

Обзорная статья

УДК 621.822:621.891:620.22

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-145-154

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТЫ В ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛАХ: ОБЗОР МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Часть 1

Е.С. Пастух¹, Н.В. Севостьянов¹, А.А. Шавнев¹

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

Аннотация. Выбор материалов для узлов трения требует комплексного подхода. Традиционно применялись стали, бронзы и чугуны, однако полимеры, благодаря низкому коэффициенту трения и невысокой стоимости, также показали свою эффективность. Тем не менее ресурс полимеров ограничен высокими нагрузками и жесткими условиями эксплуатации. В связи с этим актуальна разработка металломатричных композиционных материалов, уже зарекомендовавших себя в промышленности. Данная статья содержит анализ исследований материалов для подшипниковых узлов за последние 10 лет.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, композиционный материал, подшипники, материаловедение, износостойкость

Для цитирования: Пастух Е.С., Севостьянов Н.В., Шавнев А.А. Перспективные металлокомпозиты в подшипниковых узлах: обзор материаловедческих решений. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2026. № 7 (161). С. 145–154. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-145-154.

Review article

PERSPECTIVE METAL COMPOSITES IN BEARING ASSEMBLIES: AN OVERVIEW OF MATERIALS SCIENCE SOLUTIONS

Part 1

E.S. Pastukh¹, N.V. Sevostyanov¹, A.A. Shavnev¹

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

Abstract. The choice of materials for friction units requires an integrated approach. Traditionally, steels, bronzes and cast irons have been used, but polymers, due to their low friction coefficient and low cost, have also shown their effectiveness. However, the polymer life is limited by high loads and harsh operating conditions. In this regard, the development of metal matrix composite materials, which have already proven themselves in industry, is relevant. This article analyzes researches on materials for bearing assemblies over the past 10 years.

Keywords: coefficient of friction, wear, composite material, bearings, material science, wear resistance

For citation: Pastukh E.S., Sevostyanov N.V., Shavnev A.A. Perspective metal composites in bearing assemblies: an overview of materials science solutions. Part 1. *Trudy VIAM*, 2026, no. 7 (161), pp. 145–154. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-7-145-154.

Введение

На протяжении многих десятилетий не только в России, но и во всем мире разрабатываются новые и модернизируются имеющиеся материалы антифрикционного назначения. Трение – сложный процесс, включающий в себя разного рода факторы, которые могут быть стабильными на протяжении всей эксплуатации узла, а могут варьироваться, что зачастую негативно сказывается на ресурсе ответственного изделия. Изучением процессов, возникающих в процессе трения, занимается трибология. Трибология довольно обширная отрасль в науке, которая также имеет свои разделы. Еще Аристотель в своих трудах по «механике подлунных тел» писал о сопротивлении внешней среды движению тел [1]. Прогнозирование износостойкости при различных видах изнашивания – достаточно сложная задача из-за отсутствия простого и надежного комплекса факторов, связанного с механическими и технологическими характеристиками металлов и сплавов, с внешним действием сил, характером движения и среды [2]. Трибология затрагивает изучение взаимодействия контактирующих твердых тел при взаимном перемещении в различных условиях трения (при повышенных температурах, в жидкостной и сухой средах), а также их износ. Основываясь на трудах исследователей по данной тематике, можно выделить три фундаментальных направления в трибологии:

- повышение экономической выгоды благодаря увеличению износостойкости материала;
- обеспечение высоких показателей энергоемкости и снижение энергетических потерь на трение;
- достижение требуемых значений износостойкости, жесткости, надежности и долговечности трибосопряжений.

При разработке антифрикционного материала должны учитываться будущие механические и эксплуатационные свойства. Большим преимуществом такого материала будет оптимальное сочетание и тех, и других свойств на должном уровне. Однако, как показывает многолетняя практика, подобные требования труднодостижимы. Триботехнические материалы включают различные классы материалов, поэтому это не только композиты, но и различные покрытия и сплавы. Однако в настоящее время актуальны композиционные материалы с металлическими матрицами, которые имеют перспективу в трибологии и доказали свое преимущество в таких ответственных отраслях, как авиационная и космическая.

