

## **Эффективность применения наноструктурных композиционных материалов и изделий из них в авиационной промышленности**

**Климов А. К.<sup>1\*</sup>, Климов Д. А.<sup>2</sup>, Низовцев В. Е.<sup>2\*\*</sup>, Ухов П. А.<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*Компания Diaprom, Промышленная ул., 4, Москва, 115477, Россия*

<sup>2</sup>*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, ЦИАМ, Авиамоторная ул., 2, Москва, 111116, Россия*

<sup>3</sup>*Московский авиационно-технологический институт имени К.Э. Циолковского, МАТИ, Оршанская ул., 3, Москва, 121552, Россия*

*\*e-mail: diaprom1@mail.ru*

*\*\*e-mail: 3991258@mail.ru*

### **Аннотация**

В статье приводится краткий обзор свойств и областей применения разработанных и исследованных наноструктурированных сверхтвёрдых композиционных материалов и покрытий на их основе в ведущих организациях авиационного моторостроения одними из первых ступивших на путь инновационного развития: ФГУП «ЦИАМ», ОАО «Кузнецов», ООО «Диапром». Проведенные исследовательские работы позволяют сделать вывод о больших перспективах применения наноструктурированных композиционных материалов на основе карбидов, карбонитридов и диборидов переходных и тугоплавких металлов для авиакосмических объектов.

### **Ключевые слова:**

наноструктурированные материалы, тугоплавкие карбиды, карбонитриды, дибориды, коэффициент трения, дисперсно-упрочнённый, антифрикционные материалы, антифрикционные покрытия, интеркерамиды, интерметаллиды

## 1. Введение

Одним из перспективных направлений повышения технического уровня летательного аппарата, в том числе авиационных двигателей, и их надежности, наработки на отказ, является применение перспективных сверхтвердых, высокотемпературных композиционных материалов.

Высокая твердость, термостойкость, а также благоприятное сочетание других физико-механических параметров сверхтвердых композиционных материалов на основе карбонитрида титана, карбида кремния и диборида титана позволяют минимизировать износ узлов трения, повысить надежность и ресурс деталей летательного аппарата и механизмов авиационного двигателя.

Основными факторами, определяющими и стимулирующими применения сверхтвердых композиционных материалов в авиации, являются:

- увеличение тяговых характеристик;
- снижение весовых и габаритных показателей;
- значительное увеличение ресурса деталей и узлов;
- улучшение экологии окружающей среды.

Научная концепция разработки таких материалов выражается в том, что в их матрицы внедрены частицы другого вещества нанодисперсного диапазона (от 4 нм до 1,0 мкм), активирующих образование интеркерамидных и интерметаллидных соединений. При механическом нагружении таких материалов основную нагрузку воспринимает материал матрицы, в которой диспергированы наночастицы другого вещества, практически нерастворимого в ней. В результате чего создается структура эффективно сопротивляющаяся пластической деформации и термическим напряжениям.

## 2. Композиционные материалы и их применение в технике.

Композиционные материалы состоят из смеси кристаллических зерен, стекловидной фазы, интеркерамидных и интерметаллидных соединений и др. фракций. Механические, теплофизические и даже оптические свойства композиционных материалов в основном зависят от сочетания их микроструктуры и параметров кристаллической решетки.

В технологиях производства высокопрочных и износоустойчивых композиционных материалов используются нанопорошки высокой степени чистоты, гранулированные в зерна

(гранулы) определенной формы и определенного состава. При этом частицы (гранулы) спекаются в специальных высокотемпературных печах, образуя сложный материал малой пористости, равномерной структуры с низкой концентрацией напряжений.

Для получения особо износостойких материалов с необходимыми свойствами нашим коллективом разработаны инновационные технологии. Полученные с использованием таких технологий материалы обладают функциональной гомогенной микроструктурой. Такие технологии позволяют управлять коэффициентами трения, теплопроводности, радиопоглощением, электропроводностью и прочностью создаваемых материалов. Проанализируем далее некоторые свойства таких наноструктурированных материалов.

### ***Карбиды кремния***

В настоящее время с использованием разработанных технологий авторам удалось получить наноструктурированные дисперсно-упрочненные реакционно-спеченные карбиды кремния. Методами спектральных и микроскопических анализов установлено, что в состав таких карбидов входят: первичный карбид кремния SiC, вторичный карбид кремния SiC, а также вискеры карбида кремния SiC (рис.1).

