

На правах рукописи



ПАШКОВ АЛЕКСЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ

Специальность 05.16.05 – «Обработка металлов давлением»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

МОСКВА – 2017

Работа выполнена в Акционерном обществе «Научно-производственное предприятие «Исток» имени А.И. Шокина» и кафедре инжиниринга технологического оборудования (ИТО) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»»

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор **Горбатюк Сергей Михайлович**

**Официальные оппоненты:**

**Роберов Илья Георгиевич**

доктор технических наук,  
ФГУП «Научно-исследовательский  
институт стандартизации и унификации»,  
начальник отдела

**Лисовский Александр Владимирович**

кандидат технических наук,  
Электростальский институт (филиал)  
Московского политехнического  
университета, зав. кафедрой  
«Машиностроительные и металлургические  
технологии»

**Ведущая организация:**

Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук

Защита состоится «28» июня 2017 года в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.09 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»» по адресу:

119049, г. Москва, ленинский проспект, дом 4.

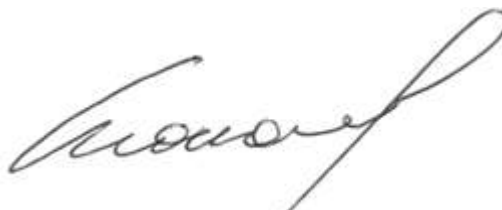
С диссертацией можно ознакомиться в читальном зале библиотеки НИТУ «МИСиС»

Автореферат разослан «\_\_\_» мая 2017 года

Справки по телефону: (495) 638-46-56

E-mail: [Vachiyan@yandex.ru](mailto:Vachiyan@yandex.ru)

Ученый секретарь  
Диссертационного совета



Ионов С.М.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы.

Разработка СВЧ (сверхвысокочастотных) узлов и приборов для авиакосмической отрасли выдвигает специальные требования к свойствам конструкционных материалов, используемых для производства элементной базы современной электроники. Принципиальное значение в этой сфере имеют такие свойства композитных материалов, как низкий температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), высокая удельная электрическая проводимость, низкий удельный вес и согласованность ТКЛР с функциональными элементами конструкций.

Чистые металлы и их сплавы, полученные традиционными методами, не удовлетворяют задаваемым технологическим требованиям. Это потребовало создать специальные материалы с заданными свойствами слоистого, волокнистого или дисперсного строения на основе различных комбинаций металлов, сплавов и соединений. Такие материалы получили общее название композитов или композиционных материалов.

Широкое применение получили композиционные материалы на основе меди с дисперсной фазой из тугоплавких металлов, таких как молибден, вольфрам и др. Их получают в определенных составах и специальных способах производства методами порошковой металлургии для обеспечения необходимого набора свойств деталей СВЧ электроники.

Потребность в композитах на основе меди в «НПП «Исток» возникла еще с середины 60-х годов в качестве материала (Cu-Mo) для пролётных труб вакуумных СВЧ приборов клистронного типа.

Этот материал должен был обладать, как минимум, следующими свойствами:

- иметь высокую теплопроводность;
- достаточно узкий интервал ТКЛР;
- хорошую формоустойчивость;
- необходимое для сохранения внутренних размеров трубы сопротивление электронной эрозии;
- смачиваемость твердыми припоями на основе меди, золота и серебра.

Также нашли широкое применение композиты на основе алюминия (алюминий-карбид кремния, алюминий-углерод и др.). В авиационной и космической отраслях, как известно, одну из важнейших ролей играют массогабаритные характеристики изделия. К одному из направлений развития этих отраслей стоит отнести разработку материалов, сочетающих в себе необходимые конструкционные и эксплуатационные свойства

(прочность, теплопроводность, вакуумную плотность, коррозионную стойкость) и при этом обладающих малым удельным весом. В частности, такая задача была решена после разработки технологии создания облегченных теплоотводящих оснований из композиционного материала SiC-Al для элементов конструкций приемно-передающих субмодулей активной фазированной антенной решетки (АФАР). Таким образом, развитие СВЧ электроники неразрывно связано с разработкой новых материалов, обладающих необходимыми заданными свойствами.

Многообразие свойств композитов и расширяющиеся масштабы их применения определяют актуальность разработки новых способов создания композитов, изучения свойств этих материалов, а также совершенствование способов производства.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи – разработке технологии производства композиционных материалов на основе металлической матрицы (медь, алюминий) и наполнителя (молибден, карбид кремния, углерод) для изделий СВЧ электроники на основе методов обработки давлением. Работа выполнена на АО «НПП «Исток» им. Шокина» и в НИТУ «МИСиС».

Автором были разработаны и усовершенствованы технологии для получения композиционных материалов на основе Cu и Al. Были проведены исследования влияния исходных компонентов и технологических режимов на конечные свойства полученных материалов. На основании полученных результатов проведена доработка технологии и изготовлены опытные образцы, которые успешно выдержали климатические и механические испытания по ГОСТ 20.57.406.

#### Цель работы.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование технологий производства металломатричных композиционных материалов на основе меди и алюминия для изделий СВЧ-электроники.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

- Провести анализ существующих технологий и оборудования для производства композиционных материалов на основе меди и определить направления их совершенствования.
- Выполнить обзор научно-технической и патентной литературы в области получения композиционных материалов на основе металлической матрицы из алюминия и наполнителя из карбида кремния.

- Разработать модель рабочего инструмента и провести исследования напряжений, возникающих в процессе горячего прессования с помощью программного комплекса QForm3D.
- Разработать и опробовать технологию производства металломатричных композитов с заданным комплексом свойств методом горячего прессования.
- Провести исследования физических и служебных свойств полученных композиционных материалов (теплопроводность, термический коэффициент линейного расширения, прочность на изгиб, плотность).
- Разработать технологию производства композиционного материала методами обработки давлением и получить изделия из металломатричного композиционного материала на основе алюминия.
- Провести испытания изделий по ГОСТ 20.57.406, полученных по разработанной технологии, на внешние воздействующие факторы.

#### Научная новизна

- Разработана технология производства обработкой давлением заготовок композиционных материалов на основе матрицы из меди, алюминия и его сплавов с содержанием наполнителя до 70%.
- Получены зависимости ТКЛР различных композитов SiC-Cu, установлено, что с уменьшением в композите медной составляющей ТКЛР материала уменьшается.
- Определены напряжения и деформации, возникающие в инструменте горячего прессования, с помощью программного комплекса QForm3D; показано, что при заданных режимах прессования инструмент работает в пределах упругих деформаций.
- Получены зависимости изменения плотности композита SiC-Al от времени изотермической выдержки и от давления прессования, на основе которых рекомендованы технологические режимы обработки давлением.
- Установлено, что использование карбида кремния с гексагональной структурой сингонии 6H модификаций  $\alpha$ -SiC и алюминиевого сплава с содержанием кремния 7...12%, позволяет получить композит SiC-Al с теплопроводностью до 240 Вт/м·°C.

