

Научная статья

УДК 621.891

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-247-260

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУХОГО ТРЕНИЯ SiC С МАТЕРИАЛАМИ РАЗНОГО ТИПА ПРИ НИЗКИХ СКОРОСТЯХ

Часть 1

Н.В. Севостьянов¹, Е.С. Пастух¹, О.Ю. Сорокин¹, В.В. Викулин¹

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

Аннотация. Представлены закономерности сухого трения свободно спеченного и реакционно-спеченного карбида кремния в паре с материалами разного типа при различных уровнях нагрузки и скорости скольжения. В первой части статьи сравниваются трибологические характеристики двух видов карбида кремния с полимерными материалами и графитом. Данные материалы широко используются в узлах трения за счет способности к самосмазыванию, что вызывает наибольший интерес для данного исследования и рекомендаций по возможному расширению области применения.

Ключевые слова: коэффициент трения, износ, керамический материал, карбид кремния, трибология, антифрикционный материал, страгивание

Для цитирования: Севостьянов Н.В., Пастух Е.С., Сорокин О.Ю., Викулин В.В. Закономерности сухого трения SiC с материалами разного типа при низких скоростях. Часть 1 // Труды ВИАМ. 2026. № 10 (164). С. 247–260. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-247-260.

Scientific article

PATTERNS OF SiC DRY FRICTION WITH DIFFERENT TYPES OF MATERIALS AT LOW SPEEDS

Part 1

N.V. Sevostyanov¹, E.S. Pastukh¹, O.Yu. Sorokin¹, V.V. Vikulin¹

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 paper presents the patterns of dry friction of freely sintered and reactively sintered silicon carbide from the load and sliding speed paired with materials of different types. The first part of the article compares the tribological characteristics of two types of silicon carbide with polymer materials and graphite. These materials are widely used in friction units due to their ability to self-lubricate, which is of the greatest interest for this study and recommendations for possible use expansion.

Keywords: coefficient of friction, wear, ceramic material, silicon carbide, tribology, antifriction material, straining

For citation: Sevostyanov N.V., Pastukh E.S., Sorokin O.Yu., Vikulin V.V. Patterns of SiC dry friction with different types of materials at low speeds. Part 1. *Trudy VIAM*, 2026, no. 10 (164), pp. 247–260. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-10-247-260.

Введение

Современная техника в настоящее время нуждается в применении новых материалов, обеспечивающих ее дальнейшее развитие и повышение эксплуатационных характеристик. Карбид кремния не относится к новым материалам, но высокий уровень физических и механических свойств, радиационная и химическая стойкость, промышленная доступность и низкая стоимость определяют расширение сфер его применения. Ключевыми областями использования карбида кремния являются [1–7] аэрокосмическая техника, энергетика, атомная промышленность, машиностроение и полупроводниковая техника. Высокая износостойкость и химическая инертность позволяют применять карбид кремния в производстве высоконагруженных торцевых уплотнений валов и подшипников скольжения, способных работать в агрессивных средах без дополнительной смазки.

Карбид кремния является синтетическим материалом, его получают промышленным способом из оксида кремния и углерода. В природе существует минерал, содержащий карбид кремния, – муассанит, однако он редко встречается и его количества недостаточно для применения в промышленном масштабе [8, 9]. В отличие от природного минерала муассанита, синтетический SiC – это материал с точно контролируемыми свойствами, достигнутыми за счет определенного уровня давления и температуры в процессе горячего прессования и реализации других методов получения. Хотя в современной промышленности свободное спекание SiC все чаще уступает место более эффективным технологиям, оно обеспечивает получение практически беспористого материала (~98–99) % от теоретической плотности). Ключевыми преимуществами этого метода также являются возможность использования дешевого исходного порошка с крупными частицами SiC и достижение теоретической плотности при более низких температурах по сравнению с беспрессовым спеканием. Однако применение метода горячего прессования ограничено для изготовления сложных деталей и не подходит для крупносерийного производства [9]. В работах [10, 11] отмечена возможность получения высокопрочной керамики с твердостью по Виккерсу 29 ГПа и вязкостью разрушения $5,25 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$.

Благодаря высокой твердости, низкой плотности и относительно низкой стоимости карбид кремния широко применяется в качестве триботехнического материала [12]. Из карбида кремния изготавливают втулки валов, опорные подпятники, тела качения подшипников качения. Однако, несмотря на высокую износостойкость SiC, сухое трение весьма ограничено из-за высокого коэффициента трения, склонности к схватыванию и образованию задиров [8, 9]. В узлах трения карбид кремния зачастую применяют со смазкой или в паре трения со самосмазывающимся материалом. В этой связи в карбид кремния добавляют износостойкие или твердосмазочные составляющие. Так, в работе [13] изучен износ горячепрессованного карбида кремния с добавкой карбида вольфрама. Коэффициент трения при комнатной температуре снижался с 0,4 до 0,3. Лучшей износостойкостью при комнатной температуре обладал состав с 50 % WC, а при 500 °C – с 30 % WC. Механизмы износа включают трибохимические реакции и микрорастрескивание. Кроме того, в работе [14] показано, что минимальное количество спекающих добавок достаточно для полной консолидации материала, а коэффициент трения в паре SiC/SiC снижается с ~0,6 до ~0,2 при увеличении нагрузки. Наименьший износ наблюдается у керамики с добавкой AlN–Sc₂O₃, которая формирует чистые зернограничные фазы. Средний размер зерна SiC не влияет на установившийся коэффициент трения. Однако он критически важен для износа: чем мельче зерно, тем меньше износ детали. Основные механизмы износа – зернограничное разрушение и тонкое

истирание. Данное обстоятельство подчеркивает необходимость контроля микроструктуры для достижения высокой износостойкости [15, 16].

В качестве триботехнического материала возможно применение карбида кремния с графитом в структуре материала и содержащего свободный графит в структуре материала. В этом случае карбидокремниевый материал обеспечивает смазку контактирующих поверхностей при трении. Однако наличие мягкого графита в структуре SiC снижает механические характеристики [8, 9]. Реакционно-спеченный (РС), или реакционно-связанный, карбид кремния, часто обозначаемый как RBSC (Reaction Bonded Silicon Carbide) или SiSiC, традиционно получают пропиткой жидким кремнием пористой заготовки из смеси порошков карбида кремния и углерода при температурах $\sim(1750-1900)$ °C. В отличие от полностью консолидированного горячепрессованного карбида кремния, РС SiC является композиционным материалом, содержащим от 6 до 15 % свободного кремния, который заполняет остаточные поры после реакции. Эта особенность определяет его уникальные свойства: возможность формования сложных деталей с минимальной усадкой и более низкую стоимость производства, но с ограничением по максимальной рабочей температуре (до ~ 1350 °C), связанным с присутствием легкоплавкой кремниевой фазы [17, 18].

