

Научная статья

УДК 621.891

DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРЕНИЯ ГРАФИТА И НИТРИДА БОРА С МАТЕРИАЛАМИ РАЗНЫХ ТИПОВ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ СКОРОСТЕЙ

Н.В. Севостьянов<sup>1</sup>, Е.С. Буданова<sup>1</sup>

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

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментального определения коэффициента трения, а также линейного износа графита и нитрида бора в паре трения с материалами разных типов (сталь 95X18, бронза БрАЖ9-4, фторопласт Ф-4, полиамид ПА-6, графит МПГ-7 и твердый сплав ВК-8) в условиях низких скоростей. Установлено, что трение фторопласта и полиамида в паре со слоистыми твердосмазочными материалами зависит от триботехнических свойств полимера. Коэффициент трения твердосмазочных слоистых материалов в паре с металлическими материалами определяется качеством формирующегося адгезионного упорядоченного смазочного слоя на поверхности металла.

**Ключевые слова:** трение, коэффициент трения покоя, износ, коэффициент трения при страгивании, графит, нитрид бора

**Для цитирования:** Севостьянов Н.В., Буданова Е.С. Закономерности трения графита и нитрида бора с материалами разных типов в условиях низких скоростей // Труды ВИАМ. 2024. № 5 (135). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.

Scientific article

## PATTERNS OF FRICTION OF GRAPHITE AND BORON NITRIDE WITH MATERIALS OF DIFFERENT TYPES AT LOW SPEEDS

N.V. Sevostyanov<sup>1</sup>, E.S. Budanova<sup>1</sup>

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

**Abstract.** The research presents the results of experimental determination of friction coefficient and linear wear at rubbing of graphite and boron nitride in the friction pair with materials of different types (steel 95X18, bronze BrAZh9-4, fluoroplastic F-4, polyamide PA-6, graphite MPG-7 and hard alloy VK-8) under conditions of low speeds. It was found that the friction of polymers in pairing with layered solid lubricants is determined by tribotechnical properties of the polymer. The friction coefficient of layered solid-lubricating materials paired with metallic materials is determined by the quality of the forming adhesive ordered lubricating layer on the metal surface.

**Keywords:** friction, quiescent friction coefficient, wear, drag friction coefficient, graphite, boron nitride

**For citation:** Sevostyanov N.V., Budanova E.S. Patterns of friction of graphite and boron nitride with materials of different types at low speeds. *Trudy VIAM*, 2024, no. 5 (135), paper no. 06. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.

### Введение

Развитие материалов триботехнического назначения берет свое начало с таких материалов, как древесина, минералы и т. д. Еще в начале медного века освоены методы литейного дела различных металлов, которые остаются основными триботехническими материалами в настоящее время [1–3]. Современные технологии и методы, например магнетронное напыление, позволяют получать материалы с заданным уровнем триботехнических свойств для разных сфер промышленности.

Эксплуатационная надежность и ресурс работы оборудования во многом определяются физическим износом узлов трения. Обеспечение долговечности композиционных узлов трения, широко применяемых в технологическом оборудовании, неразрывно связано с использованием новых материалов, обладающих соответствующим комплексом физико-механических свойств [4–7]. Графит и нитрид бора занимают одну из лидирующих позиций среди материалов, предназначенных для авиастроения, ракетно-космической техники, атомной энергетики и т. д. Нитрид бора и графит могут использоваться в качестве самостоятельного материала, а также функционального или армирующего компонента.

Графит часто применяют в качестве смазочного материала для различных сплавов. Так, повышение объемной доли элементного или карандашного графита в медных сплавах приводит к увеличению коэффициента трения на  $\sim 0,1$ , при этом износ уменьшается на 5–10 мкм/км [8]. Порошковый графит часто используется в качестве токопроводящего компонента для композиционных материалов. При содержании графита до 15 % (по массе) удельная электропроводность композиционного материала остается стабильной, что позволяет применять его в картриджах для радиаторов [9].

Нитрид бора, который называют белым графитом, обладает похожими свойствами. Его часто используют как основу для теплозащитных материалов. Кристаллы гексагонального нитрида бора, подобно кристаллам графита, состоят из монослоев, структура которых аналогична структуре слоев графена [10]. Данный материал также используется в авиационных двигателях [11]. Зачастую нитрид бора выполняет функции армирующего элемента в матрице основного материала. Так, модификация политетрафторэтилена нитридом бора позволяет улучшить структуру фторопласта за счет подавления образования связей  $-C-N_x$  и дефектных состояний углеродной цепи  $(-C-C-)$  [12].