Эволюция типов подшипников и ключевые эксплуатационные требования к материалам

Для антифрикционных материалов, которые применяются в подшипниковых узлах, ключевыми являются триботехнические параметры: коэффициент трения, линейный износ, износ по массе, износостойкость, скорость и степень изнашивания [3, 4]. Как следствие, при достижении необходимых значений данных величин повышается надежность узлов триботехнического назначения. Узлы трения подразделяют на несколько видов [5]:

- узлы трения покоя, в которых применяются фрикционные материалы, предотвращающие относительное перемещение тел – например, в тормозных системах (коэффициент трения при этом $>0,2$);
- узлы трения скольжения/качения, для которых применяются антифрикционные материалы с коэффициентом трения $<0,2$.

Еще с древних времен использовали системы, схожие с современными узлами трения. Для этого применяли простые материалы и натуральные смазки –

масла растительного и животного происхождения. Только в XVII–XVIII вв. появились первые патенты на подшипник качения и осевой шариковый подшипник, разработанные в Англии [6, 7]. Но в XIX в. начались уже массовые разработки подшипников и внедрение их в узлы трения. Лидерами в то время стали США, Франция и Швеция. В XX в. в данном направлении начали развиваться и другие зарубежные страны – основными компаниями по производству подшипников стали: Svenska Kullagerfabriken (Швеция), Torrington Co, Timken (США), Schaeffler (Германия), NTN, NSK, Koyo (Япония). В таблице приведена краткая классификация по развитию инженерных решений, начиная с древности.

Этапы развития конструкции подшипников

Период	Тип подшипника	Ключевые изобретатели или компании	Примечание
До 1500 г.	Деревянные ролики, втулки	Древний Египет, Рим	Подшипники скольжения и примитивные ролики
1500 г.	Шариковые и роликовые (чертежи)	Леонардо да Винчи	Теоретические конструкции
1794 г.	Осевой шариковый	Philip Vaughan	Получен первый патент
1869–1899 гг.	Радиальный шариковый, конический	Jules Suriray, Henry Timken, Sven Wingquist	Начало применения подшипников современного типа
1907–1930 гг.	Массовое производство	SKF, FAG, Timken	Стандартизация и расчетные методы
С 1950 г. по настоящее время	Керамические, магнитные, интеллектуальные	SKF, Schaeffler, NSK, NASA и др.	Высокотехнологичные решения

Узлы трения скольжения и качения представляют собой подшипники, которые также подразделяются по своей конструкции (см. рисунок). Подшипники трения качения – это подшипники (кольца) с шариками различного диаметра, называемые шариковыми подшипниками. По признаку направления главной воспринимаемой нагрузки их делят на радиальные, радиально-упорные и упорные. Помимо этого, есть роликовые подшипники, которые тоже относятся к группе подшипников качения. Они в свою очередь классифицируются по форме роликов: цилиндрические, конические и т. д. Третий вид подшипников – это подшипники скольжения, которые обычно представляют собой два элемента с соприкасающимися друг с другом поверхностями – корпус и вкладыш/втулка. Такие подшипники применяются в тяжелонагруженных системах, работающих при малых скоростях. Новое направление в разработке подшипников – магнитные подшипники, гибридные и комбинированные опоры [7–9].



Подшипники скольжения (а) и качения (б)

Материал для подшипниковых узлов должен обеспечивать несущую способность и контактную выносливость в заданных условиях: высокое сопротивление усталости при многократном циклическом нагружении (для подшипников качения – контакт Херца, выкрашивание дорожек; для подшипников скольжения – усталостное разрушение антифрикционного слоя), достаточную статическую прочность и жесткость, размерную стабильность при рабочих температурах [4, 8]. Критичны также трение и износ. Необходимо обеспечивать низкий коэффициент трения на рабочих режимах (особенно при граничной и смешанной смазке), высокую износостойкость и стойкость к задирам, хорошую прирабатываемость поверхностей. Для подшипников скольжения дополнительно важны способность материала поглощать твердые частицы и конформность (способность подстраиваться под форму вала без разрушения), что снижает чувствительность к загрязнению и погрешностям монтажа. В подшипниках качения, напротив, требуется высокая твердость и минимизация поверхностных дефектов при сохранении достаточной вязкости, чтобы избежать хрупкого разрушения дорожек [8, 9].

