

УДК 621.822.1

Н.П. Бурковская¹, Н.В. Севостьянов¹, Т.А. Болсуновская¹, И.Ю. Ефимочкин¹

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ (обзор)

DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91

Рассмотрен процесс совершенствования материалов подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания автомобилей в зависимости от предъявляемых требований: от литых, многослойных, композиционных подшипников до перспективных керамических. Приведены основные мировые и отечественные производители подшипников двигателей внутреннего сгорания. Показаны различные типы структур подшипников и технологические приемы их изготовления. Описаны наиболее эффективные многослойные подшипники скольжения. Представлены требования к материалам подшипников скольжения, определяющие развитие материаловедения в области антифрикционных материалов для двигателей внутреннего сгорания.

Ключевые слова: подшипник скольжения, вкладыш, втулка, двигатель внутреннего сгорания, коэффициент трения, износ, антифрикционный материал, трибология, пара трения, триботехнический узел.

N.P. Burkovskaya¹, N.V. Sevostyanov¹, T.A. Bolsunovskaya¹, I.Yu. Efimochkin¹

IMPROVEMENT OF MATERIALS FOR SLIDING BEARINGS OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES (review)

The process of improving the materials of sliding bearings of internal combustion engines of cars is considered, depending on the requirements: from cast, multilayer, composite bearings to promising ceramic. The main world and domestic manufacturers of bearings of internal combustion engines are presented. Various types of bearing structures and manufacturing techniques for their manufacture are shown. The most efficient multilayer plain bearings are described. The paper presents the requirements for sliding bearing materials that determine the development of materials science in the field of antifriction materials for internal combustion engines.

Keywords: sliding bearing, liner, sleeve, internal combustion engine, friction coefficient, wear, antifriction material, tribology, friction pair, tribological unit.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

Известно, что подшипники скольжения были первыми антифрикционными узлами, использовавшимися с древних времен и отличавшимися простотой конструкции и надежностью в эксплуатации. Эволюция подшипников определялась совершенствованием их материалов и смазочных масел, используемых в подшипниках для снижения трения, – начиная с масел и жиров растительного или животного происхождения до современных синтетических.

Развитие теоретических основ науки о трении (трибологии) начинается еще с работ Леонардо да Винчи [1], в которых подтверждается пропорциональность трения нагрузке на трущиеся поверхности, после чего происходит этап бурного развития прикладной триботехники.

Цель данной работы заключалась в определении тенденций в области разработок и изготовления материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания.

Работа выполнена в рамках реализации комплексного научного направления 12. «Металломатричные и полиматричные композиционные материалы» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [2].

Подшипники скольжения для двигателей внутреннего сгорания

Подшипник скольжения в двигателе внутреннего сгорания (ДВС) выполняет следующие функции:

- обеспечивает возможность вращения коленвала и деталей шатунно-поршневой группы (рис. 1);
- уменьшает трение и износ.

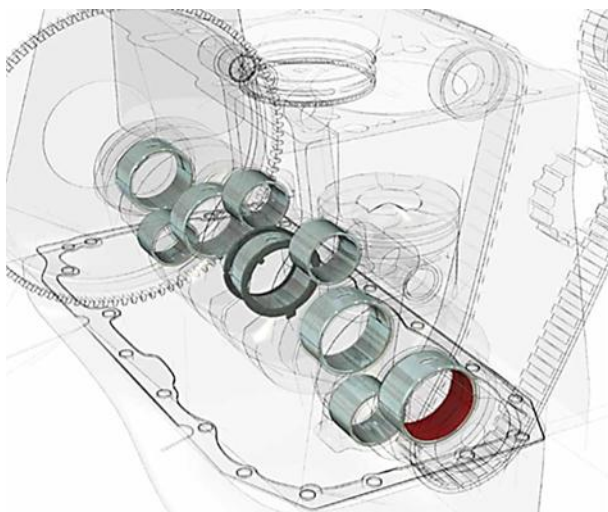


Рис. 1. Расположение подшипников скольжения опорного вала в двигателе внутреннего сгорания [3]

В современной технике подшипники скольжения используются в паровых турбинах, центробежных компрессорах, ДВС, мощных электродвигателях. Так, подшипник скольжения в ДВС является одной из важнейших деталей двигателя, обеспечивающей надежную работу. Свойства материала подшипника скольжения напрямую влияют на производительность двигателя. Подшипник скольжения в ДВС является одной из важнейших деталей, требования к функциональным свойствам которых продолжают повышаться, так же как и к самому материалу.

По типу трения различают следующие подшипники скольжения:

- гидродинамические (трущиеся поверхности разделяет слой смазки и трение протекает в слое жидкости);
- работающие в условиях сухого трения (без смазки);
- граничного трения (соприкасающиеся поверхности разделены молекулярным слоем смазки);
- самосмазывающиеся (материал подшипника содержит смазку или сам является смазкой).

Первые подшипники скольжения для ДВС изготавливали из баббита – сплава олова со свинцом. В качестве антифрикционных материалов используют сплавы на медной основе (бронзы, латуни). Возросло использование алюминиевых сплавов. Для повышения стойкости к задиру алюминиевых сплавов в их состав вводят до 30–40% (по массе) олова (алюминиево-оловянные сплавы) [4, 5]. В качестве антифрикционных материалов используются и цинковые сплавы, не получившие достаточно широкого распространения.

