



Государственная корпорация  
по космической деятельности «Роскосмос»

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
«ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
ИМЕНИ М.В.КЕЛДЫША»  
(АО ГНЦ «Центр Келдыша»)**

Онежская ул., д. 8, Москва, Россия, 125438  
Тел. +7 (495) 456-4608 Факс: +7 (495) 456-8228  
ОКПО 47430587 ОГРН 1217700095667 ИНН/КПП 7743355574 / 774301001  
kerc@elnet.msk.ru; <https://keldysh-space.ru>

26.11.2025 № 200-06/391  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

**УТВЕРЖДАЮ**

**Заместитель генерального директора**

**по средствам выведения**

**АО ГНЦ «Центр Келдыша»**

**Д-р техн. наук, проф.**



**В.В. Миронов**

**2025 г.**

### **ОТЗЫВ**

#### **ведущей организации на диссертационную работу**

**Сукманова Игоря Владимировича на тему «Разработка углерод-керамических композиционных материалов, содержащих карбиды и бориды гафния, титана и ниобия, для эксплуатации в скоростных потоках окислительных газов», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки)**

#### **Актуальность работы**

Работа посвящена разработке углерод-керамических композиционных материалов (УККМ) с включениями карбидов и боридов гафния, титана и ниобия, предназначенных для эксплуатации в скоростных потоках окислительных газов и подвергающихся высоким тепловым нагрузкам и термохимическому воздействию.

Уникальный комплекс эксплуатационных характеристик углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) и УККМ и их разнообразие, связанное с возможностью широкого варьирования структурой армирующего каркаса, составом и способом формирования матрицы и керамического покрытия (КП), обуславливают их перспективность для изготовления теплонапряженных элементов конструкций ракетных двигателей и летательных аппаратов: оболочек сопловых насадков радиационного охлаждения (НРО), элементов камер сгорания ЖРД, камер

ЖРД малой тяги, элементов камер сгорания и фюзеляжа прямоточных воздушно-реактивных двигателей и многоразовых аэрокосмических систем.

При окислении существующих марок УККМ типа карбида кремния и карбида бора с матрицами на основе соединений кремния образуются пленки на базе силикатного / боросиликатного стекла. Пребывая в вязко-текучем состоянии, стеклофаза заполняет поры, пустоты и дефекты в структуре, что обуславливает реализацию эффекта самозалечивания. Защитные свойства пленок, как правило, сохраняются до температуры стенки  $\sim 1650-1700$  °С. При дальнейшем нагреве происходит переход к активному окислению карбида кремния, в результате которого генерируется газообразная моноокись SiO. Это приводит к разрушению диффузионного барьера из оксида кремния, увеличивает диффузию окислительных компонентов потока к материалу и интенсифицирует процесс термохимического разрушения композитов, то есть уноса массы вследствие окисления при воздействии скоростных высокоэнтальпийных потоков кислородсодержащих газов.

Основные усилия современных исследователей сосредоточены на поиске путей увеличения жаростойкости и особенно термохимической стойкости УККМ и расширения температурно-временных интервалов их работоспособности. Основными направлениями исследований при этом являются поисковые работы по введению в матрицу материала тугоплавких добавок на основе циркония, гафния и тантала и определению влияния легирующих добавок на формирование и эволюцию структуры оксидных пленок в условиях протекания высокотемпературной газовой коррозии, эрозии и абляции композитов. Увеличение температуры длительной работоспособности УККМ до уровня  $\sim 2100-2300$  °С и выше способно существенно расширить область их применения и в случае внедрения технологии повысить тактико-технические характеристики разрабатываемых изделий. При этом практика показывает, что введение исключительно тугоплавких прекурсоров в матрицу не способно защитить стенку от термохимического уноса на этапе разогрева стенки проточного тракта или корпуса до того, как начинает образовываться жидкофазная и при этом вязкая пленка оксида, которая снижает скорость дальнейшего термохимического уноса материала. Это приводит к необходимости исследования многокомпонентных легирующих добавок,



каждая из которых будет обеспечивать работоспособность материала на всех этапах эксплуатации в составе изделия. Введение многокомпонентных добавок в свою очередь требует изучения влияния всех стадий технологического процесса изготовления материала, так как архитектура и морфология образующихся пленок в существенной степени зависят от химического состава, доли и дисперсности исходных фаз в матрицах композитов, а также от температуры, продолжительности эксплуатации и степени агрессивности среды.

