

Научная статья

УДК 621.891

DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89

СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТРИБОТЕХНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ ТЯЖЕЛОНАГРУЖЕННЫХ УЗЛОВ СУХОГО ТРЕНИЯ (обзор)

Н.В. Севостьянов¹, Н.П. Бурковская¹

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

Аннотация. Проанализированы методы и тенденции развития трибоматериаловедения для обеспечения свойств, необходимых для материалов узлов трения современной техники. Активно ведутся разработки в следующих направлениях: керамические покрытия, новые триботехнические сплавы, модификация структуры сплавов с целью повышения их функциональных характеристик, керамические материалы, металлокерамические материалы, химико-термическая обработка и закалка поверхности. Керамические покрытия триботехнического назначения в большинстве случаев имеют нитридную основу. В настоящее время активно ведутся работы в области керамических материалов, а новые материалы на основе ZrO_2 и Si_3N_4 находят промышленное применение в узлах трения. Металлокерамические материалы обладают высокой износостойкостью, сравнимой с аналогичной характеристикой у керамических материалов, и находят применение в горнодобывающей и нефтегазовой промышленности. Химико-термическая обработка позволяет улучшить триботехнические свойства промышленных сталей и сплавов.

Ключевые слова: трибология, материаловедение, триботехническое материаловедение, трибоматериаловедение, износ, коэффициент трения

Для цитирования: Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Современные аспекты развития триботехнического материаловедения тяжело нагруженных узлов сухого трения (обзор) // Труды ВИАМ. 2022. № 10 (116). Ст. 07. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.

Scientific article

MODERN ASPECTS TRIBOTECHNICAL MATERIALS SCIENCE OF HEAVY-LOADED DRY FRICTION UNITS THE DEVELOPMENT (review)

N.V. Sevostyanov¹, N.P. Burkovskaya¹

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 methods and trends in the development of tribomaterials science to provide the properties necessary for materials of friction units of modern technology are analyzed. The following approaches are being actively developed and are being used: ceramic coatings, development of new tribotechnical alloys or modification of the structure in order to improve their functional characteristics, ceramic materials, metal-ceramic materials, chemical-thermal treatment and surface hardening. Ceramic coatings for tribotechnical purposes are mainly based on nitride systems. Active work is being carried out in the field of ceramic materials, and new materials based on ZrO_2 and Si_3N_4 are already finding industrial application in friction units. Metal-ceramic materials have high wear resistance comparable to ceramic materials and are used in the mining and oil and gas industries. Chemical-thermal treatment makes it possible to improve the tribological properties of industrial steels and alloys.

Keywords: tribology, materials science, tribotechnical materials science, tribomaterials science, wear, friction coefficient

For citation: Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P. Modern aspects tribotechnical materials science of heavy-loaded dry friction units the development (review). *Trudy VIAM*, 2022, no. 10 (116), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.

Введение

Развитие материалов триботехнического назначения началось с применения природных материалов типа минералов, древесины и др. С освоением человечеством литейных технологий изготовления бронзы, чугуна и стали в узлы трения начали активно внедряться металлы, которые и в настоящее время остаются основными триботехническими материалами. С развитием высокотехнологичных методов синтеза, таких как магнетронное напыление, горячее изостатическое прессование, электрохимическое осаждение и др., появилась возможность получения материалов с заданным комплексом и уровнем свойств, что позволяет разработать новые триботехнические материалы.

На каждом этапе развития техники повышаются эксплуатационные свойства машин, аппаратов и устройств. Немаловажное значение при этом имеют работы по совершенствованию и созданию новых материалов [1].

Современная техника характеризуется увеличением сложности конструкций. Повышаются требования к надежности машин, снижению затрат на их обслуживание, которые достигаются не только за счет конструктивных решений, но и благодаря применению новых материалов с более высокими механическими и функциональными свойствами [2].

Развитие современного машиностроения идет по пути уменьшения габаритов изделий, увеличения их эффективности и надежности, отказа от обслуживания и ремонта на весь срок эксплуатации техники и сопровождается увеличением удельных нагрузок на трущиеся детали. Особо тяжелым условиям эксплуатации подвержены узлы сухого трения. Увеличение нагрузок на узлы трения с уменьшением габаритов деталей требует применения прогрессивных функциональных материалов [3].

В современной трибологии выделяют самостоятельный раздел – трибоматериаловедение.

Триботехническое материаловедение – раздел трибологии, изучающий поведение материалов при трении, изнашивании и смазке, а также изменение структурно-фазовых состояний поверхностных слоев металлов под действием силы трения [4–6]. В задачи трибоматериаловедения входят:

- разработка теоретических основ трибологических принципов функционирования материалов;
- создание триботехнических материалов, характеризующихся высокими эксплуатационными свойствами в узлах трения;
- установление взаимосвязи структурно-фазового состава и уровня механических свойств со скоростью и механизмом износа материалов в процессе трения;
- решение вопросов трибосопряжения и подбор наилучших сочетаний материалов пар трения, удовлетворяющих надежности, долговечности и экономичности узла трения.

К тяжело нагруженным трибосопряжениям относят пары трения, работающие в условиях вакуума, низких или высоких температур, при высоких удельных нагрузках, в коррозионно-агрессивных средах и т. п.

Цель данной работы – обобщение современных проблем триботехнического материаловедения современной техники и подходов к их решению для тяжело нагруженных узлов сухого трения скольжения, к которым относятся пары трения, работающие в условиях вакуума, низких или высоких температур, при высоких удельных нагрузках и в коррозионно-агрессивных средах.

