
Научная статья

УДК 621.891

DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-133-145

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СУХОГО ТРЕНИЯ Si_3N_4 С МАТЕРИАЛАМИ РАЗНОГО ТИПА

Н.В. Севостьянов¹, Е.С. Пастух¹, Н.Е. Щеголева¹, Д.И. Вершинин¹, 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 трения нитрида кремния от нагрузки и скорости скольжения в паре с материалами разного типа. В качестве контртел выбраны материалы различных классов, наиболее часто используемые в механизмах узлов трения. В процессе трения различных материалов с нитридом кремния активное участие принимают оксидные пленки, поверхностная активность, энергия активации межплоскостного сдвига плоскостей. Наименьший коэффициент трения с нитридом кремния показали полимерные и самосмазывающиеся материалы.

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

Для цитирования: Севостьянов Н.В., Пастух Е.С., Щеголева Н.Е., Вершинин Д.И., Викулин В.В. Закономерности сухого трения Si_3N_4 с материалами разного типа // Труды ВИАМ. 2026. № 4 (158). С. 133–145. URL: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-133-145.

Scientific article

PATTERNS OF DRY FRICTION OF Si_3N_4 WITH DIFFERENT TYPES OF MATERIALS

N.V. Sevostyanov¹, E.S. Pastukh¹, N.E. Shchegoleva¹, D.I. Vershinin¹, 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 article presents the patterns of friction of silicon nitride from load and sliding speed paired with materials of different types. Materials of various classes, which are most often used in the mechanisms of friction units, are selected as counterbells. In the process of friction of various materials with silicon nitride, oxide films, surface activity, and activation energy of the interplane shear of planes are actively involved. Polymer and self-lubricating materials showed the lowest coefficient of friction with silicon nitride.

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

For citation: Sevostyanov N.V., Pastukh E.S., Shchegoleva N.E., Vershinin D.I., Vikulin V.V. Patterns of dry friction of Si_3N_4 with different types of materials. *Trudy VIAM*, 2026, no. 4 (158), pp. 133–145. Available at: <http://www.viam-works.ru>. DOI: 10.18577/2307-6046-2026-0-4-133-145.

Введение

Подшипники разного типа применяются в авиастроении, машиностроении, космической и других отраслях промышленности. Наиболее распространенными видами подшипников являются шариковые, роликовые конические, упорные шариковые и т. д. [1, 2]. Материалами для подшипников зачастую служат металлические сплавы и композиционные составы на основе металлов. Однако такие материалы не всегда отвечают требованиям по жаростойкости, износостойкости и коррозионной стойкости в ответственных узлах конструкций, применяемых в авиастроении и других смежных отраслях, упомянутых ранее. В таком случае на первый план выходят керамические композиционные материалы [3–6].

Химическая инертность керамических материалов определяет небольшой адгезивный износ в сопрягаемых деталях опорных элементов. Это свойство керамических материалов обеспечивает возможность эксплуатации тел качения подшипников в условиях слабой смазки или даже без применения смазочных материалов. Поэтому подшипники с керамическими телами качения проявляют превосходные эксплуатационные ходовые качества в аварийных режимах и не приводят к внезапным отказам [7]. Среди композиционных керамических материалов выделяют составы на основе нитрида кремния.

В работе [1] установлено: прочность образцов из керамики на основе нитрида кремния при статическом изгибе при температуре 20 °С составляет 629–644 МПа и значительно превышает значения прочности шариков из стали [8]. Нитрид кремния характеризуется низкой плотностью, высокими твердостью и износостойкостью, а также устойчив ко многим химически агрессивным средам и к окислению на воздухе. Твердость и модуль упругости нитрида кремния более чем в 1,5 раза больше, чем аналогичные характеристики стали [1]. Возрастание твердости материалов подшипника увеличивает его ресурс при работе в условиях повышенного загрязнения. Такой комплекс свойств позволяет применять нитрид кремния не только в ответственных деталях, работающих при высоких нагрузках [9], но и в атомной энергетике.

Следует отметить, что подобные составы с нитридом кремния чаще всего получают методом спекания в контролируемой среде с использованием оксидных активаторов. Действие активаторов заключается в наиболее оптимальной схеме уплотнения нитрида кремния, что предопределяет прочностные свойства композиционной керамики [10]. Спеченные материалы при технологическом процессе всегда содержат микропоры, которые снижают прочностные свойства изделий, но положительно влияют на триботехнические характеристики [11].

Нитрид кремния (Si_3N_4) – полиморфное соединение, которое существует в четырех аллотропных модификациях и в природе не встречается [12, 13]. Высокопрочный нитрид кремния – керамический материал с ковалентными связями и тетрагональной кристаллической структурой, который может применяться в сильно нагруженных изделиях – например, в работающих при высоких температурах подшипниках качения и в горячих узлах двигателей. Микроструктура керамических материалов (рис. 1) напоминает микроструктуру металлов, но при этом зерна представляют собой кристаллиты с иным принципом образования границ, чем у металлов, из-за присущей им валентности [14].

В данной работе исследованы триботехнические характеристики нитрида кремния (коэффициент трения и износ), полученного горячим спеканием. Испытания проводили с различными контртелами, имитирующими пары трения тех материалов, которые наиболее часто применяются при изготовлении подшипников. Трение твердых тел – сложный процесс, включающий тепловые эффекты, макро- и микропластические

деформации, внутреннее и внешнее трение и другое. В последние годы трибология развивается на основе представлений об иерархической системе, в которой установлена общность событий, происходящих на нано-, мезо- и макромасштабных уровнях. К этому можно добавить, что последовательность событий при трении подчиняется принципам самоорганизации на всех масштабных уровнях [10]. Вследствие этого исследование триботехнических характеристик нитрида кремния и остальных подобных материалов перспективно для выявления закономерностей формирования тех или иных механизмов разрушения, а также для прогнозирования эксплуатационных свойств изделий, в том числе подшипников.

