

Научная статья

УДК 66.017

DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94

## МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ (обзор)

Н.П. Бурковская<sup>1</sup>, Н.В. Севостьянов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Москва, Россия; admin@viam.ru

**Аннотация.** Рассмотрены составы, свойства, способы изготовления металлокерамических материалов (МКМ) для подшипников скольжения транспортных машин и другой техники. Показано, что в качестве матричного материала металлокерамических подшипников в основном используют железо, медь, кобальт и никель или сплавы на их основе. Керамический наполнитель выбирают для улучшения прочностных свойств, повышения износостойкости и несущей способности. Повышение смазывающих характеристик обеспечивают введением в состав МКМ твердых смазок: графита, нитрида бора или сульфидов, а также полимеров.

**Ключевые слова:** антифрикционные материалы, металлокерамический материал, подшипники скольжения, коэффициент трения, износостойкость, пара трения, триботехнический узел

**Для цитирования:** Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.

Scientific article

## CERMETS FOR PLAIN BEARINGS (review)

N.P. Burkovskaya<sup>1</sup>, N.V. Sevostyanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific-Research Institute of Aviation Materials» of National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia; admin@viam.ru

**Abstract.** The compositions, properties, methods of manufacturing of cermet materials for plain bearings of transport vehicles and other equipment are considered. It is shown that iron, copper, cobalt and nickel or alloys based on them are mainly used as the matrix material of cermet bearings. Ceramic filler is selected to improve strength characteristics, increase wear resistance and load-bearing capacity. An increase in lubricating characteristics is provided by the introduction of solid lubricants into the composition of cermet materials: graphite, BN or sulfides, as well as polymers.

**Keywords:** antifriction materials, cermet material, plain bearings, coefficient of friction, wear resistance, friction pair, tribological unit

**For citation:** Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V. Cermets for plain bearings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.

### Введение

Известно, что эволюция подшипников определяется совершенствованием их материалов и смазочных масел, используемых в них для снижения трения.

В отличие от подшипников, работающих в условиях принудительной подачи смазки, подшипники сухого трения не требуют сложной системы подачи смазки и герметизации узлов трения, что в результате способствует снижению массы конструкции машины, повышает ее надежность и упрощает обслуживание. Используемые в настоящее время полимерные и металлополимерные материалы из-за недостаточной несущей способности не позволяют выдержать межремонтный интервал, предусмотренный регламентом технического обслуживания, что приводит к дополнительным финансовым затратам. Одним из эффективных путей решения данной проблемы является применение металлокерамических композиционных материалов для подшипника скольжения.

В данной работе представлен обзор износостойких металлокерамических композиционных материалов для подшипников скольжения сухого трения, в том числе тяжело нагруженных.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### **Металлокерамические композиционные материалы для подшипников**

Одним из ответственных элементов узлов трения большинства транспортных машин и механизмов являются подшипники. Выбор материала для подшипника определяется его размерами и условиями эксплуатации [1].

По данным, представленным в патенте [2], в настоящее время наиболее перспективными в области подшипникового производства считаются подшипники на керамической основе, которые можно эксплуатировать при высокой температуре в устройствах, подверженных коррозионному и абразивному воздействию, а также при одновременном воздействии магнитных и электрических полей [3]. В рамках совместного проекта RolaMot разработкой подшипников из керамики занимаются специалисты компаний FEV, FCT и Cerobear. Что касается производства, то подшипники скольжения на керамической основе изготавливают методами порошковой металлургии, являющейся перспективной технологией для массового производства, преимуществами которой заключаются в значительной экономии энергии и материалов, высокой производительности, точности и стабильности. Тем не менее, говоря об изготовлении керамических подшипников скольжения, следует отметить их высокую стоимость. К другим серьезным недостаткам относят также их хрупкость [3, 4]. Использование пластичной металлической матрицы позволяет решить проблему хрупкости, а подшипник, совмещающий керамическую составляющую и пластичную металлическую матрицу, рассматривается как металлокерамический. В развитии современного материаловедения для тяжело нагруженных узлов трения одним из основных направлений является разработка новых металлокерамических материалов (МКМ).

Подшипники скольжения из таких материалов применяют в триботехнических узлах, где необходимы высокая износостойкость и низкий коэффициент трения (до 0,02). В работе [5] МКМ для подшипников условно разделены на две группы:

– пористые материалы на металлической основе и графита: железографит, бронзографит, алюмографит. Материалы этой группы содержат в некоторых случаях твердые смазки (нитрид бора – BN) и сульфиды ( $WS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $CuS_2$ ,  $FeS$ ,  $CoS$ ,  $TiS_2$ ,  $SnS$ ), содержание которых может меняться от 1,5 до 10 % (по массе). Доля основного металла при этом составляет 88–99 % (по массе), графита 0,3–4 % (по массе) [4, 5];

– сплавы на основе железа, меди и других металлов с полимерной пропиткой, обычно политетрафторэтиленом (ПТФЭ), содержание которого составляет от 1,5 до 10 % (по массе) [5].