#### Практическая значимость

- Разработана технология производства обработкой давлением изделий из композиционного материала SiC-Al, позволяющая повысить их плотность на 1% ( $3,08 \text{ г/см}^3$ ) и теплопроводность на 25% (240 Вт/м·K), а также обеспечить заданный температурный коэффициент линейного расширения композиционного материала ( $7,5...7,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

- Рекомендованы режимы горячего прессования композиционных материалов на основе матриц из меди и алюминия:
  - SiC-Al - давление 25 МПа,  $T=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{выдержки}} = 10$  минут;
  - SiC-Cu – давление 25 МПа,  $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t_{\text{выдержки}} = 10$  минут.
- Проведены механические и климатические испытания изделий из композиционного материала SiC-Al в виде теплоотводящих оснований для субмодулей активной фазированной антенной решетки (АФАР) на АО «НПП «Исток» им. Шокина». Положительный результат испытаний, подтвержденный протоколами испытаний, позволяет внедрить данную технологию в СВЧ-производство электронных модулей.
- Применение разработанной технологии позволило получить первые отечественные субмодули АФАР с композитом SiC-Al, не уступающим уровню зарубежных аналогов.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается использованием современного оборудования и аттестованных методик исследований, значительным количеством экспериментальных данных и применением статических методов обработки результатов, сопоставлением полученных результатов с результатами других авторов. Обоснованность предложенных диссертантом научно-технических решений доказана лабораторными исследованиями и опытно-промышленным испытанием разработанных технологий и оборудования. Основные выводы работы соответствуют известным из литературы концепциям и фундаментальным положениям теории обработки давлением и вычислительной математики.

#### Апробация работы.

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и форумах: Пятом Международном молодежном промышленном форуме «Инженеры будущего 2015» (г. Челябинск, 2015 г.); Научно-технической конференции АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино, 2015 г.); V научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино, 2015 г.); 21 международной промышленной выставке Металл-Экспо (г. Москва, 2015 г.); 4-я Молодежной Премии в области науки и инноваций проходящей в рамках 69-х дней науки студентов МИСиС (г. Москва, 2014 г.); Третьем Международном молодежном промышленном форуме «Инженеры будущего 2013» (г. Уфа, 2013 г.); III научно-технической конференции молодых ученых и специалистов АО «НПП «Исток» им. Шокина» (г. Фрязино, 2013 г.); 19 Международной промышленной выставке Металл-Экспо (г. Москва, 2013 г.); Международной, межвузовской и

институтской научно-технической конференции «68-е дни науки студентов МИСиС» (г. Москва, 2013 г.).

Публикации. Основное содержание работы отражено в 10 опубликованных работах, три из которых – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы и приложений. Она изложена на 143 страницах машинописного текста содержит 51 рисунок и 14 таблиц. Библиографический список включает 30 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан анализ технологических процессов и оборудования производства металломатричных композиционных материалов на основе меди и алюминия, обоснован выбор направления исследований, показана актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследований.

Первая глава посвящена обзору научно-технической и патентной литературы.

Высоконаполненные композиционного материалы получают методами порошковой металлургии, когда исходные компоненты на начальной стадии получения материала представляют комбинацию порошков. Эффективность порошковой металлургии обусловлена несколькими достоинствами. Одно из достоинств порошковой металлургии заключается в снижении затрат энергии на производство изделий по сравнению с литейной технологией. При этом значительная экономия энергии достигается за счет снижения температуры технологических операций, сокращения технологических операций, исключения механической обработки при изготовлении деталей сложной формы. Вторым важным достоинством порошковой металлургии является то, что способы порошковой металлургии позволяют использовать широкий спектр матричных порошков и армирующих наполнителей как по виду, так и по фракционному составу, и различные варианты компактирования, что существенно влияет на механические и эксплуатационные свойства композитов. Предварительная подготовка включает в себя приготовление состава пресспорошка с последующей гомогенизацией, после происходит его формование под давлением в пресс-формах методом горячего прессования, либо методом электроискрового спекания. При этом получают композиты высокого качества с малой пористостью.

Проведенный анализ существующих способов производства металломатричных композиционных материалов позволил определить технологическое направление для

отработки производства макетов из композита SiC-Al с заданными свойствами на основе метода горячего прессования порошков, а также разработать технологию промышленного производства теплоотводящих элементов СВЧ субмодулей из вышеуказанного композита на основе метода пропитки заготовки расплавом алюминия под давлением.

Вторая глава посвящена изучению и отработке методик исследования композиционных материалов и полученного конечного материала. Качество исходных компонентов напрямую связано с достижением необходимых параметров композиционных материалов. Это высокая теплопроводность, минимальная пористость материала, качество защитного покрытия и т.д. В главе приведены методики исследования образцов на следующих установках:

- дилатометр DIL 402 C, (определение ТКЛР);
- дифрактометр ДРОН-8 (определение фазового состава порошковых материалов);
- установка для измерения плотности SHIMADZU;
- оптический микроскоп OLYMPUS (изучение микрошлифов).
- установка для измерения теплопроводности;
- установка для измерения прочности на изгиб.

Применение указанных установок и методик позволяет оценивать все необходимые характеристики композиционных материалов, которые непосредственно связаны с выполнением режимов их производства.

Третья глава описывает существующие технологии и оборудование производства металломатричных композиционных материалов на основе меди и рекомендации по их совершенствованию.

Получение конструкционных материалов из псевдосплава Cu-Mo с заданными свойствами оказалось достаточно сложным из-за большого различия свойств меди и молибдена, а также из-за необходимости учета влияния таких факторов, как размер частиц, равномерность распределения частиц порошка меди и молибдена, точность регулирования и поддержания температуры спекания, соблюдение режимов нагрева, выдержки и охлаждения.

Контроль свойств принято проводить по весу, химическому составу и внешнему виду спеченных штабиков. Выход годных штабиков, изготовленных по этой технологической схеме, составлял 40...50%. Дальнейшие работы, нацеленные на увеличение выхода годного и снижение брака готовых пролётных труб из-за пористости материала, были направлены на изыскание способов повышения плотности штабиков.

В результате были внесены в технологию следующие дополнительные операции:

- контроль каждого штабика после прессования на отсутствие расслоений;



- контроль каждого штабика после спекания на отсутствие «выпотеваний» меди, сколов и трещин;
- холодная допрессовка штабиков после спекания, иногда двукратная с промежуточным отжигом в водородной среде;
- выборочный контроль штабиков на плотность и величину удельного электрического сопротивления.

Внедрение этих изменений и дополнений в технологию производства штабиков позволило повысить выход годного до 85%, величина удельного электрического сопротивления штабиков МД-50 стала составлять 35,2...37,6 МСм/м. На рисунках 1 и 2 представлены фотографии микрошлифов композита медь-молибден МД-50 (медь – 50 % масс., молибден – 50 % масс.), полученного по действующей и улучшенной технологии производства соответственно.