При низких скоростях скольжения проявляется эффект трения покоя. При этом коэффициент трения покоя может превышать коэффициент трения скольжения. Цель данной работы – установить закономерности и механизмы трения в условиях низких скоростей скольжения слоистых самосмазывающихся материалов в паре трения с разными материалами: сталь, твердый сплав, сплав цветных металлов и полимеры.

Применение современных композиционных материалов, как металлических, так и полимерных, определяет уровень развития авиационной и гражданских отраслей промышленности [13–16]. Выявленные в данной работе закономерности можно использовать при подборе и создании композиционных материалов для узлов пар трения с учетом условий эксплуатации.

### Материалы и методы

Для исследования выбраны призматические образцы из графита марки МПГ-7 и гексагонального нитрида бора, полученного горячим прессованием. Триботехнические испытания проводили при сухом трении методом возвратно-поступательного движения по схеме торцового трения «палец–поверхность» с применением линейного привода для трибометра [17, 18].

Нагрузку при испытаниях изменяли в диапазоне от 10 до 50 Н, скорость скольжения – от 1 до 20 мм/с.

Контртело представляет собой цилиндр диаметром 6,35 мм, изготовленный из разных материалов: сталь 95X18, бронза БрАЖ9-4, фторопласт Ф-4 (политетрафторэтилен), полиамид ПА-6, графит МПГ-7 и твердый сплав ВК-8. Пластины из графита и нитрида бора устанавливали на подвижной каретке, обеспечивающей возвратно-поступательное движение. Палец закрепляли неподвижно по отношению к датчику силы, регистрирующему нормальную силу сопряжения и горизонтальную силу трения, возникающую при движении. Амплитуда цикла скольжения составила 15 мм. Каждый цикл испытаний проводили по новому пути подготовленной поверхности [19]. Показателями процесса фрикционного взаимодействия в измерительной системе прибора являются коэффициент трения и линейный износ пары трения.

Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости коэффициентов трения материалов разных типов в паре трения с графитом от скорости скольжения (при постоянной нагрузке 50 Н) и нагрузки (при постоянной скорости скольжения 1 мм/с). Скорость скольжения и нагрузка практически не влияют на коэффициент трения. Во всем исследуемом диапазоне скоростей и нагрузок коэффициент трения стабилен. Для большинства типов материалов контртел (сталь, бронза и твердый сплав) коэффициент трения составляет 0,18–0,27. Такое поведение материалов может быть связано с триботехническими свойствами графита, благодаря которым на поверхности трения контртела образуется адсорбированное графитовое покрытие. Фактически трение происходит в зоне контакта двух поверхностей графит/графит. Данное предположение подтверждается результатами определения коэффициента трения и механизмом процесса в паре трения графит/графит.

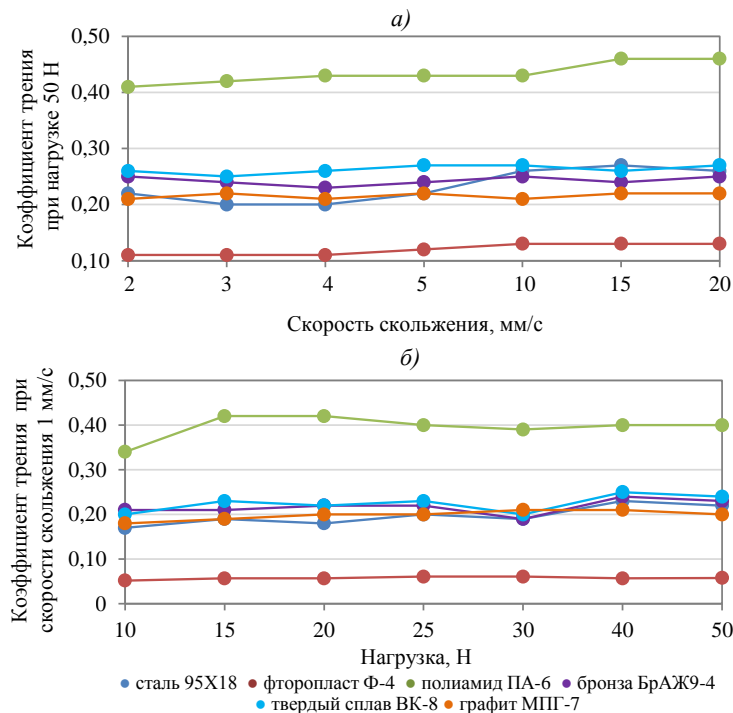


Рис. 1. Зависимости коэффициентов трения графита в паре трения с разными материалами от скорости скольжения (а) и нагрузки (б)