В качестве твердосмазочных композитов на основе SiC также рассматривают материалы с добавками Mo и CaF_2 . Исследование таких самосмазывающихся композитов выявило рекордные показатели. При использовании 20 % Mo и 30 % CaF_2 достигается исключительно низкий коэффициент трения (0,17 при 1000 °C) [19]. Это открывает путь для создания высокотемпературных узлов трения, работающих в условиях сухого трения. Из наиболее интересных исследований в области трибологических свойств РС SiC можно отметить публикацию [20], в которой представлены результаты изучения поведения материала при сухом трении в интервале температур от комнатной до 600 °C с использованием метода pin-on-disk («палец–диск»). Установлено, что коэффициент трения максимален при 300 °C, снижается как при комнатной температуре, так и при 600 °C. При этом скорость изнашивания материала монотонно возрастает с увеличением температуры, что связано с изменением состава продуктов износа (с образованием аморфного и кристаллического SiO_2).

Сравнение двух типов карбидокремниевой керамики показывает, что их трибологические характеристики определяются не только химическим составом, но и способом получения, фазовым составом, наличием остаточной пористости или свободного кремния. При этом большинство известных исследований выполнено для одного вида SiC и фиксированного контртела (чаще всего – для пары «карбид кремния–карбид кремния» или «карбид кремния–сталь»). Систематические сравнительные испытания свободно спеченного (СС) SiC и РС SiC в идентичных условиях сухого трения с материалами разного типа (полимеры, стали, бронзы и др.) практически отсутствуют. Таким образом, актуальность данной работы обусловлена такими факторами, как технологическая востребованность, недостаточная изученность влияния типа контртела и практическая значимость.

Цель работы – сравнение трибологических характеристик СС и РС SiC в условиях сухого трения в парах трения с материалами разного типа.

Материалы и методы

Для испытаний использованы карбидокремниевые материалы, полученные методами свободного и реакционного спекания, отличающиеся составом и структурой. Сущность метода свободного спекания заключается в высокотемпературной обработке предварительно спрессованной заготовки из ультрадисперсного порошка SiC

и небольшого количества спекающих добавок [10]. Образцы РС SiC получают путем пропитки пористой углеродкарбидокремниевой заготовки жидким кремнием при высокой температуре с последующим химическим синтезом фазы карбида кремния в структуре материала [17]. Регулируя соотношение графита и кремния, можно получить карбидокремниевый материал с включениями графита. Для триботехнических испытаний использовали РС SiC следующего состава, %: 15 – графит, 15 – Si, 70 – SiC.

Для исследований выбраны политетрафторэтилен (ПТФЭ) марки Д-4 и полиамид марки ПА-6, применяемые в большинстве узлов трения. Основным самосмазывающимся материалом в узлах трения является графит. Для испытаний использовали графит марки МПГ-7, обладающий хорошей конструкционной прочностью, и графитонаполненный полиамид марки ПА-6МГ [21].

Триботехнические испытания проводили на трибометре возвратно-поступательного движения по схеме «палец–плоскость». Образцы карбида кремния изготавливали в виде плоскопараллельной призмы, закрепляли на подвижной каретке трибометра, совершающей возвратно-поступательные движения с амплитудой 15 мм. Ответное контртело, представляющее собой штифт диаметром 6,35 мм, закрепляли на неподвижном двухосном датчике силы. Каждое испытание проводили по новому треку подготовленной поверхности карбида кремния [21, 22].

Нагрузку при испытаниях изменяли в диапазоне от 1 до 20 Н. Испытания проведены при скольжении на малых скоростях для выявления действия сил трения страгивания (трение покоя). Скорость скольжения варьировали в диапазоне от 0,001 до 0,005 м/с с шагом 0,001 м/с, в диапазоне от 0,01 до 0,02 м/с – с шагом 0,005 м/с.

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

Результаты и обсуждение

Пары трения карбида кремния с фторопластом представляют большой интерес для создания высокоэффективных, надежных и ответственных узлов трения. На рис. 1 приведены зависимости коэффициентов трения от нагрузки при различных скоростях скольжения для СС и РС SiC в паре с ПТФЭ.

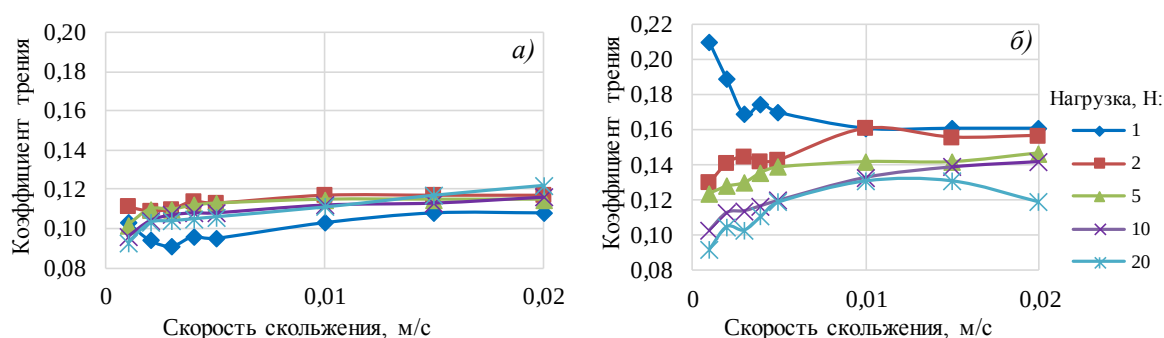


Рис. 1. Влияние скорости скольжения и нагрузки на средний коэффициент трения для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с политетрафторэтиленом марки Д-4

Для пары трения ПТФЭ с СС SiC отмечен низкий коэффициент трения ($f = 0,091\text{--}0,122$). Коэффициент трения характеризуется стабильностью значений и незначительно увеличивается с повышением скорости скольжения и нагрузки на контакт, что свидетельствует о едином механизме трения во всем исследованном диапазоне

режимов трения. Это согласуется с данными работы [23], где для систем SiC/ПТФЭ значения f находятся в диапазоне от 0,05 до 0,16.

