

УДК 666.7

И.О. Беляченков<sup>1</sup>, Н.Е. Щеголева<sup>1</sup>, А.С. Чайникова<sup>1</sup>, М.Л. Ваганова<sup>1</sup>, А.А. Шавнев<sup>1</sup>

**НИТРИДОКРЕМНИЕВЫЕ КЕРАМИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ  
ДЛЯ ПОДШИПНИКОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД  
И СПОСОБЫ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-7-42-49

*Рассмотрены материалы, применимые для создания подшипников авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Показаны преимущества использования керамических материалов при создании подшипников по сравнению с традиционными сталями и сплавами. Рассмотрены методы получения керамических материалов на основе нитрида кремния. Показана перспективность создания высокотемпературных износостойких керамических материалов на основе нитрида кремния триботехнического назначения. Приведены данные по разработке нитридокремниевых керамических материалов с сухими смазками.*

**Ключевые слова:** газотурбинные двигатели, подшипники качения, гибридные подшипники, керамика, нитрид кремния, сухие смазки.

I.O. Belyachenkov<sup>1</sup>, N.E. Schegoleva<sup>1</sup>, A.S. Chainikova<sup>1</sup>, M.L. Vaganova<sup>1</sup>, A.A. Shavnev<sup>1</sup>

**SILICON NITRIDE CERAMIC MATERIALS  
FOR AVIATION GTE BEARINGS  
AND METHODS OF MANUFACTURING (review)**

*Considered materials applicable to the creation of bearings of aircraft gas turbine engines (GTE). The advantages of using ceramic materials are shown in comparison with traditional steels and alloys. The methods of obtaining ceramic materials based on silicon nitride are considered. The prospects of creating high-temperature wear-resistant ceramic materials based on silicon nitride for tribological purposes are shown. The data on the development of silicon nitride ceramics with dry lubricants are given.*

**Keywords:** gas turbine engines, rolling bearings, hybrid bearings, ceramics, silicon nitride, dry lubricants.

---

<sup>1</sup>Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

**Введение**

Одним из путей развития современного материаловедения является создание подшипников качения авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) с повышенной работоспособностью, поскольку требования, предъявляемые к материалам подшипников, постоянно растут. Это обусловлено тем, что при высоких скоростях вращения увеличивается действие центробежных сил, что может привести к разрушению внутренних колец вследствие растрескивания и износа, «задира» центрирующих поверхностей, «раскатки» дорожек качения наружного кольца вследствие большого тепловыделения, что приводит к быстрому износу подшипника.

Для снижения центробежных сил от тел качения в перспективных ГТД целесообразно применение гибридных подшипников качения с телами качения из металлокерамики, керамики либо с пустотелыми телами качения. При этом подшипниковые материалы должны обладать высокой твердостью, высокими прочностными характеристиками

и износостойкостью, характеризоваться низкими значениями коэффициента трения, устойчивостью к воздействию агрессивных сред и повышенных температур.

Перспективным в данной области материалом для изготовления тел качения является нитрид кремния, отличающийся пониженной в 2,5 раза плотностью по сравнению с подшипниковой сталью и характеризующийся низкими значениями коэффициента трения.

В связи с этим в данной статье рассматриваются материалы, применимые для создания подшипников авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), показаны преимущества использования керамических материалов по сравнению с традиционными сталями и сплавами, а также перспективность применения керамики на основе нитрида кремния для создания износостойких керамических материалов триботехнического назначения. В статье также рассмотрены методы получения керамических материалов на основе нитрида кремния.

### Материалы подшипников

В настоящее время в целях повышения производительности работы авиационных ГТД широко проводятся исследования по применению в конструкции ответственных узлов материалов на основе керамики и керамических композиционных материалов, в том числе высокотемпературных [1–5]. Большая доля исследований направлена на совершенствование подшипниковых материалов, поскольку предъявляемые к ним требования постоянно растут.