Материалы второй группы получают методом взрывного прессования [6, 7]. В качестве полимерной фазы может применяться не только ПТФЭ, но и сверхвысокомолекулярный политетрафторэтилен (СВМПЭ), нейлон, капрон и др. Данные полимеры выполняют при трении роль твердой смазки [8]. Коэффициент трения СВМПЭ (по стали) составляет  $\sim 0,1$  [9].

Однако, несмотря на информацию, представленную в работе [5], материалы второй группы с полимерным наполнением в качестве твердой смазки следует определять как металлополимерные подшипниковые материалы. Отдельно необходимо рассматривать проблемы эксплуатационной стойкости и стойкости к климатическим воздействиям таких подшипниковых материалов [10].

В условиях высоких нагрузок, температур и сухого трения на сопряженных поверхностях пары трения могут возникать задиры и схватывание. Разработка металлополимерных подшипников позволяет увеличить запас твердой смазки.

В статье [11] утверждается, что разработка бронзофторопластового материала марки БФГ-50М для узлов трения авиационной техники позволила увеличить пористость бронзового слоя (до 50 %) и запас твердой смазки, следовательно, износостойкость и антифрикционность материала. Тем не менее, авторы пишут, что металлофторопластовый материал не обеспечивает полностью ресурс узлов трения.

Развитие современной науки и техники требует разработки материала, работоспособного в условиях высоких температур, устойчивого к износу и с высокой смазывающей способностью. Поскольку при трении происходит вытеснение смазки с поверхности подшипника, возникает острая необходимость в разработке высокотемпературной смазки для обеспечения способности самосмазывания в условиях повышенного износа при высокой температуре или в агрессивной среде. Большинство таких разработок в основном принадлежит китайским исследователям. В компании Anhui Silver-Ball Bearing Co Ltd (Китай) получены высокопрочные самосмазывающиеся подшипниковые МКМ [12–18], в которых в качестве смазки использовался наноразмерный углерод.

В самосмазывающемся материале на металлической или керамической основе уровень трибологических свойств зависит от осаждения и дисперсного распределения твердой смазки в матричном материале. Важно, чтобы при температуре спекания твердая смазка не потеряла смазывающих свойств, поскольку неравномерность ее распределения или разрушение могут значительно снизить триботехнические характеристики матричного материала. В работе [12] реализован способ решения проблемы высокотемпературного самосмазывания и износа путем оптимального соотношения диаметра частиц исходного порошка и их формы или порообразующего компонента, что позволяет осуществлять регулирование пористости частиц, их размера и распределение.

Разработчиками компании Anhui Silver-Ball Bearing Co Ltd описан способ изготовления высокопрочного самосмазывающегося подшипника из МКМ системы TiC/Fe–Cr–W–Mo–V [12–17], в котором содержание смазки составляет 0,7–0,9 % (по массе), графита 1,0–1,1 % (по массе), а доля основного металла (железа) составляет 65,0–66,0 % (по массе). Кроме того, состав материала содержит значительное количество порообразующего компонента.

Порошковую шихту, восстановленную в атмосфере водорода при температуре 500–520 °С, компактируют в вакууме холодным прессованием при давлении 600–620 МПа с последующим вакуумным жидкофазным спеканием при температуре 1230–1235 °С и охлаждением с печью до комнатной температуры.

Проблему повышения прочности сцепления керамической и металлической фаз подшипника решают путем модификации покрытия карбидом титана – поверхность

частиц керамической фазы покрывали железом и никелем (использовали цитрат железа и основной карбонат никеля). Применение нанокремнезема, альгината железа и фероценацетиленового кетона значительно повышает прочность и ударную вязкость материала, улучшает смазочные характеристики и компактируемость в процессе прессования, обеспечивает связуемость пор спеченных материалов. Кроме того, улучшается показатель пористости, а износостойкость подшипника становится чрезвычайно высокой.

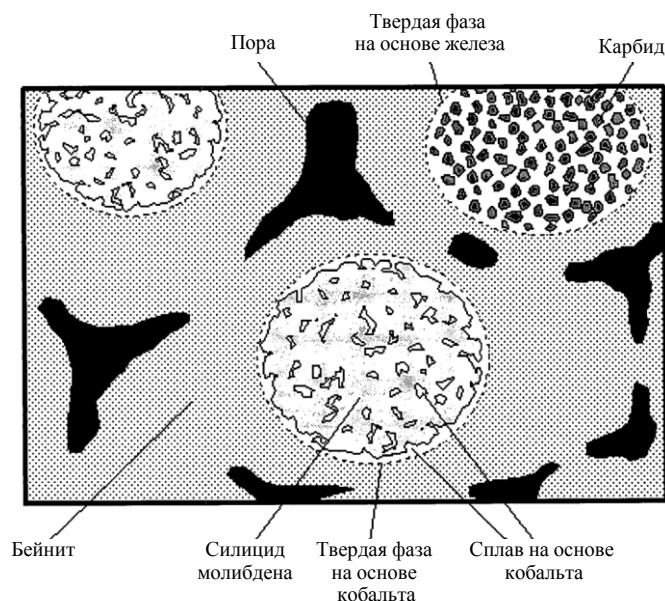
В патенте [18] представлен самосмазывающийся металлокерамический подшипник с высокими показателями твердости, прочности, трещиностойкости и устойчивости к изгибу. Подшипник изготавливают из сырья, аналогичного описанному ранее, с помощью таких соединений, как  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{WC}$ ,  $\text{LaB}_6$ ,  $\text{GeO}_2$ , и волокон бора нанометрового размера, которые улучшают термическое сопротивление и сопротивление изгибу материала подшипника.