Для пары трения с РС SiC коэффициент трения имеет значительно больший разброс значений ($f = 0,091–0,210$), что указывает на нестабильность процесса трения. При низких нагрузках и скоростях скольжения коэффициент трения достигает величины 0,2. С увеличением скорости скольжения и нагрузки на контакт величина f снижается до типичных значений для ПТФЭ ($f = 0,092–0,130$). Такое поведение коэффициента трения можно объяснить неоднородностью структуры РС SiC. При низких нагрузках и скоростях скольжения велика адгезионная составляющая неоднородной поверхности и необходимы большие усилия на их преодоление. С увеличением нагрузки на контакт и скорости наблюдается межслойное скольжение ПТФЭ как твердой смазки [24]. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами более ранних исследований, где коэффициент трения пар трения с РС SiC варьируется от 0,15 до 0,80, что объясняется влиянием адгезионных процессов на поверхности контакта [25]. Близкие значения f для пар трения с ПТФЭ свидетельствуют о едином механизме взаимодействия трущихся поверхностей, что определяется в основном физико-механическими свойствами фторопласта.

На рис. 2 приведены результаты износа пар трения СС и РС SiC с ПТФЭ. Учитывая высокую твердость карбида кремния, можно принять, что полученные результаты износа относятся к ПТФЭ.

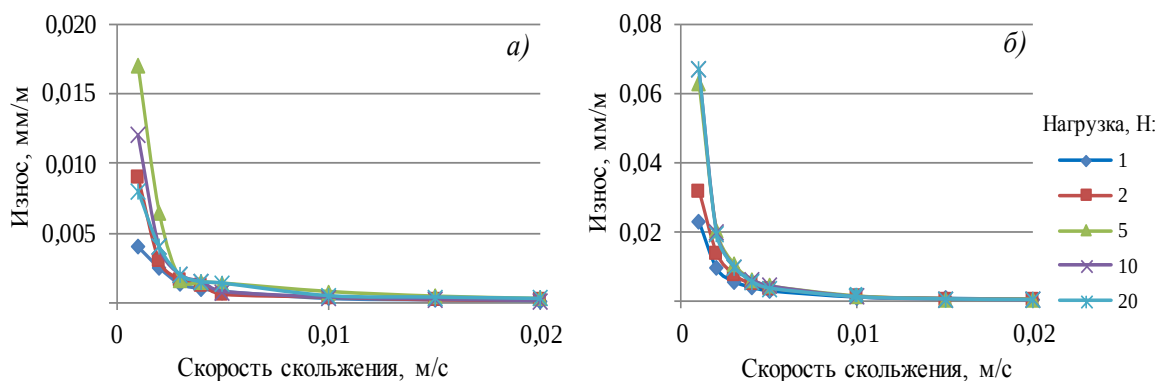


Рис. 2. Влияние скорости скольжения и нагрузки на износ для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с политетрафторэтиленом марки Д-4

Выявлен общий характер изменения износа пар трения для обоих видов карбида кремния. При низких скоростях и нагрузках износ имеет значительную величину. С увеличением скорости скольжения износ резко снижается во всем диапазоне нагрузок и начиная со скорости $>0,005$ м/с достигает практически минимального постоянного значения, изменяясь в дальнейшем уже незначительно. При низких скоростях скольжения увеличение нагрузки на контакт также приводит к снижению износа. Такое поведение можно объяснить отсутствием формирования твердосмазочного слоя и затруднительной приработкой при низких скоростях скольжения. В условиях низких скоростей скольжения проявляются эффекты страгивания, сопряженные с повышенным износом. Из данных, представленных на рис. 2, следует, что износ для РС SiC в условиях низких скоростей и нагрузок заметно больше по сравнению с СС SiC. Однако для максимальных режимов испытаний (скорость скольжения 0,02 м/с, нагрузка 20 Н) величины износа для обоих видов SiC выравниваются.

Фторопласт ПТФЭ обладает одним из самых низких коэффициентов трения, но его износостойкость более низкая по сравнению с SiC, имеющего высокую твердость

(~29 ГПа [11]). При трении о твердую поверхность SiC сам полимер подвергается интенсивной механической деструкции. Высокая твердость и однородность СС SiC способствуют более эффективной ориентации макромолекул ПТФЭ в приповерхностном слое, формируя высокоупорядоченную структуру с минимальным износом. Неоднородная микроструктура РС SiC, напротив, могла инициировать образование очагов разрушения в ПТФЭ, что привело к увеличению износа и нестабильности трения.

Таким образом, СС SiC является более предпочтительным контртелом для пары с ПТФЭ при работе в условиях низких скоростей и в диапазоне нагрузок 1–20 Н. Он обеспечивает в 1,5–2 раза более низкий и стабильный коэффициент трения, а также значительно меньший износ по сравнению с РС аналогом. Эта особенность СС SiC обусловлена более совершенной микроструктурой, которая способствует формированию защитной переносной пленки из полимера, предотвращающей прямое взаимодействие и разрушение материалов.

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента трения СС и РС SiC в паре с нейлоном ПА-6 от скорости скольжения и нагрузки на контакт трения. Испытания показали, что для СС SiC коэффициент трения более стабилен и варьируется в диапазоне 0,143–0,234, тогда как для РС SiC этот диапазон шире (0,124–0,320). Начальное значение коэффициента трения для РС SiC меньше, чем для СС SiC, что может быть связано с отличиями в микроструктуре поверхности карбидного материала, например с наличием свободной фазы кремния и графита у РС SiC.

Однако с увеличением скорости оба материала демонстрируют общую тенденцию к незначительному повышению коэффициента трения, при этом для РС SiC разброс значений значительно больше.