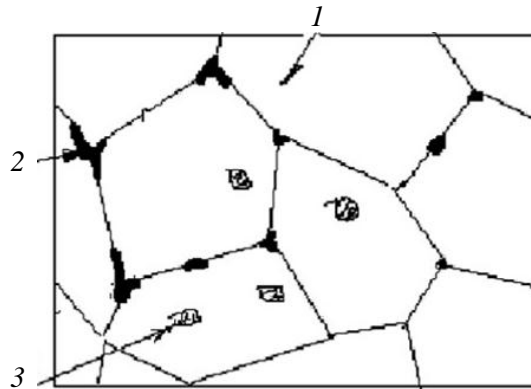


Рис. 1. Схематическое изображение микроструктуры керамического материала: 1 – зерно; 2 – микротрещины, образовавшиеся из пор в результате действия температурных и механических напряжений; 3 – частицы второй фазы

Ранее проведены исследования триботехнических характеристик нитрида кремния в воде, которые показали, что в процессе трения на нитриде кремния образуется аморфная гидратированная пленка и в паре с некоторыми металлами (медь, никель) коэффициент трения снижается [15]. Однако в условиях трения без смазки (т. е. с жесткой системой трения) нитрид кремния практически не исследован, несмотря на то, что другие виды керамики изучены тщательнее, – например, как в работе [16], в которой сделаны следующие выводы:

- при сухом трении керамические материалы в основном разрушаются, трескаются и ломаются, а затем возникает износ шлифовального зерна;
- в случае низких значений контактной нагрузки и скорости скольжения износ материала становится липким и отслаивающимся. Когда значения контактной нагрузки и скорости скольжения высокие, керамическая поверхность износа может расплавиться, а расплавленная часть керамики спадает во время трения и после охлаждения превращается в чешуйчатые обломки;
- неоксидная керамика может подвергаться фрикционному окислению и износу оксидного слоя [17, 18].

Помимо нитрида кремния, исследованы также триботехнические свойства других нитридов, применяющихся в качестве армированной фазы в металлических композиционных материалах, где они показали достаточно хороший уровень характеристик трения в качестве антифрикционных материалов [19, 20].

Цель данной работы – определение уровня возможных триботехнических характеристик нитрида кремния в паре трения с материалами разного типа для применения его в качестве компонента гибридных узлов трения перспективной техники.

Материалы и методы

Триботехнические испытания проводили на универсальной машине трения с линейным приводом. Нитрид кремния закрепляли на каретке, осуществляющей возвратно-поступательные движения, и задавали амплитуду цикла скольжения 15 мм. Каждое новое испытание проводили по новому пути подготовленной поверхности.

Нагрузку при испытаниях изменяли в диапазоне от 1 до 20 Н, а скорость скольжения для определения коэффициента страгивания варьировали от 0,001 до 0,005 м/с с шагом 0,001 м/с, для среднего коэффициента трения – от 0,01 до 0,02 м/с с шагом 0,005 м/с.

Образец для триботехнических испытаний изготовлен в виде плоскопараллельной призмы из нитрида кремния (Si_3N_4) методом порошковой технологии при помощи горячего прессования. Микроструктура горячепрессованного нитрида кремния приведена на рис. 2. Материал характеризуется высокой плотностью и однородностью структуры.

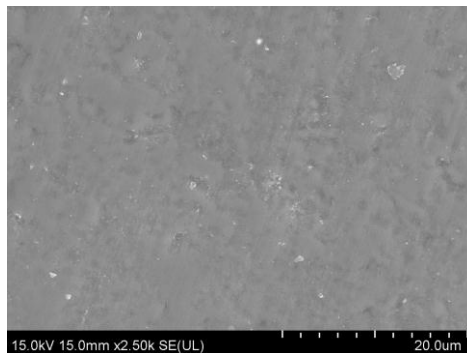


Рис. 2. Микроструктура образца Si_3N_4

Контртела представляли собой цилиндры диаметром 6,35 мм. Для исследований отобраны материалы различных классов: металлические сплавы, полимеры и самосмазывающиеся материалы. Из металлических сплавов выбраны: подшипниковая сталь 95X18, сталь ШХ15, твердый сплав ВК8, бронзы БрАЖ9-4 и ВБ-23НЦ, чугун СЧ15. Из полимерных материалов основной интерес представляют 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 и графитонаполненный полиамид марки ПА-6МГ.

Результаты и обсуждение

В данной работе исследованы закономерности трения нитрида кремния с различными типами материалов: металлические сплавы и стали (чугун СЧ15, стали ШХ15 и 95X18), бронзы (БрАЖ9-4 и ВБ-23НЦ), твердый сплав ВК8; пластмассы (фторопласт ПТФЭ марки Д-4, нейлон марки ПА-6 и нейлон с графитом марки ПА-6МГ), графит марки МПГ-7. Испытания проведены в режиме скольжения на малых скоростях, при которых выявляется действие процессов страгивания (трение покоя).

В настоящее время из нитрида кремния изготавливают гибридные подшипники качения со стальными кольцами и керамическими шариками. Нитрид кремния также широко применяется в других узлах трения при сопряжении со сталями.

На рис. 3 приведены зависимости коэффициентов трения от нагрузки и скорости скольжения для нитрида кремния в паре с металлическими материалами.