Среди исследуемых пар трения выделяются углеродные полимеры: фторопласт Ф-4 и полиамид ПА-6. Несмотря на принадлежность к одному классу материалов, они

обладают совершенно разными триботехническими свойствами. Существенное различие можно объяснить слабым адгезионным взаимодействием полимерных материалов с графитом. В результате на поверхности полимеров не формируется графитовая пленка, выполняющая функции твердой смазки, и происходит непосредственное трение полимера с графитом. Как следствие, триботехнические характеристики пары трения полимер/графит зависят от физико-механических свойств полимера. Так, более твердый и упругий полиамид проявляет абразивный механизм сухого трения с графитом. Пару трения полиамид/графит можно охарактеризовать как фрикционную, так как коэффициент трения составляет  $\sim 0,4$  в диапазоне исследуемых скоростей скольжения и нагрузок.

Диаметрально противоположная картина наблюдается для фторопласта Ф-4. В паре трения с графитом данный материал продемонстрировал самый низкий коэффициент трения, что объясняется особенностями структуры фторполимеров.

Графические зависимости коэффициента трения нитрида бора в паре с разными материалами от скорости скольжения (при постоянной нагрузке 20 Н) и нагрузки (при постоянной скорости 1 мм/с) представлены на рис. 2.

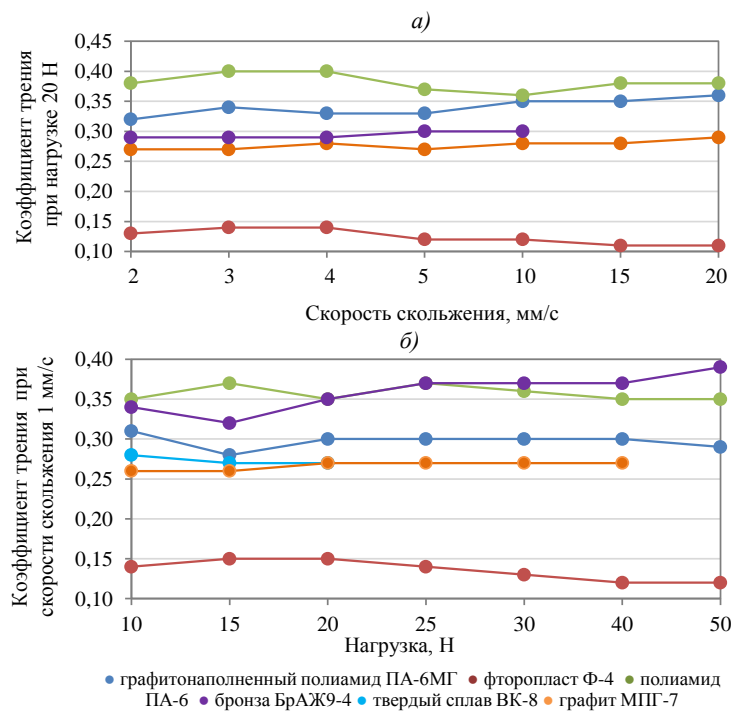


Рис. 2. Зависимости коэффициентов трения нитрида бора в паре трения с разными материалами от скорости скольжения (а) и нагрузки (б)

Фторопласт в паре трения с нитридом бора, как и с графитом, имел наименьшее значение коэффициента трения. Однако для нитрида бора коэффициент трения в 1,5 раза больше и составляет 0,11–0,15. Значительное отличие свидетельствует об отсутствии вклада нитрида бора в процесс скольжения. В этом случае нитрид бора является твердой поверхностью, не проявляющей смазывающих свойств.