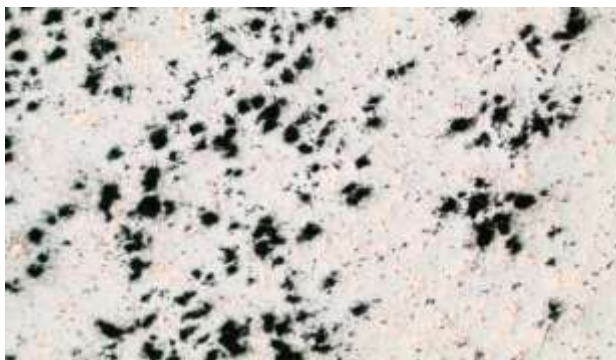


Рисунок 1 – Фотография микрошлифа композита МД-50, увеличение 200 крат (стандартная технология производства)



Рисунок 2 – Фотография микрошлифа композита МД-50, увеличение 200 крат (улучшенная технология производства)

Введение дополнительных операций позволило повысить плотность материала, что подтверждается фотографией (рисунок 2).

В настоящее время также ведутся разработки по получению композиционных материалов, среди которых особое место занимает медь-карбид кремния ( $\text{SiC-Cu}$ ). Создание технологии производства таких материалов крайне необходимо для промышленности, поскольку они обладают уникальным комплексом свойств, таких как

высокая теплопроводность, согласованность по ТКЛР с функциональными материалами электроники и т.д.

В ходе работы автором получены различные составы композиционного материала SiC-Cu и проведены аналитические исследования. Измерение ТКЛР образцов SiC-Cu проводились на установке DIL 402 C в среде аргона. Скорость нагрева составляла 5 °C/мин. Температурный диапазон измерения ТКЛР составляет 20...250 °C.

Исследование образцов SiC-Cu различных составов позволило получить кривые зависимости ТКЛР от температуры, представленные на рисунке 3.

Из графика видно, что с уменьшением в композите медной составляющей ТКЛР материала уменьшается. Также на графике приведены данные по дилатометрии материала медь-молибден (МД-50) и меди вакуумной плавки (МВ). Стоит отметить, что состав SiC – Cu 45/55 имеет ТКЛР в диапазоне 20...150°C меньше, чем медь-молибден. Конструкционный композиционный материал системы SiC-Cu также легче материала медь-молибден. Плотность композиционного материала SiC-Cu составляет 5...7,5 г/см<sup>3</sup>, плотность МД-50 - 9...10 г/см<sup>3</sup>. Данное преимущество позволяет использовать SiC-Cu в системах, чувствительных к весу.

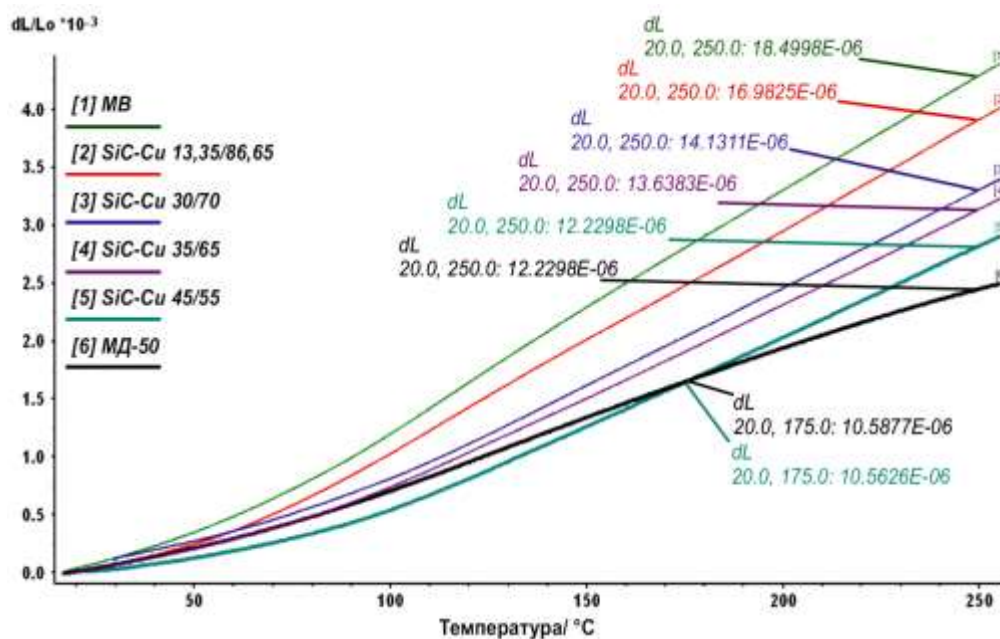


Рисунок 3 – График зависимости ТКЛР различных композитов SiC-Cu от температуры

Четвертая глава посвящена разработке технологии производства металломатричных композиционных материалов на основе алюминия методами обработки давлением и инструмента для ее реализации.

Система алюминий-карбид кремния является двухфазной. Одна фаза – металлическая матрица алюминиевого сплава (АК12ч), вторая – карбид кремния, имеющий преимущественно гексагональную кристаллическую решетку (6Н). В качестве матрицы композита был выбран алюминиевый сплав. Этот сплав имеет высокую теплопроводность 230 Вт/м·К, низкую плотность 2,7 г/см<sup>3</sup> и низкую стоимость. К его недостаткам необходимо отнести высокий ТКЛР –  $23 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ . Это один из важнейших параметров разрабатываемого материала, поскольку он должен быть согласован с ТКЛР приборов ( $5 \dots 8 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ ) фиксируемых на теплоотводящие основания. Поэтому выбирая наполнитель композита, необходимо выбрать материал с низким ТКЛР. В качестве наполнителя был выбран SiC, ТКЛР которого составляет  $4 \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ , а теплопроводность достигает 400 Вт/м·К. Выбор в качестве наполнителя SiC с решеткой 6Н обоснован его наибольшей теплопроводностью. При концентрации SiC 63 % об. в композите материал согласован с низкотемпературной совместно обжигаемой керамикой по ТКЛР, и имеет теплопроводность 180 Вт/(м·град), плотность - 3,0 г/см<sup>3</sup>. Это в 3,3 раза меньше, чем у сплава медь-молибден.

Известно, что при изменении концентрации SiC в алюминиевом сплаве можно получить материалы с широким диапазоном эксплуатационных характеристик таких как, ТКЛР= $5 \dots 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , плотность 2,7...3,2 г/см<sup>3</sup>, теплопроводность 140...200 Вт/м·К. Сочетание таких свойств делают его идеальным материалом для теплоотводящих оснований электронных модулей АФАР, функционирующих при высоких уровнях мощности. Такой модуль включает в свой состав низкотемпературную совместно обжигаемую керамику, которая должна быть согласована по ТКЛР =  $(5,8 \dots 7,2) \cdot 10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$  с теплоотводящим основанием.

#### ***Получение макетных образцов композиционного материала SiC-Al методом горячего прессования.***

Для получения макетных образцов в работе был выбран способ производства металломатричного композиционного материала, основанный на методе горячего прессования. Этот метод позволяет варьировать свойства композита изменением состава исходных компонентов шихты.

Необходимые параметры конечного материала (плотность, теплопроводность, ТКЛР, структура материала) обеспечивают режимы прессования. Автором разработана специальная оснастка для прессования и выбраны рациональные режимы процесса.