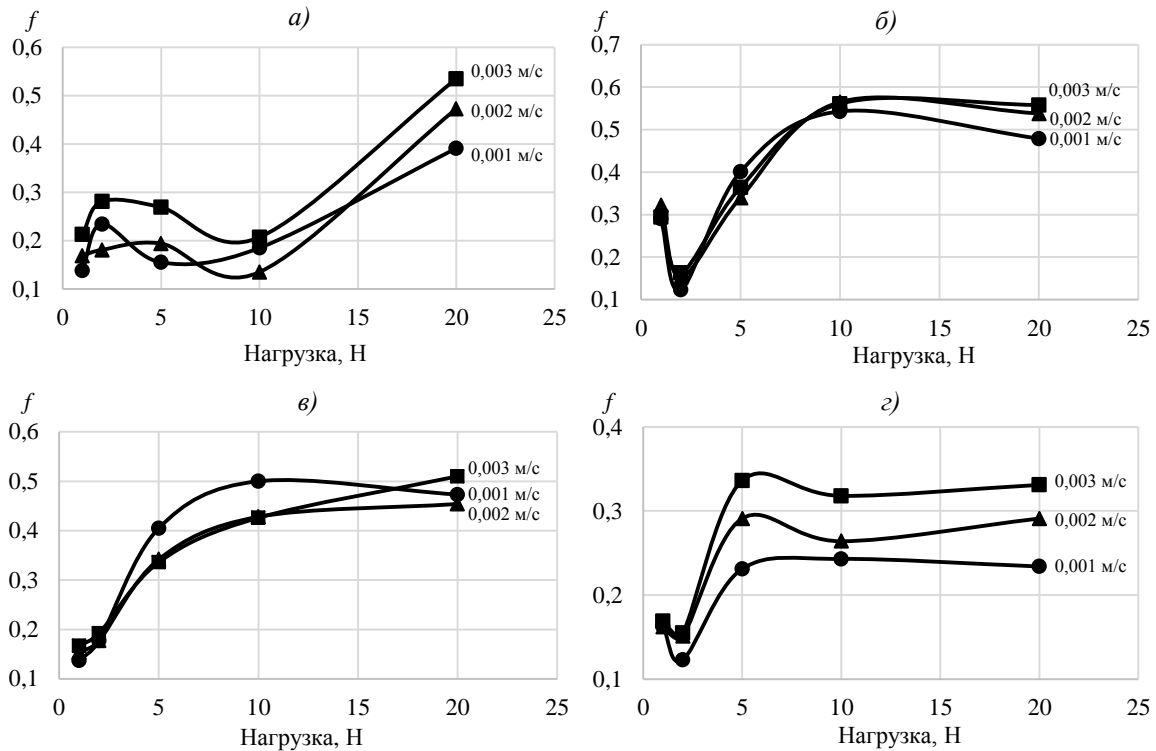


Рис. 3. Зависимости коэффициента трения f от нагрузки и скорости скольжения для нитрида кремния в паре с металлическими материалами: сталями 95X18 (а) и ШХ15 (б), чугуном СЧ15 (в) и твердым сплавом ВК8 (з)

Зависимости коэффициента трения от нагрузки для сталей 95X18 и ШХ15, являющихся однотипными материалами, имеют различный характер кривых (рис. 3, а, б). Так, сталь 95X18 имеет при малых нагрузках до 10 Н плато с низким коэффициентом трения, что связано, по-видимому, с плотной оксидной пленкой, образующейся на стали, и хорошей теплостойкостью стали – до 450 °С. Небольшое снижение коэффициента трения в диапазоне нагрузки от 5 до 10 Н связывается с разрушением оксидных пленок на стали в зоне трения и контактированием металла непосредственно с нитридом кремния. Как следует из графиков, коэффициент трения ювенильной поверхности стали по нитриду кремния имеет немного более низкие значения, в отличие от оксидов. Увеличение нагрузки >10 Н приводит к механическому повреждению оксидных слоев стали и локальному нагреву контактирующих участков со снижением механических свойств и, как результат, к резкому росту коэффициента трения.

Сталь ШХ15 имеет теплостойкость до 250 °С, что отражается на графиках зависимостей коэффициента трения от нагрузок. При низких нагрузках до 2 Н наблюдается смешанное трение оксидных пленок стали с нитридом кремния. При увеличении нагрузки окисные пленки разрушаются, что сопровождается снижением коэффициента трения, который достигает минимума при нагрузке 2 Н. Увеличение нагрузки на контактную поверхность трения >2 Н приводит к резкому росту коэффициента трения, что можно объяснить низкой теплостойкостью стали ШХ15. В отличие от стали 95X18 у стали ШХ15 уже при нагрузке 10 Н наблюдается стабилизация коэффициента трения.

Чугун марки СЧ15 имеет значительно более низкие механические характеристики по сравнению с подшипниковыми сталями. Как видно из графиков зависимостей коэффициента трения от нагрузки (рис. 3, в), оксидные пленки на чугуне практически не оказывают влияния на процессы трения. После нагружения >5 Н коэффициент трения

выходит на плато и незначительно изменяется с дальнейшим увеличением нагрузки. Скорость скольжения чугуна по нитриду кремния не оказывает заметного влияния на процесс трения.

Коэффициент трения твердого сплава с нитридом кремния характеризуется низкими значениями при небольших нагрузках (рис. 3, *з*). Однако при увеличении нагрузки до 5 Н коэффициент трения резко увеличивается и принимает стабильное значение для всего исследуемого диапазона скоростей скольжения и нагрузок. При низких нагрузках в процессах трения могут принимать активное участие поверхностные оксидные слои на твердом сприве. С увеличением нагрузки на контактную поверхность трения, как только превышает механическая прочность оксида, изменяются условия трения. В этом случае нитрид кремния непосредственно взаимодействует с составными фазами твердого сплава – карбидами вольфрама и кобальта. Для твердого сплава отчетливо просматривается зависимость увеличения коэффициента трения с повышением скорости скольжения за исключением режимов с низкой нагрузкой, где трение реализуется с участием оксидных пленок на твердом сплаве.