Смазочный эффект фторопласта объясняется особенностями химических связей и структуры. Благодаря линейной структуре молекул углеродного каркаса, а также высокой энергии связи атомов фтора и углерода молекулы имеют спиральную форму углеродной цепочки, экранированную атомами фтора [19]. Она представляет собой ориентированные кристаллические плоскости толщиной 10–40 нм, разделенные аморфными областями толщиной до 1 нм [20–22]. Такая структура обеспечивает низкую энергию связи между молекулярными цепочками, что позволяет им во время трения скользить относительно друг друга, обеспечивая низкий коэффициент трения.

Полиамид в паре трения с нитридом бора характеризуется высоким коэффициентом трения ( $\geq 0,35$ ). Как и в случае трения с графитом, полиамид не смазывается нитридом бора с образованием адгезионного покрытия, служащего твердой смазкой. Следует отметить стабильный коэффициент трения при различных нагрузках и скоростях скольжения во всем исследованном диапазоне, что подтверждает единый механизм трения – по-видимому, преимущественно адгезионный.

При включении графита в состав полиамида коэффициент трения снижается незначительно и не достигает уровня для пары трения нитрид бора/графит, поскольку данные материалы слабо взаимодействуют друг с другом. С повышением скорости скольжения коэффициент трения непрерывно увеличивается и при скорости 20 мм/с приближается к значениям показателя для полиамида без графита, что можно расценивать как следствие разрушения графитового адгезионного твердосмазочного покрытия.

Графит МПГ-7, являясь твердосмазочным материалом, имеет один из наиболее низких коэффициентов трения в паре с нитридом бора, значения которого стабильны, практически не зависят от нагрузки и скорости скольжения. Однако следует отметить, что при нагрузке на контакт трения  $>40$  Н на нитриде бора остаются глубокие задиры, в этом случае механизм трения является абразивным.

Твердый сплав в паре трения с нитридом бора имеет сравнительно низкий коэффициент трения, практически как у графита. Однако при нагрузке  $>20$  Н механизм трения становится абразивным, что вызывает образование глубоких задиры. При больших нагрузках твердосмазочное покрытие из нитрида бора не способно обеспечить противозадирный эффект. Кроме того, при скорости скольжения  $>1$  мм/с происходит абразивное изнашивание резанием, что свидетельствует о неработоспособности данной пары трения.

По-видимому, нитрид бора слабо взаимодействует с бронзой адгезионно, образуя непрочное твердосмазочное покрытие, что проявляется в сравнительно высоком значении коэффициента трения:  $\sim(0,3-0,4)$ . Однако при скорости скольжения  $>10$  мм/с на поверхности нитрида бора образуются глубокие задиры, что подтверждает смену механизма трения и разрушение непрочного твердосмазочного покрытия.

Сталь 95X18 при любых скоростях и нагрузках оставляла глубокие задиры на поверхности нитрида бора, что свидетельствует о преимущественно абразивном механизме трения. Высокий коэффициент трения ( $>0,8$ ) подтверждает полное отсутствие адгезионного взаимодействия нитрида бора со сталью, в результате чего твердосмазочное покрытие на поверхности стали не образуется.

В табл. 1 и 2 приведены значения линейного износа пар трения графита и нитрида бора с материалами разных классов при различных нагрузках.

Пары трения с фторопластом и полиамидом, несмотря на существенное различие коэффициентов трения, характеризуются практически одинаковым износом. Наполнение полиамида графитом позволило уменьшить линейный износ.

Пара трения сталь/графит продемонстрировала самый высокий износ среди испытанных образцов при максимальных нагрузках. Однако пара фторопласт/графит проявляет повышенный износ во всем интервале исследуемых нагрузок. Пара трения сталь/нитрид бора изначально проявила абразивный механизм трения с катастрофическим износом.

Бронза и твердый сплав в паре трения с графитом показали один из самых небольших износов, что может свидетельствовать об образовании прочного графитового покрытия, предотвращающего задиры.

В противоположность графиту, нитрид бора слабо взаимодействует с бронзой и твердым сплавом. Для данных пар трения отмечены высокие значения износа, переходящие в критические при высоких нагрузках.