С учетом того, что узлы трения зачастую находятся в агрессивной среде, важны их тепловые и коррозионные свойства. Материал подшипника должен эффективно отводить тепло от зоны контакта (достаточная теплопроводность, допустимая рабочая температура без потери прочности), быть совместимым со смазочным материалом и рабочей средой, обладать коррозионной стойкостью либо допускать нанесение защитных покрытий. Для высокоскоростных и высокотемпературных узлов (турбомашины и др.) все чаще применяют жаростойкие сплавы, металлокерамические и композиционные материалы, способные сохранять структуру и трибологические характеристики при повышенных температурах [10, 11].

Наконец, важны технологичность и экономичность: возможность получения требуемой структуры по выбранной технологии; обрабатываемость, ремонтпригодность и приемлемая стоимость при массовом производстве. В этом контексте перспективные металлокомпозиты для подшипников оценивают не только по трибологическим и механическим характеристикам, но и по совместимости с существующими конструкциями и технологиями изготовления узлов [12].

Традиционные материалы подшипников и предпосылки к использованию металлокомпозитов

Развитие материаловедения в подшипниковой отрасли берет свое начало еще в раннем периоде древних цивилизаций, когда из материалов были доступны лишь древесина, камень и бронза. Однако даже из таких простых материалов старались сделать узлы с высоким показателем скольжения. Это требовалось для самых разных задач – от рукоделия до перемещения крупных и тяжелых предметов. Конструкция подшипников тогда была самой простой, основной акцент делали на смазках – животных или растительных маслах. С развитием человеческого общества увеличивались и его потребности, а значит, появлялись новые идеи, заключающиеся в оптимизации конструкций и повышении эффективности работы. В XIX в. произошла индустриальная революция, в ходе которой появились новые материалы – чугун и баббиты. Их применение стало востребованным в узлах трения из-за хорошей прирабатываемости и работе при граничной смазке. Конструкция подшипниковых узлов также претерпела изменения: появилось понимание о трибологических требованиях на границе «мягкий антифрикционный слой–твердая опора». В конце XIX в. уже начали появляться подшипниковые стали, которые являются актуальными материалами для узлов трения до настоящего времени. Они имеют высокую твердость, прочность и достаточную вязкость, чтобы обеспечивать хорошую контактную выносливость [8, 13]. Параллельно с разработкой

подшипниковых сталей получили развитие работы по поиску пористых и самосмазывающихся материалов: синтерованных бронз, железных и бронзографитовых материалов, пропитанных маслом. Такие материалы нашли применение в малых и тихоходных узлах трения – например, в бытовой технике. В целом с конца XIX до начала XX в. распространяется технология упрочнения материалов путем термической обработки, поэтому стали становятся наиболее подходящими материалами для применения в трибологии и имеют в настоящее время преимущество перед остальными материалами.

Конец XX в. – период, когда в трибологии массово разрабатывались и внедрялись самые разные типы материалов, в том числе полимерные, которые стали инновационным и грандиозным открытием и до сегодняшнего дня остаются перспективными материалами для многих отраслей промышленности. Основные преимущества полимерных материалов – низкий коэффициент трения, коррозионная стойкость, малая масса и работа без смазки. Но, к сожалению, они имеют недостатки: сниженная рабочая температура, ползучесть, меньшая несущая способность по сравнению со сталями и бронзами, что ограничивает применение данных материалов [14–16]. В это же время начали разрабатывать керамические материалы, которые обладают высокой твердостью, малой плотностью, термо- и коррозионной стойкостью. Именно керамические материалы возможно применять в узлах трения, непрерывно работающих при относительно невысоких нагрузках, но с большой скоростью [17, 18]. Одни из самых распространенных в этой категории материалов – нитрид и карбид кремния. Последними инновациями в трибологическом материаловедении считаются материалы с приставкой нано-, а также специальные покрытия, композиционные материалы и аддитивные технологии [19]. Существенный резерв для повышения ресурса связан с инженерией поверхности: модификацией приповерхностного слоя деталей подшипников (колец, тел качения, вкладышей) путем термохимической обработки, нанесения тонких твердых покрытий и твердосмазочных пленок. В материаловедении различают следующие типы покрытий, которые в той или иной степени актуальны для трибологии [12, 20, 21]:

- термохимически модифицированные слои (азотирование, карбонитрирование и др.);
- физико- и химико-вакуумные твердые покрытия (PVD/CVD) на основе нитридов, карбидов, оксидов переходных металлов;
- алмазоподобные углеродные (DLC) покрытия различных типов;
- покрытия с твердыми смазками (MoS_2 , WS_2 , графит, мягкие металлы, полимерные связи);
- градиентные и многослойные системы, в том числе с комбинацией износостойких и смазочных слоев.