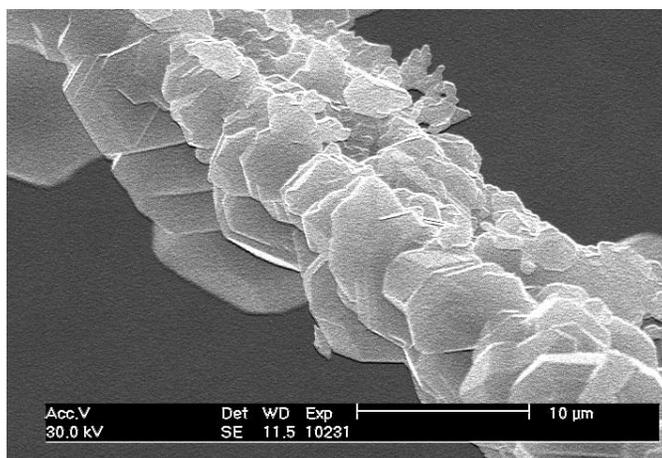
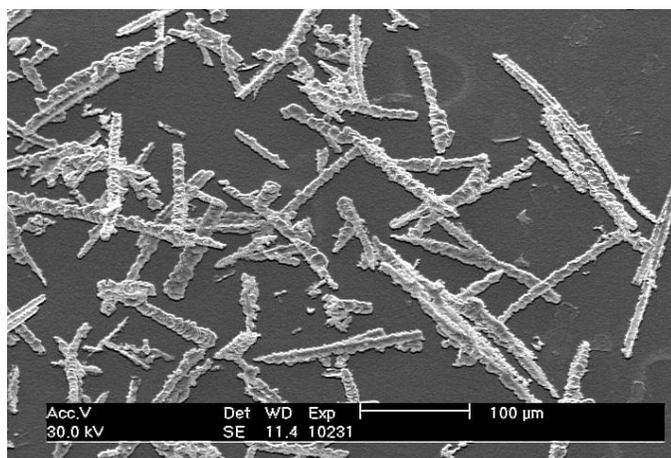


Рис. 1 Вискеры поликристаллического карбида кремния

Такой карбид кремния изготавливается технологией жидкофазного реакционного спекания с предварительной газофазной термохимической активацией. Технология позволяет получать материалы с содержанием карбидной фазы от 85 до 97% (по массе) и пористостью, приближающейся к нулю. При этом такая технология позволяет получать карбиды кремния, легированные бором, углеродом, алюминием, соединениями переходных металлов. Это даёт возможность управлять в широких пределах структурой и фазовым составом композиционных

материалов. Авторами отработаны технологии по изменению гранулометрического состава первичного и вторичного карбида кремния, содержанию углеродной составляющей в исходной шихте, пористости заготовки. В итоге, благодаря полученным близким кристаллохимическим и физическим свойствам, высокой адгезии кремния и карбида кремния, их межфазное взаимодействие находится на уровне химических связей (эпитаксиального сращения решеток кремния и карбида кремния). Это и обуславливает высокую, характерную для разработанного композиционного материала, прочность межфазных границ, жесткость и монолитность структуры, высокую теплопроводность.

Кроме того, это обеспечивает необходимую термостойкость, высокое сопротивление термоудару, исключает образование трещин.

В настоящее время все больше внимания привлекает карбид кремния как наиболее перспективный композиционный материал для узлов и деталей газотурбинных двигателей и установок. Особенно широкое применение карбид кремния и его различные модификации находят в конструкциях летательных аппаратов, работающих с повышенной температурой в условиях высокой нагрузки и повышенного износа (рис 2,3,4,5). Это связано с тем, что, SiC обладает экстремальными высокотемпературными антифрикционными свойствами. Уже сегодня он постоянно применяется в радиальных и торцевых подшипниках скольжения, рабочих кольцах торцовых уплотнений, в том числе и газодинамических. Пары скольжения с низким коэффициентом трения способны существенно снизить энергопотребление механизмов, обеспечить высокий уровень надежности их работы и значительно повысить их долговечность.



Рис. 2 Торцевые уплотнения нового поколения из композиционного материала на основе

карбида кремния



Рис. 3 Торцовые подшипники скольжения нового поколения с управляемым коэффициентом трения из композиционного материала на основе карбида кремния



Рис. 4 Защитные пластины камеры сгорания нового поколения для газотурбинного двигателя из композиционного материала на основе карбида кремния



Рис. 5 Композиционный пенокарбид кремния для рассеивания и отражения тепловых потоков.

Этот вопрос является актуальным в постановке широкомасштабных НИР.

В результате таких исследований уже сегодня авторами разработаны подшипники скольжения с низким коэффициентом трения и высоким ресурсом работы в высокотемпературных средах.