Таблица 1

**Зависимость линейного износа пары трения графита с различными материалами от нагрузки при постоянной скорости скольжения 1 мм/с**

Нагрузка, Н	Линейный износ, мм, в паре трения графита с материалом					
	сталь 95X18	фторопласт Ф-4	полиамид ПА-6	бронза БрАЖ9-4	твердый сплав ВК-8	графит МПГ-7
10	0,006	0,011	0,007	0,004	0,005	0,006
15	0,009	0,011	0,006	0,006	0,006	0,008
20	0,009	0,013	0,008	0,010	0,007	0,010
25	0,010	0,014	0,010	0,012	0,010	0,012
30	0,018	0,020	0,010	0,015	0,010	0,012
40	0,027	0,035	0,022	0,024	0,025	0,014
50	0,050	0,040	0,044	0,025	0,025	0,016

Таблица 2

**Зависимость линейного износа пары трения нитрида бора с различными материалами от нагрузки при постоянной скорости скольжения 1 мм/с**

Нагрузка, Н	Линейный износ, мм, в паре трения нитрида бора с материалом					
	графитонаполненный полиамид ПА-6МГ	фторопласт Ф-4	полиамид ПА-6	бронза БрАЖ9-4	твердый сплав ВК-8	графит МПГ-7
10	0,010	0,013	0,013	0,022	0,016	0,015
15	0,012	0,017	0,014	0,035	0,024	0,018
20	0,015	0,021	0,018	0,050	0,032	0,025
25	0,015	0,024	0,024	0,058	–	0,032
30	0,018	0,028	0,032	0,066	–	0,040
40	0,021	0,030	0,034	0,080	–	0,050
50	0,025	0,032	0,033	0,158	–	–

Пара трения графит/графит демонстрирует низкие значения коэффициента трения и износа. В паре трения графит/нитрид бора эффект твердой смазки хоть и проявляется в низком коэффициенте трения, но износ – на грани катастрофического.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов трения графита и нитрида бора в паре трения с различными материалами при страгивании.

При страгивании для графита в парах трения со всеми исследуемыми материалами отмечен первоначальный всплеск значений коэффициента трения, обусловленный образованием межатомных связей в зонах контакта сопрягаемых поверхностей [23]. При страгивании требуется большее усилие для разрушения межатомных связей. При дальнейшем движении прежнее количество связей не успевает восстановиться и наблюдается меньший коэффициент трения.

Наклон переднего фронта зависимостей коэффициента трения при страгивании определяется выбором зазоров и жесткостью испытательного оборудования, а также упругостью и пластичностью материалов. На рис. 3, а видно, что более мягкие полимерные материалы, такие как фторопласт и полиамид, имеют меньший угол наклона при страгивании в отличие от металлических контртел.

При страгивании сталь 95X18, бронза БрАЖ9-4, твердый сплав ВК-8 и графит МПГ-7 характеризуются практически одинаковым всплеском значений коэффициента трения с незначительным релаксационным отскоком. Одинаковый уровень коэффициента трения при страгивании свидетельствует о едином механизме процесса для данных пар трения. Наблюдаемый релаксационный отскок связан с высвобождением накопленной упругой деформации. Неизменно одинаковое пиковое значение коэффициента связывается с активацией скольжения базовых плоскостей графита.

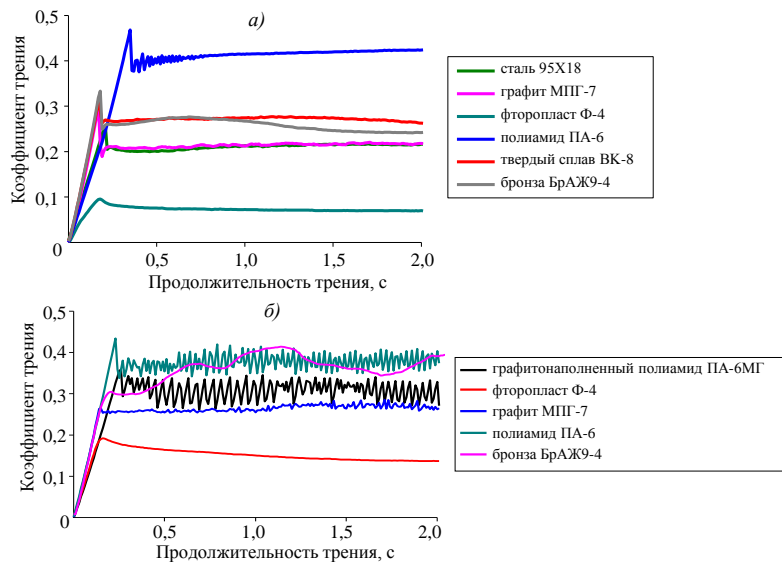


Рис. 3. Зависимости коэффициентов трения графита (а) и нитрида бора (б) в паре трения с разными материалами при страгивании