На рис. 4 приведены графики зависимостей коэффициента трения нитрида кремния в паре с бронзами в зависимости от нагрузки на контактную поверхность трения и скорости скольжения. Рассмотрены бронзы БрАЖ9-4 и ВБ-23НЦ. Высокопрочная бронза БрАЖ9-4 применяется в тяжело нагруженных узлах трения, обладает высокими износо- и коррозионной стойкостью, устойчива к кавитации, хорошо обрабатывается, благодаря чему находит широкое применение в узлах трения для изготовления втулок и вкладышей подшипников скольжения, шестерен. Бронза ВБ-23НЦ также высокоэффективна в узлах трения и обладает отличной коррозионной стойкостью.

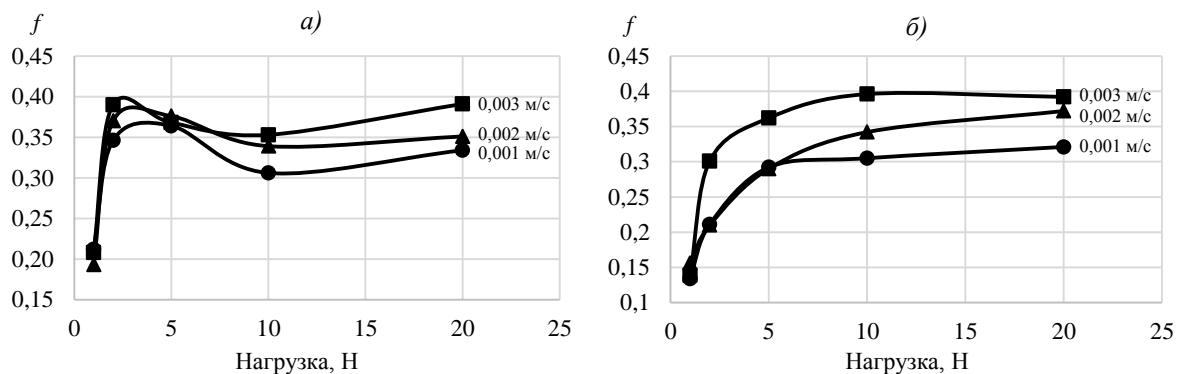


Рис. 4. Зависимости коэффициента трения f от нагрузки и скорости скольжения для нитрида кремния в паре с бронзовыми сплавами БрАЖ9-4 (*а*) и ВБ-23НЦ (*б*)

Бронза БрАЖ9-4 является высокопрочным твердым материалом (твердость 200 НВ), что обусловлено дисперсным упрочнением. График коэффициента трения бронзы БрАЖ9-4 с нитридом кремния имеет сложную зависимость от нагрузки на контактную поверхность трения как результат изменения состояния трущейся поверхности. При низких нагрузках трение происходит с участием оксидных слоев на поверхности металла и характеризуется низкими значениями коэффициента трения. С увеличением нагрузки до 2 Н на контактную поверхность трения в результате разрушения оксидов на поверхности бронзы наблюдается резкий рост коэффициента трения. Дальнейшее увеличение нагрузки до 20 Н практически не влияет на изменение коэффициента трения, что свидетельствует о протекании процесса по единому механизму.

Зависимость коэффициента трения бронзы ВБ-23НЦ от нагрузки на контактную поверхность трения, в отличие от аналогичной зависимости для бронзы БрАЖ9-4,

имеет плавный характер изменения (рис. 4, б). Бронза ВБ-23НЦ содержит в составе 20 % свинца, выполняющего функцию твердой смазки. Повышение нагрузки на контактную поверхность трения разрушает оксидные слои металла, что ведет к трению металлической поверхности по нитриду кремния с ростом коэффициента трения. Высокая концентрация свинца в составе бронзы позволят избежать резкого роста коэффициента трения с увеличением нагрузки. При нагрузке на контактную поверхность трения >5 Н коэффициент трения стабилизируется [21]. Заметна ощутимая разница коэффициента трения от скорости скольжения при нагрузках >5 Н. Для бронзы ВБ-23НЦ с увеличением скорости скольжения наблюдается увеличение коэффициента трения.