Работа выполнена при поддержке ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ 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») [1].

Требования, предъявляемые к триботехническим материалам, и основные направления их развития

Для применения в узлах сухого трения современной техники, триботехнические материалы должны обладать следующими характеристиками [7, 8]:

- высокой износостойкостью;
- стабильным коэффициентом трения в широком диапазоне рабочих скоростей и нагрузок;
- расширенным рабочим температурным диапазоном;
- вибростойкостью и стойкостью к ударным нагрузкам;
- коррозионной и химической стойкостью к различным агрессивным средам;
- низким трибоакустическим шумом;
- работоспособностью в условиях граничной смазки или сухого трения.

Для тяжело нагруженных пар трения предъявляются дополнительные требования:

- диапазон рабочих температур $-60 \div +250$ °С;
- контактное давление более 4–5 МПа;
- наличие абразивных частиц в зоне трения.

Существующие триботехнические материалы не обеспечивают необходимого уровня свойств, что требует создания новых материалов с применением технологий синтеза или поиску новых принципов функционирования материалов в паре трения.

Эксплуатационные качества узлов трения зависят от стабильности значений коэффициента трения пары трения. Энергоэффективность антифрикционных материалов определяется низким коэффициентом трения, а надежность фрикционных материалов – высоким и стабильным.

Особенностью транспортных машин является то, что они могут эксплуатироваться во всех климатических зонах, отличающихся существенными перепадами температур – от отрицательных в арктических широтах и на горных высотах до сильно положительных в жарких тропических зонах. Возможны также резкие и критические нагревы в тяжело нагруженных узлах, например в тормозных механизмах.

Работа тяжело нагруженных узлов трения всегда сопровождается высокими вибрационными и ударными нагрузками. При вращении валов и роторов существует разбалансировка, вызывающая вибрации с частотой вращения. Возвратно-поступательное движение само по себе генерирует вибрации, связанные с торможением и ускорением, в связи с чем к триботехническим материалам предъявляются требования устойчивости к вибрационным и ударным нагрузкам.

Как правило, пары трения выполняют из разнородных материалов, что приводит к образованию короткозамкнутой гальванической пары. Эксплуатация транспортных

машин в различных климатических зонах также не предопределяет заранее коррозионных требований. Ситуация усугубляется тем, что при трении наблюдается поверхностная активация, связанная с удалением коррозионностойких оксидных пленок и электростатическая ионизация. Все это способствует протеканию активной трибокоррозии материалов пары трения, ранее казавшихся стойкими к ней.

Наряду с требованием стабильного коэффициента трения и низкого износа материалов большое значение имеют виброакустические характеристики пар трения. Шум и вибрация в узлах трения приводят к проблемам, связанным с технологической эксплуатацией материалов [9].

В развитии современного материаловедения для тяжело нагруженных узлов трения можно выделить следующие основные направления разработки:

- новые керамические покрытия и материалы;
- новые триботехнические сплавы или модификация структуры сплавов с целью повышения их эксплуатационных характеристик;
- новые металлокерамические материалы, а также химико-термическая обработка и закалка поверхности.

Ввиду низких механических характеристик полимерных материалов их применение в тяжело нагруженных узлах трения современных машин не рассматривается из-за недостаточной несущей способности.

Керамические покрытия

Наиболее дешевым и технологичным способом повышения триботехнических свойств деталей узлов трения является модификация поверхности трения, в частности нанесение износостойких покрытий [10]. Наибольшей стойкостью к износу обладают твердые керамические покрытия, нанесение которых позволяет значительно повысить твердость поверхности и увеличить износостойкость.

Возможность быстрой перенастройки технологического оборудования по нанесению покрытий позволяет получать покрытия как из чистых металлов, так и из керамических материалов с варьированием состава и толщины покрытия, что обусловило большое количество разработок в этой области. При нанесении покрытий толщиной до 50 мкм расход дорогостоящих материалов незначителен по сравнению с эффектом повышения свойств при модификации поверхности.

Наибольшее распространение в качестве износостойких покрытий получили покрытия на основе нитрида титана (TiN), которые рассматриваются как перспективные для узлов трения [11–13].

Разработаны износостойкие наноструктурированные покрытия систем Ti–Al–Ni–N и Ti–Al–Ni–Mo–N, имеющие многослойную равномерную структуру. Хрупкость покрытий значительно снижена благодаря наличию металлической фазы, разветвленной сети границ нанозерен и слоистому строению, что препятствует распространению трещин. Измеренные при 20 °С коэффициенты трения для покрытий систем Ti–Al–Ni–N и Ti–Al–Ni–Mo–N составили 0,63 и 0,65, а износ: 2,65 и 2,50 мм³/(Н·м) соответственно. При увеличении температуры испытаний до 500 °С коэффициенты трения снижаются до 0,42 и 0,45, а износ увеличивается до 5,18 и 7,23 мм³/(Н·м) соответственно [14].

Высокой износостойкостью обладает покрытие системы Ti–Al–N, применяемое для обрабатываемого инструмента. Авторы работы [15] провели сравнительные триботехнические испытания покрытий систем Ti–Al–N и Cr–Al–Si–N, а также алмазоподобных покрытий (DLC). Установлено, что при рабочих нагрузках (10 Н на палец диаметром 6,35 мм) в контактной зоне, максимальный рост износостойкости

обеспечивает использование покрытия системы Cr–Al–Si–N с гетерофазной наноструктурой ($1,66 \cdot 10^{-7} \text{ мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$), а покрытие DLC обладает наименьшим коэффициентом трения (0,330) по сравнению с нитридными системами (0,722–0,820).

