



**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ**

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015157111/05, 30.12.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.12.2015

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.12.2015

(45) Опубликовано: 27.08.2016

Адрес для переписки:

105005, Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1,
МГТУ им. Н.Э. Баумана, ЦЗИС, для Нелюба
В.А. (МИЦ НМКН)

(72) Автор(ы):

**Богачёв Евгений Акимович (RU),
Михайловский Константин Валерьевич (RU),
Просунцов Павел Викторович (RU),
Резник Сергей Васильевич (RU)**

(73) Патентообладатель(и):

**федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана" (МГТУ
им. Н.Э. Баумана) (RU)**

**(54) СХЕМА ТЕПЛОЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ГРАДИЕНТНОГО ПОРИСТОГО
УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА**

(57) Реферат:

Полезная модель относится к теплозащитным композиционным покрытиям, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике. Неабляционное (неуносимое) термостойкое теплозащитное покрытие с максимальной рабочей температурой в окислительной среде до 2000 К состоит из слоев тканого и нетканого углеродного каркаса и матрицы, содержащей углеродную и карбидокремниевую составляющие, и относится к покрытиям из существенно анизотропных материалов с разными по уровню физико-механическими и теплофизическими характеристиками как слоев, так и по толщине материала. Предлагается покрытие, состоящее из пяти последовательно расположенных слоев: первый наружный (фронтальный) слой из углерод-керамического композиционного материала (УККМ) на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% и толщиной от 3 до 5 мм для обеспечения термостойкости и окислительной стойкости, второй слой под первым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с

остаточной пористостью не менее 18%, третий слой под вторым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 22%, четвертый слой под третьим слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 38%, пятый слой под четвертым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 48%. Теплозащитное покрытие сохраняет свою работоспособность при по крайней мере 10 циклах нагружения с продолжительностью каждого цикла не более 5 минут в окислительной среде при температуре 2000 К. В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека. 1 з.п. ф-лы, 6 ил.

RU 164403 U1

RU 164403 U1

Область техники

Полезная модель относится к теплозащитным композиционным покрытиям, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике.

Уровень техники

5 Известен ряд патентов на теплозащитные покрытия для защиты аэрокосмических летательных аппаратов, а именно: RU 2497783, RU 2482146.

Однако, все эти покрытия слабо коррелируют с предлагаемой полезной моделью.

10 Известна авторская статья «Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов», опубликованная Инженерно-физическом журнале, 2015, ТОМ 88, №3 (МАЙ-ИЮНЬ), в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0099 между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э. Баумана, где представлены результаты исследований теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов (УККМ) тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов.

Однако в этой статье не представлены конкретные результаты в виде описания многослойной схемы теплозащитного покрытия на основе градиентного пористого УККМ..

20 Раскрытие полезной модели

Неабляционное (неуносимое) термостойкое теплозащитное покрытие с максимальной рабочей температурой в окислительной среде до 2000 К состоит из слоев тканого и нетканого углеродного каркаса и матрицы, содержащей углеродную и карбидокремниевую составляющие, и относится к покрытиям из существенно
25 анизотропных материалов с разными по уровню физико-механическими и теплофизическими характеристиками как слоев, так и по толщине материала. Предлагается покрытие, состоящее из пяти последовательно расположенных слоев: первый наружный (фронтальный) слой из углерод-керамического композиционного материала (УККМ) на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью
30 менее 5% и толщиной от 3 до 5 мм для обеспечения термостойкости и окислительной стойкости, второй слой под первым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 18%, третий слой под вторым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого
35 углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 22%, четвертый слой под третьим слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 38%, пятый слой под четвертым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса
40 с остаточной пористостью не менее 48%. Теплозащитное покрытие сохраняет свою работоспособность при по крайней мере 10 циклах нагружения с продолжительностью каждого цикла не более 5 минут в окислительной среде при температуре 2000 К.

В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного
45 целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека.

Перечень фигур

Фиг. 1 - Фотография микроструктуры слоя УККМ.

Фиг. 2 - Геометрическая модель представительного элемента микроструктуры УККМ на основе углеродной ткани полотняного плетения с остаточной пористостью 20%.

