on the base of ceramics and composites with ceramic matrix. *Perspektivnye materialy*. 2001;4:5-16. (In Russ.).
13. Lukin E.S., Popova N.A., Anufrieva E.V., Safina M.N., Gorelik E.I., Saburina I.N., et al. Novel oxide ceramics and fields of its application. *News Academy of Engineering Sciences A.M. Prokhorov*. 2014;2:30-39. (In Russ.). EDN: TDOTYP.
14. Barinov S.M., Shevchenko V.Ya. *Technical ceramics strength*. Moscow: Nauka; 1996, 159 p. (In Russ.).
15. Evans A.G., Langdon T.G. *Structural ceramics*. California: Pergamon Press Ltd; 1976. (Russ. ed.: *Konstrukcionnaya keramika*. Moscow: Metallurgiya; 1980, 256 p.)
16. Vovk M.Y., Kulalayev V.V., Svodin P.A., Zulkova M.V. The appearance of a matrix ceramic journal bearing with a porous structure for the rotor support of a promising gas turbine engine. *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii = Problems and Development Prospects of Engine Manufacturing: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference*. 23–25 June 2021, Samara. Samara: Samara National Research University named after academician S.P. Korolev; 2021, vol. 1, p. 207-208. (In Russ.). EDN: DHJDWP.
17. Chernavsky S.A. *Plain bearings*. Moscow: Mashgiz; 1963, 245 p. (In Russ.).
18. Zubko A.I., Dontsov S.N. Studying performance conditions and development of diagnostics for new generation ceramic bearings *Elektronnyj zhurnal "Trudy MAI"*. 2014;74:16. (In Russ.). EDN: SDZCFL.
19. Durazo-Cardenas I.S., Corbett J., Stephenson D.J. The performance of a porous ceramic hydrostatic journal bearing. *Journal of Engineering Tribology*. 2010;224(10):81-89. (In Russ.). <https://doi.org/10.1243/13506501JET570>.
20. Roshchin M.N. Investigation of the possibility of reducing the friction moment in sliding bearings made of zirconium ceramics. *Transport, mining and construction engineering: science and production*. 2020;6:11-14. (In Russ.). <https://doi.org/10.26160/2658-3305-2020-6-11-14>. EDN: JMCJIS.
21. Segerlind L.J. *Applied finite element analysis*. New York; London; Sydney; Toronto: John Wiley and Sons; 1976. (Russ. ed.: *Primenenie metoda konechnykh elementov*. Moscow: Mir; 1979, 392 p.)
22. Zienkiewicz O., Morgan K. *Finite elements and approximation*. New York; Chichester; Toronto; Singapore: John Wiley and Sons; 1983. (Russ. ed.: *Konechnye elementy i approksimaciya*. Moscow: Mir; 1986, 318 p.)

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Панова Ирина Михайловна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры основ
конструирования машин,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1, Россия
✉ pim-07@mail.ru

Irina M. Panova,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Machine
Design Fundamentals,
Bauman Moscow State Technical University,
5, 2nd Baumanskaya St., bld. 1, Moscow 105005,
Russia
✉ pim-07@mail.ru

Синицына Юлия Владимировна,

к.т.н.,
доцент кафедры основ
конструирования машин,
Московский государственный технический
университет им. Н.Э. Баумана,
105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул.,
д. 5, стр. 1, Россия
js.werris@bmstu.ru

Yulia V. Sinitsyna,

Cand. Sci. (Eng.),
Associate Professor of the Department of Machine
Design Fundamentals,
Bauman Moscow State Technical University,
5, 2nd Baumanskaya St., bld. 1, Moscow 105005,
Russia
js.werris@bmstu.ru

Заявленный вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 25.06.2025 г.; одобрена после рецензирования 02.08.2025 г.; принята к публикации 17.08.2025 г.

Authors' contribution

The authors contributed equally to this article.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 25.06.2025; approved after reviewing 02.08.2025; accepted for publication 17.08.2025.