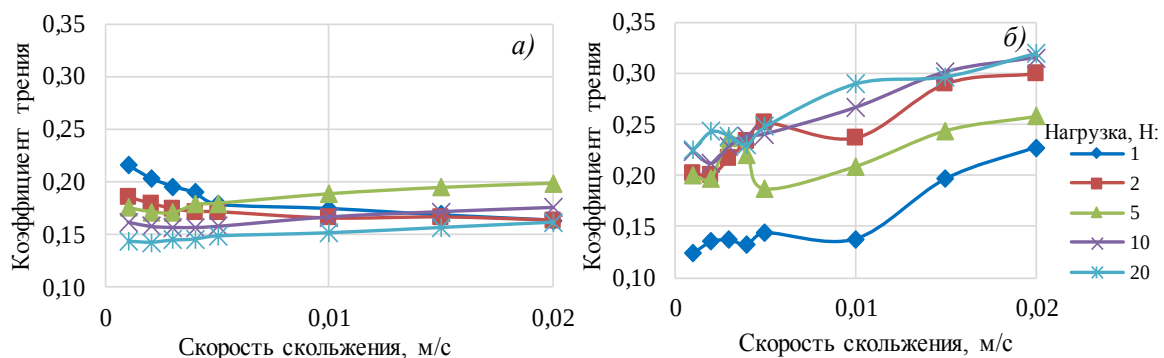


Рис. 3. Влияние скорости скольжения и нагрузки на средний коэффициент трения для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с полиамидом марки ПА-6

Стабильно малый разброс значений коэффициента трения и минимальный износ свидетельствуют о том, что на поверхности СС SiC формируется равномерная, сплошная и высокоадгезионная переносная пленка из полиамида ПА-6. Это согласуется с данными научно-технической литературы, в соответствии с которыми спеченная керамика демонстрирует способность образовывать стабильные переносные пленки, особенно с композитами на основе полиамида ПА-6 [26–28]. Способность к формированию такой пленки приводит к тому, что дальнейшее трение происходит в слое полимера, а не на границе «полимер–керамика», что кардинально снижает как трение, так и износ. Более высокий и непостоянный коэффициент трения РС SiC указывает на нестабильность или отсутствие сплошной переносной пленки на его поверхности.

Выявлен однотипный характер зависимости износа от скорости скольжения независимо от нагрузки для пар трения с СС и РС SiC (рис. 4). Пара трения с РС материалом отличается практически на порядок большей величиной износа во всем диапазоне скоростей и нагрузок.

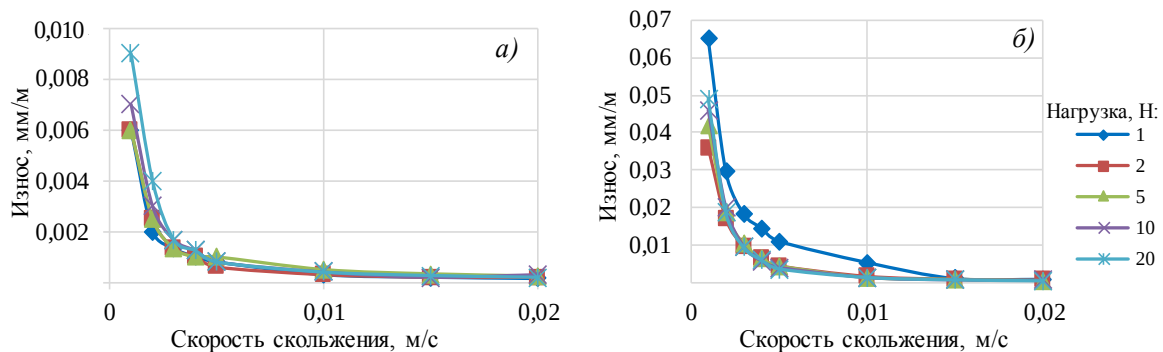


Рис. 4. Влияние скорости скольжения и нагрузки на износ для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с полиамидом марки ПА-6

Однородная структура СС SiC способствует формированию адгезионной пленки полимера ПА-6 на поверхности контакта трения с SiC, в дальнейшем выполняющей функцию твердой смазки. Высокая твердость керамики и, возможно, особенности разнородной микроструктуры РС SiC приводят к интенсивному абразивному износу полимера и затруднению образования адгезионной пленки, что проявляется в виде высокого износа.

При низких нагрузках и скоростях скольжения в паре трения нейлона с карбидом кремния адгезионная пленка формируется затруднительно, в результате чего наблюдается повышенный износ. В случае достаточной нагрузки на контакт трения и скорости скольжения для образования твердосмазочной полимерной пленки износ резко снижается и достигает стабильной величины.

Испытания с графитонаполненным нейлоном марки ПА-6МГ показали существенное увеличение коэффициента трения для обоих типов карбида кремния по сравнению с полиамидом ПА-6, что является неожиданным результатом (рис. 5). Вместо снижения силы трения за счет присутствия твердой смазки (графита) коэффициент трения увеличился в 1,4–1,7 раза.

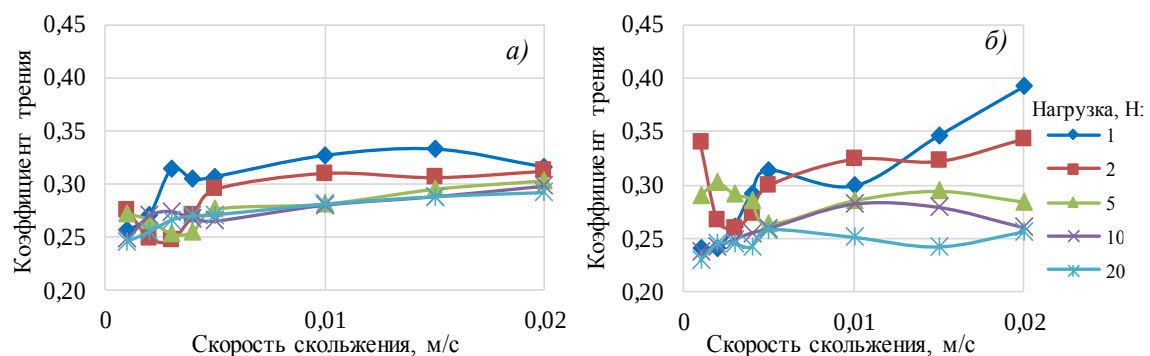


Рис. 5. Влияние скорости скольжения и нагрузки на средний коэффициент трения для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с графитонаполненным полиамидом марки ПА-6МГ

Поведение пар трения SiC с полиамидами ПА-6МГ и ПА-6 аналогично. Пара трения с СС SiC демонстрирует стабильные значения коэффициента трения во всем диапазоне исследованных скоростей скольжения и нагрузок в отличие от РС SiC.

Износ пары трения с графитонаполненным полиамидом ПА-6МГ меньше, чем для чистого нейлона ПА-6 (рис. 6). Следует отметить, что в паре трения с РС SiC износ немного меньше по сравнению с СС SiC. По-видимому, графит увеличивает жесткость нейлона, что приводит к увеличению коэффициента трения, но в то же время улучшает износостойкость.