Затем вместо монолитных баббитовых вкладок втулок или подшипников стали использовать многослойные вкладыши, которые представляли собой прочную изогнутую стальную ленту в качестве твердой подложки с нанесенным на нее мягким антифрикционным слоем (сплав алюминия, бронзы и олова или сплав олова и свинца) – вкладыши со слоистой структурой (рис. 2). Для разделения трущихся поверхностей в зазор между вкладышем и валом под давлением подается масло из системы смазки или путем масляного тумана. Образующийся масляный «клин» разделяет трущиеся поверхности, уменьшая силу трения и износ деталей [5].

Долговечность работы подшипника скольжения достигается в том случае, когда его материалы сочетают прочность (грузоподъемность, износостойкость, кавитационную стойкость) с мягкостью (сопрягаемость, прирабатываемость, способность к поглощению абразивных частиц, гашению вибраций). Поэтому материалы подшипника должны быть как прочными, так и мягкими. Для достижения такого компромисса материалы подшипников скольжения имеют композиционную структуру (рис. 2) [6].

Структура подшипника может содержать мелкие частицы мягкого материала, которые распределены в относительно прочной матрице. В некоторых подшипниках комбинируют слоистые и дисперсноупрочненные композиционные конструкции (рис. 2).



Рис. 2. Типы структур материалов подшипника

Материал подшипника скольжения должен иметь высокие несущую способность и сопротивление усталости. Несмотря на хорошие экологические показатели, ни один из используемых подшипников не отвечает вышеуказанным требованиям к материалу подшипника скольжения [7, 8]. Кроме того, современные традиционные материалы на основе меди представляют собой полосу из сплава меди (Cu) и свинца (Pb) – например, $\text{CuPb}_{20}\text{Sn}_4$, $\text{CuPb}_{24}\text{Sn}$ и т. д., широко использующиеся при повышенной нагрузке двигателя. Основную проблему представляет содержание свинца в материале. Современные тенденции применения материалов для ДВС сводятся к ужесточению экологических норм и переходу к «зеленым» технологиям в производстве. Современное общество остро нуждается в экологически чистых материалах для подшипников скольжения, являющихся альтернативой традиционному материалу из медно-свинцовистых сплавов, поскольку использование свинца в двигателях автомобилей, производящихся серийно, запрещено с 2011 года [4].

Известно, что современный ДВС должен быть экологичным – это необходимое условие для снижения антропогенного влияния на изменение климата, связанное с выбросами парниковых газов. Поскольку транспорт является главным источником выбросов парниковых газов [9], то в настоящее время для автомобилей уровень выброса CO_2 строго нормируется. Необходимость снижения углекислого газа, угарного газа, оксидов азота и твердых микрочастиц углерода решается, в частности, за счет концепций *downsizing* и *downspeeding*. Суть концепции *downsizing* заключается не просто в уменьшении рабочего объема камеры сгорания и размеров агрегата, но и в оптимизации геометрической формы деталей, применении новейших материалов и технологий. Такой подход обеспечивает большую мощность с единицы рабочего объема камеры сгорания двигателя, а также эффективное сжигание топлива при более легком и компактном двигателе. Концепция *downspeeding* заключается в получении дополнительной мощности за счет повышения крутящего момента, без увеличения оборотов. В результате по технологии *downspeeding* частота вращения коленчатого вала у ДВС снижается в среднем на 15%, по сравнению с обычным двигателем. При этом уменьшаются насосные потери и инерционные расходы мощности на возвратно-поступательное трение шатунно-поршневой группы [10].

При анализе научно-технической и патентной литературы за последние 20 лет установлено, что широкое распространение в России получили технологии, описанные в патентах [11–17], которые предполагают использование многослойных композиционных материалов (МКМ), или подшипники со слоистой структурой, включающие основу, или опорный слой, подшипника с/без промежуточного слоя с нанесенным на него слоем скольжения – антифрикционным; может также присутствовать тонкий притирочный слой (рис. 3).



Рис. 3. Поперечное сечение слоя металла подшипника, промежуточного слоя и скользящего слоя в многослойном композиционном материале:

1 – антифрикционный слой; 2 – промежуточный слой; 3 – основа

Сущность технических решений, описанных в данных документах, заключается в том, что многослойный МКМ для подшипника скольжения содержит опорный слой 3 из стали и металла подшипника (медный или алюминиевый сплав), на который химическим или электрохимическим методом, плазменным напылением или термическим распылением наносят промежуточный слой 2 для улучшения адгезии с антифрикционным слоем 1, нанесенным электрохимическим, дифференциальным плакированием, напылением или другим методом. Сверху некоторые производители наносят тем же способом тонкое

притирочное покрытие из мягкого материала. Известные технические решения могут улучшить какое-либо одно свойство подшипника: антифрикционное, жаростойкое, износостойкое и т. п. Тем не менее все известные покрытия обладают предельной допустимой нагрузкой, превышение которой приводит к быстрой потере функции скольжения. Связанное с этим обнажение материала подложки, не обладающего достаточной антифрикционной функциональностью, вызывает впоследствии полный отказ элемента подшипника скольжения в результате катастрофического износа.