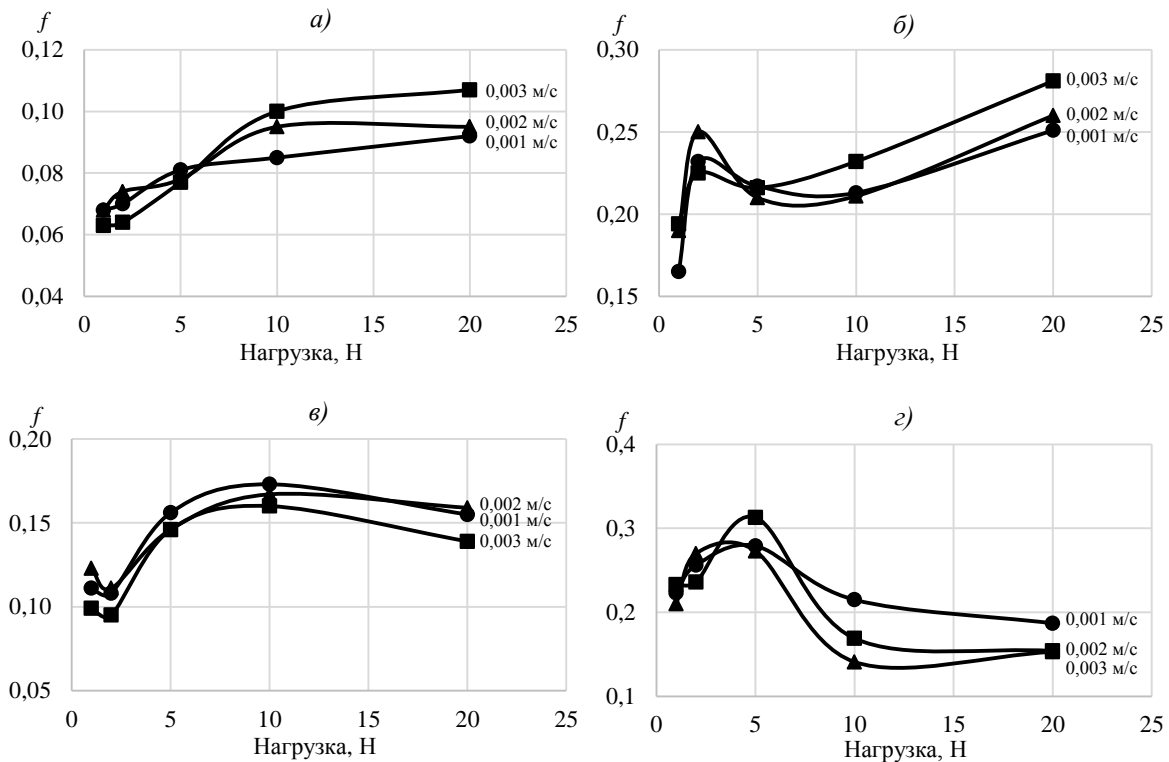


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения f от нагрузки и скорости скольжения для нитрида кремния в паре с полимерными и самосмазывающимися материалами ПТФЭ (а), МПГ-7 (б), ПА-6 (в) и ПА-6МГ (г)

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициента трения нитрида кремния с полимерными и самосмазывающимися материалами от нагрузки на контактную поверхность трения и скорости скольжения. Из всех опробованных в работе [22] пар трения наиболее низкий коэффициент трения наблюдается в паре трения с ПТФЭ. Установленные значения коэффициента трения 0,065–0,11 (рис. 5, а) в исследуемом диапазоне нагрузок и скоростей сравнимы с другими парами трения с ПТФЭ [23–26]. Близкие значения коэффициента трения для пар трения с ПТФЭ свидетельствуют о едином механизме взаимодействия трущихся поверхностей, что определяется в основном физико-механическими свойствами ПТФЭ.

Коэффициент трения для пары трения с ПТФЭ незначительно растет с увеличением нагрузки на контактную поверхность трения. Выше нагрузки 10 Н наблюдается замедление скорости роста коэффициента трения с образованием плато и стабилизацией значения $\sim 0,1$. Стабилизацию коэффициента трения можно объяснить достижением предела прочности ПТФЭ и протеканием процесса скольжения с частичным

механическим износом. Увеличение скорости скольжения незначительно влияет на коэффициент трения при нагрузках >10 Н, приводя к его росту, что тоже объясняется механическим пределом ПТФЭ.

На рис. 5, б приведены зависимости коэффициента трения графита МПГ-7 в паре с нитридом кремния от нагрузки на контактную поверхность трения при различных скоростях скольжения. Во всем исследуемом диапазоне скоростей скольжения при малых нагрузках на контактную поверхность трения (1–2 Н) наблюдается резкое увеличение коэффициента трения. Дальнейшее увеличение нагрузки с 2 до 5 Н сопровождается снижением значений коэффициента трения, а, начиная с нагрузки 5 Н, коэффициент трения монотонно возрастает.

Графит, являясь сухой смазкой, обладает низким коэффициентом трения благодаря легкому межплоскостному (базальному) скольжению графеновых слоев по плоскостям (0001). Однако для легкого скольжения графита необходимо преодолеть хотя и слабую, но имеющуюся межслойную связь в графите, которая составляет 0,1–0,5 эВ (10–50 кДж/моль) [27, 28]. До преодоления энергетического барьера межплоскостного скольжения графита трение будет происходить непосредственно на границе раздела с контактирующим материалом.

Трение при малых нагрузках (1–2 Н) и скоростях скольжения графита с нитридом кремния характеризуется наиболее низким значением коэффициента трения, с увеличением нагрузки наблюдается резкий рост значений. Низкий коэффициент трения нитрида кремния с графитом объясняется слабым поверхностным взаимодействием. С ростом нагрузки на контактную поверхность трения из-за низких механических прочностных свойств графита возрастает абразивная составляющая механизма трения, что приводит к росту коэффициента трения. Дальнейшее увеличение контактной нагрузки >2 Н приводит к достижению энергетического порога активации начала межплоскостного скольжения графита, что снижает коэффициент трения при контактной нагрузке 7 Н, после чего его значение снова начинает монотонно возрастать вследствие роста механической составляющей.

На рис. 5, в приведены зависимости коэффициента трения нейлона ПА-6 в паре с нитридом кремния. Для всего исследуемого диапазона скоростей скольжения характерна единая зависимость коэффициента трения от нагрузки на контактную поверхность трения. При увеличении нагрузки с 1 до 2 Н на зависимостях наблюдается незначительное снижение коэффициента трения. Дальнейшее продолжение нагружения ведет к переходу через минимум при нагрузке 2 Н и к росту значений коэффициента трения при нагрузке до 10 Н с выходом на плато. При последующем нагружении до 20 Н значения коэффициента трения незначительно снижаются. Изменение скорости скольжения в исследуемом диапазоне не оказывает влияния на ход зависимостей коэффициента трения. Столь сложное поведение коэффициента трения в зависимости от нагрузки свидетельствует о большом количестве механических, прочностных, физических и адгезионных факторов, лимитирующих процесс трения нейлона с нитридом кремния.