Самые распространенные покрытия получены термохимическим способом. Благодаря им повышается прочность поверхностного слоя, а также одновременно снимаются остаточные сжимающие напряжения в основном материале. Покрытия типа PVD/CVD применяются в подшипниках качения при высоких скоростях скольжения, однако такие покрытия довольно хрупкие и высок риск их отслоения. Алмазоподобные покрытия в основном наносят на узлы трения, работающие при граничной смазке и в условиях сухого трения. Твердые смазки в качестве покрытий актуальны в условиях небольшого количества основной смазки, в вакууме и при экстремальных температурах. Покрытия в принципе являются довольно универсальной отраслью в материаловедении. Разработать технологию получения покрытия, которое будет выполнять определенную функцию, возможно практически для любого материала-основы, поэтому в трибологии существует значительное количество разработок, связанных именно с нанесением упрочняющих и износостойких покрытий на уже давно известные марки сталей.

При обилии разного рода материалов исследователи в конце концов начали уделять больше внимания конструкции подшипников. Так появились гибридные подшипники, состоящие из двух и более деталей, схожих или отличающихся по материалам [17]. Таким образом, возникла необходимость в подборе оптимальных и высокоэффективных пар трения. Перед исследователями стоит задача: имея арсенал множества сплавов и композиций, подобрать пары трения с наиболее выгодными эксплуатационными характеристиками под определенный трибологический узел или же тестировать новые технологии обработки имеющихся материалов, проводить модификацию составов и разрабатывать новые технологии (подбирать комплекс условий) изготовления самих узлов.

Основными материалами для тяжело нагруженных подшипников уже многие годы являются стали и их сплавы, причем наибольшее распространение получили высокоуглеродистые хромистые стали марки ШХ, а также хромистые стали марки ЭИ. Несмотря на повышенную прочность и довольно высокую износостойкость сталей, их триботехнические характеристики продолжают повышать с помощью упрочнения поверхности – например, азотирования [22]. Исследования показали, что азотирование сталей снижает коэффициент трения в паре «сталь–сталь» на 5–8 %, а интенсивность изнашивания при контактном давлении до 830 МПа – до 85 %. Однако применение сталей в некоторых узлах трения не всегда выгодно с точки зрения долговечности. Износостойкость материала имеет прочностную основу и от твердости не зависит, поэтому структура оказывает прямое влияние на ее показатели. В связи с этим в ранних исследованиях доказано, что высоколегированные специальные и коррозионностойкие стали не всегда достигают нужного уровня износостойкости из-за небольшой возможности управления структурой на этапе создания материала [2, 23].

Применение подшипников огромно и затрагивает множество отраслей, в том числе и те отрасли (судостроение, сельское хозяйство, авиа- и космическое строение), где материал должен обладать не только хорошими триботехническими показателями, но и стойкостью к окислению в агрессивных средах или при высоких температурах. При таких условиях эксплуатации хорошо зарекомендовали себя цветные сплавы, а именно бронзы. Цветные сплавы на основе меди в большинстве случаев являются антифрикционными материалами. За счет их структуры, которая обладает высокими показателями к сжимающим нагрузкам и теплопроводностью, узлы трения из бронзы исправно работают долгие годы. Распространенными марками бронз в узлах трения являются: оловянистые бронзы БрОЦС5-5-5, БрОЦС6-6-3, БрОЦС4-4-2; алюможелезистые бронзы БрАЖ9-4, БрАЖМц1-3-1,5 и свинцовистые бронзы типа БрС-30. Узлы трения из бронз легки в изготовлении, легко обрабатываются и совместимы с другими материалами. Только в опорных роликах гусеничной тележки экскаватора марки ЭО-5111 используются 24 бронзовые втулки, в поддерживающих роликах – шесть втулок, а в ведущих и направляющихся колесах – до 10 шт. [24].