Полиамид в паре трения с графитом кроме высокого коэффициента трения имеет и высокий коэффициент трения покоя. Кроме того, начало скольжения полиамида по графиту сопровождается затухающими автоколебаниями. Полученные результаты свидетельствуют, что трение полиамида в паре с графитом не связано со скольжением базовых плоскостей графита.

Коэффициент трения для пары трения графит/фторопласт имеет не только самые низкие значения, но и незначительный всплеск при страгивании. Такое поведение пары трения определяется свойствами фторопласта.

Характер трения пары фторопласт/нитрид бора также определяется свойствами полимера (рис. 3, б).

При страгивании пара трения полиамид/нитрид бора характеризуется значительным всплеском значений коэффициента трения, а скольжение сопровождается непрерывными автоколебаниями. Введение графита в структуру полиамида незначительно снижает коэффициент трения, в том числе при страгивании, однако не влияет на автоколебания при трении скольжения.

Коэффициенты трения металлов и графита при страгивании по нитриду бора не имеют всплеска значений, что может свидетельствовать об абразивном механизме трения. Движение контактирующих поверхностей происходит в момент механического разрушения. Поскольку энергия процесса микрорезания на любом этапе скольжения одинаковая, коэффициенты трения при страгивании и скольжении равны.

### Заключения

Экспериментальное исследование процесса трения при страгивании и скольжения слоистых твердосмазочных материалов в паре с материалами разного типа показало, что коэффициент трения зависит от адгезионной способности материала контртела. Низкий коэффициент трения скольжения обеспечивается высокой адгезией частиц слоистого материала на трущейся поверхности. В этом случае формируется упорядоченный слой твердой смазки на поверхности трения, обеспечивающий скольжение базовых плоскостей с низкой энергией межатомных связей слоистого материала.

Полимерные материалы при трении с графитом и нитридом бора ведут себя по-разному. Высокий коэффициент трения полиамида ПА-6 (0,34–0,48) объясняется отсутствием склонности к формированию на поверхности материала упорядоченного слоистого твердосмазочного покрытия, в результате чего смазочный эффект отсутствует.

Благодаря особой структуре фторопласт Ф-4 обладает смазочными свойствами. Высокоориентированные области, расположенные в зоне контакта, позволяют легко проскальзывать материалу по аморфным прослойкам при малых сдвиговых напряжениях. Коэффициент трения при этом уменьшается и определяется триботехническими свойствами фторопласта.

Адгезионный твердосмазочный упорядоченный слой лучше всего формируется на материалах с металлической основой.

Сравнение коэффициентов трения показало, что графит имеет более высокую способность к образованию твердосмазочного покрытия при более высоком уровне механических свойств по сравнению с нитридом бора. Несмотря на низкие значения твердости и прочности, нитрид бора по износостойкости не уступает графиту.