Уменьшения размера зерна и увеличения сцепления между металлической матрицей и керамической составляющей достигают с помощью трихлорида галлия и селенида кадмия. Наноразмерные порошки триоксида вольфрама и оксида циркония повышают износостойкость и жаропрочность подшипника в условиях высоких температур [16].

Улучшения смазывающих свойств и износостойкости подшипника достигают благодаря использованию оптического изомера аминокислоты – L-аргинина, триоксида молибдена и нитрата серебра [17]. Применение смешанного оксида лантана и алюминия обеспечивает мелкозернистую структуру материала и повышает жаропрочность подшипника.

В изобретении [18] улучшение смазывающих свойств и ударной вязкости материала подшипника обеспечивают за счет добавления оксида ниобия (V), борида димольбдата, нитевидных кристаллов бората алюминия и порошка вольфрамовой бронзы, легированной танталом.

Способ изготовления износостойкого спеченного сплава с твердой фазой (см. рисунок) описан в работе [19]. Износостойкий спеченный материал содержит от 5 до 40 % (по массе) твердой фазы на основе кобальта (осажденного совместно с силицидом молибдена), диспергированной в матрице сплава железа и состоящей из фаз бейнита, мартенсита и аустенита.



Структура износостойкого спеченного сплава с твердой фазой Fe–Co

Изобретение относится к износостойкому спеченному сплаву, используемому в материалах седел клапанов для автомобильных двигателей большой мощности.

Износостойкий спеченный элемент, содержащий матрицу из сплава на основе железа и твердую фазу, диспергированную в матрице из сплава на основе железа, описан в работе [20]. Частицы сульфида марганца размером 10 мкм и менее равномерно диспергированы в кристаллических зернах матричного сплава на основе железа.

В работе [21] описан износостойкий спеченный материал, в котором карбиды  $M_6C$  со средним диаметром частиц 5 мкм и более осаждены в количестве от 20 до 50 % (объемн.) в исходной мартенситной фазе на основе железа, имеющей твердость HRC 50. Более высокой твердости можно достигнуть при отпуске до температуры 600 °С. Износостойкий материал наносят на материал-основу для использования в триботехнических узлах строительных машин и т.п. Применение материала с повышенной стойкостью к заеданию увеличивает срок эксплуатации за счет предотвращения износа, особенно в условиях дефицита смазки при высоких скоростях скольжения.

В патенте [22] японскими разработчиками описан способ изготовления материала для подшипника, который демонстрирует превосходную способность самосмазывания. Материал изготавливают путем смешивания твердой смазки (графит,  $MoS_2$ ,  $WS_2$ , стекло, Pb, BN) с порошком на основе железа или меди, затем формируют заготовку и путем последующего взрывного прессования получают материал с высокой плотностью.

Проблему однородного распределения твердых частиц в материале седла клапана двигателя внутреннего сгорания, которое обеспечивает равномерное сопротивление износу по всему объему, решают разработчики в компании Honda Motor Co Ltd [23]. Описан дисперсно-упрочненный медный сплав следующего состава, % (по массе): (6–15)Co, (3–8)Cr (или Mo), (0,3–1)W, (0,5–1,8)Fe, (8–15)Ni, (0,08–0,2)C, (1,5–4)Si, (0,5–0,8)Al, (0,1–0,3)P; остальное – медь и необходимые примеси. Порошковый материал получен лазерным спеканием. Средний размер частиц составляет от 8 до 20 мкм, распределение частиц по размеру – в диапазоне от 0,1 до 100 мкм.

Частицы твердой фазы занимают площадь от 10 до 40 % в произвольном поперечном сечении, т.е. они, по существу, равномерно распределены в медной матрице. По этой причине значения твердости одинаковые по всему объему материала. Частицы с высокой твердостью обладают превосходной износостойкостью. Кроме того, поскольку средний размер частиц и их распределение по размеру находятся в пределах заданных диапазонов, также удается избежать увеличения шероховатости поверхности.

В работе [24] представлен материал для подшипника, содержащий гранулированный графит и металлическую матрицу. Порошковую смесь предварительно прессуют, а затем производят ее спекание. В спеченном подшипнике реализуется соотношение площади гранул свободного графита в произвольном поперечном сечении подшипника 25 к ~80 %.