При этом совершенствование материалов для узлов трения продолжается. В настоящее время стали широко использоваться композиционные материалы (КМ), которые состоят из двух и более самостоятельных материалов, обладающих собственным комплексом физико-механических свойств. Композиционные материалы классифицируют по типу матрицы (металлическая, полимерная, углеродная, керамическая) и армирующих компонентов (слоистые, волокнистые, дисперсно-упрочненные) [25].

Более распространенными являются подшипники, изготовленные с применением керамических КМ, которые сочетают высокую износостойкость с твердостью и теплостойкостью [26]. Обычно за основу берут неоксидную керамику – нитрид или карбид кремния. Однако керамические КМ для подшипников являются довольно хрупким

материалом, что делает их применение в тяжело нагруженных узлах трения невозможным. Российские керамические подшипники на основе SiC имеют предел прочности при изгибе в диапазоне 220–550 МПа, а коэффициент теплопроводности при 100 °С составляет 70–180 Вт/(м·К) [27].

Если рассматривать крупногабаритные машины, в которых узлы трения работают в тяжелых условиях, то керамические КМ не всегда возможно применять, поэтому на первый план выходят металлические КМ (МКМ). Они более прочные и имеют запас вязкости, что дает им преимущество в сроке эксплуатации. Но следует учесть, что пара «металл–металл» при сухом трении – одна из самых «жестких» пар, имеющая свои недостатки. При трении двух металлических элементов при циклических нагрузках и высоких скоростях образуются дефекты, которые препятствуют дальнейшей работе узла. Одним из решений при этом является добавление смазочного материала. Но иногда конструкция узла этого не предусматривает, что оставляет открытым вопрос выбора материалов для пары трения. Дисперсно-упрочненные МКМ – одни из популярных материалов в трибологии. В ведущих институтах России ведутся разработки МКМ на основе металлических матриц, которые зарекомендовали себя как наиболее подходящие антифрикционные материалы. Оптимальным вариантом для решения поставленной задачи являются КМ с Co–Ni матрицей. Система Co–Ni образует твердые растворы, максимальная прочность которых выше прочности индивидуальных компонентов. Матричные КМ системы Co–Ni перспективны при изготовлении подшипников скольжения, работающих при высоких нагрузках и скоростях, так как даже при повышении температуры рассматриваемые материалы сохраняют удовлетворительные показатели триботехнических характеристик [28].

При разработке новых материалов всегда учитывается их востребованность и экономическая целесообразность. Безусловно, получение нового состава дает ряд преимуществ, которые могут пригодиться в определенной отрасли, однако этот процесс многоэтапный и требует участия со стороны специалистов из смежных областей.

Заключения

Материаловедение в области триботехники обширно и имеет ряд проблем, которые необходимо решать комплексно. Узлы трения присутствуют практически во всех сферах деятельности человека, что делает разработку новых триботехнических материалов актуальной. В первой части статьи рассмотрены аспекты эволюции подшипниковых узлов и материалов для них с историческим уклоном. Успех в разработке нового антифрикционного материала отчасти зависит от предшествующего опыта исследователей и их идей. Обращая внимание на развитие составов, можно оценить перспективу текущих исследований и скорректировать курс поиска.

С развитием человечества развиваются и идеи в области авиации, машиностроения, ракетостроения и других ответственных отраслей. Но вместе с этим усложняются конфигурации узлов. Одной из первостепенных целей исследователей является эффективность и оптимизация процессов, однако не всегда получается совместить данные показатели с малыми габаритами и простотой исполнения изделий. Поэтому разработка новых КМ позволяет комбинировать уже существующие материалы, повышая комплекс физических и механических свойств, а также не усложнять конструкцию самого узла.

Во второй части статьи предполагается рассмотреть методы получения МКМ, востребованность и экономическую целесообразность таких материалов на рынке, а также проанализировать разработки как отечественных, так и зарубежных исследователей за последние 10 лет.