#### Список источников

1. Карабасов Ю.С., Черноусов П.И., Коротченко Н.А., Голубев О.В. *Металлургия и время: энциклопедия* в 4 т. М.: ИД МИСиС, 2011. Т. 1: Основы профессии. Древний мир и раннее средневековье. 216 с.
2. 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> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
3. Каблов Е.Н., Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Лонский С.Л., Куршев Е.В. Исследование микроструктуры однонаправленного органопластика на основе арамидных волокон Русар-НТ и эпоксидно-полисульфонового связующего // *Авиационные материалы и технологии*. 2020. № 4 (61). С. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
4. Кобзев Д.Е., Баронин Г.С., Дмитриев В.М. и др. Интенсификация твердофазной плунжерной экструзии наномодифицированного полиэтилена высокой плотности ультразвуковым воздействием // *Материаловедение*. 2012. № 4. С. 37–40.
5. Shanfu Lu, Ruijie Xiu, Xin Xu et al. Polytetrafluoroethylene (PTFE) reinforced poly (ethersulphone)–poly (vinyl pyrrolidone) composite membrane for high temperature proton exchange membrane fuel cells // *Journal of Membrane Science*. 2014. Vol. 464. P. 1–7. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.053.
6. Ghalmi Z., Farzaneh M. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy // *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 314. P. 564–569. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.194.
7. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В., Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю. Совершенствование материалов для подшипников скольжения двигателей внутреннего сгорания (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2020. № 1 (85). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.
8. Ильющенко А.Ф., Лешок А.В., Дьячкова Л.Н. и др. Особенности влияния графита карандашного и графита элементного на триботехнические свойства фрикционного материала на основе меди, работающего в условиях граничного трения // *Порошковая металлургия*. Минск: Изд. дом «Белорусская наука», 2019. С. 65–58.
9. Кальчев Д.Н., Завгородняя Л.В. Композиты на основе графита и карбоната кальция в энергосберегающих системах электрического отопления // *Инновационная наука*. 2023. № 3–1. С. 45–48.
10. Ряшенцев Д.С., Беленков Е.А. Новые полиморфные разновидности нитрида бора с графеноподобными структурами // *Радиоэлектроника. Наносистемы. Информационные технологии*. 2021. № 13 (3). С. 349–354. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.349.
11. Живушкин А.А., Козлова Е.А., Чубуков И.А., Марова А.Ю. Особенности применения композиционного материала «Алюминий – нитрид бора» в авиационных двигателях // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (НИУ)*. 2009. № 3 (19). С. 235–240.
12. Негров Д.А., Еремин Е.Н., Корусенко П.М., Несов С.Н. Влияние ультразвуковой активации на структурообразование политетрафторэтилена, модифицированного нитридом бора // *Омский научный вестник*. Сер.: Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2017. Т. 1. № 2. С. 57–63.

13. 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.
14. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
15. Раскутин А.Е. Российские полимерные композиционные материалы нового поколения, их освоение и внедрение в перспективных разрабатываемых конструкциях // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
16. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.01.2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
17. Комбалов В.С. Методы и средства испытаний на трение и износ конструкционных и смазочных материалов: справочник / под ред. К.В. Фролова, Е.А. Марченко. М.: Машиностроение, 2008. 384 с.
18. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Колмаков А.Г., Рыбакова Л.М. Методы испытания на трение и износ. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 152 с.
19. Браун Э.Д., Буяновский И.А., Воронин Н.А. и др. Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. М.: Изд-во ЛКИ, 2014. 480 с.
20. Lancaster J.K., Play D., Godet M. et al. Third body formation and the wear of PTFE fibre-based dry bearings // *Journal of Lubrication Technology*. 1980. Vol. 102. No. 2. P. 236–246.
21. Makinson K.R., Tabor D. The friction and transfer of polytetrafluoroethylene // *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.: Mathematical and Physical Sciences*. 1964. Vol. 281. No. 1384. P. 49–61.
22. Белый В.А., Свириденко А.И., Петраковец Н.И. Трение и износ материалов на основе полимеров. Минск: Наука и техника, 1976. 431 с.
23. Трение, изнашивание и смазка: справочник в 2 кн. / под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алишина. М.: Машиностроение, 1978. Кн. 1. 400 с.

#### References

1. Karabasov Yu.S., Chernousov P.I., Korotchenko N.A., Golubev O.V. *Metallurgy and time: encyclopedia in 4 vols*. Moscow: MISiS, 2011, vol. 1: Fundamentals of the profession. The ancient world and the early Middle Ages, 216 p.
2. 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), paper no. 07. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2022-0-10-76-89.
3. Kablov E.N., Kulagina G.S., Zhelezina G.F., Lonskii S.L., Kurshev E.V. Microstructure research of the unidirectional organoplastic based on Rusar-NT aramid fibers and epoxy-polysulfone binder. *Aviacionnye materialy i tehnologii*, 2020, no. 4 (61), pp. 19–26. DOI: 10.18577/2071-9140-2020-0-4-19-26.
4. Kobzev D.E., Baronin G.S., Dmitriev V.M. et al. Intensification of solid-phase plunger extrusion of nanomodified high-density polyethylene by ultrasonic influence. *Materialovedenie*, 2012, no. 4, pp. 37–40.
5. Shanfu Lu, Ruijie Xiu, Xin Xu et al. Polytetrafluoroethylene (PTFE) reinforced poly (ethersulfone)–poly (vinyl pyrrolidone) composite membrane for high temperature proton exchange membrane fuel cells. *Journal of Membrane Science*, 2014, vol. 464, pp. 1–7. DOI: 10.1016/j.memsci.2014.03.053.
6. Ghalmi Z., Farzaneh M. Durability of nanostructured coatings based on PTFE nanoparticles deposited on porous aluminum alloy. *Applied Surface Science*, 2014, vol. 314, pp. 564–569. DOI: 10.1016/j.apsusc.2014.05.194.
7. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V., Bolsunovskaya T.A., Efimochkin I.Yu. Improvement of materials for sliding bearings of internal combustion engines (review). *Trudy VIAM*, 2020, no. 1, paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2020-0-1-78-91.