Фиг. 3 - Геометрические модели представительного элемента микроструктуры УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20 (а), 25 (б), 40 (в) и 50% (г)

5 Фиг. 4 - Изменение коэффициентов теплопроводности УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от его остаточной пористости вдоль осей X и Y в плоскости армирования и вдоль оси Z в направлении, перпендикулярном плоскости армирования

Фиг. 5 - Изменение коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от его остаточной пористости вдоль осей X и Y в плоскости армирования и вдоль оси Z в направлении, перпендикулярном плоскости армирования.

Фиг. 6 - Перепад температур по толщине экспериментальных образцов из УККМ при действии эксплуатационных нагрузок, К.

Осуществление полезной модели

15 В соответствии с техническим заданием на прикладные научные исследования (ПНИ) в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0099 между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э. Баумана в качестве экспериментальных образцов теплозащитных покрытий из слоев пористых и градиентных термостойких УККМ рассматривались:

- 20 - плоские образцы размером 50×50 мм и толщиной 5 мм;
- цилиндрические образцы диаметром 70 мм и высотой 70 мм.

В качестве образцов элементов конструкций покрытий из пористых и градиентных термостойких УККМ рассматривались:

- 25 - элементы конструкций конической формы диаметром 100 мм и высотой 200 мм;
- элементы конструкций цилиндрической формы диаметром до 100 мм и высотой до 200 мм.

На фиг. 1, 2, 3 представлены соответственно: фотография микроструктуры слоя УККМ; геометрическая модель представительного элемента микроструктуры УККМ на основе углеродной ткани полотняного плетения с остаточной пористостью 20%; а также геометрические модели представительного элемента микроструктуры УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20 (а), 25 (б), 40 (в) и 50% (г). Геометрические модели использовались в ходе компьютерного моделирования термомеханических процессов в образцах покрытий с целью оценки теплофизических и термомеханических характеристик УККМ. В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека.

На основе параметрического моделирования были получены расчетные данные по теплофизическим и термомеханическим характеристикам УККМ на основе тканого и нетканого армирующего каркаса в зависимости от остаточной пористости, которые представлены в таблице 1, 2 и на фиг. 4, 5.

Таблица 1 – Расчетные значения КЛТР и коэффициентов теплопроводности УККМ на основе углеродной ткани

Наименование характеристики	Значение
КЛТР вдоль оси X (вдоль основы углеродной ткани), K^{-1}	$0,73 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Y (вдоль утка углеродной ткани), K^{-1}	$0,73 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}	$1,61 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности вдоль оси X, Вт/(м·К)	2,54
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Y, Вт/(м·К)	2,54
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Z, Вт/(м·К)	3,15

Таблица 2 – Расчетные значения КЛТР и коэффициентов теплопроводности УККМ на основе углеродной ткани при учете пористости микрообъема представительного элемента микроструктуры

Наименование характеристики	Значение
КЛТР вдоль оси X (в плоскости армирования), K^{-1}	$0,63 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Y (в плоскости армирования), K^{-1}	$0,63 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}	$1,42 \cdot 10^{-6}$

Коэффициент теплопроводности вдоль оси X, Вт/(м·К)	8,42
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Y, Вт/(м·К)	5,50
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Z, Вт/(м·К)	1,84

5

10

15

На фиг. 4 представлены расчетные данные по изменению коэффициентов теплопроводности УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от остаточной пористости (оси X, Y - в плоскости армирования, ось Z - перпендикулярно плоскости армирования), а на фиг. 5 - расчетные данные по изменению КЛТР УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от остаточной пористости (оси X, Y - в плоскости армирования, ось Z - перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}

Полученные результаты позволили оценить взаимосвязь теплофизических и термомеханических характеристик, плотности УККМ от остаточной пористости. На основе расчетных данных по параметрическому анализу была проведена оценка распределения температур в экспериментальных образцах и опытных образцах элементов конструкций для обеспечения минимальной температуры на тыльной поверхности и массы градиентной теплозащиты.

Для расчета распределения температур в образцах и образцах элементов конструкций, расчета напряженно-деформированного состояния с различным типом структуры УККМ использовался метод математического моделирования - метод конечных элементов. На основе геометрических моделей были построены конечно-элементные модели, причем, для получения сетчато-независимых решений проводился расчет на сетках с разной степенью дискретности элементов.