Изготовление алюмоматричного композиционного материала на основе системы SiC-Al предложено производить в следующей последовательности. Взвешивание исходных компонентов, смешивание компонентов композита, введение пластификатора в

пресс-порошок, формование заготовок, горячее прессование заготовок, спекание прессовок в регулируемой атмосфере, шлифовка спеченных заготовок композита, резка заготовок под размер, нанесение покрытия, контроль параметров материала.

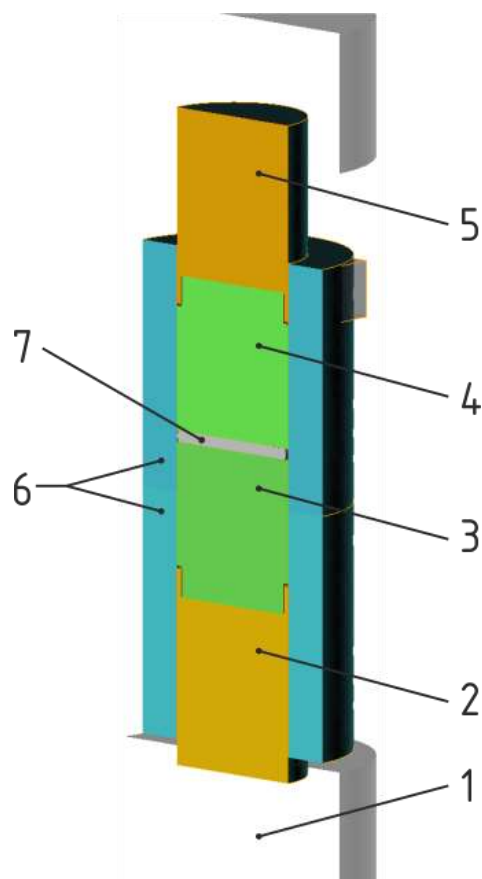
Горячее прессование заготовок макетов образцов композиционного материала осуществлялось на гидравлическом прессе PYE-250 SIM. Для осуществления производства макетных образцов из композиционных материалов методом горячего прессования была спроектирована и изготовлена специальная оснастка (пресс-форма).

В случае прессования композита SiC-Al рабочая температура пресс-формы составляет 500...650 °C. Материал пресс-формы должен обладать высоким сопротивлением термической усталости, сохраняя способность выдерживать многократные нагревы и охлаждения без образования сетки трещин. Примером такого материала является сталь 4X5МФС, которая применяется для производства поковок, различных деталей общего машиностроения; пресс-форм для литья под давлением алюминиевых, а также цинковых и магниевых сплавов.

На рисунке 4 приведена схема пресс-формы с заготовкой. Составные пуансоны позволяют снизить тепловые потери, уменьшают температуру внешних частей пуансона, которые находятся вне зоны нагрева. Параметры прессования варьировались в следующих пределах: температура прессования – 550, 600, 625 °C; давление прессования – 5 - 25 МПа; время прессования – 5 - 20 минут.

В работе разработана и исследована модель рабочего инструмента оснастки для горячего прессования, проведен расчет по фактическим напряжениям в программном обеспечении QForm. Условия расчета следующие: скорость прессования составляет 1 мм/с на гидравлическом прессе при максимальном усилии 0,25 МН и температуре 600 °C. Исходная толщина заготовки составляет 8 мм, конечная толщина после прессования составила 4 мм.

Проведен расчет напряжений и деформаций, возникающих в инструменте, изготовленного из стали 4X5МФС, в процессе горячего прессования. Максимальные напряжения в рабочем инструменте составляют 130 МПа, а максимальные деформации – 0,00023 мм (рисунки 5 и 6). Расчет показал, что в заданных режимах прессования инструмент работает в пределах упругих деформаций.



1, 2, 3 - части нижнего пуансона; 4, 5 - части верхнего пуансона; 6 - матрица;  
7 - заготовка из композита SiC-Al

Рисунок 4 – Пресс-форма для прессования композита

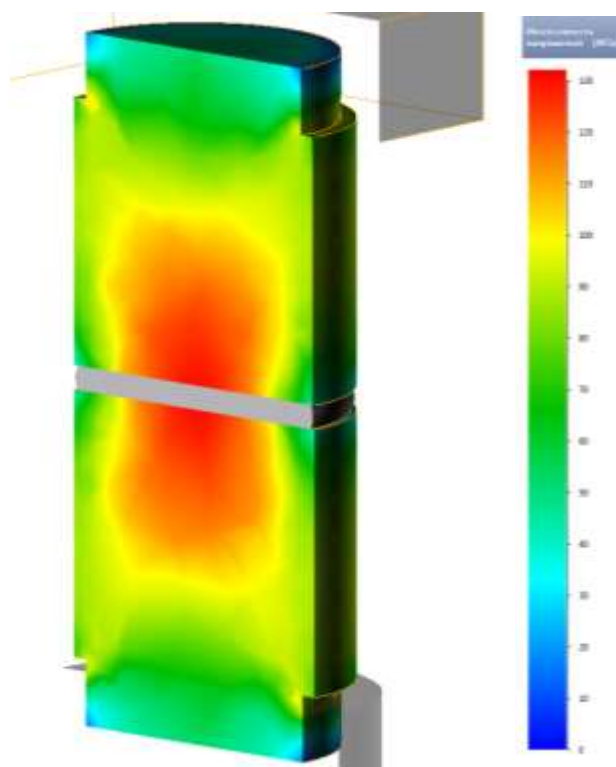


Рисунок 5 – Профиль распределения напряжений в рабочем инструменте пресс-формы

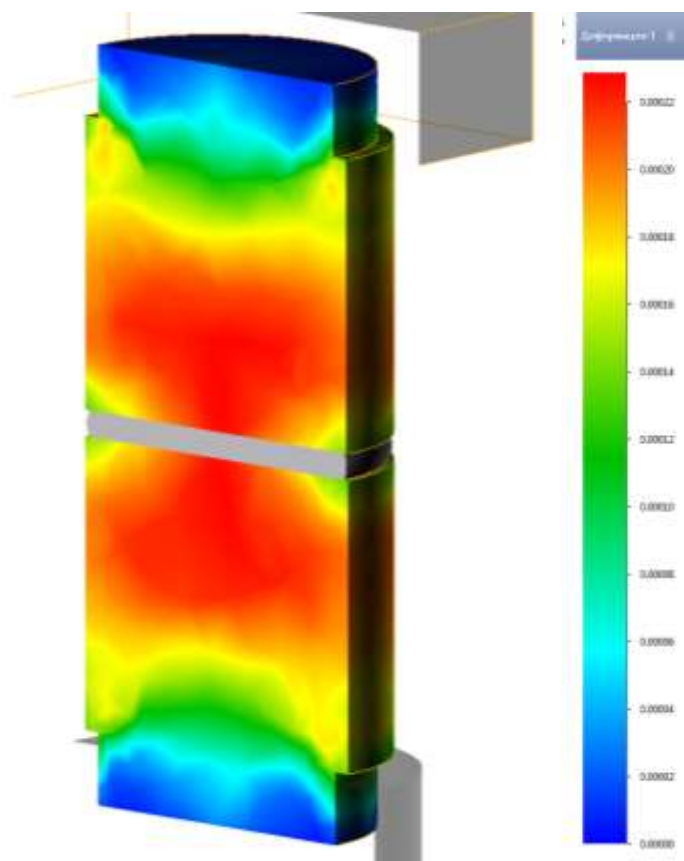


Рисунок 6 – Профиль распределения деформаций в рабочем инструменте прессформы

Анализ результатов расчета разработанной оснастки для прессования показал возможность ее использования в заданных условиях.