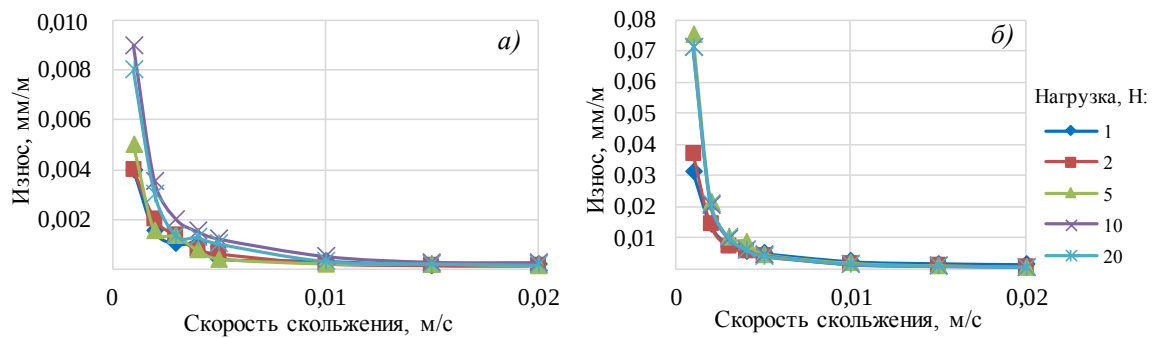


Рис. 6. Влияние скорости скольжения и нагрузки на износ для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с графитонаполненным полиамидом марки ПА-6МГ

При повышении скорости возрастает температура в зоне контакта. Это приводит к переходу в высокоэластическое состояние полиамида ПА-6МГ, что позволяет переносной пленке лучше подстраиваться под микрорельеф поверхности и «залечивать» дефекты. Присутствующий графит, вероятно, способствует формированию стабильной композиционной фрикционной пленки. В итоге снижается прочность адгезионных связей, трение переходит в менее энергоемкий режим, резко сокращается износ и значение коэффициента трения стабилизируется на новом уровне [29].

В данных парах трения действие графитового наполнителя носит двойственный и отчасти негативный характер. В паре трения с полиамидом ПА-6 основное значение имеет формирование переносной пленки из полимера. Графит обладает слоистой структурой с низкой энергией сдвига между слоями [30, 31]. Графит «соревнуется» с полиамидом ПА-6 за адгезию к более твердой керамической поверхности. Рыхлая структура РС SiC, по-видимому, не способствует формированию стабильной несущей способности переносной пленки из полиамида. Графит, выступая в качестве разделителя, еще сильнее дестабилизирует этот процесс.

Анализ результатов, полученных при трении керамики на основе SiC с графитом МПГ-7, выявляет значимые отличия от поведения пар трения с полимерными контртелами (рис. 7).

Коэффициент трения для СС SiC с увеличением скорости скольжения и нагрузки линейно повышается во всем исследованном интервале, не достигая стабильного значения (рис. 7, а). Исключением являются самые низкие значения скорости скольжения (0,001–0,015 м/с) и нагрузки (1 Н), при которых наблюдаются повышенные значения f . При этих режимах, по-видимому, недостаточно усилий для активации межплоскостного скольжения графита, а также велико влияние сил страгивания.

В случае с РС SiC наблюдается практически стабильное значение коэффициента трения (рис. 7, б), что свидетельствует о едином механизме трения для всего исследованного диапазона скоростей и нагрузок.

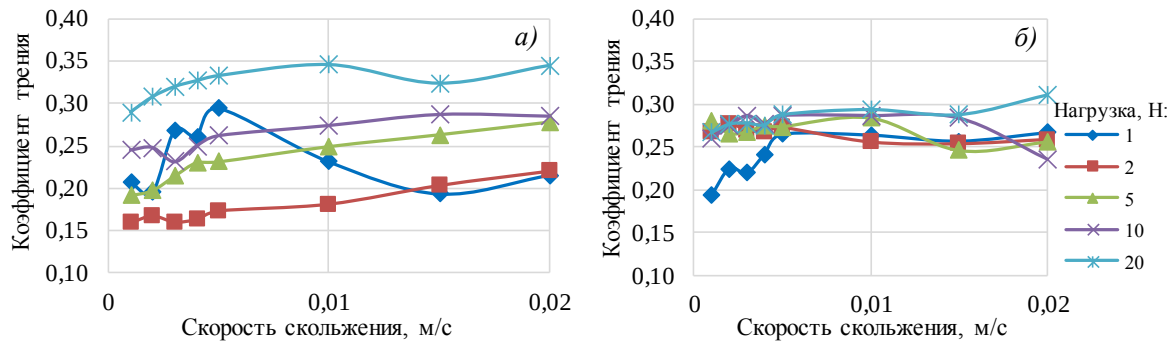


Рис. 7. Влияние скорости скольжения и нагрузки на средний коэффициент трения для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с графитом марки МПГ-7

Значительный разброс значений коэффициента трения для СС SiC, особенно при низких скоростях, указывает на нестабильный, переходный режим трения (так называемый running-in). Пара трения с РС SiC обладает большей предрасположенностью к образованию граничного слоя при малых скоростях. Важно отметить, что меньший разброс значений свидетельствует о более раннем выходе процесса на стабильный режим.

Для пары трения с графитом наблюдается зависимость износа от скорости скольжения и нагрузки, характерная для пар трения с полимерными материалами (рис. 8). Резкое уменьшение износа с увеличением скорости и нагрузки свидетельствует о типичных механизмах трения, связанных с преодолением режимов трения страгивания и формированием твердосмазочной пленки, разделяющей трущиеся поверхности. Графит МПГ-7 – это мелкозернистый высокоплотный материал с многослойной кристаллической решеткой, который действует как твердая смазка: частицы углерода легко отслаиваются, создавая защитную пленку [32].