В этой связи диссертационная работа Сукманова И.В., направленная на разработку новых составов многокомпонентных матриц на основе ультравысокотемпературных керамик (УВТК) и технологий изготовления УККМ, **представляет несомненную актуальность** как с научной, так и с практической точки зрения.

### **Общая характеристика работы**

Достоинством диссертационной работы Сукманова И.В. является то, что автору удалось подробно проанализировать и исследовать зависимость высокотемпературных свойств получаемых УККМ от структурных особенностей, определяемых методом изготовления. В частности проведены исследования реакционного взаимодействия в системах  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C}$ ,  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C-C}$  и  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C-C-TiC-TiB}_2$ . Для изготовленных образцов материалов проведен широкий анализ реализующихся физико-механических и теплофизических характеристик, а также параметры термохимической стойкости в условиях воздействия высокотемпературного окислительного потока.

В работе предложен новый методологический подход к созданию УККМ с комбинированными матрицами, включающими УВТК компоненты. Суть метода заключается в интегрировании в УВТК прекурсоров между слоями углеродного наполнителя на стадии подготовки препрега. Варьирование типом, дисперсностью, процентным соотношением прекурсоров УВТК компонентов и параметрами высокотемпературной обработки позволяет управлять кинетикой взаимодействия, полнотой конверсии и спекания при изготовлении материала. На основе проведенного широкого анализа выбраны составы реакционной смеси для

реализации нового метода и проведены всесторонние исследования технологического процесса на всех этапах, включая сопоставление расчетно-аналитических исследований с конечным результатом, что представляет несомненный научный интерес. Выполнены исследования влияния разложения фенолформальдегидной смолы на процесс производства УККМ в рамках предложенного подхода. Апробировано изготовление УККМ для эксплуатации в высокотемпературных окислительных потоках и проведены огневые испытания и их всесторонний анализ, в ходе которого определены характеристики термохимической стойкости предложенных составов, исследовано формирование получающихся в ходе испытаний оксидных пленок и получены модели реализации термохимической стойкости УККМ при их взаимодействии со скоростными высокоэнтальпийными потоками кислородсодержащих газов с температурой стенки  $T_w = 2100-2300$  °С и выше, подтверждаемые результатами дефектации образцов материалов до и после огневых испытаний.

**Практическая значимость работы** включает: доказанную возможность изготовления УККМ с компонентами матриц из УВТК в рамках одного техпроцесса получения изделий из углерод-углеродных композиционных материалов; разработанный новый состав УККМ и технологию его получения, обеспечивающие высокую термохимическую стойкость УККМ при ультравысоких температурах в окислительном потоке; предложенный и апробированный новый методологический подход к созданию УККМ с УВТК компонентами матриц, заключающийся в интегрировании между слоями углеродного наполнителя полидисперсных прекурсоров УВТК компонентов; результаты огневых испытаний; полученные модели реализации термохимической стойкости разработанных УККМ, подтверждаемые результатами дефектации образцов материалов до и после огневых испытаний.

Предложенный автором методологический подход принят к применению в АО «ЦНИИСМ» при разработке и изготовлении теплонапряженных деталей органов управления, камер сгорания и проточных трактов двигательных установок



перспективных скоростных летательных аппаратов с повышенными тактико-техническими характеристиками, что подтверждено соответствующим актом.