На рисунке 7 приведено изменение плотности композита от времени изотермической выдержки, а на рисунке 8 от давления прессования. Рациональное время изотермической выдержки составляет до 10 мин, что является достаточным условием для протекания процесса уплотнения. Зависимость плотности от давления прессования близка к линейной, максимальная плотность достигается при давлении 25 МПа (максимальное давление пресса). При температуре прессования 550 °С, времени прессования 15 минут и давлении 25 МПа плотность заготовок композита недостаточна и имеют пористую структуру. При 625 °С происходит выжимание алюминия из заготовки композита, заготовка разрушается. Наиболее рациональной является температура 600 °С. При данной температуре плотность заготовки композита составляет 2,8...2,9 г/см<sup>3</sup>.

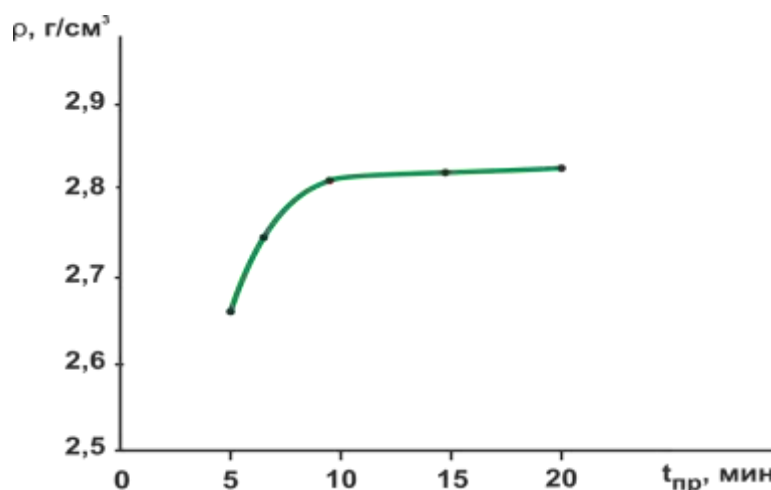


Рисунок 7 – Изменение плотности композита SiC-Al от времени изотермической выдержки при горячем прессовании ( $T_{пр}=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P=20\text{ МПа}$ ) заготовки состава № 2

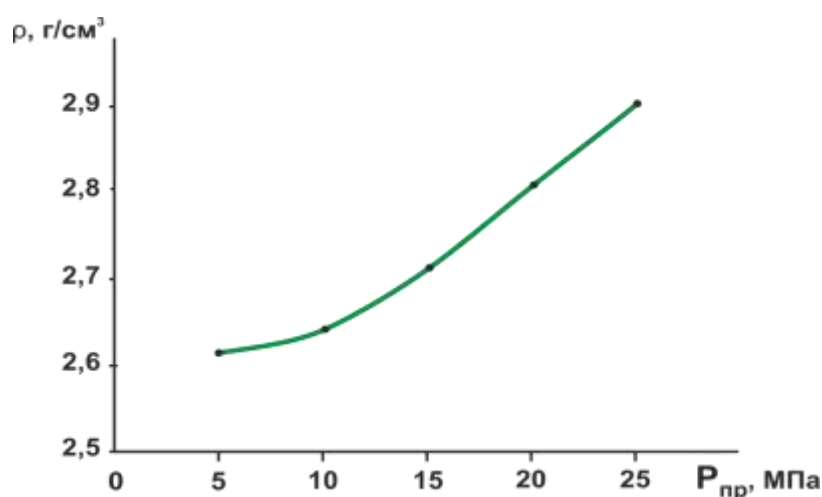


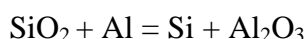
Рисунок 8 – Изменение плотности композита SiC-Al (состав №2) от давления прессования ( $T_{пр}=600\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $t=10\text{ мин}$ )

После прессования алюминиевая матрица имела зернистую структуру. Большинство композиционных материалов – представители термодинамически неравновесных систем, для которых характерно наличие развитой сети внутренних границ раздела и градиентов химических потенциалов элементов в матрице и армирующих элементах. Эти градиенты являются движущей силой процессов межфазного взаимодействия, в частности взаимной диффузии и химических реакций. Межфазное взаимодействие в ограниченной степени необходимо для получения композиционных материалов с оптимальными свойствами, а именно с улучшенными механическими свойствами. Поэтому для улучшения структуры алюминиевого сплава его необходимо спекать. При спекании матричный алюминиевый сплав более плотно обтекает зерна наполнителя, что улучшает межфазное взаимодействие.

В ходе исследований установлено, что рациональные технологические параметры процесса спекания: температура спекания  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ , время выдержки 1 час, атмосфера – азот.

Данная температура позволяет исключить взаимную диффузию и химическое взаимодействие между фазами.

В работе проведен анализ свойств различных составов. Для исследований были выбраны составы композита, содержащие 50...65 % об. карбида кремния, 4...7 % об. оксида кремния, 41...30 % об. алюминиевой пудры и состав без добавок оксида кремния. Кремний для легирования сплава вводился методом алюмотермии. Порошковая технология позволяет легировать алюминий в процессе изготовления по схеме:



В процессе экзотермической реакции происходит образование целевого кремния в алюминиевом сплаве. При этом для поддержания соотношения между алюминием и карбидом кремния в композит предложено вводить дополнительное количество алюминия.

Было разработано более 10 различных составов композита системы SiC-Al, состав шихты и измеренный ТКЛР которых приведены в таблице 1, из которой видно, что ТКЛР композита SiC-Al находится в диапазоне (5...11)  $10^{-6} \cdot \text{K}^{-1}$ . Это позволяет подбирать необходимый состав композиционного материала для максимального согласования с определенным типом керамики. К достоинствам полученного материала стоит отнести его легкость. По сравнению с применяемым сейчас материалом медь-молибден, полученный материал легче более чем в 3 раза, что делает его предпочтительным в системах чувствительных к весу в авиакосмической промышленности.

