

УДК 621.452.3.01.03+620.22

## О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРИМЕНЕНИЯ НАНОСТРУКТУРНЫХ ГЕТЕРОФАЗНЫХ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В АВИАДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ

© 2015 В. Е. Низовцев, Д. А. Климов, А. Д. Бортников, О. В. Низовцева

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Дан краткий обзор свойств и областей применения разработанных и исследованных наноструктурированных сверхтвёрдых композиционных материалов и покрытий на их основе. Проведённые исследовательские работы позволяют сделать вывод о перспективности применения наноструктурированных композиционных материалов на основе карбидов, карбонитридов и диборидов тугоплавких металлов для авиакосмических объектов. Приоритетным направлением повышения технико-экономических показателей газотурбинных двигателей является применение новых композиционных конструкционных материалов, которые по своим основным физико-механическим свойствам превосходят традиционные в несколько раз. Многочисленные исследования в этой области свидетельствуют о том, что наибольшего прогресса при разработке новых перспективных конструкционных композиционных материалов следует ожидать на пути создания материалов на основе полимерных, металлических, интерметаллических и керамических матриц. В настоящее время прослеживается чёткая тенденция по созданию агрегатов и узлов газотурбинных двигателей и энергетических установок многократного запуска с большим ресурсом работы и повышенной долговечностью. Исследования по применению композиционных материалов нового поколения проводятся практически во всех развитых странах, в первую очередь, в США и Японии.

*Наноструктурированный материал и покрытие; тугоплавкий карбид; карбонитрид; диборид; коэффициент трения.*

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-122-127

### Введение

Одним из перспективных направлений повышения технического уровня авиационных двигателей, в частности их надёжности, является применение перспективных сверхтвёрдых высокотемпературных композиционных материалов.

Высокая твёрдость, термостойкость, а также благоприятное сочетание других физико-механических параметров сверхтвёрдых композиционных материалов на основе карбонитрида титана, карбида кремния и диборида титана позволяют минимизировать износ узлов трения, повысить надёжность и ресурс деталей [1].

Научная концепция разработки таких материалов выражается в том, что в их матрицы внедрены активирующие образования интеркерамидных и интерметаллидных соединений, частицы другого вещества нанодисперсного диапазона (от 4 до 100 нм). При механическом нагружении таких материалов основную нагрузку воспринимает материал матрицы, в который диспергированы наночастицы другого вещества, практически нерастворимого в ней. В результате создаётся структура,

эффективно сопротивляющаяся пластической деформации и термическим напряжениям [2, 3].

### Композиционные материалы и их применение в технике

Для получения особо износостойких высокотемпературных материалов с необходимыми свойствами в ФГУП «ЦИ-АМ им. П. И. Баранова» совместно с ООО «Дианпром» разработаны инновационные технологии. Такие технологии позволяют управлять коэффициентами трения, теплопроводности, электропроводностью и прочностью создаваемых материалов [4].

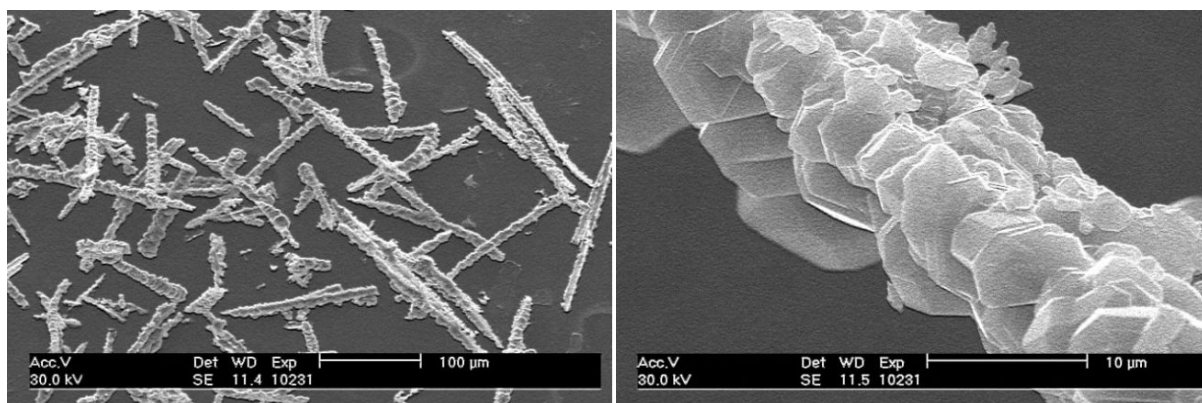
*Композиционные материалы на основе карбида кремния.* В настоящее время с использованием разработанных технологий удалось получить наноструктурированные дисперсно-упрочнённые реакционно-спечённые модифицированные композиционные материалы на основе карбида кремния. Методами рентгено-спектрального и рентгено-структурного анализов установлено, что в состав таких композиционных материалов входят: первичный карбид кремния SiC, вторичный