В настоящее время выпускается большое количество «твердых сплавов», представляющих собой металлические композиционные материалы с высоким содержанием твердой фазы на металлической связке [25, 26], которые нашли широкое применение в металлообрабатывающей промышленности для изготовления расходных инструментов. Благодаря высоким показателям износостойкости, твердости и прочности при ударе такие материалы применяют для производства подшипников скольжения, работающих в неблагоприятных условиях. Например, из них изготавливают подшипники скольжения для работы в скважинном оборудовании в условиях высокого абразивного износа и повышенных радиальных и осевых нагрузок [27].

В охранном документе компании Shandong University of Technology [28] описан композиционный материал на основе кобальта. Изобретение относится к области

высокотемпературных износостойких сплавов. Состав матричного сплава следующий, % (по массе):  $\sim(30-34)\text{Cr}$ ,  $\sim(9-28)\text{W}$ ,  $(3-8)\text{Ni}$ ,  $(3-6)\text{V}$ ,  $\sim(1,5-2,5)\text{C}$ ; остальное – кобальт, а основной упрочняющей фазой материала является карбид типа  $\text{M}_6\text{C}$  и  $\text{M}_{23}\text{C}_6$ . Композиционный материал изготавливают порошковой металлургией. Сплав обладает высокой жаростойкостью, стойкостью к коррозии и хорошими антиабразивными характеристиками. Введение карбида вольфрама (WC) в матричный сплав на основе кобальта (за счет высокотемпературного фазового превращения WC) приводит к образованию армирующей фазы карбида  $\text{M}_6\text{C}$ , которая существенно повышает твердость и износостойкость сплавов на основе кобальта.

В патенте компании Suzhou Xinrui Alloy Tool Co Ltd [29] описан способ получения твердого сплава системы WC-Co (кобальт) по следующей схеме:

– спекание при температуре  $\sim(1360-1400)^\circ\text{C}$  заготовки из твердого сплава, прессованной из шихты после размолла в шаровой мельнице;

– охлаждение спеченной заготовки до температуры  $\sim(600-900)^\circ\text{C}$  в течение  $\sim(1-2)$  ч, а затем до температуры  $\sim(400-500)^\circ\text{C}$  в течение  $\sim(1-2)$  ч с последующим охлаждением до комнатной температуры;

– глубокое охлаждение в жидком азоте, температура обработки составляет  $\sim(-180\div-190)^\circ\text{C}$ ;

– отпуск заготовки при температуре  $\sim(350-400)^\circ\text{C}$  для окончательного формирования структуры твердого сплава.

Представленный способ изготовления твердого сплава способствует улучшению коэффициента трения, а также повышает ударопрочность сплава. Кроме того, допустима частичная замена кобальта на никель, что позволяет реализовать характеристики, соответствующие твердым сплавам системы WC-Co-Ni.

Изобретение компании Central South University представлено в работе [30]. Описан способ изготовления твердого сплава системы WC-Fe-Ni методом порошковой металлургии путем измельчения и смешивания 75–92 % (по массе) твердой фазы карбида вольфрама (содержание углерода составляет 6,01–6,11 % (по массе)), 5–14 % (по массе) порошка железа и 3–11 % (по массе) порошка никеля с последующей штамповкой и спеканием заготовки при давлении 4,5–6,0 МПа. Мартенситного фазового превращения достигают путем криогенной обработки материала кольца системы WC-Fe-Ni, при этом выпадает вольфрам, дисперсно распределенный в связующей фазе, что приводит к упрочнению и повышению твердости на 19,5 %, а также к снижению коэффициента трения на 22,4 % и улучшению износостойкости на 55,5 %. Характеристики разработанного материала выше, чем у подшипника качения, изготовленного из твердого сплава марки YGR55 системы WC-25(Co-Ni-Cr). Таким образом, срок службы элемента подшипника увеличивается на 5 % по сравнению с кольцом из твердого сплава YGR55, а стоимость производства снижается более чем на 15 %.

Изобретение компании Luoyang Mingli Science and Technology Development Co Ltd представлено в работе [31]. Описан способ изготовления материала подшипника из твердого сплава системы WC-Fe-Ni-Co (имеющего низкую стоимость, но обладающего высокими эксплуатационными характеристиками) следующего состава, % (по массе): 25WC, 8Fe, 8Ni, 9Co. Пористость полученного образца составляет 0,03 %, а твердость, прочность при изгибе и вязкость разрушения – соответственно 948 МПа, 2809 МПа и  $21,7 \text{ МПа} \sqrt{\text{м}}$ .