8. Ilyushchenko A.F., Leshok A.V., Dyachkova L.N. et al. Features of the influence of pencil graphite and elemental graphite on the tribological properties of copper-based friction material operating under boundary friction conditions. *Powder Metallurgy*. Minsk: Publ. House «Belarusian Science», 2019, pp. 65–58.
9. Kalchev D.N., Zavgorodnyaya L.V. Composites based on graphite and calcium carbonate in energy-saving electric heating systems. *Innovatsionnaya nauka*, 2023, no. 3–1, pp. 45–48.
10. Ryashentsev D.S., Belenkov E.A. New polymorphic varieties of boron nitride with graphene-like structures. *Radioelektronika. Nanosistemy. Informatsionnye tekhnologii*, 2021, no. 13 (3), pp. 349–354. DOI: 10.17725/rensit.2021.13.349.
11. Zhivushkin A.A., Kozlova E.A., Chubukov I.A., Marova A.Yu. Features of the use of the composite material «Aluminum – boron nitride» in aircraft engines. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (NIU)*, 2009, no. 3 (19), pp. 235–240.
12. Negrov D.A., Eremin E.N., Korusenko P.M., Nesov S.N. The influence of ultrasonic activation on the structure formation of polytetrafluoroethylene modified with boron nitride. *Omsk Scientific Bulletin. Ser.: Aviation, missile and power engineering*, 2017, vol. 1, no. 2, pp. 57–63.
13. 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 tekhnologii*, 2015, no. 1 (34), pp. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
14. Kablov E.N. Composites: today and tomorrow. *Metally Evrazii*, 2015, no. 1, pp. 36–39.
15. Raskutin A.E. Russian polymer composite materials of new generation, their exploitation and implementation in advanced developed constructions. *Aviacionnye materialy i tekhnologii*, 2017, no. S, pp. 349–367. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-349-367.
16. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V. Cermets for plain bearings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), paper no. 08. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: January 16, 2024). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
17. Kombalov V.S. *Methods and means of testing friction and wear of structural and lubricating materials*: a reference book. Ed. K.V. Frolov, E.A. Marchenko. Moscow: Mashinostroenie, 2008, 384 p.
18. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Kolmakov A.G., Rybakova L.M. *Friction and wear test methods*. Moscow: Intermet Engineering, 2001, 152 p.
19. Brown E.D., Buyanovsky I.A., Voronin N.A. et al. *Modern tribology: results and prospects*. Ed. K.V. Frolov. Moscow: LKI Publ. house, 2014, 480 p.
20. Lancaster J.K., Play D., Godet M. et al. Third body formation and the wear of PTFE fibre-based dry bearings. *Journal of Lubrication Technology*, 1980, vol. 102, no. 2, pp. 236–246.
21. Makinson K.R., Tabor D. The friction and transfer of polytetrafluoroethylene. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A.: Mathematical and Physical Sciences*, 1964, vol. 281, no. 1384, pp. 49–61.
22. Bely V.A., Sviridenok A.I., Petrakovets N.I. *Friction and wear of polymer-based materials*. Minsk: Nauka i tekhnika, 1976, 431 p.
23. *Friction, wear and lubrication*: a reference book in 2 books. Ed. I.V. Kragelsky, V.V. Alisin. Moscow: Mashinostroenie, 1978, book 1, 400 p.

#### Информация об авторах

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

#### Information about the authors

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

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена и принята к публикации после рецензирования 22.04.2024.  
The article was submitted 12.04.2024; approved and accepted for publication after reviewing 22.04.2024.