Для длительной и надежной работы антифрикционного слоя подшипников необходимо выполнять следующие требования к свойствам:

- удовлетворительное сопротивление усталости, выражающееся в способности материала не разрушаться под действием изменяющихся нагрузок во всем диапазоне рабочих температур;
- высокая износостойкость, выражающаяся в способности материалов оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения;
- низкий коэффициент трения;
- высокая задиростойкость;
- способность материала поглощать посторонние твердые частицы;
- высокая коррозионная стойкость материала в среде смазочного масла;
- хорошая прирабатываемость;
- технологичность и невысокая стоимость изготовления;
- невысокая стоимость и доступность материалов подшипника;
- нетоксичность материалов и возможность организации «зеленых» технологий производства;
- отсутствие каталитической активности материала подшипника по отношению к маслам.

Подшипники производства компании FederalMogul

За разработку материалов оптимально удовлетворяющих перечисленным ранее требованиям, предъявляемым к подшипникам скольжения для ДВС, брались многие производители. Тем не менее авторы работы [4] считают, что лучших результатов удалось добиться разработчикам компании FederalMogul, которая выпускает продукцию под торговым брендом Glysco.

Производственные мощности компании FederalMogul в сочетании с научно-исследовательским комплексом и технологическими возможностями обеспечивают этому производителю лидирующие позиции на рынке подшипников скольжения для транспортных средств, сельскохозяйственной и строительной техники.

Разработчиками создан уникальный «умный» материал под маркой G-488, в котором мягкий притирочный слой оловомедного сплава сочетается с никелевым или оловоникелевым слоем. Материал является бессвинцовым. Притирочный слой позволяет плавно сгладить неровности, избежав задиров в начале работы, и оказать полирующий эффект сопрягаемых поверхностей трения, сформировав пятно контакта максимальной площади по месту установки. После обкатки двигателя, слой олова стирается, в результате чего обнажается более прочный оловоникелевый слой, работающий в течение всего срока службы ДВС.

Кроме того, по сведениям авторов работ [4, 18], разработано полимерное покрытие марки IROX (рис. 4), сочетающее в составе композитной матрицы полимерные и неметаллические включения и твердые смазывающие вещества. Разработанное покрытие увеличивает срок службы вкладышей подшипника и коленчатого вала в сложных условиях более чем в 5 раз. Полимерное связующее IROX для подшипников обеспечивает

повышенную демпфирующую способность, твердые смазывающие вещества дают возможность кратковременно работать в условиях сухого трения, металлические включения покрытия обеспечивают повышенную износостойкость.



Рис. 4. Подшипники с полимерным покрытием марки IROX

Созданы также многослойные вкладыши (Glyco G-499), каждый слой которых нанесен с помощью катодного напыления из паровой фазы в вакууме. Используемая технология обеспечивает не только заданный состав и структуру нанесенного слоя, но и повышенную прочность по сравнению со стандартными подшипниками скольжения из медно-свинцовистых сплавов.

Помимо передовых технологий разработчики компании FederalMogul используют и технические решения, среди которых патентованные составы антифрикционных материалов и др. [11, 12, 14–17, 19–23].

Для высокофорсированных дизелей разработчики компании FederalMogul считают перспективным применение сталебронзовых подшипников со слоем антифрикционного покрытия AlSn_{20} (сплав FMG199) толщиной 0,01–0,02 мм, нанесенным ионно-вакуумным напылением [24].

Тем не менее лидером вторичного рынка подшипников для ДВС считают производителя King Engine Bearing.

Подшипники скольжения фирмы King Racing Bearing

На рис. 5 представлены типичные структуры подшипника марки King [6], которые содержат заднюю стальную часть – опору, которая обеспечивает подшипнику жесткость и плотную посадку в условиях повышенной температуры и циклической нагрузки.

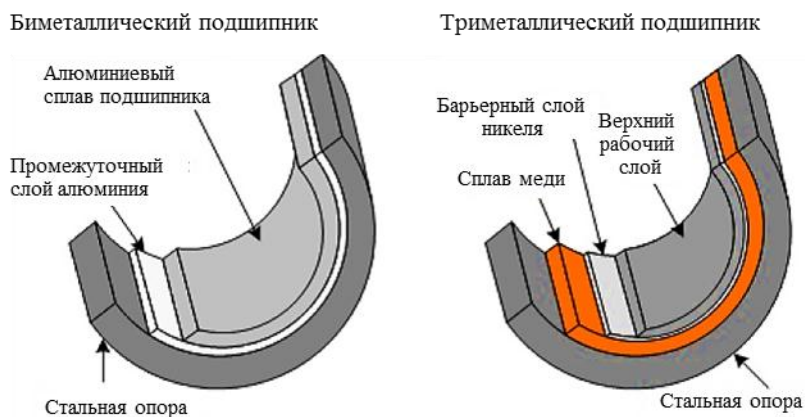


Рис. 5. Структура слоистого подшипника марки King для двигателя внутреннего сгорания