Таблица 1 – Разработанные составы композита SiC-Al

Заготовка	Состав шихты		ТКЛР, $1/\text{K} \cdot 10^{-6}$
N1	SiC(5мкм)	– 56,74 %	8,61
	Al <sub>пудра</sub>	– 39,32 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 3,93 %	
N2	SiC(50 мкм)	– 56,74 %	8,65
	Al <sub>пудра</sub>	– 39,32 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 3,93 %	
N3	SiC (20 мкм)	– 56,74 %	9,05
	Al <sub>пудра</sub>	– 39,32 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 3,93 %	
N5	SiC (50+5мкм)	– 60,12 %	7,49
	Al	– 35,71 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 4,16 %	
N6	SiC (5 мкм)	– 64,28 %	7,55
	Al <sub>пудра</sub>	– 35,71 %	
N8	SiC (5 мкм)	– 63 %	6,72
	Al <sub>пудра</sub>	– 30 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 7 %	



N9	SiC(5мкм)	– 7,2 %	5,08
	SiC(20мкм)	– 60,4 %	
	Al <sub>пудра</sub>	– 27,2 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 5,2 %	
N10	SiC(20мкм)	– 63 %	6,58
	Al <sub>пудра</sub>	– 30 %	
	SiO <sub>2</sub>	– 3 %	
	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	– 4 %	
N 11C	SiC (50+5мкм)	– 60,12 %	8,89
	Силумин (AK12)	– 39,88 %	
N 5У без SiO <sub>2</sub>	SiC (50+5мкм)	– 50 %	11,01
	Al <sub>пудра</sub>	– 50 %	

### ***Получение опытных образцов композиционного материала SiC-Al.***

В связи с возросшими потребностями авиационной промышленности в изделиях АФАР для производства опытной партии образцов теплоотводящих оснований из композиционного материала SiC-Al был выбран метод пропитки расплавом алюминия под давлением пористой заготовки (преформы) из карбида кремния, который позволяет производить тысячи штук изделий в год.

На основе проведенных исследований производства макетов SiC-Al был выбран фракционный состав заготовок (SiC – 50 мкм и 5 мкм) опытных образцов, с соответствующей кристаллической сингонией. Гексагональная кристаллическая структура 6Н карбида кремния позволяет получить максимальную теплопроводность в конечном материале.

Для оценки и выбора марки матричного сплава были выбраны алюминиевые сплавы системы Al-Si с различным содержанием Si, а также технически чистый алюминий различной чистоты.

При получении композитных материалов с матричными алюминиевыми сплавами и наполнителем карбидом кремния существует риск химического взаимодействия между SiC и Al-расплавом. Химическое взаимодействие в системе «Al и его сплавы – SiC» сопровождается образованием фазы Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> и носит необратимый характер в результате возможного торможения или полного подавления перитектической реакции L+Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> → (Al) + SiC при неравновесной кристаллизации. Установлено, что для полного подавления взаимодействия с образованием фазы Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub> в композиционных материалах на основе сплавов системы Al-Si температура расплава при получении должна быть не выше 700 °С. Время контакта SiC с матричным расплавом в этих условиях: при содержании в матричном сплаве Si до 7% - не более 30 минут. При содержании в матричном сплаве Si от 7 до 12% может быть более длительным.

Как известно, наибольшая теплопроводность наблюдается у технически чистых сплавов. Однако их получение затруднено высокой температурой плавления и низкими литейными свойствами. Кроме снижения риска образования карбидов алюминия, добавки Si снижают температуру плавления сплава и увеличивают его текучесть, которая будет максимальной при эвтектическом сплаве (12,4% Si). Это существенно повышает литейные свойства материала. Все вышеперечисленные факторы разработанной технологии являются положительными, так как позволяют работать при более низких температурах сплава.

Предлагаемая технология пресс-литья пропитки жидким алюминиевым расплавом под высоким давлением в замкнутых металлических формах, обеспечивает получение заготовок из материала SiC-Al с размерами, приближенными к заданным. Она обеспечивает выпуск серий изделий количеством 40 – 80 тыс. изделий в год (рисунок 9).

Процесс пропитки пористых керамических заготовок (преформ) под высоким давлением был осуществлен на прессе ИП-2500М-авто. Пресс обеспечивает номинальное усилие главного гидроцилиндра 2500 кН, скорость нагружения программируемая в диапазоне 1,0...100 кН/с. Размеры плит составляет 500х500 мм.

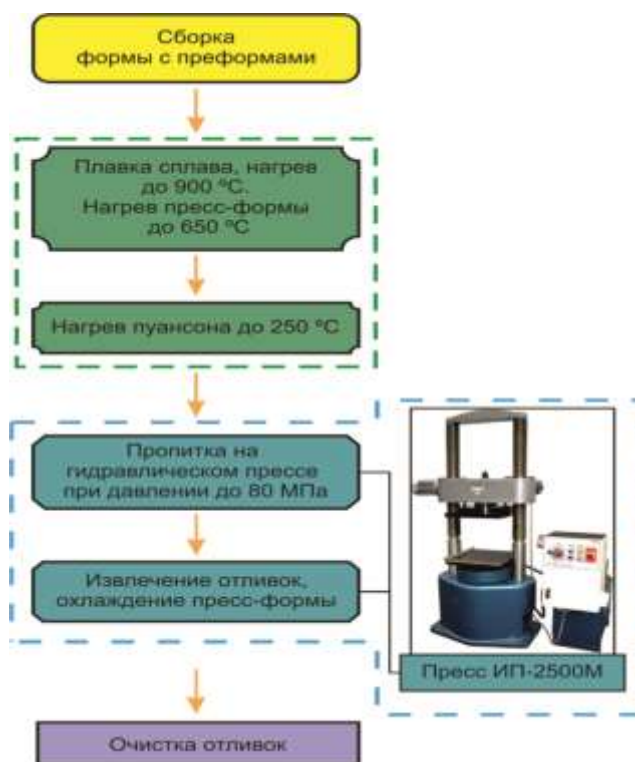


Рисунок 9 – Схема процесса пропитки пористых керамических форм под высоким давлением

С учетом возможных тепловых потерь в процессе пропитки заготовок (преформ) была разработана технологическая форма (рисунок 10). В качестве основного материала пресс-формы была выбрана штамповая сталь 4Х5МФС с поверхностным азотированием

на глубину до 0,15 мм и твердостью поверхности 50 - 55 HRC, что обусловлено высокими давлениями и температурами нагрева пресс-формы.

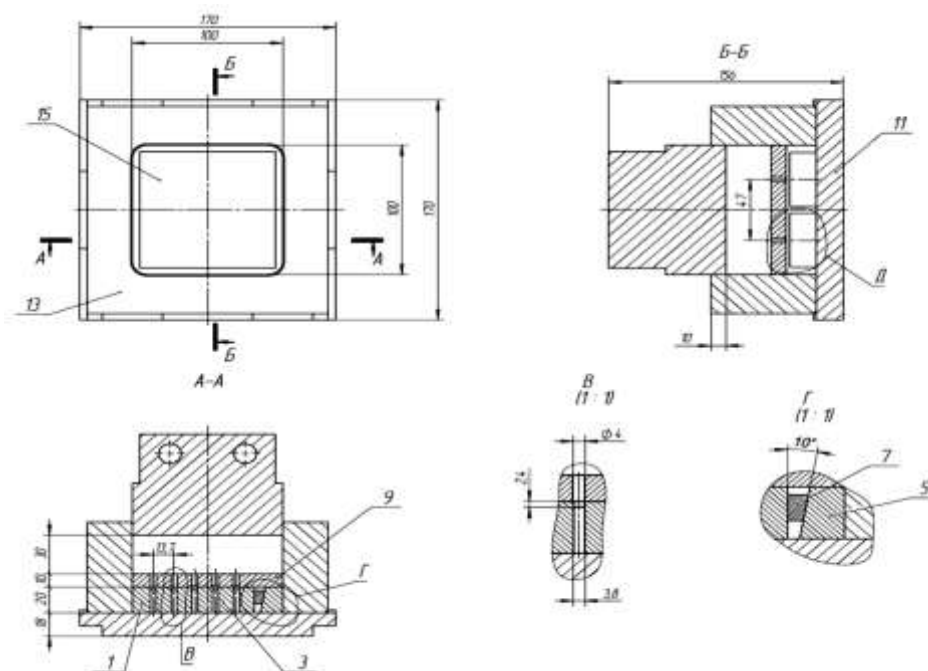


Рисунок 10 – Чертеж технологической оснастки для пропитки заготовок под высоким давлением