В работе [32] представлен твердый сплав с повышенной ударной вязкостью. Твердой фазой сплава является карбид WC, связующей фазой – кобальт с интерметаллидным соединением  $\text{Ni}_3\text{Al}$  ( $\gamma'$ -фаза), объемная доля которой составляет 10–40 %. Способ приготовления твердого сплава включает следующие последовательные этапы: равномерное смешивание 2,07–16,05 % (по массе) порошковой смеси никеля и алюминия (в соответствии со стехиометрическим соотношением  $\text{Ni}_{25}\text{Al}$ ) с порошком WC; спекание в графитовой пресс-форме в температурном диапазоне  $1100-1200^\circ\text{C}$  в инертной атмосфере; измельчение и просеивание порошковой смеси (WC и  $\text{Ni}_3\text{Al}$ ) для отделения

фракции с размером частиц <120 мкм; восстановление порошка в атмосфере водорода при температуре  $400 \pm 50$  °С в течение 6–12 ч; измельчение в жидкости 83,26–97,62 % (по массе) смешанного порошка, полученного после восстановления, затем добавление остатка порошка кобальта и проведение измельчения в течение 18–36 ч; сушка и формование под давлением измельченного смешанного материала; жидкофазное спекание прессованной заготовки при температуре 1350–1550 °С с получением твердого сплава системы WC–Co–Ni<sub>3</sub>Al. За счет равномерного распределения Ni<sub>3</sub>Al в связующей фазе, сплав обладает высокой прочностью, хорошей износостойкостью и стойкостью к высокотемпературному окислению и коррозии.

Перспективными для триботехнического применения в тяжело нагруженных узлах трения, работающих в условиях высоких температур с ограниченной подачей смазки, являются МКМ на основе никелевых сплавов с высоким наполнением [33]. В качестве керамического наполнителя применяют бориды, карбиды, карбонитриды, нитриды, оксиды, силициды, интерметаллиды и более сложные соединения, а также их комбинации. Дополнительно в состав могут входить твердые смазки (С, MoS<sub>2</sub>, BN и др.) и легкоплавкие металлы (свинец, серебро и др.), выполняющие роль гидродинамических смазок в тонких слоях. В парах трения скольжения, выполненных из высоконаполненных МКМ, удается получить низкие значения коэффициента трения и малую величину износа [34]. Высоконаполненные МКМ триботехнического назначения по своим свойствам не уступают керамическим и имеют перед ними ряд преимуществ. Металлическая связка МКМ обеспечивает их устойчивость к вибрации и ударам.

В работе [35] описаны металлокерамические подшипники скольжения, применяемые в небольших электродвигателях с диаметром вала до 12 мм. Структура материала подшипников пористая, при этом металлокерамика пропитана жидкой смазкой. Преимуществами таких материалов являются точность и легкость монтажа, большой срок службы. Кроме того, они не требуют обслуживания при эксплуатации. В автомобильной промышленности предпочтительнее применение подшипников из металлокерамики на основе стали, чем на основе бронзы. Невысокая стоимость железокерамических подшипников в сочетании с высокой стойкостью к коррозии обеспечивает меньшее окисление смазки. Достоинствами подшипников из металлокерамики на основе бронзы являются большая несущая способность, меньший уровень шума и оптимальный коэффициент трения (см. таблицу).

**Классификация металлокерамических материалов [34]**

Материал	Обозначение материала*	Состав материала и содержание его компонентов, % (по массе)	Характеристика материала
Спеченный сплав на основе железа	Sint-B 00	Fe	Стандартный материал, отвечающий требованиям для умеренных нагрузок и уровня шума
Спеченная сталь, содержащая медь	Sint-B 10	<0,3С, (1–5)Cu, остальное – Fe	Материал с высокой износостойкостью и более высокой несущей способностью, чем у чистого железа
Спеченная сталь с более высоким содержанием меди	Sint-B 20	20Cu, остальное – Fe	Материал с более низкой стоимостью, чем у спеченной бронзы, имеющий хорошие шумовые характеристики и высокие значения предела работоспособности** материала
Спеченная бронза	Sint-B 50	<0,2С, (9–10)Sn, остальное – Cu	Стандартный материал на основе системы Cu–Sn, имеющий хорошие шумовые характеристики

\* Материалы Sint-B имеют пористость 20 %, Sint-A: 25 %, Sint-C: 15 %.  
 \*\* Определяется как произведение прилагаемой нагрузки и скорости скольжения.

### Заключения

В работе рассмотрены составы, свойства, способы изготовления и применение МКМ для подшипников скольжения транспортных машин и другой техники. В качестве матричного материала металлокерамических подшипников в основном используют железо, медь, кобальт и никель или сплавы на их основе. Керамический наполнитель выбирают в зависимости от: требующих улучшения прочностных характеристик, повышения износостойкости и несущей способности. Улучшение смазывающих характеристик обеспечивают введением в состав МКМ твердых смазок: графита, нитрида бора или сульфидов ( $WS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $CuS_2$ ,  $FeS$ ,  $CoS$ ,  $TiS_2$ ,  $SnS$ ), а также полимеров.