Начальное уменьшение коэффициента трения с ростом нагрузки на контактную поверхность трения (1–2 Н) объясняется эффектом Герца–Мора. При малой нагрузке контакт трущихся тел происходит по вершинам микронеровностей, в этом случае коэффициент трения определяется адгезионным взаимодействием. С ростом нагрузки вследствие упругой деформации площадь реального контакта растет с более равномерным распределением давления, что способствует уменьшению коэффициента трения. Дальнейшее увеличение нагрузки >2 Н ведет к пластической деформации полимера в условиях реальных контактов с увеличением адгезионной составляющей, приводящей к росту коэффициента трения [29]. При увеличении нагрузки >10 Н коэффициент трения

стабилизируется и начинает незначительно уменьшаться, что может быть вызвано преобладанием уже абразивного механизма трения, обусловленного достижением механической прочности нейлона в пятне контакта.

На рис. 5, ε представлены зависимости коэффициента трения нитрида кремния с графитонаполненным полиамидом марки ПА-6МГ от нагрузки при различных скоростях скольжения. Зависимость коэффициента трения можно охарактеризовать как суммарную характеристику полиамида и графита. В основном зависимость коэффициента трения нитрида кремния с ПА-6МГ больше схожа с зависимостью графита. При увеличении нагрузки с 1 до 5 Н коэффициент трения возрастает, проходя через максимум. С дальнейшим увеличением нагрузки коэффициент трения снижается, стабилизируясь при нагрузке 10 Н и выходя на плато вплоть до нагрузки 20 Н. Рост коэффициента трения с увеличением нагрузки с 1 до 5 Н объясняется пластической деформацией полиамида ПА-6МГ с ростом адгезионной составляющей коэффициента трения. Отсутствие участка снижения коэффициента трения в диапазоне нагрузки от 1 до 2 Н, характерного для полиамида ПА-6, определяется наличием графита в составе полиамида ПА-6МГ, который уменьшает упругость полиамида и имеет более высокий коэффициент трения с нитридом кремния. Снижение коэффициента трения в интервале нагрузок от 5 до 10 Н объясняется активацией графита. В интервале нагрузок от 10 до 20 Н коэффициент трения стабилизируется, что является суммарным эффектом работы графита как твердой смазки и предела механической прочности нейлоновой основы с абразивным механизмом трения.

Заключения

Триботехнические испытания нитрида кремния в паре с материалами разного типа показали разнообразные механизмы процессов трения, протекающих при взаимодействии трущихся тел в зависимости от природы материала, которые необходимо учитывать при выборе пары трения и условий эксплуатации.

При трении металлических материалов при низких нагрузках большой вклад в процесс вносят оксидные пленки. Оксиды всех испытанных металлов имеют низкий коэффициент трения с нитридом кремния – в диапазоне 0,15–0,2. При увеличении нагрузки на контактную поверхность трения происходит разрушение оксидных пленок, что приводит к непосредственному трению металлической поверхности с нитридом кремния и, как следствие, к росту коэффициента трения. В этом случае основное значение имеют механические свойства, фазовый состав и сродство металла к нитриду кремния. Металлы в процессе трения склонны к адгезионному взаимодействию, но, как только силы адгезии превосходят прочностные свойства металла, в механизме трения начинают преобладать абразивные процессы.

Трение самосмазывающихся материалов в паре с нитридом кремния определяется в основном энергиями активации работы самих твердых смазок. При малых нагрузках, недостаточных для обеспечения межплоскостного скольжения, можно наблюдать несколько бóльшие значения коэффициента трения, связанные с адгезионным взаимодействием трущихся поверхностей.

Полимерные материалы обладают малой адгезионной составляющей при трении с нитридом кремния, чем и обусловлены их низкие значения коэффициента трения. Одновременно низкие механические свойства полимерных материалов не позволяют применять их в тяжело нагруженных узлах трения в паре с нитридом кремния.

Нитрид кремния обладает высокими твердостью, рабочей температурой и механической прочностью, что делает его привлекательным для использования в подвижных узлах трения. В настоящее время нитрид кремния применяется в качестве тел

качения (шариков) в гибридных подшипниках со стальными кольцами. Проведенные триботехнические испытания показали перспективность твердого сплава для изготовления колец гибридных подшипников качения.

При проведении лабораторных испытаний кардинальных преимуществ бронзы БрАЖ9-4 перед бронзой ВБ-23НЦ не выявлено – обе марки бронз с одинаковым успехом могут применяться в качестве сепараторов подшипников качения с телами качения из нитрида кремния. Выбор применения марки бронзы может определяться условиями эксплуатации, такими как рабочая среда, частота вращения и температура.

В качестве сепараторов гибридных подшипников выгодно применять полимерные материалы, которые отличаются низкими коэффициентом трения и массой, высокими акустическим звукопоглощением и химической стойкостью. Однако необходимо учитывать невысокие механические и физические свойства полимерных материалов, что ограничивает их применение в тяжелонагруженных подшипниках.