Толщина второго (относительно толстого) слоя антифрикционного материала подшипника составляет ~0,3 мм. Такая толщина второго слоя позволяет адаптировать конструкцию к допускам размеров и другим отклонениям геометрической формы и является важной особенностью биметаллических подшипников. Кроме того, толстый антифрикционный слой обеспечивает хорошее поглощение посторонних абразивных частиц. В триметаллических подшипниках, кроме стальной задней опоры, содержится промежуточный слой из сплава меди, содержащего 20–25% (по массе) Pb в качестве твердого смазочного компонента и упрочняющую добавку к сплаву 2–5% (по массе) Sn. Третий (внешний) слой на основе Pb или баббитового сплава нанесен на промежуточный слой. Между промежуточным и внешним слоем находится барьерный никелевый слой, предотвращающий диффузию Sn из наружного слоя в промежуточный. Содержание 10% (по массе) Sn в сплаве на основе Pb повышает его коррозионную стойкость, незначительное процентное содержание Cu увеличивает прочность внешнего слоя. Малая толщина внешнего слоя (12–20 мкм) триметаллических подшипников ограничивает его антифрикционные свойства, такие как сопротивление задиру, прирабатываемость и поглощение абразивных частиц.

Когда антифрикционный слой изнашивается (даже частично), антифрикционные свойства вкладыша резко ухудшаются. Увеличение толщины мягкого антифрикционного слоя нецелесообразно ввиду его низкой несущей способности. Чем тоньше антифрикционный слой, тем больше его несущая способность. Таким образом, толщина антифрикционного слоя является компромиссом между прочностью и антифрикционными свойствами. Триметаллические подшипники характеризуются следующими показателями:

- хорошим сопротивлением усталости благодаря прочному антифрикционному материалу на основе меди;
- отличной устойчивостью к задиру, которая обеспечивается наличием свинца в составе антифрикционного материала (устойчивость к задиру при прямом контакте «металл–металл» резко падает, когда антифрикционный слой изнашивается);
- хорошим поглощением мелких посторонних твердых частиц загрязнения;
- отличной сопрягаемостью при наличии небольших размерных и геометрических отклонений.

Вклады подшипников компании Miba Bearing Group

Лидером по разработке и поставке вкладышей подшипников скольжения для высоконагруженных двигателей, дизельных двигателей больших размеров, компрессоров и турбин является компания Miba Bearing Group, использующая для изготовления подшипников свинцовистые бронзы и алюминиевые сплавы. Запатентованная технология *Sputter* позволяет наносить ионно-плазменным методом в вакууме на поверхность вкладыша специальные антифрикционные покрытия [24–26].

Другие производители слоистых подшипников

Показано, что вкладыши подшипников коленчатого вала ДВС следующих фирм: ДЗВ «Димитровградский завод вкладышей» (г. Димитровград, Россия), TOYOTA (Япония), KFM BEARING (Южная Корея), Cummins (США), CCEC (Китай), работающие в тяжелонагруженных условиях, изготовлены по триметаллической технологии и отличаются между собой только химическим составом и толщиной антифрикционных покрытий [26].

Одним из мировых лидеров по производству подшипников и систем управления автомобилями является компания Kooyo SEIKO Co., Ltd [27].

В патентном документе компании Kooyo SEIKO [28] описан композиционный материал для подшипника скольжения, который содержит опорный слой из сплава меди, и покрытия подшипника, нанесенного на указанный опорный слой. Медный сплав может содержать, % (по массе): 0,5–5,0 никеля; 0,2–2,5 кремния; 0,1 свинца. Несущее покрытие может быть нанесено гальваническим осаждением, напылением или представлять собой слой пластика.

Данное изобретение [29] относится к подшипникам скольжения, предназначенным для использования в триботехнических узлах, таких как коленчатые валы и шатуны. Несущий корпус подшипника выполнен из мягкой конструкционной стали, на поверхность которого нанесен антифрикционный слой меди и алюминиевого сплава. Для улучшения адгезии антифрикционного сплава со сталью наносят промежуточный слой сплава на основе никеля толщиной от 1 до 20 мкм и промежуточный слой хрома толщиной 0,4–0,6 мкм.

Слоистая структура обеспечивает хорошую стойкость к задиру, низкий коэффициент трения и износостойкость благодаря наличию коррозионностойкого модифицированного вольфрамом антифрикционного слоя.

Следует отметить, что слоистый материал прекрасно работает пока сохраняется целостность антифрикционного слоя, который довольно тонкий и легко может быть поврежден. Даже частичное оголение промежуточного слоя вызывает резкое снижение несущей способности. Триметаллические подшипники более чувствительны к размерным неточностям, геометрическим искажениям и перекосам, чем биметаллические.

Материалы подшипников, изготавливаемых методами порошковой металлургии

По сравнению с обычной металлургией возможности порошковой металлургии расширены и при создании материалов с новыми химическими составами дают возможность комбинирования металлов и неметаллов с различными интерметаллидами и другими соединениями.

Области применения спеченных антифрикционных материалов обширны. С помощью новых материалов решают проблему улучшения эксплуатационных параметров машин и механизмов, увеличения скоростей скольжения и нагрузок, расширения срока службы узлов трения, а также сокращения затрат и периодов простоя для замены изношенных пар трения.