В работе [16] установлено, что на величину коэффициента трения и устойчивость к износу влияют не только состав, но и параметры технологического режима осаждения покрытий системы Ti–Al–N – потенциал смещения и температура подложки.

Механические потери на трение цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания одни из самых больших и составляют 40 % от всех механических потерь при работе двигателя. Поршневое кольцо в двигателе внутреннего сгорания является одним из самых высоконагруженных узлов трения, работающим в условиях граничного трения при высоких температурах (до 400 °С), скоростях скольжения (12–17 м/с) и нагрузках (7,5–10,5 кПа). В связи с этим снижение коэффициента трения и увеличение износостойкости поршневых колец – одна из самых первоочередных задач. Для увеличения ресурса поршневых колец фирма Male (Германия) предложила технологию PVD-нанесения покрытия CrN на их рабочую поверхность [17].

С целью модификации в покрытие CrN добавляют алюминий. Авторами в работе [18] проведены всесторонние исследования влияния химического состава покрытий на топографию, механические, триботехнические и коррозионные свойства. Установлено, что покрытие системы Al–Cr–N имеет меньший параметр решетки и размер кристаллитов, большую шероховатость, оно более коррозионностойко по сравнению с покрытием CrN. Так, покрытие состава $\text{Al}_{0,70}\text{Cr}_{0,30}\text{N}$ обладает наиболее высокой адгезионной прочностью, коэффициентом трения по сфере из оксида алюминия в диапазоне 0,62–0,68 с удельной объемной износостойкостью $2,1 \cdot 10^{-17} \text{ м}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$.

Керамические материалы

Керамические материалы отличаются особо высокой твердостью и, соответственно, обладают высокой износостойкостью, а также имеют ряд преимуществ, таких как высокие температуры эксплуатации, химическая стойкость, способность воспринимать высокие нагрузки [19]. Однако из-за высокой хрупкости применение керамических материалов ограничено.

В машинах и аппаратах, где необходимо обеспечить высокую абразивную износостойкость, применение находят керамические материалы на основе карбида и нитрида кремния [20, 21]. Особенно перспективны такие материалы для узлов трения авиационных газотурбинных двигателей благодаря низкой плотности, высокой износостойкости и высоким рабочим температурам. Разработкой материалов для керамических подшипников трения занимаются ведущие зарубежные компании – SKF (Швеция), GE Aviation (США), Snecma (Франция) и др. На образцах из керамических материалов, полученных горячим прессованием, достигнуты следующие показатели коэффициентов трения: 0,17 – для Si_3N_4 и 0,14–0,16 – для SiC [22, 23].

Проведены экспериментальные работы по исследованию возможности применения нитридокремниевых материалов в автомобильных двигателях внутреннего сгорания для облегчения шатунно-поршневых узлов, снижения расхода топлива и повышения экологичности. Так, концерном Scrobear GmbH проведены обширные научно-исследовательские и опытно-конструкторские разработки проекта RolaMot. В результате разработаны технологии изготовления методом горячего прессования материала на основе соединения Si_3N_4 , а также механической обработки для изготовления узлов шатунно-поршневой группы двигателя внутреннего сгорания.

Проведены стендовые испытания двигателя с узлами трения из нитридокремниевой керамики. К работе были привлечены и другие организации, такие как FhG IWM, FEV Motorenttechnik GmbH, FCT Ingenieurkeramik GmbH и FhG IKTS [24].

Особую перспективность для использования в узлах сухого трения по стали представляет керамика на основе диоксида циркония при высоких скоростях скольжения. При трении в паре «керамика–керамика» предельная скорость скольжения составляет не более 1 м/с из-за катастрофического разрушения поверхности трения. При трении пары «керамика–металл (сталь)» верхний предел скоростей скольжения составляет до 10–15 м/с. В случае трения керамики на основе оксида циркония по стали испытателям удалось достичь скорости скольжения 34 м/с с коэффициентом трения 0,1 при сохранении высокой износостойкости, несмотря на высокие температуры в зоне трибоконтакта. Износ керамики на основе диоксида циркония, твердость которой существенно больше твердости стали при ее трении без смазки о сталь, определяется главным образом свойствами материала границ зерна керамики [25–27].

Металлические сплавы

Создание новых триботехнических сплавов остается актуальным, однако с каждым этапом требуется переход на новый качественный технологический уровень получения материалов с применением все более редких и дорогостоящих элементов, что приводит к несопоставимому росту стоимости изделий [28–30].