Список источников

1. Пахомова С.А., Повалев А.И., Шебешев К.И. Керамические композиционные материалы на основе нитрида кремния для коррозионностойких подшипников качения // Сб. науч. тр. Междунар. науч.-практ. конф. «Ключевые тренды в композитах: наука и технологии» (05–08 дек. 2019 г., г. Москва). М., 2019. С. 556–561.
2. Толмачев Я.В., Заварзин С.В., Лощина А.О., Князев А.В. Высокотемпературная оксидная коррозия керамических материалов ГТД // Труды ВИАМ. 2023. № 7 (125). С. 69–83. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
3. Muthu N., Rajaram G. Effect on lubrication regimes with silicon nitride and bearing steel balls // Tribology International. 2017. Vol. 116. P. 403–413. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.043.
4. Yang H., Zheng P., Hu G. et al. A broadband, low-crosstalk and low polarization dependent silicon nitride waveguide crossing based on the multimode-interference // Optics Communications. 2019. Vol. 450. P. 28–33. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.05.052.
5. 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.
6. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Исаева Н.В., Солнцев С.С. Перспективные высокотемпературные керамические композиционные материалы // Российский химический журнал. 2010. Т. 54. № 1. С. 20–24.
7. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов / под ред. И.Я. Гузман. М.: Стройматериалы, 2003. 496 с.
8. Гаршин А.П., Горопянов В.М., Зайцев Г.П., Семенов С.С. Керамика для машиностроения. М.: Научтехиздат, 2003. 384 с.
9. Рассохина Л.И., Битюцкая О.Н., Гамазина М.В., Авдеев В.В. Исследование составов керамических стержней на основе плавленного кварца и технологии их изготовления // Труды ВИАМ. 2021. № 1 (95). С. 34–42. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
10. Чупов В.Д., Харланов А.С. Прочность керамических материалов на основе карбида и нитрида кремния // Огнеупоры и техническая керамика. 2006. № 9. С. 16–18.
11. Перспективные материалы: учеб. пособие: в 7 т. / под ред. Д.Л. Мерсона. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. Т. V. 422 с.
12. Гриценко В.А. Электронная структура нитрида кремния // Успехи физических наук. 2012. Т. 182. № 5. С. 531–541. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205d.0531.
13. Семенов А.А., Лизунов А.В., Глебов А.В., Макаров Ф.В., Карпюк Л.А. Перспективы использования нитрида кремния, модифицированного изотопом азот-15 высокого обогащения, при изготовлении оболочек ТВЭЛов // Аналитика: аналитические методы и приборы. 2021. Т. 11. № 3. С. 208–217.

14. Панов А.Д., Панова И.М. Трибологические особенности конструкционных керамических материалов в подшипниках скольжения // *Науковедение*. 2015. Т. 7. № 1. С. 1–9. URL: <https://naukovedenie.ru> (дата обращения: 16.07.2025). DOI: 10.15862/78TVN115.
15. Takadoun J., Houmid-Bennani H., Mairey D. The wear characteristics of silicon nitride // *Journal of the European Ceramic Society*. 1998. Vol. 18 (5). P. 553–556. DOI: 10.1016/S0955-2219(97)00157-X.
16. Yao J., Wu Y., Sun J. et al. Friction and wear characteristics of silicon nitride ceramics under dry friction condition // *Materials Research Express*. 2021. No. 8. P. 1–12. DOI: 10.1088/2053-1591/abe8ab.
17. Shpenev A.G. Friction and wear of fiber composites with abrasive particles on contact surface // *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39. P. 188–194. DOI: 10.3103/s106836661803011x.
18. Xing Y., Deng J., Wu Z., Wu F. High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction // *Optics & Laser Technology*. 2017. Vol. 93. P. 24–32. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.01.032.
19. Севостьянов Н.В., Буданова Е.С., Хватов В.Д., Фомичев А.Н. Триботехнические особенности металлических композиционных материалов, армированных нитридами // *Труды ВИАМ*. 2025. № 2 (144). С. 100–111. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.
20. Бурковская Н.П., Севостьянов Н.В. Металлокерамические композиционные материалы для подшипников скольжения (обзор) // *Труды ВИАМ*. 2023. № 3 (121). С. 84–94. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 04.03.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
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: 03.09.2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.
23. Костецкий Б.И. Трение, смазка и износ в машинах. Киев: Техніка, 1970. 395 с.
24. Yamaguchi Y. Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components. Elsevier, 1990. Vol. 16. 362 p.
25. Handbook of polymer tribology / ed. S.K. Sinha. Delhi: World Scientific, 2018. 736 p.
26. Stachowiak G., Batchelor A.W. Engineering tribology. London: Butterworth-Heinemann, 2025. 884 p.
27. Inagaki M. Carbon materials science and engineering: from fundamentals to applications. Beijing: Qing Years University Publishing Co., Ltd., 2006. 542 p.
28. Pierson H.O. Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications. New Jersey: William Andrew, 2012. 417 p.
29. Johnson K.L. Contact mechanics. Cambridge: Cambridge University press, 1987. 452 p.

References

1. Pakhomova S.A., Povalyaev A.I., Shebeshev K.I. Ceramic composite materials based on silicon nitride for corrosion-resistant rolling bearings. *Coll. sci. trac. Int. scientific and practical. conf. «Key trends in composites: science and technology»*. Moscow, 2019, pp. 556–561.
2. Tolmachev Ya.V., Zavarzin S.V., Loshchinina A.O., Knyazev A.V. High temperature oxide corrosion of ceramic materials in turbine engines. *Trudy VIAM*, 2023, no. 7 (125), pp. 69–83. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-7-69-83.
3. Muthu N., Rajaram G. Effect on lubrication regimes with silicon nitride and bearing steel balls. *Tribology International*, 2017, vol. 116, pp. 403–413. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.06.043.