Программа прессы для проведения процесса пропитки выглядит следующим образом:

1. Движение плиты на быстром ходе до касания с пуансоном;
2. Движение плиты со скоростью 10 кН/с до достижения усилия 100 кН;
3. Движение плиты со скоростью 20 кН/с до достижения усилия 220 кН;
4. Движение плиты со скоростью 45 кН/с до достижения усилия 800 кН;
5. Выдержка при усиллии 800 кН на протяжении 30 с для обеспечения кристаллизации расплава под давлением.

Графики зависимости воздействующей силы на пуансон от времени и воздействующей силы от перемещения пуансона, а также условное разделение процесса на этапы показаны на рисунках 11 и 12.

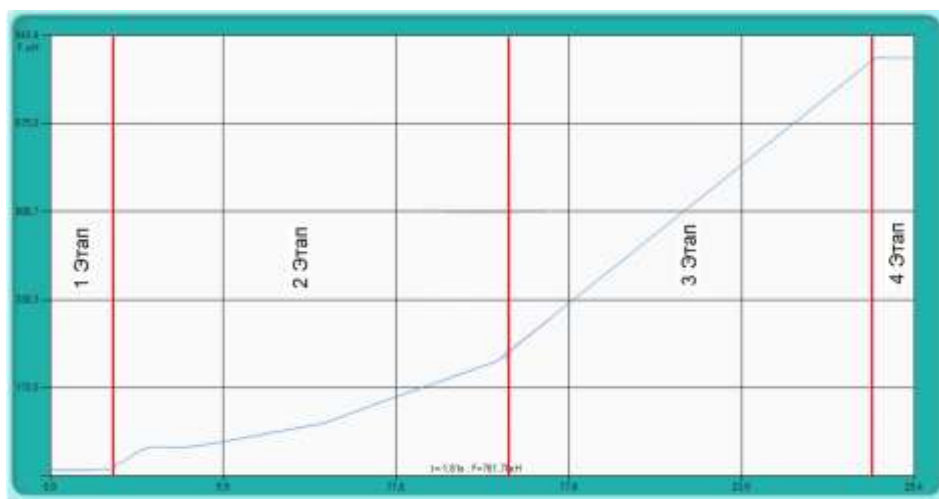


Рисунок 11 – Зависимость величины воздействующей силы на пуансон (кН) от времени процесса пропитки (с)

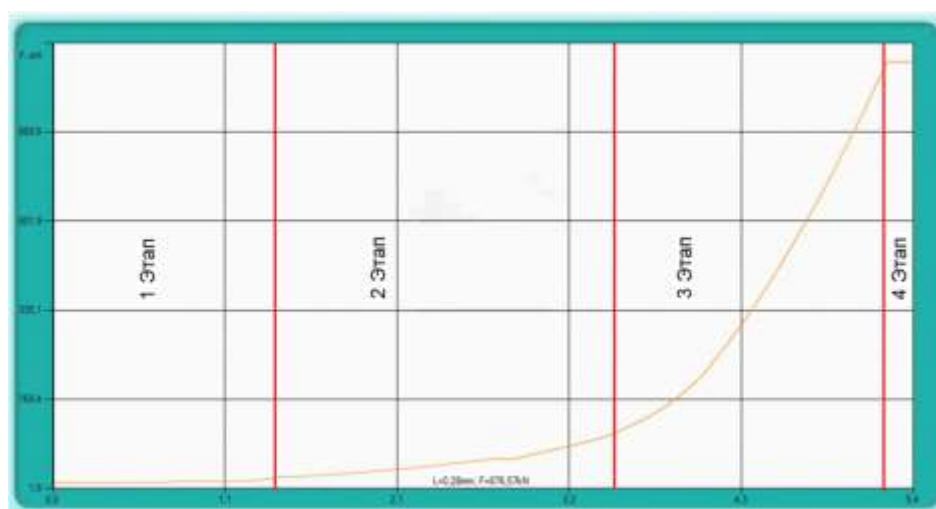


Рисунок 12 – Зависимость величины воздействующей силы на пуансон (кН) от величины перемещения поршня (мм)

Процесс пропитки, проводимый по указанным выше диаграммам нагружения пресса, обеспечивает получение композитного материала основного выбранного состава с плотностью выше  $2,95 \text{ г/см}^3$  и теплопроводностью выше  $180 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ .

Пятая глава посвящена отработке технологии нанесения защитных покрытий Ni - Au на опытные образцы.

Для успешного применения изделий из композита SiC-Al в электронике требуется, чтобы их поверхность была покрыта адгезионно прочными пленками из никеля (Ni) и золота (Au). Такое покрытие обеспечивает механически прочные паяные, сварные и клеевые соединения.

В рамках проведенных исследований отработаны соответствующие технологии подготовки поверхности и нанесения защитных гальванических покрытий с учетом разнородных свойств составляющих компонентов композита.

В результате выполнения работы были отработаны технологии подготовки поверхности и нанесения защитного покрытия Ni-Au на теплоотводящие основания из металломатричного композиционного материала SiC-Al. На рисунке 13 представлена фотография теплоотводящего основания с нанесенным защитным покрытием.



Рисунок 13 – Теплоотводящее основание для субмодуля АФАР

(слева – до нанесения защитного покрытия, справа – с покрытием Ni-Au.)

Шестая глава посвящена проведению испытаний образцов композиционных материалов.

Полученные образцы теплоотводящих оснований с соответствующим фракционным составом (SiC – 50 + 5мкм) из композиционного материала SiC-Al были подвергнуты механическим и климатическим испытаниям. Режимы и методы испытаний на механические и климатические факторы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы испытаний образцов теплоотводящих оснований

Наименование воздействующего фактора, его характеристика, единица измерения	Значения внешних воздействующих факторов	Метод испытаний по ГОСТ 20.57.406	Примечание
Механические факторы			
1 Синусоидальная вибрация: - диапазон частот, Гц - амплитуда ускорения, g	10-2000 20	103-1	1,2
2 Механический удар одиночного действия: - пиковое ударное ускорение, g - длительность действия ударного ускорения, мс	150 0,1-2	106-1	2
3 Механический удар многократного действия: - пиковое ударное ускорение, g - длительность действия ударного ускорения, мс - количество ударов	150 1-5 10000	104-1	2

Климатические факторы			
4 Повышенная температура среды: - максимальное значение при эксплуатации, °С	85	205-1	3
5 Пониженная температура среды: - минимальное значение при эксплуатации, °С	-65	205-1	3
6 Повышенная влажность воздуха: - относительная влажность при температуре 40 °С, %	98	207-2	4
Примечания. 1 Испытания проводятся по одной координатной оси ОХ. 2 Требования к изделию предъявляются только на прочность. 3 Время выдержки в каждой камере 30 мин, 3 цикла. 4 Допускается проводить ускоренные испытания в течение 21 суток.			