Начиная с 1980-х гг. большое внимание уделяется триботехническим сплавам на основе алюминия, характеризующихся низкой плотностью, доступностью и технологичностью. В настоящее время ведутся работы по подбору составов сплавов и установлению влияния легирующих элементов на триботехнические свойства [31]. Исследовано влияние легирующих элементов (олова, свинца, цинка, меди, кремния, магния, железа и титана) на триботехнические характеристики экспериментальных алюминиевых сплавов. *Олово* снижает стойкость к задирам, но повышает износостойкость материала и снижает износостойкость стального контртела (влияния на прирабатываемость не обнаружено). *Свинец* повышает износостойкость алюминиевого сплава, но износ стального контртела увеличивается. *Цинк* снижает стойкость к задирам, но улучшает механические свойства алюминиевых сплавов. *Медь* не оказывает влияния на стойкость к задирам и прирабатываемость. *Кремний* повышает износостойкость и прирабатываемость алюминиевых антифрикционных сплавов. *Магний* повышает коррозионную стойкость сплавов и практически не влияет на прирабатываемость. *Железо* повышает износостойкость и прирабатываемость, рекомендуется для легирования антифрикционных алюминиевых сплавов. *Титан* увеличивает стойкость к задирам при снижении износостойкости сплавов и стального контртела, но не влияет на прирабатываемость.

Повысить износостойкость традиционных триботехнических материалов, таких как чугуны, возможно путем их легирования ванадием и хромом. Так, в эрозионных условиях удалось повысить стойкость в 1,5–2,8 раза чугунов с системой легирования V–Cr–Mn–Ni в сочетании с последующей плазменной закалкой поверхности. При этом в структуре чугуна формируются фазы сфероидального карбида вольфрама, благодаря чему обеспечивается эффективная защита дендритных областей от износа [32].

Металлические композиционные материалы

Повысить износостойкость традиционных триботехнических металлических композиционных материалов возможно при добавлении в их состав износостойких твердых фаз [33, 34]. В работе [35] исследовалось влияние добавления порошка

железо-хромистого сплава ПХ-30 к материалу на основе меди в количестве 10–40 % (объемн.). Минимальный износ материала составил при этом 10 % (объемн.) сплава ПХ-30. Повышение триботехнических свойств объясняется действием не только добавки порошка сплава ПХ-30, но и сформированных на поверхности после спекания твердого раствора железа в меди (Fe_4Cu_3), интерметаллида FeSn и образованием твердых фаз карбида хрома (Cr_{23}C_6).

В промышленности выпускается большое количество «твердых сплавов», представляющих собой металлические композиционные материалы с высоким содержанием твердой фазы на металлической основе [5, 36, 37], которые широко используются в металлообрабатывающей промышленности для изготовления расходных инструментов. Благодаря высокой износостойкости, твердости и ударной прочности такие материалы применяются для изготовления подшипников скольжения, работающих в неблагоприятных условиях. Например, из них изготавливают подшипники скольжения для работы в скважинном оборудовании в условиях абразива, высоких радиальных и осевых нагрузок [38]. Так, в работе [39] карбид титана применяется в составе твердых сплавов взамен карбида вольфрама. Опытные составы композиционного материала обеспечили минимальные значения потерь мощности на трение, которые на 6–10 % меньше, чем у твердого сплава марки ВК8, и на 17–20 % меньше, чем у алмазосодержащего материала марки D-57 для режущего инструмента. Температура нагрева образцов на основе железа, содержащих 30 и 40 % (по массе) карбида титана, на 20–40 % ниже, чем у твердого сплава или алмазосодержащего композита.

В качестве износостойкой фазы для композиционных материалов широко опробуются не только керамические твердые и тугоплавкие соединения, но и интерметаллидные соединения составов Ti-46Al-8Cr и Al-3Ni . Так, добавление состава Ti-46Al-8Cr в композиционный материал на основе бронзы марки БрО6 приводит к увеличению коэффициента трения с 0,047 до 0,055, в то же время улучшается износостойкость – с 4,0 до 3,7 мкм/км, а износ контртела снижается в 2 раза [40].

В работе [41] для увеличения износостойкости материалов на основе бронзы марки БрО10 опробовано добавление интерметаллида состава Ti-46Al-8Cr , полученного методом искрового плазменного спекания. Введение частиц алюминидов позволяет снизить коэффициент трения до 0,06, в контакте с закаленной сталью 40Х – в 1,2–1,3 раза, увеличить износостойкость в 20 раз (до 0,22 мм²/ч) и повысить рабочую температуру в 1,15–1,6 раза (до 160 °С).

Методом взрывного прессования возможно получение металлополимерных композиционных материалов на основе меди, никеля, бронзы, алюминия. В качестве полимерной фазы могут использоваться политетрафторэтилен, сверхвысокомолекулярный полиэтилен, нейлон, капрон и др. [42, 43]. Металлополимерные композиционные материалы обладают коэффициентом трения в диапазоне 0,1–0,15, а их износостойкость возрастает в 1,5 раза по сравнению с материалом матрицы. Содержащийся полимер выполняет роль твердой смазки при трении по механизму его подачи в зону трения при разогреве за счет разности значений температурных коэффициентов линейного расширения металла и полимера [44].

Обработка поверхности

Поверхностной обработкой триботехнических материалов возможно достичь значительного улучшения износостойкости благодаря формированию особой структуры при закалке, микролегированию поверхности, формированию внутреннего покрытия (цементация, борирование, азотирование), наплавке на поверхности и другим способам.

Для увеличения износостойкости предложен комбинированный способ упрочнения поверхностей трения деталей из стали 45 [45]. Покрытие наносится методом электродуговой металлизации с последующими точением с алмазным выглаживанием поверхности и импульсной магнитной обработкой. Испытания показали, что приработка в процессе трения поверхностей деталей, упрочненных комбинированным способом, в основном отсутствует, поэтому при эксплуатации сразу наступает рабочий режим трения. Низкий износ деталей практически не вызывает образования продуктов износа, которые не попадают в зону трения и не вызывают абразивного изнашивания.