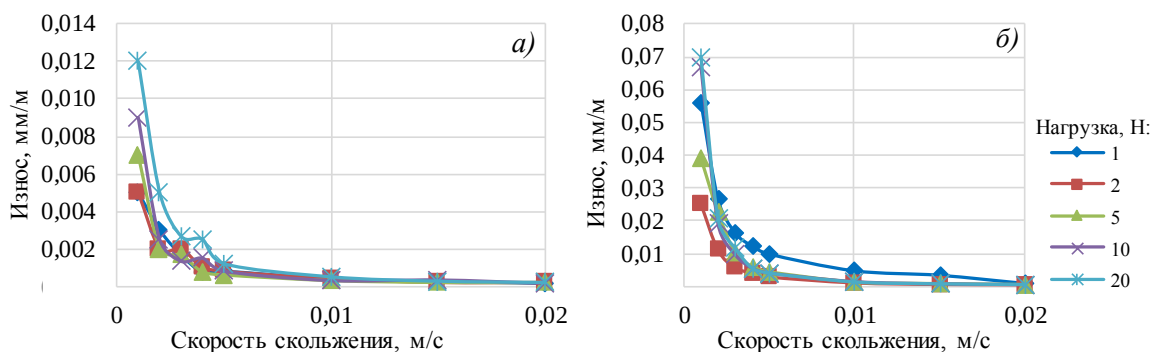


Рис. 8. Влияние скорости скольжения и нагрузки на износ для пары трения свободно спеченного (а) и реакционно-спеченного (б) карбида кремния с графитом марки МПГ-7

При трении SiC и графита МПГ-7 достигается равновесие между процессами образования и разрушения фрикционной пленки. Ее формирование подтверждается резким снижением износа, уменьшением разброса коэффициента трения и его стабилизацией на более высоком уровне, характерном для режима трения «графит по графиту». Лучшая совместимость РС SiC с графитом обусловлена его гетерогенной микроструктурой (наличие свободного кремния и углерода) [33, 34]. По-видимому, твердосмазочная адгезионная пленка графита предпочтительнее формируется на кремнии и углероде в отличие от карбида кремния, что также подтверждается меньшим износом пары трения с РС SiC.

Заключения

Проведенные трибологические испытания двух типов керамики в паре с полимерными и углеродными материалами (ПТФЭ, полиамиды ПА-6 и ПА-6МГ, графит МПГ-7) позволили установить ключевые закономерности трения, определяющие выбор карбидокремниевого материала для конкретной пары трения и условий эксплуатации.

Испытания при низких скоростях скольжения и нагрузках на контакт трения выявили единую закономерность – высокий износ. Такое поведение объясняется действием сил страгивания и недостаточными условиями формирования твердосмазочной пленки. Как только преодолевается барьер механики трения по формированию твердосмазочной пленки на поверхности, наблюдаются резкое снижение общего износа и стабилизация коэффициента трения.

Основное различие между СС и РС SiC заключается в их способности формировать стабильную твердосмазочную пленку на поверхности трения. Обладая плотной однородной микроструктурой и высокой твердостью, СС SiC обеспечивает равномерную адгезию полимерных материалов уже при минимальных скоростях скольжения и нагрузках на контакт. Это проявляется в устойчиво низком и воспроизводимом коэффициенте трения и минимальном износе. Пары трения СС SiC с полимерами можно считать антифрикционными – они эффективно работают в узлах трения, где требуются долговечность и стабильность момента сопротивления.

Напротив, РС SiC демонстрирует высокую вариабельность трибологических характеристик в паре трения с полимерами при малых скоростях и нагрузках. Его гетерогенная структура препятствует раннему формированию сплошной твердосмазочной пленки из полимера. Однако после превышения пороговых значений скорости и нагрузки износ резко снижается, а трение стабилизируется. Следует отметить, что пары трения РС SiC с графитонаполненным полиамидом ПА-6МГ и графитом МПГ-7 имеют преимущество по величине износа. Графитовая твердосмазочная пленка на поверхности трения РС SiC гораздо устойчивее, чем на СС SiC. Триботехнические характеристики пары трения РС SiC с полиамидом ПА-6МГ занимают промежуточное положение: коэффициент трения для РС SiC больше, чем для СС SiC, а износ меньше. В парах трения с графитосодержащими материалами РС SiC имеет преимущество перед СС SiC. Такие пары трения отличаются высокой несущей способностью и возможностью работать при повышенных температурах. Следует отметить, что для пары с полиамидом ПА-6МГ коэффициент трения увеличился по сравнению с полиамидом ПА-6, поэтому также предпочтительнее для графитонаполненного полиамида применять СС SiC.

В реальных узлах трения карбидокремниевая керамика часто взаимодействует с металлическими и твердосплавными элементами. Во второй части статьи будут приведены результаты испытаний тех же образцов СС и РС SiC в парах с конструкционными сталями, бронзами, чугуном и твердым сплавом в условиях сухого трения при низких скоростях. Анализ этих данных позволит завершить сравнительную оценку и дать практические рекомендации по применению пар трения «керамика–металл», где механизмы износа принципиально отличаются от пар трения «керамика–полимер».

Список источников

1. Yehia A. Ceramic SiC B₄C/TiC/C composites as plasma-facing components for fusion reactors // Journal of Nuclear Materials. 1996. Vol. 237. Part B. P. 1230–1234.
2. Якимов А.В. Методика трибологических исследований быстроходных упорных подшипников из SiSiC // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2023. № 6. С. 67–73.
3. Андриевский Р.А., Ланин А.Г., Рымкевич Г.А. Материаловедение карбида кремния. Минск: Наука и техника, 1975. 184 с.

4. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview // *Journal Composites Science and Technology*. 2004. Vol. 64 (2). P. 155–170.
5. Житнюк С.В. Керамика на основе карбида кремния, модифицированная добавками эвтектического состава: дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 150 с.
6. 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.
7. Гаршин А.П., Нилов А.С., Галинская О.О., Краснов В.И. Перспективы развития и пути совершенствования авиационных тормозных систем на базе керамоматричных композиционных материалов (обзор) // *Авиационные материалы и технологии*. 2023. № 2 (71). С. 104–121. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.
8. Гаршин А.П., Шумячер В.М., Пушкарев О.И. Новые конструкционные материалы на основе карбида кремния: учеб. пособие для вузов, 2-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2023. 183 с.
9. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 216 с.
10. Andrew J. Hot-Pressed SiC (HPSC). *Silicon Carbide Ceramics: Structure, Properties, and Manufacturing*. Amsterdam: Elsevier, 2023. P. 215–250.
11. Grasso S., Kim Y.W., Sakka Y. Additive-free hot-pressed silicon carbide ceramics – A material with exceptional mechanical properties // *Journal of the European Ceramic Society*. 2015. Vol. 35 (13). P. 3463–3470.
12. Ивженко В.В., Кайдаш О.Н., Сарнавская Г.Ф. и др. Получение и свойства горячепрессованных материалов на основе карбида кремния с добавками карбидов бора и титана // *Сверхтвердые материалы*. 2016. № 5. С. 25–34.
13. Sharma S.K., Manoj Kumar B.V., Kim Y.W. Room and high temperature reciprocated sliding wear behavior of SiC–WC composites // *Journal Ceramics International*. 2017. Vol. 43 (18). P. 16827–16834.
14. Manoj Kumar B.V., Kim Y.W., Lim D.S., Seo W.S. Influence of small amount of sintering additives on unlubricated sliding wear properties of SiC ceramics // *Journal Ceramics International*. 2011. Vol. 37 (8). P. 3599–3608.
15. Guicciardi S., Sciti D., Melandri C., Pezzotti G. Dry sliding wear behavior of nano-sized SiC pins against SiC and Si₃N₄ discs // *Journal of the European Ceramic Society*. 2007. Vol. 27 (2-3). P. 827–832.
16. Воронов В.А., Чайникова А.С., Лебедева Ю.Е., Житнюк С.В. Получение, физико-механические и триботехнические свойства горячепрессованного углерод-керамического композиционного материала на основе карбида кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2022. № 2 (67). С. 74–84. URL: <http://www.journal.viam.ru> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
17. Гаршин А.П., Чулкин С.Г. Реакционноспеченные карбидокремниевые материалы конструкционного назначения: физико-механические и триботехнические свойства / под ред. А.П. Гаршина. СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2006. 83 с.
18. Викулин В.В., Мухин А.Н., Курбаткина Е.И., Заклякова О.В. Возможность получения керамики на основе реакционно-связанного нитрида кремния с регулируемой твердостью и высокими теплопрочностными характеристиками // *Труды ВИАМ*. 2026. № 1 (155). С. 124–135. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.06.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-124-135.
19. Li F., Zhu S.Y., Cheng J. et al. Tribological properties of Mo and CaF₂ added SiC matrix composites at elevated temperatures // *Journal Tribology International*. 2017. Vol. 111. P. 46–51.
20. Lu Z.L., Zhou Y.X., Zhang M., Huang Q.W. Dry Friction Behaviour of Reaction-Bonded Silicon Carbide at High Temperature // *Journal Key Engineering Materials*. 2007. Vol. 336–338. P. 2472–2474.
21. Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П., Медведев П.Н., Буданова Е.С. Коэффициент трения при низких скоростях скольжения монокристаллического оксида алюминия в паре с металлическими и полимерными материалами // *Трение и износ*. 2024. Т. 45. № 2. С. 141–150. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-141-150.

22. 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). С. 61–70. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 07.04.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.
23. Суй Ц., Морозов Д.В., Никитин А.В. Фрикционные свойства и применение композитов из политетрафторэтилена // Трение и износ. 2006. Т. 27. № 4. С. 388–395.
24. Современная трибология: итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. Изд. стереотип. М.: Изд-во ЛКИ, 2014. 480 с.
25. Kim H.K., Kim I.S., Lee B.H. Friction Coefficient and Microstructure of Reaction-Bonded Silicon Carbide According to Sliding Conditions // Journal of the Korean Ceramic Society. 1995. Vol. 32 (7). P. 825–831.
26. Sathees Kumar K.S., Vishnu Vardhan V.T., Sridhar Babu B.B. et al. Dataset on tribological, characterization and thermal properties of Silicon carbide reinforced polyamide composites for industrial applications // Data in Brief. 2020. Vol. 30. P. 105497.
27. Qian M.B., Song P.A., Qian M.B. et al. Mechanically robust and abrasion-resistant polymer nanocomposites for potential applications as advanced clearance joints // Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing. 2019. Vol. 126. P. 105607. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105607.
28. Saeidi M., Bani Mostafa Arab N., Nakhaei M.R., Naderi G. Investigating the effect of adding silicon carbide nanoparticles on tribological properties of PA6/NBR // Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2025. Vol. 12 (1). P. 29–39.
29. Бельский С.Е., Черкасов М.А., Давыденко А.В. Триботехнические характеристики композитов на основе полиамида 6 с добавками дисульфида молибдена и графита // Трение и износ. 2014. Т. 35. № 3. С. 259–266. DOI: 10.3103/S1068366614030042.
30. Inagaki M. Carbon materials science and engineering: from fundamentals to applications. Qing Years University Publishing Co., Ltd, 2006. 542 p.
31. Pierson H.O. Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications. William Andrew, 2012. 417 p.
32. Болсуновская Т.А., Ефимочкин И.Ю., Севостьянов Н.В., Бурковская Н.П. Влияние марки графита в качестве твердой смазки на триботехнические свойства металлического композиционного материала // Труды ВИАМ. 2018. № 7 (67). С. 69–77. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.05.2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-69-77.
33. Островский В.С., Виргильев Ю.С., Костиков В.И., Шипиков Н.Н. Искусственный графит. М.: Металлургия, 1986. 272 с.
34. Гращенко А.С., Кукушкин С.А., Осипов А.В., Редьков А.В. Механические свойства композитного покрытия SiC на графите, полученного методом замещения атомов // Письма в журнал технической физики. 2021. Т. 47 (20). С. 7–10.

References

1. Yehia A. Ceramic SiC B₄C/TiC/C composites as plasma-facing components for fusion reactors. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, vol. 237, part B, pp. 1230–1234.
2. Yakimov A.V. Methodology for tribological testing of high-speed SiSiC thrust bearings. *Problemy mashinostroyeniya i nadezhnosti mashin*, 2023, no. 6, pp. 67–73.
3. Andrievsky R.A., Lanin A.G., Rymkevich G.A. *Materials Science of Silicon Carbide*. Minsk: Nauka i Tekhnika, 1975, 184 p.
4. Naslain R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview. *Journal Composites Science and Technology*, 2004, vol. 64 (2), pp. 155–170.
5. Zhitnyuk S.V. *Silicon carbide-based ceramics modified with eutectic composition additives*: thesis, Cand. Sc. (Tech.). Moscow, 2015, 150 p.
6. 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.
7. Garshin A.P., Nilov A.S., Galinskaya O.O., Krasnov V.I. Prospects for development and ways to improve aircraft braking systems on the base ceramic matrix composite materials (review). *Aviation materials and technologies*, 2023, no. 2 (71), pp. 104–121. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 04, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2023-0-2-104-121.