На фиг.6 представлены графики градиентов температур по толщине экспериментальных образцов из УККМ при действии эксплуатационных нагрузок, К.

Для оценки массовой эффективности вместе с теплоизолирующей способностью проводилось сравнение массы экспериментальных образцов из разных типов УККМ. Были получены следующие значения по массе экспериментальных образцов:

- УККМ на основе тканого каркаса без остаточной пористости: 0,0227 кг;
- УККМ на основе тканого каркаса с остаточной пористостью: 0,0205 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20%: 0,0192 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 25%: 0,0173 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 40%: 0,0151 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 50%: 0,0142 кг.

Результаты позволили выявить закономерности влияния типа УККМ на теплоизоляционные свойства и массовую эффективность экспериментальных образцов.

Определено, что наименьшую массу и наибольшую теплоизоляционную способность обеспечивает УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 50%, однако, данный материал обладает невысокими прочностными характеристиками, в сравнении с УККМ на основе тканого каркаса, который имеет наибольшую плотность.

5 В связи с чем, для рационального и эффективного проектирования систем многоуровневой защиты неохлаждаемых теплонапряженных элементов конструкций ракетно-космической техники из УККМ необходимо осуществлять чередование слоев материала с разной плотностью для создания градиентных структур. Для решения данной задачи было необходимо осуществить моделирование температурного и
10 напряженно-деформированного состояния градиентной структуры, которое позволит оценить вклад каждого слоя, а также влияние различных термических и теплофизических характеристик на общую работоспособность.

Использование наружного слоя на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% (то есть практически без остаточной пористости) и толщиной
15 от 3 до 5 мм обусловлено необходимостью обеспечения термостойкости и работоспособности градиентного материала при воздействии значительных температурных, силовых и окислительных нагрузок на фронтальную поверхность. Выбор последовательности слоев от сильно пористого до максимально плотного обусловлена технологическими особенностями процесса уплотнения карбидокремниевой
20 матрицей, где в процессе получения слоев покрытия можно управлять зоной осаждения слоев.

С учетом полученных многочисленных экспериментальных результатов, компьютерного моделирования в экспериментальных образцах пористых и градиентных УККМ распределений температурных полей, температурных перемещений,
25 термонапряжений в различных направлениях и плоскостях, и данных по массе был выбран удовлетворяющий требованиям технического задания вариант комбинации слоев УККМ с тканым и нетканым армирующим каркасом для создания эффективной тепловой защиты объектов ракетно-космической техники, который и представлен в формуле и раскрытии предлагаемой полезной модели. Предлагаемое покрытие должно
30 выдерживать не менее чем 10 циклов теплового нагружения в окислительной среде продолжительностью до 5 минут каждый при уровне температуры 2000 К.

На последующих этапах ПНИ по соглашению №14.577.21.0099 предстоит изготовление опытных образцов данной схемы покрытия и их натурные испытания.

35 **Формула полезной модели**

1. Теплозащитное покрытие, характеризующееся составом из слоев тканого и нетканого углеродного каркаса и матрицы, содержащей углеродную и карбидокремниевую составляющие, и относящееся к покрытиям из существенно
40 анизотропных материалов с разными по уровню физико-механическими и теплофизическими характеристиками как слоев, так и по толщине материала, а именно имеющее схему, состоящую из пяти последовательно расположенных слоев: первый наружный (фронтальный) слой из углерод-керамического композиционного материала (УККМ) на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% и толщиной от 3 до 5 мм для обеспечения термостойкости и окислительной стойкости,
45 второй слой под первым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 18%, третий слой под вторым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного

каркаса с остаточной пористостью не менее 22%, четвертый слой под третьим слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 38%, пятый
5 композиционный материал на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 48%, при этом теплозащитное покрытие многократно, а именно не менее 10 циклов продолжительностью каждого цикла не менее 5 мин работоспособно при тепловых нагрузках до температур 2000 К в окислительной среде.

2. Теплозащитное покрытие по п. 1, характеризующееся тем, что в качестве
10 наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека.