В работе [46] показана возможность повышения износостойкости графитизированной стали термообработкой, создающей в структуре стали повышенное количество метастабильного остаточного аустенита, претерпевающего динамическое деформационно-мартенситное превращение. Изотермическая закалка включает аустенизацию, охлаждение в воде до температуры изотермы, выдержку в печи и последующее охлаждение на воздухе, что повышает износостойкость стали при абразивном воздействии и сухом трении скольжения.

Широкое применение также нашло азотирование поверхности сталей. Благодаря формированию твердых нитридов на поверхности, повышается износостойкость. В работе [47] приведены результаты исследований влияния режимов азотирования и параметров структуры азотированного слоя с объемноцентрированной (ОЦК) и гранецентрированной (ГЦК) кубическими решетками на износостойкость. Показано, что сплавы с ОЦК-решеткой характеризуются максимальной износостойкостью при образовании некогерентных частиц нитридов, а максимальной твердостью – при когерентной структуре нитридов. В сплавах с ГЦК-решеткой максимальные твердость и износостойкость достигаются в структуре, предшествующей разрыву когерентной связи нитрида.

Заключения

Исходя из требуемых долговечности, надежности, условий эксплуатации и экономической эффективности, выбирается оптимальный триботехнический материал или комплекс методов изготовления деталей узлов трения – например, закалка стального вала с нитроцементацией поверхности и нанесение керамического покрытия системы TiAlN.

Каждый из методов обладает отличительной особенностью. Керамические износостойкие покрытия отличаются технологичностью, небольшой стоимостью, возможностью быстрой перенастройки технологического оборудования. Основной объем работ по разработке керамических покрытий триботехнического назначения ведется с нитридными системами TiN, TiAlN, CrN и более сложного состава. Керамические покрытия характеризуются высокой износостойкостью и твердостью. Однако довольно высокий коэффициент трения (~0,5) и малая толщина рабочего слоя (до 30 мкм) ограничивают применение керамических покрытий в узлах сухого трения.

Керамические материалы имеют высокую твердость, химическую стойкость и небольшую плотность. Коэффициент сухого трения керамических материалов может достигать 0,3, а в присутствии в составе твердых смазок снижается до 0,2. Основной недостаток керамических материалов – их высокая хрупкость.

Новые триботехнические сплавы обладают высокой надежностью и долговечностью, однако создание таких сплавов требует дорогостоящих легирующих элементов, что значительно увеличивает стоимость изделия, а функциональная эффективность повышается незначительно. Применение триботехнических сплавов позволяет изготовить монолитную деталь узла трения, например ось гусеничного трака.

Металлокерамические материалы сочетают в себе твердость керамических материалов и надежность металлических сплавов, в результате чего могут применяться в разнообразных узлах трения с высокими механическими нагрузками как в горнодобывающей отрасли, так и для металлообрабатывающего инструмента. Коэффициент трения в подшипниках скольжения в условиях сухого трения составляет 0,3 и более. Добавление в состав материала твердых смазок снижает коэффициент трения до 0,1, но при этом существенно ухудшаются механические свойства.

Химико-термическая обработка позволяет улучшить триботехнические свойства промышленных сталей и сплавов. Цементация, борирование и закалка поверхности позволяют значительно повысить износостойкость материалов. Преимущество данного подхода заключается в сохранении производственного цикла – отсутствует необходимость глубокой модернизации оборудования. Основное достоинство этого метода заключается в возможности получения изделий сложной формы – например, различных валов механизмов с высокой надежностью при работе. В настоящее время практически во всех узлах трения одним из элементов пары трения является вал из закаленной стали.

Список источников

1. 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.
2. Каблов Е.Н. Из чего сделать будущее? Материалы нового поколения, технологии их создания и переработки – основа инноваций // *Крылья Родины*. 2016. № 5. С. 8–18.
3. Каблов Е.Н. Без новых материалов – нет будущего // *Металлург*. 2013. № 12. С. 4–8.
4. Машков Ю.К., Малий О.В. Трибофизика конструкционных материалов: учеб. пособие. Омск: ОмГТУ, 2017. 176 с.
5. Денисова Н.Е., Шорин В.А., Гонтарь И.Н. и др. Триботехническое материаловедение и триботехнология: учеб. пособие / под общ. ред. Н.Е. Денисовой. Пенза: Изд-во ПГУ, 2006. 248 с.
6. Мышкин Н.К., Петроковец М.И. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии. М.: Физматлит, 2007. 368 с.
7. Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // *Двигатель*. 2013. № 3 (87). С. 24–26.
8. Воронков Б.Д. Подшипники сухого трения. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, 1979. 224 с.
9. Бухаров С.Н., Меринов В.К., Сенатрев А.Н., Сергиенко В.П. Исследование влияния оксида железа (III) на триботехнические и виброакустические характеристики фрикционных композитов для узлов стационарного трения // *Трение и износ*. 2018. Т. 39. № 6. С. 567–572.
10. Браун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. Изд. стереотип. М.: ЛКИ, 2014. 480 с.
11. Горлов Д.С., Щепилов А.В. Влияние шероховатости поверхности и абразивного износа на демпфирующую способность композиции «сплав–покрытие» // *Труды ВИАМ*. 2017. № 5 (53). Ст. 11. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-11-11.
12. Александров Д.А., Артеменко Н.И. Износостойкие покрытия для защиты деталей трения современных ГТД // *Труды ВИАМ*. 2016. № 10 (46). Ст. 06. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.
13. Елагина О.Ю., Комадынко А.С., Полещук Е.Д. Перспективы применения покрытия из нитрида титана для контактных поверхностей фрикционных муфт // *Трение и износ*. 2020. Т. 41. № 1. С. 36–42.