8. Garshin A.P., Shumyacher V.M., Pushkarev O.I. *New Structural Materials Based on Silicon Carbide: A Textbook for Higher Education Institutions*, 2nd ed., rev. and add. Moscow: Yurayt, 2023, 183 p.
9. Gnesin G.G. *Silicon Carbide Materials*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 216 p.
10. Andrew J. *Hot-Pressed SiC (HPSC). Silicon Carbide Ceramics: Structure, Properties, and Manufacturing*. Amsterdam: Elsevier, 2023, pp. 215–250.
11. Grasso S., Kim Y.W., Sakka Y. Additive-free hot-pressed silicon carbide ceramics – A material with exceptional mechanical properties. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, vol. 35 (13), pp. 3463–3470.
12. Ivzhenko V.V., Kaidash O.N., Sarnavskaya G.F. et al. Preparation and properties of hot-pressed silicon carbide-based materials with boron and titanium carbide additives. *Sverkhtrudye materialy*, 2016, no. 5, pp. 25–34.
13. Sharma S.K., Manoj Kumar B.V., Kim Y.W. Room and high temperature reciprocated sliding wear behavior of SiC–WC composites. *Journal Ceramics International*, 2017, vol. 43 (18), pp. 16827–16834.
14. Manoj Kumar B.V., Kim Y.W., Lim D.S., Seo W.S. Influence of small amount of sintering additives on unlubricated sliding wear properties of SiC ceramics. *Journal Ceramics International*, 2011, vol. 37 (8), pp. 3599–3608.
15. Guicciardi S., Sciti D., Melandri C., Pezzotti G. Dry sliding wear behavior of nano-sized SiC pins against SiC and Si₃N₄ discs. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, vol. 27 (2-3), pp. 827–832.
16. Voronov V.A., Chainikova A.S., Lebedeva Yu.E., Zhitnyuk S.V. Production, physico-mechanical and tribotechnical properties of hot-pressed carbon-ceramic composite material on the basis of silicon carbide. *Aviation materials and technologies*, 2022, no. 2 (67), pp. 74–84. Available at: <http://www.journal.viam.ru> (accessed: June 04, 2026). DOI: 10.18577/2713-0193-2022-0-2-74-84.
17. Garshin A.P., Chulkin S.G. *Reaction-Sintered Silicon Carbide Materials for Structural Applications: Physicomechanical and Tribological Properties*. Ed. A.P. Garshin. St. Petersburg: St. Petersburg Polytech. Univ. Publ., 2006, 83 p.
18. Vikulin V.V., Mukhin A.N., Kurbatkina E.I., Zaklyakova O.V. Possibility of obtaining ceramics based on reaction-bound silicon nitride with adjustable hardness and high heat strength characteristics. *Trudy VIAM*, 2025, no. 8 (150), pp. 134–151. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: June 04, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-1-124-135.
19. Li F., Zhu S.Y., Cheng J. et al. Tribological properties of Mo and CaF₂ added SiC matrix composites at elevated temperatures. *Journal Tribology International*, 2017, vol. 111, pp. 46–51.
20. Lu Z.L., Zhou Y.X., Zhang M., Huang Q.W. Dry Friction Behaviour of Reaction-Bonded Silicon Carbide at High Temperature. *Journal Key Engineering Materials*, 2007, vol. 336–338, pp. 2472–2474.
21. Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P., Medvedev P.N., Budanova E.S. Friction coefficient of single-crystal aluminum oxide sliding against metallic and polymeric materials at low sliding speeds. *Trenie i iznos*, 2024, vol. 45, no. 2, pp. 141–150. DOI: 10.32864/0202-4977-2024-45-2-141-150.
22. 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), pp. 61–70. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: April 07, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.
23. Xu S., Morozov D.V., Nikitin A.V. Frictional properties and application of polytetrafluoroethylene composites. *Trenie i iznos*, 2006, vol. 27, no. 4, pp. 388–395.
24. *Modern Tribology: Results and Prospects*. Ed. K.V. Frolov. Reprint ed. Moscow: LKI Publ. House, 2014, 480 p.
25. Kim H.K., Kim I.S., Lee B.H. Friction Coefficient and Microstructure of Reaction-Bonded Silicon Carbide According to Sliding Conditions. *Journal of the Korean Ceramic Society*, 1995, vol. 32 (7), pp. 825–831.
26. Sathees Kumar K.S., Vishnu Vardhan V.T., Sridhar Babu B.B. et al. Dataset on tribological, characterization and thermal properties of Silicon carbide reinforced polyamide composites for industrial applications. *Data in Brief*, 2020, vol. 30, p. 105497.

27. Qian M.B., Song P.A., Qian M.B. et al. Mechanically robust and abrasion-resistant polymer nanocomposites for potential applications as advanced clearance joints. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 126, p. 105607. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.105607.
28. Saeidi M., Bani Mostafa Arab N., Nakhaei M.R., Naderi G. Investigating the effect of adding silicon carbide nanoparticles on tribological properties of PA6/NBR. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, 2025, vol. 12 (1), pp. 29–39.
29. Belsky S.E., Cherkasov M.A., Davydenko A.V. Tribological characteristics of polyamide 6-based composites with molybdenum disulfide and graphite additives. *Trenie i iznos*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 259–266. DOI: 10.3103/S1068366614030042.
30. Inagaki M. *Carbon materials science and engineering: from fundamentals to applications*. Qing Years University Publishing Co., Ltd, 2006, 542 p.
31. Pierson H.O. *Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications*. William Andrew, 2012, 417 p.
32. Bolsunovskaya T.A., Efimochkin I.Yu., Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P. The graphite grades lubrication effect on tribotechnical properties of the metallic composite material. *Trudy VIAM*, 2018, no. 7 (67), pp. 69–77. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: May 05, 2026). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-69-77.
33. Ostrovsky V.S., Virgiliev Yu.S., Kostikov V.I., Shipikov N.N. *Artificial graphite*. Moscow: Metallurgiya, 1986, 272 p.
34. Grashchenko A.S., Kukushkin S.A., Osipov A.V., Redkov A.V. Mechanical properties of a SiC composite coating on graphite obtained by the atomic substitution method. *Pisma v zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2021, vol. 47 (20), pp. 7–10.

Информация об авторах

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

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

Сорокин Олег Юрьевич, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Викулин Владимир Васильевич, главный научный сотрудник, д.т.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

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

Oleg Yu. Sorokin, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Vladimir V. Vikulin, Chief Researcher, Doctor of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Статья поступила в редакцию 23.06.2026; одобрена и принята к публикации после рецензирования 13.07.2026.
The article was submitted 23.06.2026; approved and accepted for publication after reviewing 13.07.2026.