Список источников

1. Скорнякова Л.В., Минеев-Ли В.Е., Исмаилов Г.М. Перспективные направления современной трибологии // Моя профессиональная карьера. 2019. Т. 2. № 5. С. 156–162.
2. Петровский В.А., Рубан А.Р., Хоменко Т.В., Мельников А.В. Износостойкость и совместимость исследуемых материалов для шарнирного узла черпаковой цепи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер.: Морская техника и технология. 2023. № 3. С. 7–18. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-7-18.
3. ГОСТ 27674–88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 1988. 20 с.
4. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // Труды ВИАМ. 2023. № 3 (121). С. 84–94. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
5. Берковский И.И., Громаковский Д.Г. Трибология. Физические основы, механика и технические приложения: учеб. для вузов / под ред. Д.Г. Громаковского. Самара: Самарский ГТУ, 2000. 268 с.
6. Dowson D. History of Tribology. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998. 768 p.
7. Harris T.A., Kotzalas M.N. Rolling Bearing Analysis. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 760 p.
8. Крагельский И.В., Комбалов В.С. Трение, износ и смазка (Трибология). М.: Машиностроение, 1978. 263 с.
9. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчета на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
10. Каблов Е.Н. Авиационное материаловедение в XXI веке. Перспективы и задачи // Авиационные материалы. Избранные труды ВИАМ 1932–2002. М.: МИСИС – ВИАМ, 2002. С. 23–47.
11. Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). С. 76–89. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
12. Севостьянов Н.В., Буданова Е.С., Хватов В.Д., Фомичев А.Н. Триботехнические особенности металлических композиционных материалов, армированных нитридами // Труды ВИАМ. 2025. № 2 (144). С. 100–111. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 19.01.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.
13. Modern Tribology Handbook: in 2 vols / B. Bhushan. Boca Raton: CRC Press, 2001. 1760 p.
14. ASM Handbook. Materials Park, OH: ASM International, 1992. Vol. 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology. 944 p.
15. Harnoy A. Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication. Boca Raton: CRC Press, 2003. 664 p.
16. Polymer Composites for Tribological Applications / K. Friedrich. Amsterdam: Elsevier, 1989. 430 p.
17. Friedrich K., Schlarb A.K. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013. 533 p.
18. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 1. С. 20–24.
19. Tribology of Mechanical Systems / S. Jahanmir, H. Heshmat, K.L. Doelling. New York: ASME Press, 1999. 336 p.
20. Advanced Tribology / J.S.C. Jang, H. Weng-Sing. Berlin: Springer, 2009. 1056 p.
21. ASM Handbook. Materials Park, OH: ASM International, 1994. Vol. 5: Surface Engineering. 1039 p.
22. Балякин В.Б., Филиппов А.А., Долгих Д.Е. Повышение износостойкости шарнирных сферических подшипников за счет азотирования // Известия Самарского научного центра РАН. 2025. Т. 27. № 3. С. 40–45. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-40-45.
23. Севальнев Г.С., Севальнева Т.Г., Колмаков А.Г., Дульнев К.В., Крылов С.А. Исследование триботехнических характеристик коррозионностойких сталей с различным механизмом объемного упрочнения // Труды ВИАМ. 2021. № 10 (104). С. 3–11. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 23.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.

24. Orikbai A.K., Toigonbaev S.K. Adaptations for restoration of bearings of sliding // International journal of professional science. 2019. No. 11. P. 155–162.
25. Hutchings I.M., Shipway P. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017. 412 p.
26. Сильченко О.Б. Исследование керамического подшипника скольжения с одновременным вращением наружного и внутреннего колец // СТИН. 2023. № 11. С. 12–15.
27. Куличков С.В. Обзор исследований керамических подшипников на предмет возможности их применения в технологических и энергетических машинах // Научные труды Дальрыбвтуза, 2020. Т. 54. № 4. С. 43–49.
28. 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.