14. Белов Д.С., Сергеев В.С., Блинков И.В. и др. Сравнение стойкости ионно-плазменных вакуумно-дуговых покрытий Ti–Al–Ni–N и Ti–Al–Ni–Mo–N к изнашиванию и эрозии // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 2. С. 136–144.
15. Колесников В.И., Верескун В.Д., Кудряков О.В. и др. Технология повышения износостойкости тяжело нагруженных трибосистем и их мониторинг // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 2. С. 228–234.
16. Климович И.М., Комаров Ф.Ф., Зайков В.А. и др. Влияние параметров реактивного магнетронного распыления на трибомеханические свойства защитных наноструктурированных покрытий Ti–Al–N // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 2. С. 122–129.
17. Путинцев С.В. Введение в трибологию поршневых двигателей. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018. 183 с.
18. Гилевич А., Добруховска Е., Муржинский Д. и др. Влияние химического состава покрытий AlCrN на их механические, триботехнические и коррозионные характеристики // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 5. С. 526–537.
19. Житнюк С.В. Бескислородные керамические материалы для аэрокосмической техники (обзор) // Труды ВИАМ. 2018. № 8 (68). Ст. 08. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
20. Перевислов С.Н. Материалы на основе карбида и нитрида кремния с оксидными активирующими добавками для изделий конструкционного назначения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2018. 38 с.
21. Каталог продукции // Компания «Вириал»: офиц. сайт. URL: <http://www.virial.ru/products> (дата обращения: 26.01.2022).
22. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Ваганова М.Л., Шавнев А.А. Нитридокремниевые керамические материалы для подшипников авиационных ГТД и способы их получения (обзор) // Труды ВИАМ. 2019. № 7 (79). Ст. 05. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-42-49.
23. Беляченков И.О., Щеголева Н.Е., Чайникова А.С., Голубев Н.В. Получение и свойства триботехнической керамики на основе нитрида кремния // Материалы III Всерос. науч.-техн. конф. «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия». М.: ВИАМ, 2018. С. 45–55.
24. 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. URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb08/558765742.pdf> (дата обращения: 26.01.2022).
25. Савченко Н.Л., Пятова К.М., Кульков С.Н. Трение и износ керамики на основе ZrO₂·Y₂O₃ в условиях высокоскоростного скольжения по стали // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2007. № 1. С. 84–88.
26. Савченко Н.Л., Пятова К.М. Трение и износ диоксидциркониевой керамики, стабилизированной оксидом магния // Вестник НГУ. Сер.: Физика. 2008. Т. 3. Вып. 1. С. 109–114.
27. Акимов Г.Я., Чайка Э.В. Влияние скорости на износ керамики на основе диоксида циркония при ее трении без смазки о сталь // Огнеупоры и техническая керамика. 2010. № 7–8. С. 40–42.
28. Трофименко Н.Н., Ефимочкин И.Ю., Большакова А.Н. Проблемы создания и перспективы использования жаропрочных высокоэнтропийных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 2 (51). С. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
29. Коробова Е.Н., Севальнев Г.С., Громов В.И., Леонов А.В. Стали для изготовления подшипников качения специального назначения (обзор) // Труды ВИАМ. 2021. № 11 (105). Ст. 01. URL: <http://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
30. Горбань В., Крапивка Н., Карпец М. и др. Влияние температуры на характеристики износа высокоэнтропийных сплавов // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 4. С. 335–340.
31. Миронов А.Е., Гершман И.С., Гершман Е.И., Железнов М.М. Взаимосвязь триботехнических свойств опытных алюминиевых сплавов с их химическим составом // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 67–72.

32. Ефременко В.Г., Шимидзу К., Пастухова Т.В. и др. Механизм изнашивания и оптимизация химического состава комплекснолегированных чугунов со сфероидальными карбидами ванадия в условиях абразивной эрозии // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 73–79.
33. Хренов О.В., Дмитриевич А.А., Лешок А.В. Металлокерамические фрикционные материалы: учеб.-метод. пособие. Минск: БНТУ, 2011. 42 с.
34. Кислый П.С., Боднарук Н.И., Боровикова М.С. и др. Керметы. Киев: Наукова думка, 1985. 272 с.
35. Лешок А.В., Ильющенко А.Ф., Дьячкова Л.Н., Пинчук Т.И. Триботехнические свойства порошкового фрикционного материала на основе меди с добавкой порошка железо-хромистого сплава // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 1. С. 5–12.
36. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-66-81.
37. 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://viam-works.ru> (дата обращения: 15.02.2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-9-92-100.
38. Прожега М.В. Разработка методов повышения износостойкости радиальных пар трения скольжения электрических центробежных насосов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2009. 19 с.
39. 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.
40. Ильющенко А.Ф., Талако Т.Л., Лешок А.В. и др. Триботехнические свойства спеченного фрикционного материала на основе меди с добавкой ультрадисперсного порошка алюминиды системы Ti–46Al–8Cr // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2021. Т. 65. № 1. С. 103–110.
41. Дьячкова Л.Н., Фельдштейн Е.Э., Лецко А.И. и др. Триботехнические свойства спеченной бронзы, упрочненной алюминидом системы Ti–46Al–8Cr // Трение и износ. 2017. Т. 38. № 2. С. 80–85.
42. Севостьянов Н.В., Розен А.Е., Бузник В.М. и др. Медно-фторопластовый токопроводящий композиционный материал, полученный взрывным прессованием // Трение и износ. 2020. Т. 41. № 1. С. 55–62.
43. Адаменко Н.А., Трыков Ю.П., Фетисов А.В. Полимерные и металлополимерные материалы, полученные взрывной обработкой // Перспективные материалы. 2004. № 3. С. 63–68.
44. Федорченко И.М., Пугина Л.И. Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1980. 404 с.
45. Полетаев В.А., Ведерникова И.И. Исследование износостойкости поверхностей деталей, упрочненных комбинированным электромеханическим способом // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 2. С. 178–185.
46. Малинов Л.С., Бурова Д.В., Гоманюк В.Д. и др. Повышение износостойкости графитизированной стали получением в структуре метастабильного аустенита // Трение и износ. 2021. Т. 42. № 2. С. 145–152.
47. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Алексеева М.С., Герасимов С.А. Влияние состава и структуры азотированных сплавов железа на износостойкость в условиях трения скольжения // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2011. № 1. С. 55–62.