карбид кремния SiC, а также вискеры карбида кремния SiC (рис.1).

Композиционный материал на основе модифицированного карбида кремния изготавливается по технологии жидкофазного реакционного спекания с предварительной газофазной термохимической и механохимической активацией. Технология позволяет получать материалы с содержанием карбидной фазы от 85 до 97% (по массе) и пористостью, приближающейся к нулю [5]. Такая технология позволяет получать модифицированные карбиды кремния, легированные бором, углеродом, алюминием, соединениями переходных и редкоземельных металлов. Это даёт возможность управлять в широких пределах структурой и фазовым составом композиционных материалов. От-

работаны технологии управления изменением гранулометрического состава первичного и вторичного карбида кремния, содержания углеродной составляющей в исходной шихте, пористостью заготовки. Это и обуславливает высокую, характерную для разработанного композиционного материала, прочность межфазных границ, жёсткость и монолитность структуры, высокую теплопроводность. Кроме того, это обеспечивает высокую термостойкость, сопротивление термоудару, исключаящую образование трещин.

Особенно широкое применение карбид кремния и его различные модификации могут найти в конструкциях, работающих при повышенных температурах и высоких нагрузках (рис. 2 – 6).



*Рис. 1. Вискеры поликристаллического карбида кремния*



*Рис. 2. Торцовые уплотнения нового поколения (а)*

*и торцовые подшипники скольжения нового поколения с управляемым коэффициентом трения (б) из композиционного материала на основе карбида кремния*

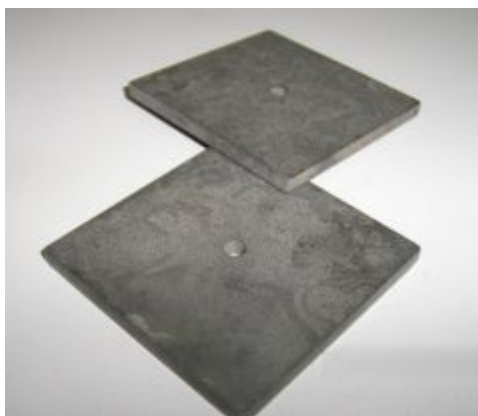


Рис. 3. Защитные пластины камеры сгорания нового поколения для газотурбинного двигателя из высокотемпературного композиционного материала на основе карбида кремния



Рис. 4. Лопатки соплового аппарата, изготовленные из высокотемпературного композиционного материала с применением аддитивных технологий

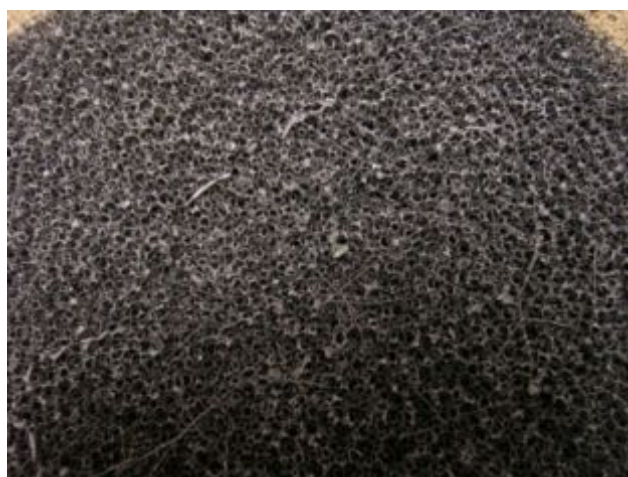


Рис. 5. Композиционный высокотемпературный пористый материал для рассеивания и отражения тепловых потоков



а



б

Рис. 6. Радиально-упорные подшипники скольжения из высокотемпературного композиционного материала для поворотных лопаток газотурбинного двигателя (а) и сферические подшипники створок сопла (б)

В результате проведённых исследований разработаны подшипники скольжения с низким коэффициентом трения и высоким ресурсом работы в высокотемпературных средах.