В патентных документах [30–36] описаны антифрикционные спеченные материалы. Помимо низкого коэффициента трения и высокой износостойкости, спеченные антифрикционные материалы имеют оптимальную несущую способность, а также высокую совместимость пары трения. Кроме того, использование методов порошковой металлургии при создании антифрикционных материалов обеспечивает высокоэффективное использование исходных металлов (95–98%), их экономию за счет сокращения количества стружки и возможности переработки отходов (окалина, стружка и т. д.) спеченных антифрикционных материалов. Стоимость деталей, полученных спеканием порошков, на 40% меньше по сравнению с изготавливаемыми традиционными способами.

Следует отметить, что материалы, полученные порошковой металлургией, могут обладать теми же свойствами, что и литые, поэтому выбор способа производства определяется экономической целесообразностью и сложностью технологии.

В изобретении [36] описан материал на основе медно-оловянно-никелевого сплава, имеющий высокую коррозионную стойкость, износостойкость, структурную стабильность и экологические преимущества – не содержит свинца.

Керамические подшипники

В настоящее время самыми перспективными в области производства подшипников считаются керамические подшипники [37].

Керамические материалы в результате их строго ориентированных ковалентных связей и относительно низкой концентрации и подвижности дефектов кристаллической решетки не склонны к схватыванию в процессе притирки. Это выгодно отличает их от антифрикционных материалов на металлической основе. Термостойкость, жаропрочность, коррозионная стойкость и низкая плотность делают использование таких материалов очень перспективным в высокоскоростных парах трения, особенно при повышенных температурах.

Подшипники из керамики могут эксплуатироваться в устройствах, подверженных абразивному и коррозионному воздействию, при высокой температуре и одновременном действии электрических и магнитных полей [38]. Керамические подшипники скольжения изготавливают методами порошковой металлургии, которые дают значительную экономию энергии и материалов, высокие производительность и точность, хорошую стабильность, а также ряд других преимуществ, что делает данную технологию подходящей для массового производства. Кроме того, с применением технологии порошковой металлургии могут быть изготовлены детали сложной геометрической формы, которые невозможно изготовить традиционными методами обработки и литья.

Известно, что созданием гибридных керамических подшипников занимается компания JTEKT Corporation, которой разработан широкий ассортимент изделий, применяемых в крайне тяжелых условиях эксплуатации.

Определенные успехи в использовании керамических композиционных материалов для изготовления деталей цилиндропоршневой группы и газораспределительного механизма поршневых ДВС из высокотемпературного антифрикционного композиционного материала достигнуты в ЦИАМ (см. таблицу), в том числе с применением 3D-печати [39].

Лидирующие производители материалов для подшипников скольжения

Структура подшипника	Монолитные материалы	Слоистые материалы	Керамические подшипники
Материал подшипника	Баббитовые сплавы; медные сплавы – бронзы, латуни; алюминиевые сплавы; цинковые сплавы	Основа: сталь/сплавы меди, алюминия, никеля. Антифрикционный слой: полимер, сплавы алюминия, олова, олова и свинца, бронзы и т. д.	Si ₃ N ₄ , SiC, ZrO ₂ , Al ₂ O ₃ , TiCN, TiB ₂
Производитель	Miba (Австрия)	FederalMogul (США), King Engine Bearings (Израиль, США), ДЗВ «Димитровградский завод вкладышей», TOYOTA (Япония), KFM BEARING (Южная Корея), Cummins (США), CCEC (Китай), Kooyo SEIKO (Япония)	ЦИАМ им. П.И. Баранова, Cerobear (Германия)

Изготовлен керамический высокоскоростной авиационный подшипник скольжения опоры турбовинтового двигателя из наноструктурированного композиционного материала на основе карбида кремния (Si₃N₄) и карбонитрида титана (TiCN).

Описан подшипник скольжения с наноструктурным функционально-градиентным антифрикционным покрытием [40], не требующим дополнительной физико-химической обработки, придающим изделию высокую прочность и повышающим его долговечность. По данным разработчиков, подшипник может быть использован в космической и авиационной промышленности, в автомобильном транспорте и др. областях для различных узлов и механизмов, работающих в широком температурном диапазоне с высокими нагрузками. Определено, что улучшение физико-механических и эксплуатационных характеристик такого подшипника достигается путем повышения износостойкости, максимального снижения коэффициента трения, термической стабильности и жаропрочности при одновременном повышении пластичности. Разработка позволяет уменьшить потери подшипников, работающих на жидкой смазке, по сравнению с подшипниками качения в ~ 10 раз.

При выборе материала подшипника следует иметь в виду особенности поведения керамики в условиях трения и структуру затрат на производство изделий из керамики. Стоимость исходного сырья в изделии составляет всего 11% (для металлов 43%), в то время как расходы на обработку составляют 38% (для металлов 43%), а самую большую часть составляют расходы на контроль 51% (для металлов 14%). Несмотря на большой интерес к применению керамических материалов в подшипниках, сведения об их трибологическом поведении весьма ограничены. В статье [38] проанализированы основные особенности, влияющие на долговечность подшипников скольжения из керамических материалов. Наиболее перспективными керамическими материалами являются нитрид кремния (Si_3N_4) и карбид кремния (SiC). Из других керамических материалов используют оксиды циркония (ZrO_2) и алюминия (Al_2O_3).