Некоторые полученные механические и теплофизические свойства композиционного материала на основе наноструктурированного дисперсно-упрочненного карбида кремния представлены в таблице 1.

В сочетании с набором других характеристик карбиды обеспечивают высокий ресурс работы механизмов, который на порядок выше существующих в настоящее время традиционных конструкционных материалов. Кроме того, наноструктурированные дисперсно-упрочненные реакционно-спеченные карбиды кремния остаются самыми перспективными для применения в качестве высокотемпературных пар трения из-за низкой себестоимости, доступности сырья, высокой износостойкости и коррозионной стойкости, а также из-за относительно небольшой плотности и экологической чистоты его производства.

В процессе выполнения данных исследований авторами исследованы и разработаны материалы и конструкции пар трения (скольжения) с диапазоном изменения коэффициентов трения: от 0,01 до 0,25.

Эффективность разработанных антифрикционных узлов и конструкций подтверждена положительными результатами испытаний проведенных в ИМАШ РАН и ОАО «Кузнецов» в 2009-2011г.

Износостойкость по сравнению с закаленными сталями увеличилась от 10 до 20 раз.

Стала возможна работа изделий при температурах до 1400 градусов цельсия.

### ***Карбонитрид титана(TiCN) и диборид титана(TiB<sub>2</sub>)***

Широкое распространение до настоящего времени имели покрытия и композиционные материалы на основе карбида вольфрама. В сочетании с различными металлическими связками (чаще всего с кобальтом) WC успешно применяется для нанесения износостойких покрытий, работающих при нормальных и повышенных температурах. Однако, несмотря на высокую износостойкость, эти покрытия катастрофически окисляются при температуре выше 773 К. Кроме того, существенными недостатками карбида вольфрама является также дефицитность вольфрамового сырья и склонность к прихватуванию (сварке) пары скольжения в случае работы без смазки.

Разработанный наноструктурированный дисперсно-упрочненный карбонитрид титана не уступает карбиду вольфрама по механическим характеристикам и отличается более высокой температурой плавления, микротвердостью, не имеет склонности к прихватуванию, обладает более высоким температурным коэффициентом расширения, меньшим коэффициентом трения, меньшей плотностью, а главное - дефицит сырья для его производства отсутствует. Покрытие из карбонитрида титана (детонационное или плазменное напыление) TiCN обладает удовлетворительной термостойкостью и износостойкостью, более высокой температурой окисления и сравнительно высокой теплопроводностью.

Таким образом, композиционные материалы и покрытия на основе наноструктурированного дисперсно-упрочненного карбонитрида титана обладают более высокими эксплуатационными свойствами, чем материалы и покрытия такого же назначения на основе карбида вольфрама.



Рис. 5 Радиально-упорные подшипники скольжения для поворотных лопаток газотурбинного двигателя из композиционного материала на основе карбонитрида титана

В настоящее время авторами наряду с антифрикционными композиционными материалами на основе карбида кремния SiC и карбонитрида титана TiCN отрабатываются технологии получения наноструктурированного композиционного материала на основе карбонитрида-диборида титана.

Основные свойства композиционных материалов на основе карбонитрида титана и диборида титана представлены в таблице 1.

Табл. 1.

**Основные физико-механические свойства сверхтвердых композиционных материалов**

№ п/п	Наименование показателя	Композиты на основе карбида кремния	Композиты на основе карбонитрида титана	Композиты на основе диборида титана
1	Коэфф. лин. расш. (К л.р.)	2,4-3,6x10 <sup>-6</sup>	6-9,5x10 <sup>-6</sup>	7,5-10,5x10 <sup>-6</sup>
2	Коэфф. Трения (К тр.)	0,01-0,3	0,05-0,15	0,07-0,20
3	Плотность г/см. куб	2,9-3,1	5,5-6,0	5-5,5
4	Модуль упругости, ГПа	230-330	250	270
5	Твердость (H <sub>Ra</sub> )	88-94	80-92	80-92
6	Прочность (сигма изг.), МПа	300-500	1500-2200	1000-2000
7	Коэфф. теплопроводности Кт. (Вт/м град К)	140-200	20-40	65-75
8	Диапазон рабочих температур, град С	-50 – +1650	-50 - +950	-50 - +1100

Керамоматричные и металлокерамоматричные композиционные материалы, приведенные в таблице 1 могут соединяться в произвольном сочетании с помощью вакуумной диффузионной сварки по технологии, разработанной авторами.