Изучены основные направления разрабатываемых износостойких антифрикционных МКМ, способных работать при высоких скоростях, со значительными нагрузками и имеющих низкий коэффициент трения. В научно-технической литературе последних десятилетий преобладают изобретения китайских разработчиков, направленные на решение ряда проблемных вопросов, касающихся повышения однородного распределения пор, улучшения прочности и ударной вязкости за счет добавления керамических частиц ( $Mo_2C$ ,  $WC$ ,  $LaB_6$ ,  $GeO_2$  и волокон бора) и смазывающих характеристик путем введения твердых смазок (нитрида бора, карбида вольфрама или сульфидов ( $WS_2$ ,  $MoS_2$ ,  $CuS_2$  и др.)).

Японские компании решают проблему однородного распределения твердых частиц в МКМ для триботехнических узлов двигателя внутреннего сгорания, что обеспечивает равномерное сопротивление износу материала по всему объему.

В настоящее время выпускается большое количество «твердых сплавов», которые находят широкое применение не только в металлообрабатывающей промышленности для изготовления расходных инструментов. Благодаря высоким показателям износостойкости, твердости и ударной прочности, такие материалы используются для изготовления подшипников скольжения в скважинном оборудовании, работающих в условиях высокого абразивного износа и повышенных радиальных и осевых нагрузок.

Перспективными для триботехнического применения в тяжело нагруженных узлах трения, работающих в условиях высоких температур с ограниченной подачей смазки, являются МКМ на основе никелевых сплавов с высоким наполнением керамическими частицами.

Металлокерамические подшипники изготавливают в основном, применяя технологии порошковой металлургии с последующей консолидацией прессованием (холодное прессование с последующим спеканием, а также горячее, плазменное или взрывное прессование).

### Список источников

1. Онищенко Г.Г., Каблов Е.Н., Иванов В.В. Научно-технологическое развитие России в контексте достижения национальных целей: проблемы и решения // Инновации. 2020. № 6 (260). С. 3–16.
2. Способ изготовления высокотемпературного композиционного антифрикционного материала: пат. 2695854 Рос. Федерация; заявл. 15.01.18; опубл. 29.07.19.
3. Copper-based alloy sliding-bearing material and preparation method thereof: pat. CN 103602849; filed 10.10.13; publ. 09.03.16.
4. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В., Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.
5. Опоры скольжения. Подвеска и рулевое управление // Автокомпоненты: бизнес, технологии, сервис: мультифункциональный портал ИД «Макс Медиа Групп». URL: <https://a-kt.ru/articles/opory-skolzheniya> (дата обращения: 08.06.2022).

6. Севостьянов Н.В., Розен А.Е., Бузник В.М., Логинов О.Н., Усатый С.Г., Болсуновская Т.А. Медно-фторопластовый токопроводящий композиционный материал, полученный взрывным прессованием // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 1. С. 55–62.
7. Адаменко Н.А., Трыков Ю.П., Фетисов А.В. Полимерные и металлополимерные материалы, полученные взрывной обработкой // Перспективные материалы. 2004. № 3. С. 63–68.
8. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 404 с.
9. Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) – материал для экстремальных условий / Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. URL: [https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION\\_ID=1487](https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1487) (дата обращения: 22.07.2022).
10. Каблов Е.Н., Старцев В.О. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
11. Мигунов В.П., Чатынян Л.А., Иванов Е.В. и др. Износостойкие и антифрикционные материалы для узлов трения // Авиационная промышленность. 1982. № 8. С. 71–73.
12. Self-lubrication sintered metal powder bearing with high tenacity and preparation method of self-lubrication sintered metal powder bearing: pat. CN 105420604A; filed 05.11.15; publ. 23.03.16.
13. High-strength self-lubricating metal ceramic bearing and preparation method thereof: pat. CN 105369146A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
14. Metal ceramic bearing with good self-lubrication performance and preparation method of metal ceramic bearing: pat. CN 105369140A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
15. Self-lubricating metal ceramic bearing with high bending resisting strength and preparing method of self-lubricating metal ceramic bearing: pat. CN 105385967A; filed 05.11.15; publ. 09.03.16.
16. Self-lubricating metal ceramic bearing good in abrasion resistance and preparing method of self-lubricating metal ceramic bearing: pat. CN 105385929A; filed 05.11.15; publ. 09.03.16.
17. Self-lubrication sintered metal powder bearing with good abrasion resistance and preparation method of self-lubrication sintered metal powder bearing: pat. CN 105420602A; filed 05.11.15; publ. 23.03.16.
18. Anti-cracking self-lubricating metal ceramic bearing and preparation method thereof: pat. CN 105369147A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
19. Alloy powder for forming hard phase and ferriferous mixed powder using the same, and manufacturing method for wear resistant sintered alloy and wear resistant sintered alloy: pat. US 7294167B2; filed 18.11.04; publ. 13.11.07.
20. Wear resistant sintered member: pat. US 7575619B2; filed 24.03.06; publ. 18.08.09.
21. Wear-resistant sintered contact material, wear-resistant sintered composite contact component and method of producing the same: pat. US 7282078B2; filed 09.01.05; publ. 16.10.07.
22. Manufacture of self-lubricative sliding material: pat. JP 532989A; filed 12.01.89; publ. 20.07.90.
23. Particle-dispersed copper alloy and method for producing the same: pat. JP 4314226B2; filed 13.09.05; publ. 12.08.09.
24. Sintered bearing: pat. CN 107252888A; filed 23.07.13; publ. 17.10.17.
25. Патрушев А.Ю., Фарафонов Д.П., Серов М.М. Безвольфрамовые твердые сплавы: методы получения, структура и свойства (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-66-81.
26. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Дворецков Р.М., Батиенков Р.В. Получение мелкозернистых твердых сплавов системы WC–Co (обзор) // Труды ВИАМ. 2020. № 1 (85). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 08.06.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-92-100.
27. Елагина О.Ю., Буклаков А.Г., Янка Л.Е.В. Разработка нового композиционного материала для зубков вооружения опорно-центрирующих устройств // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 151–157.
28. Cobalt-based composite material that a kind of wear-resisting rotation axis carbide enhances and preparation method thereof: pat. CN 108149126A; filed 02.12.16; publ. 12.06.18.
29. Method for preparing Ni cementing WC base cemented carbide: pat. CN 101397614B; filed 04.11.08; publ. 15.10.15.