15

20

25

30

35

40

45

Реферат

Полезная модель относится к теплозащитным композиционным покрытиям, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике. Неабляционное (неуносимое) термостойкое теплозащитное покрытие с максимальной рабочей температурой в окислительной среде до 2000 К состоит из слоев тканого и нетканого углеродного каркаса и матрицы, содержащей углеродную и карбидокремниевую составляющие, и относится к покрытиям из существенно анизотропных материалов с разными по уровню физико-механическими и теплофизическими характеристиками как слоев, так и по толщине материала. Предлагается покрытие, состоящее из пяти последовательно расположенных слоев: первый наружный (фронтальный) слой из углерод-керамического композиционного материала (УККМ) на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% и толщиной от 3 до 5 мм для обеспечения термостойкости и окислительной стойкости, второй слой под первым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 18%, третий слой под вторым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 22%, четвертый слой под третьим слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 38%, пятый слой под четвертым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 48%. Теплозащитное покрытие сохраняет свою работоспособность при по крайней мере 10 циклах нагружения с продолжительностью каждого цикла не более 5 минут в окислительной среде при температуре 2000 К. В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека. 1 з.п.ф-лы, 6 ил.

Схема теплозащитного покрытия на основе градиентного пористого углерод-керамического композиционного материала

Область техники

Полезная модель относится к теплозащитным композиционным покрытиям, которые могут быть использованы в авиационной и ракетно-космической технике.

Уровень техники

Известен ряд патентов на теплозащитные покрытия для защиты аэрокосмических летательных аппаратов, а именно: RU2497783, RU2482146.

Однако, все эти покрытия слабо коррелируют с предлагаемой полезной моделью.

Известна авторская статья «Прогнозирование теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов», опубликованная в Инженерно-физическом журнале, 2015, ТОМ 88, № 3 (МАЙ–ИЮНЬ), в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0099 между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э.Баумана, где представлены результаты исследований теплофизических и термомеханических характеристик пористых углерод-керамических композиционных материалов (УККМ) тепловой защиты аэрокосмических летательных аппаратов.

Однако в этой статье не представлены конкретные результаты в виде описания многослойной схемы теплозащитного покрытия на основе градиентного пористого УККМ..

Раскрытие полезной модели

Неабляционное (неуносимое) термостойкое теплозащитное покрытие с максимальной рабочей температурой в окислительной среде до 2000 К состоит из слоев тканого и нетканого углеродного каркаса и матрицы, содержащей углеродную и карбидокремниевую составляющие, и относится к покрытиям из существенно анизотропных материалов с разными по уровню физико-механическими и теплофизическими характеристиками как слоев, так и по толщине материала. Предлагается покрытие, состоящее из пяти последовательно расположенных слоев: первый наружный (фронтальный) слой из углерод-керамического композиционного материала (УККМ) на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% и толщиной от 3 до 5 мм для обеспечения термостойкости и окислительной стойкости, второй слой под первым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 18%, третий слой под вторым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 22%, четвертый слой под третьим слоем толщиной не менее 5 мм из

углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 38%, пятый слой под четвертым слоем толщиной не менее 5 мм из углерод-керамического композиционного материала на основе нетканого углеродного каркаса с остаточной пористостью не менее 48%. Теплозащитное покрытие сохраняет свою работоспособность при по крайней мере 10 циклах нагружения с продолжительностью каждого цикла не более 5 минут в окислительной среде при температуре 2000 К.

В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека.

Перечень фигур

Фиг.1 - Фотография микроструктуры слоя УККМ.

Фиг.2 - Геометрическая модель представительного элемента микроструктуры УККМ на основе углеродной ткани полотняного плетения с остаточной пористостью 20%.

Фиг.3 - Геометрические модели представительного элемента микроструктуры УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20 (а), 25 (б), 40 (в) и 50% (г)

Фиг.4 - Изменение коэффициентов теплопроводности УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от его остаточной пористости вдоль осей X и Y в плоскости армирования и вдоль оси Z в направлении, перпендикулярном плоскости армирования

Фиг.5 - Изменение коэффициентов линейного термического расширения (КЛТР) УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от его остаточной пористости вдоль осей X и Y в плоскости армирования и вдоль оси Z в направлении, перпендикулярном плоскости армирования.

Фиг.6 – Перепад температур по толщине экспериментальных образцов из УККМ при действии эксплуатационных нагрузок, К.