### **3. Технология механической обработки высокотемпературных композиционных материалов.**

Технология механической обработки высокотемпературных наноструктурированных дисперсно-упрочненных композиционных материалов может существенно отличаться в зависимости от типа композиционного материала, является ли он керамоматричным или же металлокерамоматричным, содержащим интерметаллидные компоненты.

Для керамоматричных композиционных материалов наиболее эффективной черновой обработкой показали себя гидроабразивная, ультразвуковая, и глубинное шлифование.

Обработка лазером или плазмой не подошла для обработки керамоматричных композиционных материалов на основе карбидов и оксидов, но в то же время довольно

эффективно показала себя при обработке нитридных керамоматричных композиционных материалов.

Для металлокерамоматричных композиционных материалов с содержанием интерметаллидных компонентов наиболее эффективной черновой обработкой показали себя ультразвуковая и электроэрозионная.

В качестве финишной обработки для керамоматричных и металлокерамоматричных композиционных материалов наиболее подошли процессы шлифования абразивным инструментом с зёрнами высокопрочного кубического нитрида бора, в том числе с наложением ультразвука.

Производительность процесса шлифования и тонкой доводки высокотвёрдых композитов, а также качество обработки их поверхности напрямую зависит от характеристик обрабатывающего инструмента, удельной нагрузки на обрабатываемый материал в зоне обработки, скорости и траектории движения рабочей поверхности инструмента относительно обрабатываемой поверхности детали. На доводочных операциях эффективным оказалось так же ленточное шлифование и обработка мягкими податливыми абразивными инструментами на высоких оборотах.

#### **4. Технологии изготовления опытных образцов элементов конструкции авиационной техники из высокотемпературных композиционных материалов.**

Как известно, ресурс систем и агрегатов летательного аппарата, в том числе авиационного двигателя в значительной степени зависит от свойств конструкционных материалов, из которых изготавливаются их детали и узлы. При этом конструкционные материалы должны по максимуму отвечать следующим требованиям: повышенной теплопроводностью, минимальной плотностью, минимальными коэффициентами объёмного и линейного расширения, высокой износостойчивостью, твердостью и прочностью.

В целом, для решения проблемы применения новых высокотемпературных наноматериалов в элементах авиационной техники, способствующих снижению массы при повышении ресурса, были решены следующие задачи:

- разработаны технологии нанесения износостойких высокотемпературных покрытий на основе карбидов, карбонитридов, боридов и их функциональных композиций;

- разработаны композиции антифрикционных материалов с использованием углеродных нанотрубок, квазикристаллических структур типа Al-Cu-Fe и Al-Zn-Fe, наноструктурных добавок из карбидокремниевых волокон;

- изготовлены узлы трения редуктора привода вентилятора перспективного авиационного двигателя НК-93, проведены испытания на базе ОАО «Кузнецов» с учетом требований последних авиационных правил по сертификации авиационной техники и получены положительные заключения.

- изготовлены подшипники скольжения для экспериментального газотурбинного двигателя, проведены испытания на базе ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова с учетом требований последних авиационных правил по сертификации авиационной техники, и получены положительные заключения.

- в результате проведенных работ в ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова создан редуктор привода вентилятора авиационного двигателя нового поколения с учетом требований последних авиационных правил по сертификации авиационной техники.

Фотографии некоторых деталей, выполненных с покрытиями из высокотемпературных композиционных материалов представлены на рисунке 6, рисунке 7, рисунке 8, рисунке 9 и рисунке 10,11.



Рис. 6 Валы редуктора привода вентилятора авиационного двигателя НК-93 конструкции ОАО «Кузнецов» с покрытием из наноструктурированного дисперсно-упрочненного карбонитрида титана.



Рис. 7 Слева износостойкая втулка из наноструктурированного дисперсно-упрочненного карбида кремния для подшипника скольжения редуктора привода вентилятора авиационного двигателя НК-93 конструкции ОАО «Кузнецов».

Справа износостойкая карбидокремниевая втулка в сборе с шестерней стэнда редуктора привода вентилятора авиационного двигателя.