Широко применяемыми материалами для производства подшипников авиационных ГТД являются высокоуглеродистые хромистые твердокалящиеся стали, низкоуглеродистые легированные конструкционные стали с поверхностным упрочнением, теплопрочные и коррозионностойкие высокоуглеродистые легированные стали и сплавы. Разрабатываются также новые теплостойкие подшипниковые стали и органопластики для высоконагруженных узлов трения [6–9].

С целью снижения центробежных нагрузок и повышения работоспособности в настоящее время в ведущих странах мира такими компаниями, как SKF (Швеция), GE Aviation (США), Snecma (Франция) и др., проводятся работы по созданию гибридных подшипников с керамическими телами качения. В России же отсутствует полный цикл производства гибридных подшипников, поскольку отсутствует производство керамических тел качения. Поэтому актуальной является задача анализа керамических материалов, перспективных для изготовления отечественных гибридных подшипников, и методов их получения.

В качестве неметаллических подшипниковых материалов на практике используются керамики на основе карбида кремния SiC, оксидов циркония ZrO<sub>2</sub> или алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и нитрида кремния Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>. В табл. 1 приведены свойства некоторых керамических материалов, применяемых в производстве подшипников в сравнении со сталью [10, 11].

Таблица 1

Свойства керамических подшипниковых материалов

Свойства	Значения свойств для материала				
	сталь ЭИ347-Ш	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> (ГП*)	SiC (ГП)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ZrO <sub>2</sub> (частично стабилизированный)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	7,6	3,25	3,1–3,2	3,7–4,3	6,1
Коэффициент интенсивности напряжений K <sub>1с</sub> , МПа √м	12–16	5–8	4–6	3–5	8,0
Твердость HRC при 20°C	59–65	70–78	85–95	70–74	70–72
Коэффициент трения	0,54	0,17	0,14–0,16	0,14	0,15–0,2
Износостойкость, г (без смазки при нагрузке 30 Н в течение 1 ч)	0,004	0,0008	–	0,0006	–

\* ГП – горячее прессование.

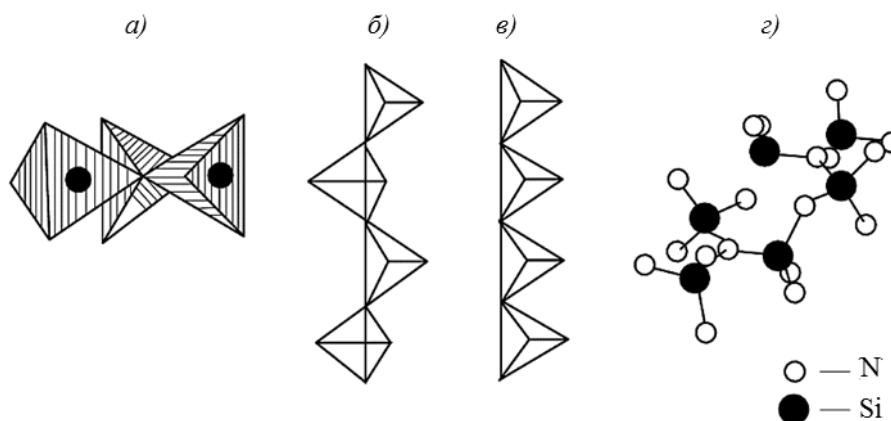
Однако наибольший интерес представляют материалы на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , поскольку нитрид кремния, помимо высоких эксплуатационных характеристик, является особым типом керамики, обладающим свойством самоусиления (армирование за счет вытянутой формы кристаллов). В 1960–1970 гг. компания Marlin Rockwell Corp. (MRC) группы SKF разработала первые керамические подшипники. Гибридный подшипник с разрезным внутренним кольцом был изготовлен MRC для программы испытаний, финансируемой правительством США. В 1984 г. группой SKF была продемонстрирована длительная эксплуатация нитрида кремния в подшипнике с использованием пластичной смазки при температурах  $>500^\circ\text{C}$  [12]. В настоящее время из нитрида кремния изготавливают шарики и ролики подшипников, а иногда и цельные подшипники. На втором этапе выполнения программы ИНПТЕТ фирма Pratt&Whitney (PW) создала и провела испытания газогенератора ХТС 66/1, в составе которого применены гибридные керамические подшипники из нитрида кремния. Аналогичные подшипники с ресурсом не менее 4000 ч используются и в двигателе F 136, являющемся альтернативным двигателем для самолетов JSF [13].