4. Yang H., Zheng P., Hu G. et al. A broadband, low-crosstalk and low polarization dependent silicon nitride waveguide crossing based on the multimode-interference. *Optics Communications*, 2019, vol. 450, pp. 28–33. DOI: 10.1016/j.optcom.2019.05.052.
5. 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.
6. Kablov E.N., Grashchenkov D.V., Isaeva N.V., Solntsev S.S. Promising High-Temperature Ceramic Composite Materials. *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 54, no. 1, pp. 20–24.
7. *Chemical Technology of Ceramics: A Textbook for Universities*. Ed. by I.Ya. Guzman. Moscow: Stroymaterialy, 2003, 496 p.
8. Garshin A.P., Goropyanov V.M., Zaitsev G.P., Semenov S.S. *Ceramics for mechanical engineering*. Moscow: Nauchtekhizdat, 2003, 384 p.
9. Rassokhina L.I., Bityutskaya O.N., Gamazina M.V., Avdeev V.V. Research of compositions of ceramic rods based on fused quartz and their manufacturing technology. *Trudy VIAM*, 2021, no. 1 (95), pp. 34–42. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-1-34-42.
10. Chupov V.D., Kharlanov A.S. Strength of ceramic materials based on silicon carbide and nitride. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*, 2006, no. 9, pp. 16–18.
11. *Advanced materials: a textbook: in 7 vols*. Ed. by D.L. Merson. Tolyatti: TSU Publ. House, 2013, vol. V, 422 p.
12. Gritsenko V.A. Electronic structure of silicon nitride. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, no. 5, pp. 531–541. DOI: 10.3367/UFNr.0182.201205d.0531.
13. Semenov A.A., Lizunov A.V., Glebov A.V., Makarov F.V., Karpuk L.A. Prospects for the Use of Silicon Nitride Modified with Highly Enriched Nitrogen-15 Isotope in the Manufacture of Fuel Rod Claddings. *Analitika: analiticheskiye metody i pribory*, 2021, vol. 11, no. 3, pp. 208–217.
14. Panov A.D., Panova I.M. Tribological Features of Structural Ceramic Materials in Plain Bearings. *Naukovedenie*, 2015, vol. 7, no. 1, pp. 1–9. Available at: <https://naukovedenie.ru> (accessed: July 16, 2025). DOI: 10.15862/78TVN115.
15. Takadoun J., Houmid-Bennani H., Mairey D. The wear characteristics of silicon nitride. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, vol. 18 (5), pp. 553–556. DOI: 10.1016/S0955-2219(97)00157-X.
16. Yao J., Wu Y., Sun J. et al. Friction and wear characteristics of silicon nitride ceramics under dry friction condition. *Materials Research Express*, 2021, no. 8, pp. 1–12. DOI: 10.1088/2053-1591/abe8ab.
17. Shpenev A.G. Friction and wear of fiber composites with abrasive particles on contact surface. *Journal of Friction and Wear*, 2018, vol. 39, pp. 188–194. DOI: 10.3103/s106836661803011x.
18. Xing Y., Deng J., Wu Z., Wu F. High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction. *Optics & Laser Technology*, 2017, vol. 93, pp. 24–32. DOI: 10.1016/j.optlastec.2017.01.032.
19. Sevostyanov N.V., Budanova E.S., Khvatov V.D., Fomichev A.N. Tribotechnical features of metal composite materials reinforced with nitrides. *Trudy VIAM*, 2025, no. 2 (144), pp. 100–111. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2025-0-2-100-111.
20. Burkovskaya N.P., Sevostyanov N.V. Cermets for plain bearings (review). *Trudy VIAM*, 2023, no. 3 (121), pp. 84–94. Available at: <http://www.viam-works.ru> (accessed: March 04, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2023-0-3-84-94.
21. Sevostyanov N.V., Burkovskaya N.P., Medvedev P.N., Budanova E.S. Coefficient of friction at low sliding speeds of single-crystal aluminum oxide paired with metal and polymer materials. *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: September 03, 2025). DOI: 10.18577/2307-6046-2024-0-5-61-70.
23. Kostetsky B.I. *Friction, lubrication, and wear in machines*. Kyiv: Tekhnika, 1970, 395 p.

24. Yamaguchi Y. *Tribology of plastic materials: their characteristics and applications to sliding components*. Elsevier, 1990, vol. 16, 362 p.
25. *Handbook of polymer tribology*. Ed. S.K. Sinha. Delhi: World Scientific, 2018, 736 p.
26. Stachowiak G., Batchelor A.W. *Engineering tribology*. London: Butterworth-Heinemann, 2025, 884 p.
27. Inagaki M. *Carbon materials science and engineering: from fundamentals to applications*. Beijing: Qing Years University Publishing Co., Ltd., 2006, 542 p.
28. Pierson H.O. *Handbook of carbon, graphite, diamonds and fullerenes: processing, properties and applications*. New Jersey: William Andrew, 2012, 417 p.
29. Johnson K.L. *Contact mechanics*. Cambridge: Cambridge University press, 1987, 452 p.

Информация об авторах

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

Пастух Екатерина Сергеевна, техник 1 категории, НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Щеголева Наталья Евгеньевна, начальник сектора, к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, admin@viam.ru

Вершинин Дмитрий Игоревич, ведущий научный сотрудник, 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, First Category Technician, NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Natalia E. Shchegoleva, Head of Sector, Candidate of Sciences (Tech.), NRC «Kurchatov Institute» – VIAM, admin@viam.ru

Dmitry I. Vershinin, Leading Researcher, 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 03.10.2025; получена после доработки 10.11.2025; одобрена и принята к публикации после рецензирования 14.11.2025.
The article was submitted 03.10.2025; received in revised form 10.11.2025; approved and accepted for publication after reviewing 14.11.2025.