Керамические подшипники на основе нитрида кремния, разработанные по проекту RolaMot

Разработкой керамических подшипников занимаются специалисты совместного проекта RolaMot. Над этим проектом работали: производитель керамических материалов (FCT), производитель роликовых подшипников (Cerobear) и разработчик двигателей (FEV). Применение керамических подшипников для коленчатого вала в автомобильных двигателях из нитрида кремния (Si_3N_4) предполагает уменьшение расхода топлива на 8% и выбросов CO_2 в окружающую среду [41]. Разработанный материал достаточно легкий, с высокими твердостью и износостойкостью, а также хорошими трибологическими свойствами. Срок службы двигателя с подшипниками из Si_3N_4 соответствует сроку службы двигателя с обычными подшипниками скольжения (требуемый срок службы 5000 ч). В дополнение к способности выдерживать высокие пиковые нагрузки разработанный керамический материал обладает низкими значениями износа и трения в случае тяжелых условий эксплуатации – например, при холодном запуске и прогреве двигателя, высоких скоростях и температурах. Замена на керамический подшипник не приводит к ухудшению акустических характеристик транспортного средства. Необходимым условием экономической эффективности результатов замены подшипников является сокращение дополнительных затрат, которые возникают в результате изменений технологии производства двигателя, а также использования новых материалов. Одна из целей проекта RolaMot заключается в исследовании и разработке недорогих марок нитрида кремния, являющегося в настоящее время наиболее доступным материалом для подшипников скольжения.

К недостаткам керамических и гибридных подшипников скольжения относят хрупкость и дороговизну их изготовления [42].

Металлокерамические материалы для подшипников скольжения

Металлокерамические подшипники скольжения применяют в триботехнических узлах, где необходимы низкий коэффициент трения (0,005–0,02) и высокая износостойкость. Условно металлокерамические материалы разделяют на две группы:

– пористые сплавы на основе железа и графита (железографит), бронзы и графита (бронзографит), алюминия и графита (алюмографит), содержащие в некоторых случаях твердые смазки (BN, WC) или сульфиды – WS_2 , MoS_2 , CuS_2 , FeS , CoS , TiS_2 , SnS . Содержание добавок может варьироваться от 1,5 до 10% (по массе), основного металла – от 88–99% (по массе), графита: 0,3–4% (по массе);

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

Полимерные подшипники скольжения

Развитие полимеров позволило значительно улучшить антифрикционные свойства подшипников скольжения. Так, сначала появились металлополимерные, а затем и полимерные втулки.

Материалы для подшипников скольжения на полимерной основе обладают уникальными антифрикционными свойствами. Использование таких материалов и композитов на их основе в трущихся парах позволило уменьшить коэффициент трения до рекордно низкого уровня – менее 0,1. Однако полимеры не получили широкого применения в высокоскоростных парах трения.

Например, ПТФЭ, который обладает химической стойкостью, теплостойкостью до 260 °С и низким коэффициентом трения, чаще всего используется в качестве уплотнений. Износостойкость и несущая способность ПТФЭ резко возрастает при добавлении в его состав бронзы, оксида свинца, циркония, железа, меди, графита, дисульфида молибдена, стекловолокна и т. д. [1, 5], а также с использованием его в виде волокон.

Описано патентное решение компании FederalMogul [43] на изготовление антифрикционного слоя и элемента скольжения на основе матрицы из ПТФЭ, упрочненной полиэфирными волокнами до 60–98% (по массе), со стабильным коэффициентом трения 0,05 на протяжении 60 тыс. циклов при нагрузке 50 МПа и скорости скольжения 0,01 м/с в паре трения со сталью.

Кроме ПТФЭ также используются полиамиды, полиуретан, поликарбонат, полиакрилат, эпоксидная смола. В чистом виде полимеры для изготовления подшипников скольжения практически не используются. Следует отметить, что антифрикционные характеристики для одних и тех же полимеров в разных условиях трения могут значительно изменяться. Износ полимерного подшипника определяется материалом контртела. Считается, что наилучшими характеристиками обладают составы материалов, содержащие полимер в виде матрицы, упрочненной различными частицами и наполнителями [5, 44].

На основе эпоксидных смол созданы такие материалы, как маслянит, состоящий из эпоксидной смолы, алюминиевой пудры, полиэтилена, полиамида, ксилола и минерального масла, а также эпоксилит, состоящий из эпоксидной смолы, бронзовой стружки, деревянных опилок и графита. Для работы при сухом трении используют такие полиамиды, как поликапролактан, нейлон, смолы П-68 и АК-7, наполненные твердыми смазками. Повышение прочности углеродистых материалов достигнуто пропиткой их полимерами и металлами [44, 45].

Весьма эффективно использование полимеров для нанесения тонкослойных антифрикционных покрытий из полимеров [5].