References

1. Kablov E.N. Innovative developments of FSUE «VIAM» SSC of RF on realization of «Strategic directions of the development of materials and technologies of their processing for the period until 2030». *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

2. Kablov E.N. What is the future to be made of? Materials of a new generation, technologies for their creation and processing – the basis of innovation. *Krylya Rodiny*, 2016, no. 5, pp. 8–18.
3. Kablov E.N. Without new materials, there is no future. *Metallurg*, 2013, no. 12, pp. 4–8.
4. Mashkov Yu.K., Maliy O.V. *Tribophysics of structural materials: textbook*. Omsk: Omsk State Technical University, 2017, 176 p.
5. Denisova N.E., Shorin V.A., Gontar I.N. et al. *Tribotechnical material science and tribotechnology: textbook*. Ed. N.E. Denisova. Penza: Penza State University, 2006, 248 p.
6. Myshkin N.K., Petrokovets M.I. *Friction, lubrication, wear. Physical foundations and technical applications of tribology*. Moscow: Fizmatlit, 2007, 368 p.
7. 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 (87), pp. 24–26.
8. Voronkov B.D. *Dry friction bearings*. 2nd ed., rev. and add. Leningrad: Mashinostroyenie, 1979, 224 p.
9. Bukharov S.N., Merinov V.K., Senatrev A.N., Sergienko V.P. Investigation of the effect of iron oxide (III) on the tribotechnical and vibroacoustic characteristics of friction composites for stationary friction units. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 6, pp. 567–572.
10. Brown E.D., Buyanovsky I.A., Voronin N.A. et al. *Modern tribology: results and prospects*. Ed. K.V. Frolov. Ed. stereotype. Moscow: LKI, 2014, 480 p.
11. Gorlov D.S., Shhepilov A.V. Influence of surface roughness and abrasive wear on the damping capacity of the composition «alloy–coating». *Trudy VIAM*, 2017, no. 5, paper no. 11. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-5-11-11.
12. Aleksandrov D.A., Artemenko N.I. Wear-resistant coatings to protect friction parts of modern gas turbine engines. *Trudy VIAM*, 2016, no. 10, paper no. 6. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-6-6.
13. Elagina O.Yu., Komadyanko A.S., Poleshchuk E.D. Prospects for the use of titanium nitride coating for contact surfaces of friction clutches. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 36–42.
14. Belov D.S., Sergevnin V.S., Blinkov I.V. Comparison of wear and erosion resistance of ion-plasma vacuum-arc coatings Ti–Al–Ni–N and Ti–Al–Ni–Mo–N. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 136–144.
15. Kolesnikov V.I., Vereskun V.D., Kudryakov O.V. et al. Technology for increasing the wear resistance of heavy-loaded tribosystems and their monitoring. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 2, pp. 228–234.
16. Klimovich I.M., Komarov F.F., Zaikov V.A. et al. Influence of parameters of reactive magnetron sputtering on tribomechanical properties of protective nanostructured coatings Ti–Al–N. *Trenie i iznos*, 2018, vol. 39, no. 2, pp. 122–129.
17. Putintsev S.V. *Introduction to tribology of reciprocating engines*. Moscow: Bauman Moscow State University, 2018, 183 p.
18. Gilevich A., Dobrukhovska E., Murzhinsky D. et al. Influence of the chemical composition of AlCrN coatings on their mechanical, tribotechnical and corrosion characteristics. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 5, pp. 526–537.
19. Zhitnyuk S.V. Oxygen-free ceramic materials for the space technics (review). *Trudy VIAM*, 2018, no. 8 (68), paper no. 8. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-8-81-88.
20. Perevislov S.N. *Materials based on silicon carbide and nitride with oxide activating additives for structural products: thesis abstract*, Dr. Sc. (Tech.). St. Petersburg, 2018, 38 p.
21. *Products of the company "Viral"*. Available at: <http://www.virial.ru/products> (accessed: January 26, 2022).
22. Belyachenko I.O., Schegoleva N.E., Chaynikova A.S., Vaganova M.L., Shavnev A.A. Silicon nitride ceramic materials for aviation GTE bearings and methods of manufacturing (review). *Trudy VIAM*, 2019, no. 7 (79), paper no. 05. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-42-49.