Осуществление полезной модели

В соответствии с техническим заданием на прикладные научные исследования (ПНИ) в рамках соглашения о предоставлении субсидии №14.577.21.0099 между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э.Баумана в качестве экспериментальных образцов теплозащитных покрытий из слоев пористых и градиентных термостойких УККМ рассматривались:

- плоские образцы размером 50x50 мм и толщиной 5 мм;
- цилиндрические образцы диаметром 70 мм и высотой 70 мм.

В качестве образцов элементов конструкций покрытий из пористых и градиентных термостойких УККМ рассматривались:

- элементы конструкций конической формы диаметром 100 мм и высотой 200 мм;
- элементы конструкций цилиндрической формы диаметром до 100 мм и высотой до 200 мм.

На фиг.1,2,3 представлены соответственно: фотография микроструктуры слоя УККМ; геометрическая модель представительного элемента микроструктуры УККМ на основе углеродной ткани полотняного плетения с остаточной пористостью 20%; а также геометрические модели представительного элемента микроструктуры УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20 (а), 25 (б), 40 (в) и 50% (г). Геометрические модели использовались в ходе компьютерного моделирования термо-механических процессов в образцах покрытий с целью оценки теплофизических и термомеханических характеристик УККМ. В качестве наполнителя для теплозащитного материала на основе градиентного пористого УККМ могут использоваться углеродные волокна из искусственного целлюлозного волокна, углеродные волокна из ПАН-волокна и углеродные волокна из пека.

На основе параметрического моделирования были получены расчетные данные по теплофизическим и термомеханическим характеристикам УККМ на основе тканого и нетканого армирующего каркаса в зависимости от остаточной пористости, которые представлены в таблице 1,2 и на фиг.4,5.

Таблица 1 – Расчетные значения КЛТР и коэффициентов теплопроводности УККМ на основе углеродной ткани

Наименование характеристики	Значение
КЛТР вдоль оси X (вдоль основы углеродной ткани), K^{-1}	$0,73 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Y (вдоль утка углеродной ткани), K^{-1}	$0,73 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}	$1,61 \cdot 10^{-6}$
Коэффициент теплопроводности вдоль оси X, Вт/(м·К)	2,54
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Y, Вт/(м·К)	2,54
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Z, Вт/(м·К)	3,15

Таблица 2 – Расчетные значения КЛТР и коэффициентов теплопроводности УККМ на основе углеродной ткани при учете пористости микрообъема представительного элемента микроструктуры

Наименование характеристики	Значение
КЛТР вдоль оси X (в плоскости армирования), K^{-1}	$0,63 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Y (в плоскости армирования), K^{-1}	$0,63 \cdot 10^{-6}$
КЛТР вдоль оси Z (перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}	$1,42 \cdot 10^{-6}$

Коэффициент теплопроводности вдоль оси X, Вт/(м·К)	8,42
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Y, Вт/(м·К)	5,50
Коэффициент теплопроводности вдоль оси Z, Вт/(м·К)	1,84

На фиг.4 представлены расчетные данные по изменению коэффициентов теплопроводности УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от остаточной пористости (оси X, Y – в плоскости армирования, ось Z – перпендикулярно плоскости армирования), а на фиг.5 - расчетные данные по изменению КЛТР УККМ на основе нетканого каркаса в зависимости от остаточной пористости (оси X, Y – в плоскости армирования, ось Z – перпендикулярно плоскости армирования), K^{-1}

Полученные результаты позволили оценить взаимосвязь теплофизических и термомеханических характеристик, плотности УККМ от остаточной пористости. На основе расчетных данных по параметрическому анализу была проведена оценка распределения температур в экспериментальных образцах и опытных образцах элементов конструкций для обеспечения минимальной температуры на тыльной поверхности и массы градиентной теплозащиты.

Для расчета распределения температур в образцах и образцах элементов конструкций, расчета напряженно-деформированного состояния с различным типом структуры УККМ использовался метод математического моделирования – метод конечных элементов. На основе геометрических моделей были построены конечно-элементные модели, причем, для получения сетчато-независимых решений проводился расчет на сетках с разной степенью дискретности элементов.

На фиг.6 представлены графики градиентов температур по толщине экспериментальных образцов из УККМ при действии эксплуатационных нагрузок, К.