Первоначально подшипник скольжения должен был обеспечить надежную и долговечную работу ДВС и свинцово-оловянистые сплавы (баббиты) прекрасно справлялись со своими функциями. По мере роста мощностных параметров ДВС возникала необходимость применения более износостойких и механически прочных материалов [46]. Такие материалы были найдены – это материалы на основе алюминия или меди со свинцом. Появление моторов с турбонаддувом не только в мотоспорте, но и в серийных автомобилях вновь поставило задачу поиска новых конструктивных решений для подшипников скольжения – таких, чтобы они выдерживали все возложенные на них нагрузки. Такое решение воплотилось в многослойных конструкциях подшипников, обеспечивающих одновременно и высокую износостойкость, и несущую характеристику. Современное развитие автомобилестроения требует не только снижения вредных выбросов, но и отказа от тяжелых и токсичных материалов в конструкции автомобиля, а также внедрения «зеленых» технологий производства. Научно-исследовательские институты мировых автопроизводителей ведут поиск и разработку перспективных материалов для ДВС. Особое внимание уделяется керамическим материалам, но их технология изготовления остается пока весьма дорогой.

Заключения

В работе рассмотрен процесс совершенствования материалов подшипников скольжения для ДВС автомобилей в зависимости от технологических потребностей и требований к самим ДВС в соответствии с концепциями *dowsizing* и *downspeeding*. Представлены требования к материалам подшипников скольжения, определяющих развитие материаловедения в области антифрикционных материалов для ДВС.

В результате анализа научно-технических и патентных документов показано, что наиболее широкое распространение получили подшипники скольжения с многослойной структурой, несмотря на то, что их работоспособность определяется целостностью антифрикционного слоя.

Дана сравнительная характеристика видов антифрикционных материалов. Показано, что, несмотря на хрупкость и дороговизну изготовления, в настоящее время самыми перспективными в области производства подшипников считаются керамические подшипники, которые не склонны к схватыванию в процессе притирки в результате их строго ориентированных ковалентных связей и относительно низкой концентрации и подвижности дефектов кристаллической решетки.

Показаны основные производители на рынке подшипников для ДВС.

Следует отметить, что антифрикционные порошковые материалы практически всех классов находят применение в скоростных парах трения. Тем не менее конкретный выбор состава материала определяется, прежде всего, его функциональным назначением и условиями эксплуатации пары трения.

Соответствие материала подшипников вышеперечисленным требованиям с сохранением общих требований к подшипникам обеспечивает стабильную работу двигателя внутреннего сгорания.

Библиографический список

1. Крагельский И.В., Щедров В.С. Развитие науки о трении. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 235 с.
2. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. GLYCO Engine Bearings: Catalogues // Federal-Mogul Motorparts [Электронный ресурс]. 2018. URL: https://www.fmmotorparts.eu/support/pdf-catalogues.html?_ga=2.102842432.1741875717.1577256718-1992142891.1577256718 (дата обращения: 08.10.2019).
4. Опоры скольжения. Подвеска и рулевое управление // Автокомпоненты: бизнес, технологии, сервис: мультифункциональный портал ИД «Макс Медиа Групп» [Электронный ресурс]. 2005. URL: <https://a-kt.ru/articles/opory-skolzheniya> (дата обращения: 08.10.2019).
5. Трение. Изнашивание и смазка: справочник в 2 кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.
6. Kopeliovich D. Engine Bearing materials [Электронный ресурс]. 2019. URL: http://www.subtech.com/docuwiki/doku.php?id=engine_bearing_materials (дата обращения: 04.09.2019).
7. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
8. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // Metallurg. 2013. №12. С. 4–8.
9. Климат и энергетика. Снижение выбросов CO₂ и других парниковых газов // WWF [Электронный ресурс]. 2019. URL: <https://wwf.ru/what-we-do/climate-and-energy/snizhenie-vybrosov-so2/> (дата обращения: 08.10.2019).
10. Снижая выбросы и трение... // АБС Авто [Электронный ресурс]. 2014. URL: <https://abs-magazine.ru/article/snijaya-vibrosi-i-trenie> (дата обращения: 08.10.2019).
11. Многослойный композиционный материал, изготовление и применение: пат. 2354865 Рос. Федерация; заявл.05.08.04; опубл.10.05.09.
12. Элемент скольжения: пат. 2521854 Рос. Федерация; заявл.28.12.09; опубл.10.07.14.
13. Способ производства композиционного материала с металлической матрицей: пат. 2536847 Рос. Федерация; заявл. 27.10.10; опубл. 27.12.14.
14. Многослойный материал для подшипников скольжения: пат. 2247658 Рос. Федерация; заявл. 27.12.00; опубл. 10.03.05.
15. Многослойный композиционный материал для подшипников скольжения, изготовление и применение: пат. 2354864 Рос. Федерация; заявл.05.08.04; опубл.10.05.09.
16. Элемент скольжения и способ его изготовления (варианты): пат. 2573851 Рос. Федерация; заявл. 12.10.11; опубл. 27.01.16.
17. Слоистый композиционный материал для антифрикционных конструктивных элементов и способ его получения: пат. 2218277 Рос. Федерация; заявл. 24.11.98; опубл. 10.12.03.
18. Calameo // Автокомпоненты [Электронный ресурс]. №7. 2015. URL: <https://ru.calameo.com/read/0047968704cb07bd44549> (дата обращения: 08.10.2019).
19. Schichtverbundwerkstoff für Gleitelemente, Verfahren zu dessen Herstellung und Verwendung: pat. DE 102009019601; filed 30.04.09; publ. 12.05.10.
20. Method for producing a spherical sliding surface of a plain bearing: pat. DE 102012209373; filed 04.06.12; publ. 21.07.16.
21. Three-material roll-bonded sliding bearing having two aluminium layers: WO 2018177919; filed 23.03.18; publ. 04.10.18.
22. Lead-free CuFe₂P slide bearing material having a chip breaker: WO 2015158807; filed 16.04.15; publ. 22.10.15.
23. Wear resistant lead free alloy bushing and method of making: WO 2009017501; filed 01.08.07; publ. 05.02.09.
24. Никишин В.Н., Белоконь К.Г., Сибиряков С.В. Подшипники скольжения в автомобиле- и двигателестроении: учеб. пособие. Набережные Челны: Изд-во Камской гос. инж.-экон. акад., 2012. 213 с.
25. Miba. Innovation in motion [Электронный ресурс]. URL: <https://www.miba.com/en/> (дата обращения: 24.10.2019).
26. Видин Д.В., Козырев И.П., Короткова Л.П. Современные тенденции в производстве вкладышей коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания // Тез. IX Всерос. науч.-практич. конф. молодых ученых «Россия Молодая» (Кемерово, 18–21 апр. 2017) [Электронный ресурс]. Кемерово: КузГТУ, 2017. URL: <http://www.kuzstu.ru> (дата обращения: 08.10.2019).