30. Novel WC–Fe–Ni hard alloy roll ring and preparation method thereof: pat. CN 104894452A; filed 03.07.15; publ. 12.09.17.
31. WC–Fe–Ni–Co–Cr cemented carbide roll collar with low cost and high performance: pat. CN 106435322A; filed 02.11.16; publ. 04.09.19.
32. WC–Co hard alloy with binding phase enhanced by Ni<sub>3</sub>Al and preparation method thereof: pat. CN 102383021A; filed 21.11.11; publ. 13.02.13.
33. Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. № 3. С. 24–26.
34. Балинова Ю.А., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Бабашов В.Г., Чайникова А.С., Курбаткина Е.И., Большакова А.Н. Высокотемпературные теплозащитные, керамические и металлокерамические композиционные материалы для авиационной техники нового поколения // Вестник Концерна ВКО «Алмаз-Антей». 2020. № 2 (33). С. 83–92. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-2-83-92.
35. Подшипники скольжения // Автомобильный справочник. URL: [https://press.ocenin.ru/podshipniki-skolzheniya/#Metallkeram\\_podsip](https://press.ocenin.ru/podshipniki-skolzheniya/#Metallkeram_podsip) (дата обращения: 08.06.2022).

### References

1. Onishchenko G.G., Kablov E.N., Ivanov V.V. Scientific and technological development of Russia in the context of achieving national goals; problems and solutions. *Innovations*, 2020, no. 6 (260), pp. 3–16.
2. *Method for manufacturing high-temperature composite antifriction material*: pat. 2695854 Rus. Federation; filed 15.01.18; publ. 29.07.19.
3. *Copper-based alloy sliding-bearing material and preparation method thereof*: pat. CN 103602849; filed 10.10.13; publ. 09.03.16.
4. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V., Bolsunovskaya T.A., Efimochkin I.Yu. Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.
5. Sliding supports. Suspension and steering. *Autocomponents: business, technology, service*: multifunctional portal of the Max Media Group publishing house. Available at: <https://a-kt.ru/articles/opory-skolzheniya> (accessed: June 08, 2022).
6. Sevostyanov N.V., Rozen A.E., Buznik V.M., Loginov O.N., Usatii S.G., Bolsunovskaya T.A. Copper-fluoroplastic conductive composite material obtained by explosive pressing. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 55–62.
7. Adamenko N.A., Trykov Yu.P., Fetisov A.V. Polymer and metal-polymer materials obtained by explosive processing. *Perspektivnye materialy*, 2004, no. 3, pp. 63–68.
8. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. *Composite sintered antifriction materials*. Kyiv: Naukova Dumka, 1980, 404 p.
9. *Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) – a material for extreme conditions*. Available at: [https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION\\_ID=1487](https://www.catalysis.ru/block/index.php?ID=3&SECTION_ID=1487) (дата обращения: 22.07.2022).
10. Kablov E.N., Startsev V.O. Systematical analysis of the climatic influence on mechanical properties of the polymer composite materials based on domestic and foreign sources (review). *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 47–58. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58.
11. Migunov V.P., Chatynyan L.A., Ivanov E.V. et al. Wear-resistant and antifriction materials for friction units. *Aviation industry*, 1982, no. 8, pp. 71–73.
12. *Self-lubrication sintered metal powder bearing with high tenacity and preparation method of self-lubrication sintered metal powder bearing*: pat. CN 105420604A; filed 05.11.15; publ. 23.03.16.
13. *High-strength self-lubricating metal ceramic bearing and preparation method thereof*: pat. CN 105369146A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
14. *Metal ceramic bearing with good self-lubrication performance and preparation method of metal ceramic bearing*: pat. CN 105369140A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
15. *Self-lubricating metal ceramic bearing with high bending resisting strength and preparing method of self-lubricating metal ceramic bearing*: pat. CN 105385967A; filed 05.11.15; publ. 09.03.16.
16. *Self-lubricating metal ceramic bearing good in abrasion resistance and preparing method of self-lubricating metal ceramic bearing*: pat. CN 105385929A; filed 05.11.15; publ. 09.03.16.