### Нитрид кремния

Нитрид кремния представляет собой соединение, химический состав которого выражается формулой  $\text{Si}_3\text{N}_4$  – единственное химическое соединение, образуемое кремнием с азотом. Существует две модификации нитрида кремния:  $\alpha$  (тригональная сингония) и  $\beta$  (гексагональная). Основным элементом структуры является тетраэдр  $[\text{SiN}_4]$ . Структурно  $\alpha$ - и  $\beta$ -модификации отличаются расположением тетраэдров вдоль оси  $c$  (см. рисунок). При 293 К более стабильной фазой является  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Переход  $\alpha \rightarrow \beta$  является необратимым (монотропным). Данный переход активно осуществляется при перекристаллизации, т. е. путем растворения – кристаллизации в присутствии жидкой фазы. В противном случае переход протекает лишь в условиях довольно высоких давлений и температур.

Нитрид кремния – как тугоплавкое соединение с преимущественно ковалентным типом связи – характеризуется низкими плотностью и температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), высокими значениями характеристик упругости, твердости и жаростойкости. Вследствие этого материалы на основе нитрида кремния особенно перспективны для высокотемпературного конструкционного применения.

Природные запасы нитрида кремния весьма скудны: минерал ниерит встречается в виде включений в метеоритах [14], поэтому в качестве сырья для производства нитридокремниевых керамик используются синтетические порошки  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

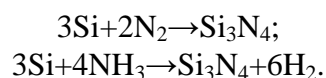


Структура нитрида кремния:

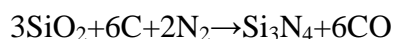
$a$  – тройка из тетраэдров  $\text{SiN}_4$ ;  $b$ ,  $c$  – схема расположения тетраэдров вдоль оси  $c$  в  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазах;  $d$  – элементарная ячейка  $\beta$ - $\text{Si}_3\text{N}_4$  [15]

Впервые нитрид кремния был получен в 1844 г. В. Бальменом в результате нагрева элементарного кремния в среде азота, выделяющегося при разложении цианистого калия. В то время появлялись работы, посвященные нитриду кремния как перспективному удобрению для повышения урожайности в сельском хозяйстве. Однако из-за своей термической и химической стабильности нитрид кремния так и не стал эффективным удобрением.

Среди методов синтеза порошков нитрида кремния наиболее экономически выгодным считается процесс самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС). Еще одно достоинство метода СВС заключается в том, что при использовании чистого исходного сырья можно получить порошок нитрида кремния с низким содержанием в нем примесей – в частности, кислорода. Метод СВС реализует прямой синтез компонентов по реакциям:

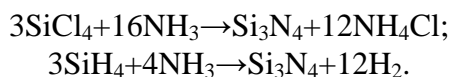


Карботермическое восстановление оксида кремния в среде азота по реакции



позволяет использовать недефицитное сырье и даже отходы, однако получаемые порошки содержат большое количество примесей и требуют очистки травлением в кислотах.

Представляют интерес ультрадисперсные порошки нитрида кремния с размером частиц <100 нм, получаемые методом газофазного синтеза. Суть данного метода заключается в осуществлении реакции между парами тетрахлорида кремния или силана, а также их производных с аммиаком при плазмохимическом или лазерном нагреве:



### Способы получения и свойства керамических материалов на основе нитрида кремния

Ввиду ковалентного характера связей нитрид кремния обладает высокой температурой хрупко-вязкого перехода и низкой диффузионной подвижностью. В связи с этим получение нитридокремниевых материалов с относительной плотностью >85% даже при высоких температурах спекания достаточно затруднительно. Для интенсификации спекания порошков  $\text{Si}_3\text{N}_4$  в них вводят оксидные спекающие добавки [14–20]:  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CeO}_2$ ,  $\text{La}_2\text{O}_3$  и др., а также их композиции. Принцип их действия заключается в образовании жидкой фазы при взаимодействии с  $\text{SiO}_2$  и оксинитридами, присутствующими на поверхности частиц  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Подробно механизм жидкофазного спекания нитрида кремния с оксидными спекающими добавками изучен в работе [20]. Помимо оксидных возможно применение нитридных спекающих добавок, таких как  $\text{AlN}$ ,  $\text{YN}$ ,  $\text{ZrN}$  и др. При выборе количества спекающих добавок надо принимать во внимание, что для сохранения высоких механических характеристик при высоких температурах необходимо минимизировать количество спекающих добавок. Однако при этом могут возникать трудности в достижении высокой относительной плотности спеченных материалов.

Основными методами получения керамических материалов на основе нитрида кремния являются:

- горячее литье термопластичных шликеров;
- литье водных шликеров в пористые формы;
- мундштучное прессование;
- реакционное спекание;
- горячее прессование в графитовых пресс-формах;
- горячее изостатическое прессование в эластичных формах;
- плазменное распыление кремния на стальные формы с солевым покрытием с последующим азотированием [21].

Горячее литье термопластичных шликеров позволяет получать изделия сложных конфигураций. Шликер представляет собой дисперсную систему, состоящую из порошка твердого материала (дисперсная фаза) и технологической связки (дисперсионная среда). В качестве основы термопластичных связок при горячем литье обычно используют парафин благодаря его низкой температуре плавления, достаточной механической прочности в твердом состоянии, химической инертности.

Основным методом изготовления полуфабрикатов в технологии горячего литья является литье под давлением, осуществляемое путем заполнения металлической формы расплавленным шликером с охлаждением его в форме под давлением до полного затвердевания.

Отформованные полуфабрикаты затем подвергаются реакционному или обычному спеканию. Такие материалы характеризуются низкими значениями плотности (80–85% от теоретической).

Литье водных шликеров в пористые формы применяют для получения тонкостенных изделий сложной формы с внутренними полостями.

Мундштучное прессование позволяет получать вытянутые изделия из нитрида кремния, такие как прутки, трубки, полосы. Метод заключается в выдавливании смеси порошка с пластификатором через мундштук (фильеру).

Получать керамику из нитрида кремния с плотностью, близкой к теоретической, и прочностью более 600–700 МПа стало возможным с появлением метода горячего прессования. Однако данный метод требует применения высоких значений температур и давления, а также не позволяет получать изделия сложной формы.

Наряду с методом горячего прессования для спекания порошков на основе нитрида кремния применяют метод горячего изостатического прессования, позволяющий получать изделия сложной формы и без использования спекающих добавок. Данный метод заключается во всестороннем сжатии изделия инертными газами, выполняющими роль рабочей среды, и одновременном нагреве. Для получения изделий сложной геометрической формы используют гибкую форму, передающую давление газа на изделие, которое предварительно спекают или прессуют в среде азота до необходимой степени. Для реализации данного метода, однако, необходимо применение повышенных температур и давлений.

В табл. 2 представлены свойства керамических материалов на основе нитрида кремния, полученных разными способами, показаны преимущества и недостатки каждого метода. Видно, что для получения материалов с относительной плотностью, близкой к 100%, требуется применение методов, предусматривающих приложение давления, а также введение спекающих добавок.

Если рассматривать вопрос получения керамических тел вращения, то наиболее подходящими для этого являются методы горячего шликерного литья под давлением с последующим спеканием или горячее изостатическое прессование.