Рис. 8 Вал редуктора привода вентилятора авиационного двигателя НК-93 конструкции ОАО «Кузнецов» с защитным антифрикционным покрытием на основе карбида кремния

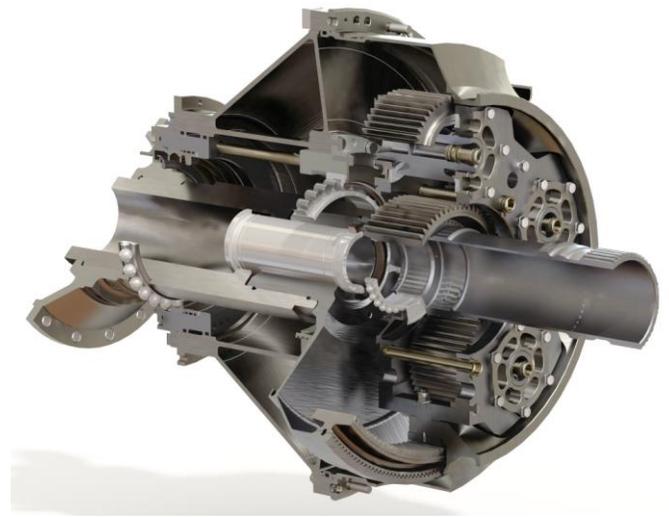


Рис. 9 Редуктор привода вентилятора авиационного двигателя нового поколения

В результате проведенных исследований предложена инновационная технология, позволяющая решать задачу управления рядом физико-механических свойств поверхностных слоёв деталей конструкций посредством наносимого слоя покрытия таких, как: коэффициенты трения, твердость, износостойкость.

Становится возможным применение в качестве несущей основы подшипника скольжения легких и высокопрочных титановых сплавов.

Коллектив авторов не останавливается на достигнутом и ведет активные работы по созданию материалов и технологий для высокотемпературных камер сгорания, соплового аппарата, лопаток и дисков турбины с возможностью работы при температурах до 2-х раз выше в сравнении с существующими.

## **Выводы.**

1. В результате проведения натурных испытаний антифрикционных покрытий в качестве подшипников скольжения в составе редуктора привода вентилятора авиационного двигателя установлено, что композиционные материалы, созданные на основе наноструктурированных дисперсно-упрочненных карбидных, карбонитридных и боридных соединений, имеют износ фрикционных пар в несколько раз меньше, чем у традиционно применяемых материалов, а также сохраняют работоспособность при повышенных температурах и нагрузках в условиях масляного голодания.

2. Наноструктурированные дисперсно-упрочненные материалы разрабатываемых композиций в силу своих экстремальных свойств и при дальнейшей отработке можно рекомендовать для изготовления высокопрочных и термостойких узлов и деталей авиационных двигателей в составе:

- редукторов - радиальные и торцевые подшипники скольжения, торцевые уплотнения и др.;
- топливных и других насосов, гидроцилиндров - износостойкие покрытия плунжерных рабочих пар трения, радиальные и торцевые подшипники скольжения, торцевые уплотнения;
- жаропрочных стенок реактивных сопел, камер сгорания;
- износостойких и термостойких покрытий изделий из легких высокопрочных титановых и алюминиевых сплавов;
- форсунок - распылителей топлива;
- лопаток и дисков турбины газотурбинного двигателя;
- высокотемпературных тормозных дисков и колодок летательных аппаратов;
- износостойких, коррозионностойких, отражающих, гидрофобных, антибликовых покрытий летального аппарата;

3. Наноструктурированные дисперсно-упрочненные материалы найдут широкое применение в элементах конструкций авиакосмических объектов.

4. В результате проводимых авторами работ создается научно-технический задел, способный в ближайшее время кардинально изменить конструктивный облик как авиационной техники, газотурбинных двигателей, так и авиакосмических объектов в целом.

## Библиографический список

1. В.Е. Низовцев, Б. Мыктыбеков, Д.А. Климов, А.А. Халутин, В.Н. Суслин, Технический отчет «Разработка подшипников скольжения с антифрикционными покрытиями на основе металлополимеров, керамополимеров или композиционных материалов с использованием квазикристаллов», ФГУП «ЦИАМ» им. П.И. Баранова, Москва, 2010г., инв. №13912.
2. А.К. Климов, Д.А. Климов, Е.А. Крылов, Ю.А. Перекатов, Композиционные материалы для двигателестроения. // «Автомобильная промышленность», 2003 №1, стр. 27-30.
3. Косолапова Т.Я., Федорус В.Б., Кузьма В.Б.- «Неорганические материалы», 1966г., т.2, №8, с. 1516-1520.
4. Гранов В.И., Глазков А.В.- «Неорганические материалы», 1975г., т.11, №2, с. 226-229.
5. «Исследование свойств материалов на основе карбида кремния», «Новые огнеупоры», №6, июнь 2009 г., Климов Д.А., Шкарупа И.Л., Плясункова Л.А., Шкарупа М.И.
6. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы // Москва, «Металлургия», 1977 г.