### **Наиболее важные полученные результаты**

**Научная новизна диссертационной работы Сукманова И.В. не вызывает сомнения и заключается в следующем:**

- Впервые установлены стадийность и закономерности взаимодействия в системах  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C}$ ,  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C-C}$  и  $\text{Hf-Nb-B}_4\text{C-C-TiC-TiB}_2$  в рамках технологического процесса изготовления УККМ;
- Разработаны составы реакционных смесей, обеспечивающие синтез керамических составляющих матриц  $\text{HfC-HfB}_2\text{-TiC-TiB}_2\text{-NbC-NbB}_2\text{-B}_4\text{C}$  в техпроцессе изготовления углерод-керамических композиционных материалов (УККМ);
- Получены модели реализации термохимической стойкости УККМ в системе  $\text{Cf/C-HfC-HfB}_2\text{-TiC-TiB}_2\text{-NbC-NbB}_2\text{-B}_4\text{C-(SiC)}$  при взаимодействии со скоростными высокосenthalпийными потоками кислородсодержащих газов с реализацией температур на поверхности 2100-2300 °С и выше. Окисление композитов протекает преимущественно в диффузионном режиме благодаря снижению газопроницаемости пленок в результате перехода фаз с высокой долей  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  и  $\text{TiO}_2$  в вязко-текучее состояние по мере увеличения температуры.

### **Рекомендации по практическому использованию основных результатов диссертации**

Представленные в диссертационной работе новые научные результаты и практические разработки в области материаловедения и технологии изготовления УККМ с УВТК компонентами матриц могут быть использованы для создания ультравысокотемпературных КМ и изделий из них, применяемых в авиакосмической отрасли. Разработанные УККМ, результаты их испытаний и полученные модели реализации термохимической стойкости пополняют банк данных материалов для ультравысокотемпературных применений и расширяют границы исследований физико-химических процессов, происходящих при

взаимодействии материалов со скоростными высокоэнтальпийными потоками окислительных газов. Созданные технические решения могут быть использованы при разработке перспективных скоростных летательных аппаратов и их двигательных установок с повышенными тактико-техническими характеристиками ведущими отечественными предприятиями специального назначения: АО «ЦНИИСМ» (г. Хотьково), АО «Композит» (г. Королев), АО «УНИИКМ» (г. Пермь), АО «НИИГрафит» (г. Москва), ПАО «РКК «Энергия» имени С.П. Королева» (г. Королев), АО «НПО Энергомаш имени академика В.П. Глушко» (г. Химки), АО ГНЦ «Центр Келдыша» (г. Москва), АО ТМКБ «Союз» (г. Лыткарино), АО «ГосМКБ «Радуга» им. А.Я. Березняка» (г. Дубна), АО ВПК «НПО Машиностроения» (г. Реутов), АО «Корпорация «МИТ» (г. Москва) и др.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных в диссертационной работе научных результатов подтверждается применением современных методов и стандартных исследовательских методик в материаловедении, сертифицированной и поверенной измерительной аппаратуры с лицензионным программным обеспечением, необходимым и достаточным количеством экспериментального материала, воспроизводимостью результатов, согласованностью данных, полученных независимыми методами и расчетными оценками.

Научные выводы и практические рекомендации работы проверены при их апробации в АО «ЦНИИСМ» посредством интеграции стадий получения наполненных углепластиковых заготовок, содержащих прекурсоры УВТК компонентов, в действующий процесс производства изделий из УУКМ и последующим проведением огневых испытаний с всесторонним анализом на всех этапах изготовления и испытаний образцов УККМ.

### **Замечания**

Отмечая достоинства диссертационной работы И.В. Сукманова, в качестве замечаний следует указать:



1. В разделе 2.5.1 в описании условий проведения эксперимента в ФАУ «ЦАГИ» отмечается, что степень диссоциации воздушного потока составила 85-95%. Вместе с тем при описании реакций окисления компонентов УККМ рассмотрены только реакции с молекулярным кислородом.

2. В разделе 2.5.2 в формулах 2.1 и 2.2 изменение толщины и массы образца делится на время эксперимента. При нагреве образцов температура поверхности выходит на примерно постоянное значение не сразу, а спустя некоторое время, аналогично ведет себя скорость уноса. При определении скорости уноса принято находить время разогрева образца и проводить два опыта первый с определением уноса на участке разогрева, а второй на более длительное время и по этим данным находить скорость уноса при известной температуре.

3. В разделе 2.5.6 не приведена формула для вычисления коэффициента теплопроводности УККМ, определяемого в ходе огневых испытаний образцов. В связи с чем без внимания остался вопрос о том, какая именно «известная» толщина образца использовалась для расчета, учитывая определяемый в ходе этих же испытаний линейный унос толщины образца.