27. Автомобилестроение. Авиация и космонавтика // Коюо [Электронный ресурс]. URL: <https://www.koyo.eu/ru/2016-06-06-08-37-19/2016-06-06-08-31-30.html> (дата обращения: 08.10.2019).
28. Slide bearing composite material: pat. US 7993758; filed 13.05.06; publ. 09.08.11.
29. Sliding Bearing: pat. JP2004076756; filed 09.08.02; publ. 11.03.04.
30. Спеченный антифрикционный материал на основе меди: пат. 2326952 Рос. Федерация; заявл. 07.11.06; опубл. 20.06.08.
31. Способ изготовления изделий из алюминиевой бронзы: пат. 2461447 Рос. Федерация; заявл. 14.06.11; опубл. 20.09.12.
32. Антифрикционный дисперсно-упрочненный композиционный материал: пат. 2203973 Рос. Федерация; заявл. 04.08.99; опубл. 10.05.03.
33. Композиционный порошковый материал для узлов трения: пат. 2245386 Рос. Федерация; заявл. 16.12.03; опубл. 27.01.05.
34. Антифрикционный композиционный порошковый материал: пат. 2331685 Рос. Федерация; заявл. 25.09.06; опубл. 20.08.08.
35. Способ изготовления высокотемпературного композиционного антифрикционного материала: пат. 2695854 Рос. Федерация; заявл. 15.01.18; опубл. 29.07.19.
36. Copper-based alloy sliding-bearing material and preparation method thereof: pat. CN103602849; filed 10.10.13; publ. 09.03.16.
37. Керамические подшипники // ПодшипникЦентр.РУ [Электронный ресурс]. 2015. URL: <http://podshipnikcentr.ru/spravochnik/keramicheskie-podshipniki.html> (дата обращения: 08.10.2019).
38. Панов А.Д., Панова И.М. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения // Науковедение: интернет-журнал. 2015. Т. 7. №1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/78TVN115.pdf> (дата обращения: 08.10.2019). DOI: 10.15862/78TVN115.
39. Подшипники // ЦИАМ [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ciam.ru/press-center/news/innovative-design-ciam-awarded-silver-medal-of-international-saloon-archimedes/> (дата обращения: 22.10.2019).
40. Подшипник скольжения с наноструктурным функционально-градиентным антифрикционным покрытием: пат. 2578840 Рос. Федерация; заявл. 25.12.14; опубл. 27.03.16.
41. Wemhöner J., Bergrath B., Kreuser J. RolaMot – Erforschung des Einsatzes von Siliciumnitrid-Wälzlager in einem Ottomotor zur Herabsetzung der inneren Motorreibung mit dem Ziel der Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs und der CO₂-Emissionen // Fraunhofer [Электронный ресурс]. URL: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/558765742.pdf> (дата обращения: 22.10.2019).
42. Кузнецов Б.Ю., Сорокин О.Ю., Ваганова М.Л., Осин И.В. Синтез модельных высокотемпературных керамических матриц методом искрового плазменного спекания и изучение их свойств для получения композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. 2018. №4. С. 37–44. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-4-37-44.
43. Plastic Glide layer and Sliding Element with such: pat. US8357622; filed 14.09.07; publ. 22.01.13.
44. Соломенцева А.В., Фадеева В.М., Железина Г.Ф. Антифрикционные органопластики для тяжело нагруженных узлов трения скольжения авиационных конструкций // Авиационные материалы и технологии. 2016. №2 (41). С. 30–34. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-2-30-34.
45. Гацков В.С., Гацков С.В. Прогрессивные технологии изготовления деталей из антифрикционных материалов: учеб. пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 152 с.
46. Фарафонов Д.П., Мигунов В.П., Алешина Р.Ш. Исследование триботехнических характеристик материалов, применяемых для упрочнения бандажных полок рабочих лопаток турбин ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2016. №S1 (43). С. 24–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-24-30.