Для оценки массовой эффективности вместе с теплоизолирующей способностью проводилось сравнение массы экспериментальных образцов из разных типов УККМ. Были получены следующие значения по массе экспериментальных образцов:

- УККМ на основе тканого каркаса без остаточной пористости: 0,0227 кг;
- УККМ на основе тканого каркаса с остаточной пористостью: 0,0205 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 20%: 0,0192 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 25%: 0,0173 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 40%: 0,0151 кг;
- УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 50%: 0,0142 кг.

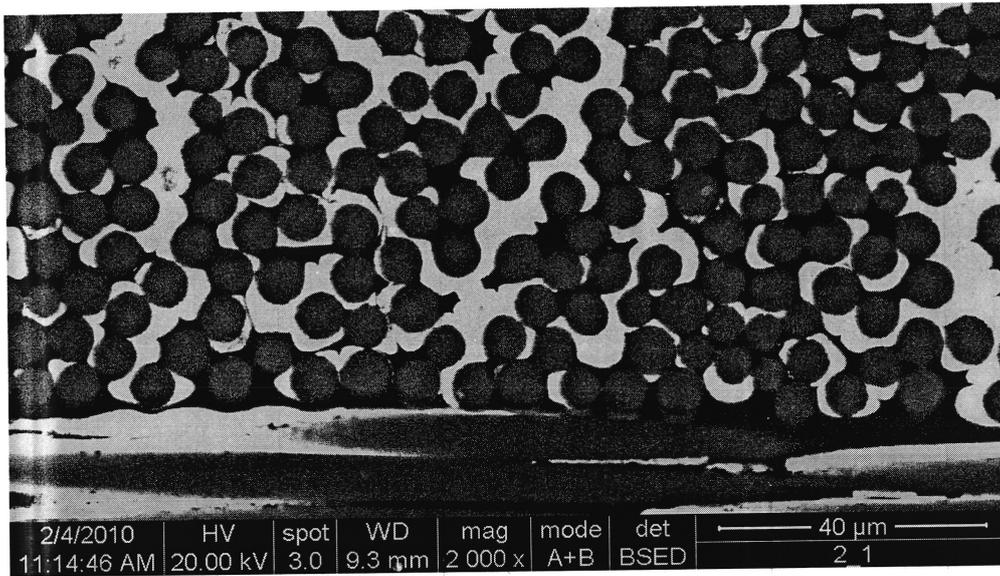
Результаты позволили выявить закономерности влияния типа УККМ на теплоизоляционные свойства и массовую эффективность экспериментальных образцов. Определено, что наименьшую массу и наибольшую теплоизоляционную способность

обеспечивает УККМ на основе нетканого каркаса с остаточной пористостью 50%, однако, данный материал обладает невысокими прочностными характеристиками, в сравнении с УККМ на основе тканого каркаса, который имеет наибольшую плотность. В связи с чем, для рационального и эффективного проектирования систем многоуровневой защиты неохлаждаемых теплонапряженных элементов конструкций ракетно-космической техники из УККМ необходимо осуществлять чередование слоев материала с разной плотностью для создания градиентных структур. Для решения данной задачи было необходимо осуществить моделирование температурного и напряженно-деформированного состояния градиентной структуры, которое позволит оценить вклад каждого слоя, а также влияние различных термических и теплофизических характеристик на общую работоспособность.

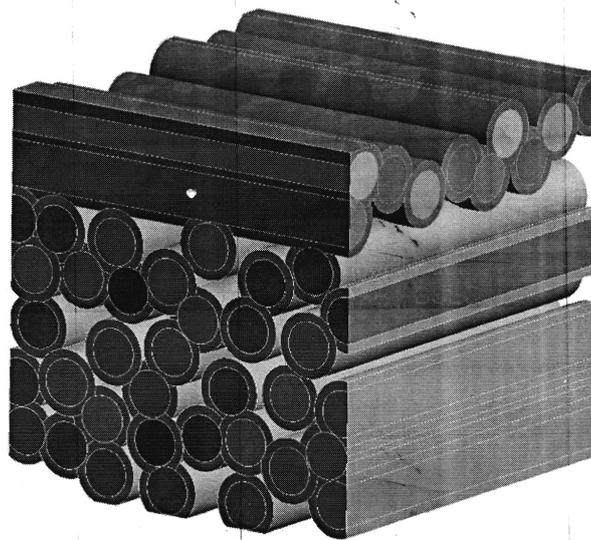
Использование наружного слоя на основе тканого углеродного каркаса с остаточной пористостью менее 5% (то есть практически без остаточной пористости) и толщиной от 3 до 5 мм обусловлено необходимостью обеспечения термостойкости и работоспособности градиентного материала при воздействии значительных температурных, силовых и окислительных нагрузок на фронтальную поверхность. Выбор последовательности слоев от сильно пористого до максимально плотного обусловлена технологическими особенностями процесса уплотнения карбидокремниевой матрицей, где в процессе получения слоев покрытия можно управлять зоной осаждения слоев.