17. *Self-lubrication sintered metal powder bearing with good abrasion resistance and preparation method of self-lubrication sintered metal powder bearing*: pat. CN 105420602A; filed 05.11.15; publ. 23.03.16.
18. *Anti-cracking self-lubricating metal ceramic bearing and preparation method thereof*: pat. CN 105369147A; filed 05.11.15; publ. 02.03.16.
19. *Alloy powder for forming hard phase and ferriferous mixed powder using the same, and manufacturing method for wear resistant sintered alloy and wear resistant sintered alloy*: pat. US 7294167B2; filed 18.11.04; publ. 13.11.07.
20. *Wear resistant sintered member*: pat. US 7575619B2; filed 24.03.06; publ. 18.08.09.
21. *Wear-resistant sintered contact material, wear-resistant sintered composite contact component and method of producing the same*: pat. US 7282078B2; filed 09.01.05; publ. 16.10.07.
22. *Manufacture of self-lubricative sliding material*: pat. JP 532989A; filed 12.01.89; publ. 20.07.90.
23. *Particle-dispersed copper alloy and method for producing the same*: pat. JP 4314226B2; filed 13.09.05; publ. 12.08.09.
24. *Sintered bearing*: pat. CN 107252888A; filed 23.07.13; publ. 17.10.17.
25. Patrushev A.Yu., Farafonov D.P., Serov M.M. Tungsten-free hard alloys: manufacturing methods, structure and properties (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 08, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-66-81.
26. Trofimenko N.I., Efimochkin I.Yu., Dvoretzky R.M., Batiykov R.V. Obtaining fine-grained cemented carbide alloys of the WC–Co system (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1 (85), paper no. 09. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 08, 2022). DOI: 10.18577 / 2307-6046-2020-0-1-92-100.
27. Elagina O.Yu., Buklakov A.G., Yanka L.E.V. Development of a new composite material for the teeth of the armament of support-centering devices. *Treniye i iznos*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 151–157.
28. *Cobalt-based composite material that a kind of wear-resisting rotation axis carbide enhances and preparation method thereof*: pat. CN 108149126A; filed 02.12.16; publ. 12.06.18.
29. *Method for preparing Ni cementing WC base cemented carbide*: pat. CN 101397614B; filed 04.11.08; publ. 15.10.15.
30. *Novel WC–Fe–Ni hard alloy roll ring and preparation method thereof*: pat. CN 104894452A; filed 03.07.15; publ. 12.09.17.
31. *WC–Fe–Ni–Co–Cr cemented carbide roll collar with low cost and high performance*: pat. CN 106435322A; filed 02.11.16; publ. 04.09.19.
32. *WC–Co hard alloy with binding phase enhanced by Ni<sub>3</sub>Al and preparation method thereof*: pat. CN 102383021A; filed 21.11.11; publ. 13.02.13.
33. Kritsky V.Yu., Zubko A.I. Investigation of the possibility of using ceramic aircraft bearings of a new generation in the structures of rotor bearings for gas turbine engines. *Dvigatel*, 2013, no. 3, pp. 24–26.
34. Balinova Yu.A., Grashchenkov D.V., Shavnev A.A., Babashov V.G., Chainikova A.S., Kurbatkina E.I., Bolshakova A.N. High-temperature heat-shielding, ceramic and metal-ceramic composite materials for a new generation of aircraft. *Vestnik Kontserna VKO «Almaz-Antey»*, 2020, no. 2 (33), pp. 83–92. DOI: 10.38013/2542-0542-2020-2-83-92.
35. Plain bearings. *Automobile directory*. Available at: [https://press.ocenin.ru/podshipniki-skolzheniya/#Metallkeram\\_podsip](https://press.ocenin.ru/podshipniki-skolzheniya/#Metallkeram_podsip) (accessed: June 08, 2022).

**Информация об авторах**

**Бурковская Наталья Петровна**, научный сотрудник, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Севостьянов Николай Владимирович**, старший научный сотрудник, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Information about the authors**

**Natalya P. Burkovskaya**, Researcher, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

**Nikolai V. Sevostyanov**, Senior Researcher, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)

Статья поступила в редакцию 17.10.2022; одобрена и принята к публикации после рецензирования 24.10.2022.

The article was submitted 17.10.2022; approved and accepted for publication after reviewing 24.10.2022.