Таблица 2

## Свойства керамических материалов на основе нитрида кремния

Метод консолидации	Горячее прессование	Горячее изостатическое прессование		Реакционное связывание	Реакционное связывание+ спекание
		спеченной заготовки	прессованной заготовки		
Исходные порошки	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Si	Si+добавки
Содержание добавок, % (объемн.)	2–15	2–15	0–8	0	3–15
Термическая обработка	1500–1800°C, одноосное прессование в графитовой пресс-форме	Спекание до закрытой пористости при 1600–1800°C, давление N <sub>2</sub> – до 0,3 МПа; ГИП: 1750–2000°C, давление газа – до 200 МПа	1750–2000°C, давление газа – до 200 МПа	1200–1450°C, до 100 ч	1200–1450°C, до 100 ч; 1600–1800°C, давление N <sub>2</sub> – до 0,3 МПа
Относительная плотность, %	~100	~100	~100	70–88	95–100
Прочность, МПа (20°C)	800–1500	800–1500	~500 (без добавок); 800–1500 (с добавками)	150–350	500–1000
Коэффициент интенсивности напряжений K <sub>Ic</sub> , МПа√м	5–8	5–11	~3 (без добавок); 5–8 (с добавками)	2–4	5–11
Достоинства	Высокие степень уплотнения и прочность	Получение изделий сложной формы, высокая прочность	Получение материалов без спекающих добавок	Усадка ~0%, недорогое сырье, относительная дешевизна метода	Небольшая усадка, недорогое сырье
		Низкое содержание спекающих добавок			
Недостатки	Получение изделий только простой формы, низкая производительность	Высокая стоимость процесса	Высокая стоимость процесса	Низкая прочность, низкая твердость, пористость	Длительный процесс

## Материалы на основе нитрида кремния с сухими смазками

В подшипниках, работающих при высоких температурах (например, в ГТД с высоким коэффициентом полезного действия, где частота вращения вала превышает 30 000 об/мин), часто неэффективно применение жидких смазок, максимальная рабочая температура которых составляет ~350°C. При высоких температурах также невозможно применение технологии газовой смазки. В этом случае достаточно перспективно использование материалов, в состав которых введены компоненты, выступающие в роли твердой смазки. Композиционные материалы, содержащие твердые смазки, могут

иметь полимерную, металлическую, интерметаллидную или керамическую матрицу. Однако для наиболее высокотемпературного применения целесообразно использовать керамическую матрицу – например, на основе  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [22, 23].

Для снижения трения и уменьшения износа в условиях сухого трения, в нитридокремниевую керамику вводят графит, содержащий  $\text{NiCl}_2$ , гексагональный нитрид бора h-BN, частицы серебра Ag, меди Cu, а также нитрид титана TiN [24–28].

### Заключения

Анализ научно-технической литературы показал, что вопрос создания отечественных гибридных подшипников авиационных ГТД в настоящее время остается открытым, поэтому проведение работ в данной области является актуальным.

Показано также, что наиболее перспективным материалом для создания керамических тел качения гибридных подшипников является нитрид кремния с возможным применением сухих смазок в своем составе.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щеголева Н.Е., Орлова Л.А., Суздальцев Е.И. Радиопрозрачная стеклокерамика на основе стронцийалюмосиликатного стекла // Огнеупоры и техническая керамика. 2016. №6. С. 31–38.
3. Севастьянов В.Г., Симоненко Е.П., Симоненко Н.П., Гращенков Д.В., Солнцев С.Ст., Ермакова Г.В., Прокопченко Г.М., Каблов Е.Н., Кузнецов Н.Т. Получение нитевидных кристаллов карбида кремния с применением золь-гель метода в объеме SiC-керамики // Композиты и наноструктуры. 2014. Т. 6. №4. С. 198–211.
4. Каблов Е.Н., Жестков Б.Е., Гращенков Д.В., Сорокин О.Ю., Лебедева Ю.Е., Ваганова М.Л. Исследование окислительной стойкости высокотемпературного покрытия на SiC-материале под воздействием высокоэнтальпийного потока // Теплофизика высоких температур. 2017. Т. 55. №6. С. 704–711.
5. Евдокимов С.А., Щеголева Н.Е., Сорокин О.Ю. Керамические материалы в авиационном двигателестроении (обзор) // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №12 (72). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-12-54-61.
6. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: Авиадвигатель, 2006. С. 278–280.
7. Громов В.И., Курпякова Н.А., Коробова Е.Н., Седов О.В. Новая теплостойкая сталь для авиационных подшипников // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №2 (74). Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-17-23.
8. Кулагина Г.С., Железина Г.Ф., Левакова Н.М. Антифрикционные органопластики для высоконагруженных узлов трения // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2019. №2 (74). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-2-89-96.
9. Макаrchук В.В. Стратегия развития методов расчета и конструирования высокоскоростных подшипников аэрокосмического применения // Авиационная и ракетно-космическая техника. 2009. №3 (19). С. 361–365.
10. Шевченко В.Я. Введение в техническую керамику. М.: Наука, 1993. 112 с.
11. Критский В.Ю., Зубко А.И. Исследование возможности использования керамических авиационных подшипников скольжения нового поколения в конструкциях опор роторов газотурбинных двигателей // Двигатель. 2013. №3. С. 24–26.