С учетом полученных многочисленных экспериментальных результатов, компьютерного моделирования в экспериментальных образцах пористых и градиентных УККМ распределений температурных полей, температурных перемещений, термонапряжений в различных направлениях и плоскостях, и данных по массе был выбран удовлетворяющий требованиям технического задания вариант комбинации слоев УККМ с тканым и нетканым армирующим каркасом для создания эффективной тепловой защиты объектов ракетно-космической техники, который и представлен в формуле и раскрытии предлагаемой полезной модели. Предлагаемое покрытие должно выдерживать не менее чем 10 циклов теплового нагружения в окислительной среде продолжительностью до 5 минут каждый при уровне температуры 2000 К.

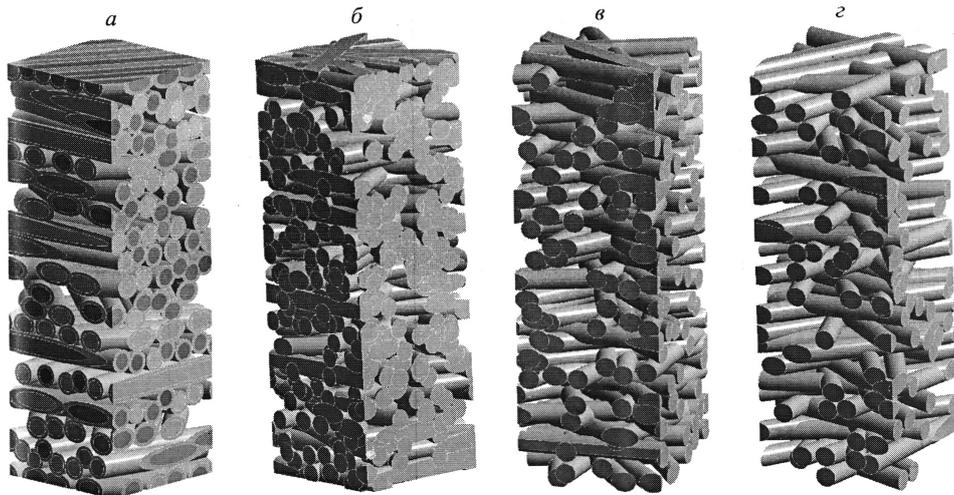
На последующих этапах ПНИ по соглашению № 14.577.21.0099 предстоит изготовление опытных образцов данной схемы покрытия и их натурные испытания.