Эффективность разработанных антифрикционных узлов и конструкций подтверждена положительными результатами предварительных испытаний, проведённых в 2009-2011 гг.

Износостойкость деталей по сравнению с деталями из закалённых сталей увеличилась в 10-20 раз. Стала возможна работа изделий при температурах до 1400°C.

Композиционные материалы на основе карбонитрида титана (TiCN) и диборида титана (TiB<sub>2</sub>). Разработанный наноструктурированный дисперсно-упрочнённый композиционный материал на основе карбонитрида титана не уступает карбиду вольфрама по механическим характеристикам и отличается более высокой рабочей температурой, микротвёрдостью, не имеет склонности к схватыванию, обладает более низким температурным коэффициентом расшире-

ния, меньшим коэффициентом трения, более низкой плотностью, а главное – доступностью сырья для его производства. Покрытие из карбонитрида титана, полученное детонационным или плазменным напылением, обладает удовлетворительной термостойкостью и износостойкостью, высокой температурой окисления и сравнительно высокой теплопроводностью.

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

Керамоматричные и металлокерамоматричные композиционные материалы могут соединяться в произвольном сочетании с помощью вакуумной диффузионной сварки. Результаты испытаний, проведённых в ФГУП «ЦИАМ им. П. И. Баранова», ООО «Диалпром» и ИМАШ РАН, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Сравнительные физико-механические и теплофизические свойства композиционных материалов

№ п/п	Наименование показателя	Композиты на основе:			
		карбида кремния	карбонитрида титана	диборида титана	нитрида кремния
1	Коэффициент линейного расширения, 1/°C	2,4-3,6·10 <sup>-6</sup>	12·10 <sup>-6</sup>	15·10 <sup>-6</sup>	2,5·10 <sup>-6</sup>
2	Коэффициент трения	0,01-0,3	0,07-0,20	0,05-0,19	0,15-0,2
3	Плотность, г/см <sup>3</sup>	2,9-3,1	5,5-6,0	5-5,5	3,12
4	Модуль упругости, ГПа	350-400	490	480	120-298
5	Твёрдость, HRc	88-94	90-92	89-92	40-60
6	Предел прочности на изгиб, МПа	300-600	1500-2500	800-1300	200-800
7	Предел прочности на сжатие, МПа	2200	2600	2500	2500-3000
8	Коэффициент теплопроводности, Вт/м К	140-200	20-40	65-75	60
9	Трещиностойкость, K <sub>1c</sub> , МПа м <sup>0,5</sup>	6,8-7,0	7,0-9,0	7,0-10,0	8,0-9,0
10	Диапазон рабочих температур, °C	-50...+1650	-50...+1200	-50...+1150	-50...+1250

### Заключение

Для применения новых высокотемпературных наноматериалов в элементах авиационной техники, способствующих снижению массы при повышении ресурса:

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

- разработаны композиции антифрикционных материалов с использованием наноструктурных добавок из карбидокремниевых волокон и вискероов.

В результате проведённых работ в ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова» спроектирован редуктор привода вентилятора авиационного двигателя нового поколения,

включающий подшипники скольжения из композиционных материалов.

Проведённые исследования позволили предложить инновационную технологию, позволяющую решать задачи управления рядом физико-механических свойств поверхностных слоёв деталей посредством наносимого слоя покрытия, основными из которых являются: коэффициент трения, теплопроводность, твёрдость и износостойкость.

Ведутся активные работы по созданию материалов и технологий для высокотемпературных камер сгорания, соплового аппарата, лопаток и дисков турбины, работающих при существенно более высоких температурах, являющихся предельными для применяемых в настоящее время материалов.