12. Pallini R.A. Turbine engine bearings for ultra-high temperatures // SKF Ball Bearing Journal. 1989. Vol. 234. P. 12–15.
13. Specialty Products Catalog // The Barden Corporation [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bardenbearings.com> (дата обращения: 10.03.2019).
14. Petzow G., Herrmann M. Silicon nitride ceramics // High performance non-oxide ceramics II. Berlin, Heidelberg: Springer, 2002. P. 47–167.
15. Андриевский Р.А. Нитрид кремния – синтез и свойства // Успехи химии. 1995. Т. 64. №4. С. 311–329.
16. Liu X.J., Huang Z.Y., Ge Q.M. et al. Microstructure and mechanical properties of silicon nitride ceramics prepared by pressureless sintering with MgO–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> as sintering additive // Journal of the European Ceramic Society. 2005. Vol. 25. No. 14. P. 3353–3359.
17. Tatarko P., Kašiarová M., Dusza J. et al. Wear resistance of hot-pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiC micro/nanocomposites sintered with rare-earth oxide additives // Wear. 2010. Vol. 269. No. 11. P. 867–874.
18. Herrmann M., Shen Z., Schulz I. et al. Silicon nitride nanoceramics densified by dynamic grain sliding // Journal of Materials Research. 2010. Vol. 25. No. 12. P. 2354–2361.
19. Bal B.S., Rahaman M. The rationale for silicon nitride bearings in orthopaedic applications // Advances in Ceramics-Electric and Magnetic Ceramics, Bioceramics, Ceramics and Environment. IntechOpen, 2011. P. 421–432.
20. Перевислов С.Н. Механизм жидкофазного спекания карбида и нитрида кремния с оксидными активирующими добавками // Стекло и керамика. 2013. №7. С. 34–38.
21. Лысенков А.С. Конструкционная керамика на основе нитрида кремния с добавкой алюминатов кальция: дис. ... канд. техн. наук. М., 2014. 139 с.
22. 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: электрон. науч.-технич. журн. 2018. №7 (67). Ст. 08. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 10.03.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-7-69-77.
23. Zhu S., Cheng J., Qiao Z., Yang J. High temperature solid-lubricating materials: A review // Tribology International. 2018. Vol. 133. P. 206–223.
24. Gangopadhyay A., Jahanmir S., Peterson M.B. Self-lubricating ceramic matrix composites // Friction and wear of ceramics. 1994. P. 163–197.
25. Carrapichano J.M., Gomes J.R., Silva R.F. Tribological behaviour of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>–BN ceramic materials for dry sliding applications // Wear. 2002. Vol. 253. No. 9–10. P. 1070–1076.
26. Liu J., Yang J., Yu Y. et al. Self-Lubricating Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-based composites toughened by in situ formation of silver // Ceramics International. 2018. Vol. 44. No. 12. P. 14327–14334.
27. Sun Q., Yang J., Yin B. et al. High toughness integrated with self-lubricity of Cu-doped Sialon ceramics at elevated temperature // Journal of the European Ceramic Society. 2018. Vol. 38. No. 7. P. 2708–2715.
28. Sun Q., Wang Z., Yang J. et al. High-performance TiN reinforced Sialon matrix composites: A good combination of excellent toughness and tribological properties at a wide temperature range // Ceramics International. 2018. Vol. 44. No. 14. P. 17258–17265.