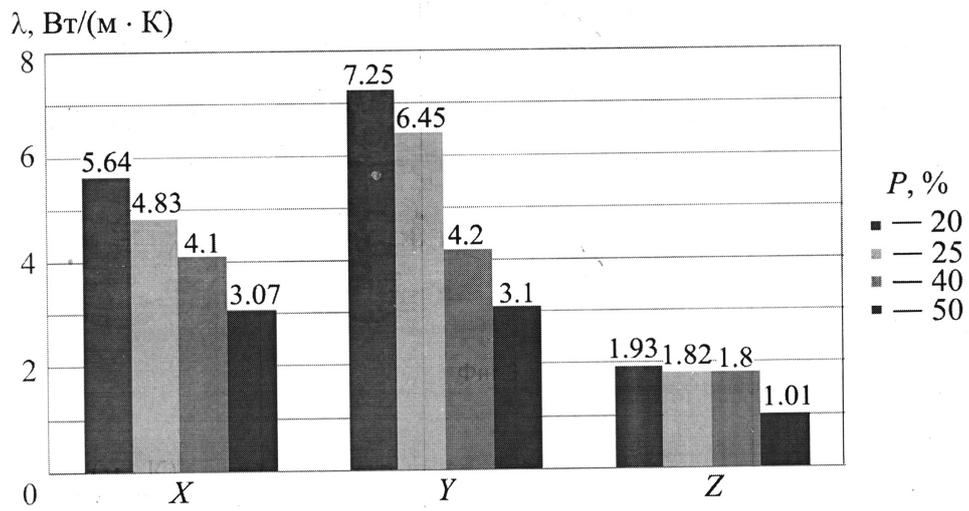
Фиг.1



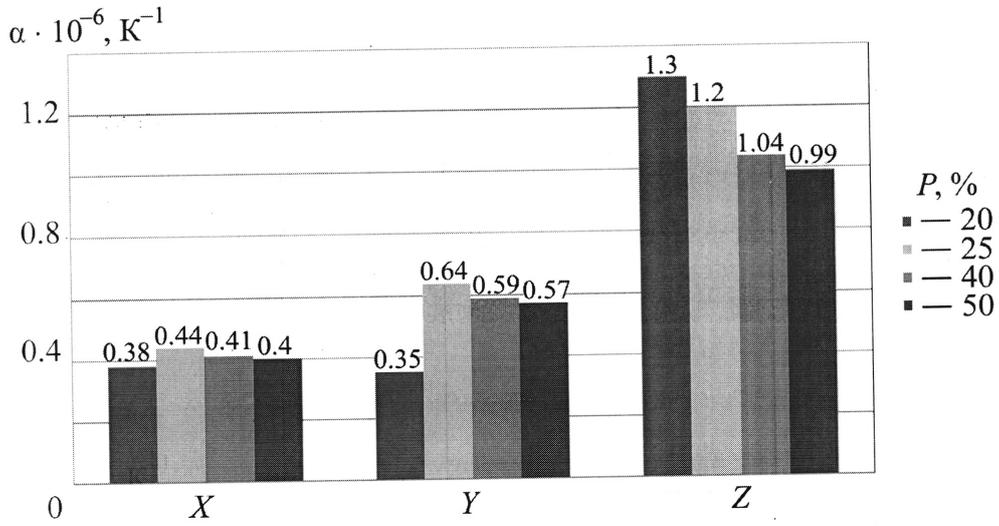
Фиг.2



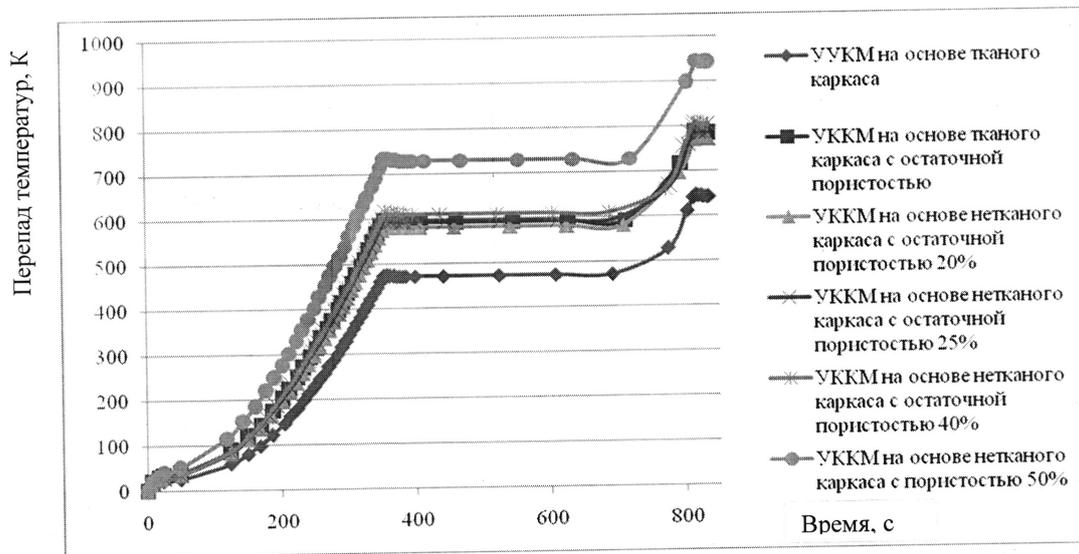
Фиг.3



Фиг.4



Фиг.5



Фиг.6