23. Belyachenkov I.O., Shchegoleva N.E., Chainikova A.S., Golubev N.V. Obtaining and properties of tribological ceramics based on silicon nitride. *Materials of the II All-Rus. sci.-tech. conf. "High-Temperature Ceramic Composite Materials and Protective Coatings"*. Moscow: VIAM, 2018, pp. 45–55.
24. 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*. Available at: <https://edocs.tib.eu/files/e01fb08/558765742.pdf> (accessed: January 26, 2022).
25. Savchenko N.L., Pyatova K.M., Kulkov S.N. Friction and wear of ceramics based on ZrO₂·Y₂O₃ under conditions of high-speed sliding over steel. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2007, no. 1, pp. 84–88.
26. Savchenko N.L., Pyatova K.M. Friction and wear of zirconium dioxide ceramics stabilized by magnesium oxide. *Vestnik NGU. Ser.: Physics*, 2008, vol. 3, is. 1, pp. 109–114.
27. Akimov G.Ya., Chaika E.V. Influence of speed on wear of ceramics based on zirconium dioxide during its friction without lubrication against steel. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2010, no. 7–8, pp. 40–42.
28. Trofimenko N.N., Efimochkin I.Yu., Bolshakova A.N. Problems of creation and prospects for the use of heat-resistant high-entropy alloys. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2018, no. 2 (51), pp. 3–8. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-2-3-8.
29. Korobova E.N., Sevalnev G.S., Gromov V.I., Leonov A.V. Steels for the manufacture of roller bearings for special purposes (review). *Trudy VIAM*, 2021, no. 11 (105), paper no. 01. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-3-11.
30. Gorban V., Krapivka N., Karpets M. et al. Influence of temperature on the wear characteristics of high-entropy alloys. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 4, pp. 335–340.
31. Mironov A.E., Gershman I.S., Gershman E.I., Zheleznov M.M. Interrelation of tribotechnical properties of experimental aluminum alloys with their chemical composition. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 67–72.
32. Efremenko V.G., Shimizu K., Pastukhova T.V. Wear mechanism and optimization of the chemical composition of complex-alloyed cast irons with spheroidal vanadium carbides under abrasive erosion. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 73–79.
33. Khrenov O.V., Dmitrovich A.A., Leshok A.V. *Ceramic-metal friction materials: textbook*. Minsk: BNTU, 2011, 42 p.
34. Kisly P.S., Bodnaruk N.I., Borovikova M.S. et al. *Cermets*. Kyiv: Naukova Dumka, 1985, 272 p.
35. Leshok A.V., Ilyushchenko A.F., Dyachkova L.N., Pinchuk T.I. Tribological properties of powder friction material based on copper with the addition of iron-chromium alloy powder. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 1, pp. 5–12.
36. 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: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-11-66-81.
37. 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: February 15, 2022). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-92-100.
38. Prozhega M.V. *Development of methods for increasing the wear resistance of radial sliding friction pairs of electric centrifugal pumps*: thesis abstract, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2009, 19 p.
39. 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. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 151–157.
40. Ilyushchenko A.F., Talako T.L., Leshok A.V. Tribotechnical properties of copper-based sintered friction material with the addition of ultrafine aluminide powder of the Ti–46Al–8Cr system. *Doklady Natsionalnoy akademii nauk Belarusi*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 103–110.

41. Dyachkova L.N., Feldshtein E.E., Letsko A.I. Tribotechnical properties of sintered bronze reinforced with aluminide of the Ti–46Al–8Cr system. *Trenie i iznos*, 2017, vol. 38, no. 2, pp. 80–85.
42. Sevostyanov N.V., Rozen A.E., Buznik V.M. Copper-fluoroplastic conductive composite material obtained by explosive pressing. *Trenie i iznos*, 2020, vol. 41, no. 1, pp. 55–62.
43. Adamenko N.A., Trykov Yu.P., Fetisov A.V. Polymer and metal-polymer materials obtained by explosive processing. *Perspektivne materialy*, 2004, no. 3, pp. 63–68.
44. Fedorchenko I.M., Pugina L.I. *Composite sintered antifriction materials*. Kyiv: Naukova Dumka, 1980, 404 p.
45. Poletaev V.A., Vedernikova I.I. Investigation of the wear resistance of surfaces of parts hardened by a combined electromechanical method. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 178–185.
46. Malinov L.S., Burova D.V., Gomanyuk V.D. and others. Improving the wear resistance of graphitized steel by obtaining metastable austenite in the structure. *Trenie i iznos*, 2021, vol. 42, no. 2, pp. 145–152.
47. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Alekseeva M.S., Gerasimov S.A. Influence of the composition and structure of nitrided iron alloys on wear resistance under conditions of sliding friction. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2011, no. 1, pp. 55–62.

Информация об авторах

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

Бурковская Наталия Петровна, научный
сотрудник, к.х.н., НИЦ «Курчатовский
институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Information about the authors

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

Natalia P. Burkovskaya, Researcher, Candidate of
Sciences (Chem.), NRC «Kurchatov Institute» –
VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 21.02.2022; получена после доработки 07.06.2022;
одобрена и принята к публикации после рецензирования 21.06.2022.
The article was submitted 21.02.2022; received in revised form 07.06.2022;
approved and accepted for publication after reviewing 21.06.2022.