### Библиографический список

1. Климов А.К., Климов Д.А., Крылов Е.А. Композиционные материалы для двигателестроения // Автомобильная промышленность. 2003. № 1. С. 27-30.

2. Косолапова Т.Я., Федорус В.Б., Кузьма В.Б. Неорганические материалы. 1966. Т. 2, № 8. С. 1516-1520.

3. Гранов В.И., Глазков А.В. Неорганические материалы. 1975. Т. 11, № 2. С. 226-229.

4. Шкарупа И.Л., Плясункова Л.А., Шкарупа М.И., Климов Д.А. Исследование свойств материалов на основе карбида кремния // Новые огнеупоры. 2009. № 6. С. 26-28.

5. Гнесин Г.Г. Карбидокремниевые материалы. М.: Металлургия, 1977. 215 с.

### Информация об авторах

**Низовцев Владимир Евгеньевич**, кандидат технических наук, начальник сектора, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). Область научных интересов: нанотехнологии, композиционные материалы.

**Климов Денис Александрович**, ведущий инженер, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). Область научных интересов: нанотехнологии, композиционные материалы.

**Бортников Андрей Дмитриевич**, инженер. Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [adb@ciam.ru](mailto:adb@ciam.ru). Область научных интересов: динамика и прочность.

**Низовцева Оксана Владимировна**, техник. Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). Область научных интересов: композиционные материалы.

## PROSPECTS OF APPLICATION OF NANOSTRUCTURED HETEROPHASE POLYFUNCTIONAL COMPOSITE MATERIALS IN AERO-ENGINE MANUFACTURING

© 2015 V. E. Nizovtsev, D. A. Klimov, A. D. Bortnikov, O. V. Nizovtseva

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The article provides a brief overview of the features and applications of developed and investigated nanostructured superhard composite materials and coatings on their basis. The research carried out makes it possible to draw a conclusion of great prospects of using nanostructured composite materials on the basis of carbides, carbonitrides and diborides of transitional and refractory metals for aerospace objects. The use of new composite structural materials is the top priority in the area of improving technical and economic parameters of gas turbine engines. These materials are superior to traditional materials by their basic physical and mechanical properties several-fold. Numerous studies in this field indicate that the greatest progress in the development of new advanced structural composite materials can be expected on the way to creating materials based on polymeric, metallic, intermetallic, and ceramic matrices. At present, there is a distinct trend towards the creation of units and assemblies of multiple-start gas turbine engines and power plants with longer life and increased durability. Research in the area of using new-generation composite materials is carried out in almost all developed countries, primarily in the United States and Japan.

*Nanostructured material and coating, refractory carbide, carbonitride, diboride, friction factor.*

### References

1. Klimov A.K., Klimov D.A., Krylov E.A. Composite Materials for Engine Manufacturing. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2003. No. 1. P. 27-30. (In Russ.)
2. Kosolapova T.Y., Fedorus V.B., Kuzma V.B. *Inorganic Materials*. 1966. V. 2, no. 8. P. 1516-1520.
3. Granov V.I., Glazkov A.V. *Inorganic Materials*. 1975. V. 11, no. 2. P. 226-229.
4. Shkarupa I.L., Plyasunkova L.A., Shkarupa M.I., Klimov D.A. Properties of materials based on silicon carbide. *Refractories and industrial ceramics*. 2009. V. 50, no. 3. P. 224-226. doi: 10.1007/s11148-009-9182-z
5. Gnesin G.G. *Karbidokremnievye materialy* [Silicon carbide materials]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1977. 215 p.

### About the authors

**Nizovtsev Vladimir Evgenjevich**, Candidate of Science (Engineering), Head of Sector, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). Area of Research: nanotechnologies, composite materials.

**Klimov Denis Alexandrovich**, Senior Engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru).

Area of Research: nanotechnologies, composite materials.

**Bortnikov Andrey Dmitrievich**, engineer, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: [adb@ciam.ru](mailto:adb@ciam.ru). Area of Research: dynamics and strength.

**Nizovtseva Oksana Vladimirovna**, technician, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: [3991258@mail.ru](mailto:3991258@mail.ru). Area of Research: composite materials.