References

1. Skornyakova L.V., Mineev-Li V.E., Ismailov G.M. Promising Directions in Modern Tribology. *Moya professionalnaya karyera*, 2019, vol. 2, no. 5, pp. 156–162.
2. Petrovsky V.A., Ruban A.R., Khomenko T.V., Melnikov A.V. Wear Resistance and Compatibility of the Studied Materials for the Bucket Chain Hinge Unit. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Morskaya tekhnika i tekhnologiya*, 2023, no. 3, pp. 7–18. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-7-18.
3. State Standard 27674–88. *Friction, Wear and Lubrication. Terms and Definitions*. Moscow: Standartinform, 1988, 20 p.
4. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V. Cermets for plain bearings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 84–94. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 21, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
5. Berkovsky I.I., Gromakovsky D.G. *Tribology. Physical principles, mechanics and technical applications*: textbook for universities. Ed. D.G. Gromakovsky. Samara: Samara State Technical Univ., 2000, 268 p.
6. Dowson D. *History of Tribology*. 2nd ed. London: Professional Engineering Publishing, 1998, 768 p.
7. Harris T.A., Kotzalas M.N. *Rolling Bearing Analysis*. 5th ed. Boca Raton: CRC Press, 2006, 760 p.
8. Kragelskii I.V., Kombalov V.S. *Friction, Wear, and Lubrication (Tribology)*. Moscow: Mashinostroenie, 1978, 263 p.
9. Kragelskii I.V., Dobychin M.N., Kombalov V.S. *Fundamentals of Friction and Wear Calculation*. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 526 p.
10. Kablov E.N. Aviation Materials Science in the 21st Century. Prospects and Challenges. *Aviation Materials. Selected Works of VIAM 1932–2002*. Moscow: MISIS – VIAM, 2002, pp. 23–47.
11. Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P. Modern aspects tribotechnical materials science of heavily-loaded dry friction units the development (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), pp. 76–89. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
12. Sevostyanov N.V., Budanova E.S., Khvatov V.D., Fomichev A.N. Tribotechnical features of metal composite materials reinforced with nitrides. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 100–111. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 19, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.
13. *Modern Tribology Handbook*: in 2 vols. Ed. B. Bhushan. Boca Raton: CRC Press, 2001, 1760 p.
14. *ASM Handbook*. Materials Park, OH: ASM International, 1992, vol. 18: Friction, Lubrication, and Wear Technology, 944 p.
15. Harnoy A. *Bearing Design in Machinery: Engineering Tribology and Lubrication*. Boca Raton: CRC Press, 2003, 664 p.

16. *Polymer Composites for Tribological Applications*. Ed. K. Friedrich. Amsterdam: Elsevier, 1989, 430 p.
17. Friedrich K., Schlarb A.K. *Tribology of Polymeric Nanocomposites*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2013, 533 p.
18. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S. Promising high-temperature ceramic composite materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 20–24.
19. *Tribology of Mechanical Systems*. Ed. S. Jahanmir, H. Heshmat, K.L. Doelling. New York: ASME Press, 1999, 336 p.
20. *Advanced Tribology*. Eds. J.S.C. Jang, H. Weng-Sing. Berlin: Springer, 2009, 1056 p.
21. *ASM Handbook*. Materials Park, OH: ASM International, 1994, vol. 5: Surface Engineering, 1039 p.
22. Balyakin V.B., Filippov A.A., Dolgikh D.E. Increasing the wear resistance of spherical plain bearings through nitriding. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2025, vol. 27, no. 3, pp. 40–45. DOI: 10.37313/1990-5378-2025-27-3-40-45.
23. Sevalnev G.S., Sevalneva T.G., Kolmakov A.G., Dulnev K.V., Krylov S.A. Study of the tribotechnical characteristics of corrosion-resistant steels with different mechanisms of volumetric hardening. *Trudy VIAM*, 2021, no. 10 (104), pp. 3–11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: September 23, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-10-3-11.
24. Orikbai A.K., Toigonbaev S.K. Adaptations for restoration of bearings of sliding. *International journal of professional science*, 2019, no. 11, pp. 155–162.
25. Hutchings I.M., Shipway P. *Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials*. 2nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017, 412 p.
26. Silchenko O.B. Study of a ceramic plain bearing with simultaneous rotation of the outer and inner rings. *STIN*, 2023, no. 11, pp. 12–15.
27. Kulichkov S.V. Review of studies of ceramic bearings for the possibility of their application in technological and power machines. *Nauchnye trudy Dalrybvtuza*, 2020, vol. 54, no. 4, pp. 43–49.
28. Farafonov D.P., Migunov V.P., Aleshina R.Sh. Tribotechnical characteristics research of materials used for gas turbine engines blade shroud hardening. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2016, no. S1, pp. 24–30. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S1-24-30.

Информация об авторах

Пастух Екатерина Сергеевна, инженер, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Севостьянов Николай Владимирович, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Шавнев Андрей Александрович, заместитель начальника Научно-исследовательского отделения, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

Ekaterina S. Pastukh, Engineer, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Nikolay V. Sevostyanov, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Andrey A. Shavnev, Deputy Head of Scientific-Research Bureau, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 03.04.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 10.04.2026.

The article was submitted 03.04.2026; approved and accepted for publication after reviewing 10.04.2026.