4. По результатам огневых испытаний, постановка и методика обработки которых описана в разделе 2.5, а результаты в разделах 3.4.4, 3.4.7, 4.2.2, 4.3.2, 4.3.4, автором определялись параметры линейного и массового уноса образцов, а также их теплопроводность. Согласно методике автором определялось одно значение параметра в ходе каждого испытания. В описании результатов огневых испытаний автором указаны диапазоны изменения величин и утверждается, что представленный диапазон является средним значением параметра (можно предположить, что по результатам нескольких испытаний). Общепринятым представлением подобной информации является использование среднего значения и среднеквадратичного отклонения (разбросов). Также отсутствует информация об оценке погрешностей определения этих величин.

5. Автор утверждает, что установлены механизмы обеспечения стойкости УККМ. Однако без внимания остался вопрос динамики формирования окисных пленок, которые согласно аналитическому обзору, выполненному автором, предназначены для защиты образца от дальнейшего окисления.

6. В качестве армирующего компонента в образцах использовалась ткань УРАЛ Т-22Р. Открытым остается вопрос об эффективности материалов при использовании других углеродных наполнителей, в том числе с применением ПАН-прекурсоров.

Отмеченные недостатки не снижают научной и практической значимости диссертации и общей высокой оценки работы.

### **Заключение**

Представленная диссертационная работа выполнена на высоком научно-техническом уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предложен и апробирован новый методологический подход к созданию УККМ с УВТК компонентами матриц для эксплуатации в скоростных потоках окислительных газов. Отличительной особенностью подхода является интегрирование между слоями углеродного наполнителя полидисперсных прекурсоров УВТК компонентов, обеспечивающих регулируемый синтез и спекание керамических составляющих матриц на стадиях карбонизации / пиролиза и высокотемпературной обработки (ВТО).

Результаты диссертационной работы, вынесенные на защиту, прошли апробацию на 16 научно-технических конференциях, опубликованы в 20 научных работах, из них 3 в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 4 в журналах, включенных в международные системы цитирования.

Автореферат и опубликованные работы полностью отражают содержание диссертации.

По научному уровню, полученным результатам, содержанию и оформлению представленная работа удовлетворяет всем требованиям п.п. 9-16 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор Сукманов Игорь Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.17. «Материаловедение» (технические науки).

Диссертация заслушана на расширенной секции НТС отделения 2 АО ГНЦ «Центр Келдыша» протокол №72 от 13 ноября 2025 года. На заседании



присутствовало 23 члена из 28. Результаты голосования: «за» - 23, против – нет, воздержавшихся - нет.

Отзыв составили:

Начальник отдела

кандидат физико-математических наук

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

А.О. ГНЦ «Центр Келдыша» г. Москва, ул. Онежская, д. 8

т. (495) 456-80-83

kerc@elnet.msk.ru

Ведущий научный сотрудник

кандидат технических наук

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 г.

А.О. ГНЦ «Центр Келдыша» г. Москва, ул. Онежская, д. 8

т. (495) 456-65-79 (2-44)

kerc@elnet.msk.ru

Р.Н. Ризаханов

В.Н. Баскаков

Начальник сектора

кандидат технических наук

« 26 » 11 2025 г.

А.О. ГНЦ «Центр Келдыша» г. Москва, ул. Онежская, д. 8

т. (495) 456-56-37 (2-33)

kerc@elnet.msk.ru

С.М. Цацуев

Подписи Р.Н. Ризаханова, В.Н. Баскакова, С.М. Цацуева удостоверяю:

Ученый секретарь АО ГНЦ «Центр Келдыша»

« 26 » 11 2025 г.



Ю.Л. Смирнов

Наименование организации: Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша» (АО ГНЦ «Центр Келдыша»)

Адрес организации: 125438, г. Москва, ул. Онежская, д. 8

Электронный адрес: [kerc@elnet.msk.ru](mailto:kerc@elnet.msk.ru)

Телефон: +7 (495) 456-46-08