Все опытные образцы прошли испытания на механические и климатические факторы. На образцах отсутствуют механические повреждения, покрытие Ni-Au сохранило свою целостность, а также функциональные и защитные свойства.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Усовершенствованная технология производства композитов на основе систем Cu-Mo и Cu-W позволила улучшить характеристики изготавливаемого материала, а также повысить выход годной продукции до 85%.
2. С помощью программного комплекса QForm3D разработана и исследована модель рабочего инструмента оснастки для горячего прессования металломатричных композиционных материалов, на основе расчетов были определены фактические напряжения и деформации рабочего инструмента. Показано, что при заданных режимах прессования инструмент работает в пределах упругих деформаций ( $\sigma_{\max}$  напряжения – 130 МПа,  $\epsilon_{\max}$  деформации – 0,00023 мм), что обеспечивает его высокую работоспособность.
3. Разработана технологическая оснастка из стали 4X5МФС для осуществления процесса горячего прессования и пропитки заготовок алюминиевым расплавом под давлением.
4. Разработана технология производства макетов из композиционных материалов методом горячего прессования (давление до 25 МПа при  $T=0,9T_{пл}$  и изотермическая выдержка до 10 минут). Технология позволяет получить композиционные материалы на основе матрицы из меди, алюминия и его сплавов с содержанием наполнителя до 70%.
5. Проведенные рентгенофлуоресцентные исследования по элементному картированию образцов показали возможность экспрессного использования этого метода для определения однородности распределения компонентов в композитах на основе системы Cu-Mo.

6. Получены зависимости ТКЛР различных композитов SiC-Cu от температуры; установлено, что с уменьшением в композите медной составляющей ТКЛР материала уменьшается.
7. На основе проведенных исследований установлено, что использование карбида кремния с гексагональной структурой сингонии 6H модификаций  $\alpha$ -SiC и алюминиевого сплава с содержанием кремния 7...12%, позволяет получить композит SiC-Al с теплопроводностью до 240 Вт/м·°C.
8. Определен состав композиционного материала SiC-Al (SiC: 65÷70 вес. %; Al<sub>расплав</sub>: 35÷30 вес. %) и разработана технология производства и для изделий субмодулей АФАР, позволяющие по сравнению с прототипом повысить: плотность на 1 процент (3,08 г/см<sup>3</sup>); теплопроводность на 25 процентов (240 Вт/м·К) и обеспечить заданный температурный коэффициент линейного расширения композиционного материала  $7,5\div 7,9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
9. Разработана и опробована в промышленных условиях технология производства изделий из композиционного материала SiC-Al в виде теплоотводящих оснований для субмодулей АФАР. Многоступенчатая технология пропитки алюминиевым расплавом заготовки под давлением, с достижением максимального усилия 800 кН и выдержкой в течение 30 с, позволяет получить изделия с однородной кристаллической структурой матрицы и минимальной остаточной пористостью менее 1%.
10. Проведенные испытания изделий по ГОСТ 20.57.406, изготовленных по разработанной технологии, на внешние воздействующие механические и климатические факторы показали, что образцы пригодны для освоения в серийном производстве. На образцах, прошедших испытания, не обнаружено механических повреждений (сколов, трещин, нарушений целостности покрытия Ni-Au) и отсутствуют признаки коррозии (пятна, вспучивание покрытия). Результаты подтверждены протоколами испытаний.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОПУБЛИКОВАНО В РАБОТАХ

1. Пашков, А.Н. Получение макетов композиционного материала SiC-Al методом горячего прессования / А.Н. Пашков, С.М. Горбатюк, А.Г. Налогин // Научно-технический сборник «Электронная техника». Серия 1, «СВЧ-техника», выпуск 2 (533), 2017. С.6-7. (Рекомендован ВАК)
2. Пашков, А.Н. Некоторые особенности изготовления облегченных теплоотводящих оснований из композиционного материала SiC-Al для субмодулей АФАР / А.Н. Пашков [и др.] // Научно-технический сборник «Электронная техника». Серия 1, «СВЧ-техника», выпуск 3 (526), 2015. С.81-89. (Рекомендован ВАК)

3. Пашков, А.Н. Разработка технологии производства катодных сплавов на основе металлов платиновой группы для мощных электровакуумных СВЧ-приборов / А.Н. Пашков [и др.] // Научно-технический сборник «Электронная техника». Серия 1, «СВЧ-техника», выпуск 4 (523), 2014. С.73-77. (Рекомендован ВАК)
4. Пашков, А.Н. Оптимизация процессов напыления меди и хрома методом термического испарения в вакууме / С.М. Горбатюк, И.Г. Морозова, А.Н. Пашков// Вестник Севастопольского национального технического университета: сборник научных трудов. Выпуск 150, 2014. С.51-54.
5. Пашков, А.Н. Конструкционные композиционные материалы системы SiC-Me для изделий СВЧ-электроники / М.Е. Фоминов, А.Н. Пашков, И.Г.Морозова // Инжиниринг металлургического оборудования и технологий: Сб. науч. трудов студентов и аспирантов НИТУ «МИСиС» - М.: ООО «Металлургиздат», 2014. С.86-90.
6. Пашков, А.Н. Разработка технологии производства композиционного материала SiC-Cu / А.Н. Пашков // 69-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС». Международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. – М.: Изд. дом «МИСиС», 2014. С.222.
7. Пашков, А.Н. Сверхлегкий конструкционный композиционный материал системы SiC-Al для изделий СВЧ электроники / А.Н. Пашков // 68-е Дни науки студентов НИТУ «МИСиС». Международные, межвузовские и институтские научно-технические конференции. – М.: Изд. дом «МИСиС», 2013. С.141, 543.
8. Пашков, А.Н. Разработка технологического процесса производства композиционного материала системы SiC-Al / А.Н. Пашков, И.Г. Морозова, А.Г. Налогин // Инжиниринг металлургического оборудования и технологий: Сб. науч. трудов студентов и аспирантов НИТУ «МИСиС» – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2013. С.92-95.
9. Пашков, А.Н. Изучение свойств металлизированных покрытий, полученных методом резистивного напыления / А.Н. Пашков, И.Г. Морозова, Л.К. Першина //Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании'2012». – Выпуск 4. Том 9. – Одесса: «КУПРИЕНКО», 2012. С.48-57.
10. Пашков, А.Н. Исследование свойств тонких металлических пленок, полученных методом термического испарения / А.Н. Пашков, И.Г. Морозова, Л.К. Першина // Инжиниринг металлургического оборудования и технологий: Сб. науч. трудов студентов и аспирантов НИТУ «МИСиС». – М.: ЗАО «Металлургиздат», 2012. С.81-90.