

На правах рукописи



БАБКИН ДМИТРИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ
УПРАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВОМ МЕТАЛЛОМАТРИЧНЫХ СЛОИСТЫХ
КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ С ЗАДАННЫМИ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИМИ
СВОЙСТВАМИ**

2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Королев – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика-космонавта А.А. Леонова»

Научный руководитель:

Антипова Татьяна Николаевна, доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты:

Одинокое Сергей Анатольевич, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный университет (национальный исследовательский университет)», кафедра 1105, профессор г. Москва

Хаймович Ирина Николаевна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», кафедра обработки металлов давлением, профессор, г. Самара.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет», г. Тула.

Защита состоится 23 сентября 2025 г. в «15:00» часов на заседании диссертационного совета 24.2.324.03 на базе ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000 г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, малый актовый зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» и на сайте www.magtu.ru

Автореферат разослан «_____» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова М.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Информационное обеспечение является неотъемлемой частью системы управления качеством продукции, которая должна реализовывать как функции оперативного управления, так и планирования с учетом средств их реализации.

Анализируя существующие информационные подсистемы для управления качеством композиционных материалов, следует отметить, что они не в полной мере отвечают требованиям по качеству информации для оперативного управления и планирования, что приводит к падению эффективности управления и, соответственно, к ухудшению качества выпускаемой продукции.

В результате анализа опубликованных материалов по управлению качеством изделий, в том числе из композиционных материалов, выявлено, что разработанные ранее модели невозможно применить к металломатричным слоистым композиционным материалам (МСКМ) в связи со спецификой их производства. Кроме того, все опубликованные результаты исследований направлены на решение задач оперативного управления и, таким образом, не рассматривался важнейший аспект управления – планирование, которое требует построения прогнозных моделей, что в свою очередь приводит к необходимости включения блока прогнозной информации, а также блока средств реализации технологии (оборудование) в подсистему информационного обеспечения.

Кроме того, проблемы качества продукции, изготовленной из металломатричных композиционных материалов, а именно подкласса слоистых металломатричных композиционных материалов, не были в достаточной степени рассмотрены в научных работах.

Таким образом, разработка научно обоснованного информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования

Среди научных разработок отечественных ученых в области управления качеством наибольший интерес представляют работы Б.В. Бойцова, Ю.С. Ключкова, В.В. Бойцова, А.А. Богданова, А.Я. Боярского, В.Н. Азарова, И.Г. Резника и другие.

Основные методы и инструменты управления качеством продукции были предложены в научных разработках и докладах следующих иностранных авторов: В. Парето, Г.Л. Ганта, В. Шухарта, Э. Деминга, Дж. Джурана, Г. Тагути, Ф. Тейлора, К. Исикава и других.

Кроме того, существуют наработки по научному обоснованию и внедрению информационного обеспечения технических систем в различных сферах деятельности М. Р. Когаловского, Ю. В. Бородакия, Ю. П. Липунцова.

Область исследования

Область данного исследования соответствует паспорту специальности 2.5.22. Управление качеством продукции. Стандартизация. Организация производства, в том числе пунктам:

- п.1 Методы анализа, синтеза и оптимизации, математические и информационные модели состояния и динамики процессов управления качеством и организации производства.
- п.9 Разработка и совершенствование научных инструментов оценки, мониторинга и прогнозирования качества продукции и процессов.
- п.23 Разработка и совершенствование методов и средств планирования и управления производственными процессами и их результатами.

Объект исследования: система менеджмента качества металломатричных слоистых композиционных материалов (МСКМ).

Предмет исследования: подсистема информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов.

Цель: Разработка структуры информационного обеспечения для системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать основные теоретические положения построения подсистемы информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричных слоистых композиционных материалов.

2. Обосновать структуру информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных композиционных материалов для обеспечения оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.

3. Провести экспериментальное исследование для выявления зависимостей и построения комплекса графических и математических моделей с целью обоснования параметров технологических операций с учетом возможностей оборудования для получения требуемых показателей качества.

4. Разработать модель управления качеством изделий из металломатричного слоистого композиционного материала.

5. Провести экспериментальное исследование для обоснования технологии получения нового металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C.

Научная новизна

В результате проведенных исследований были получены следующие новые научные результаты:

1. Разработаны основные требования к построению системы информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричных слоистых композиционных материалов, основанные на принципах системного и процессного подходов и гарантирующие получение качественной информации для оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.

2. Обоснована структура системы информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричного слоистого композиционного материала, которая обеспечивает реализацию требований по полноте информации для оперативного управления (управляющих воздействий), мониторинга (информации обратной связи) на всех стадиях технологических процессов, оценки соответствия качества продукции требованиям заказчика, а так же планирование производства новой продукции.

3. На основании проведенных экспериментальных исследований получен комплекс математических и графических зависимостей, обеспечивающих информацию для выполнения технологических операций, гарантирующих получение изделий с заданными показателями качества. В том числе получены зависимости показателя качества конечной продукции (толщина) от характеристики полуфабриката (средняя толщина насыщенного углеродного холста) и обоснованы их достоверные значения 0,0119 - 0,0129 мм, которые обеспечивают получение толщины конечной продукции $y = 0,55 - 0,58$ мм. Так же получена зависимость показателя качества конечной продукции (толщина) от параметра технологической операции (температуры спекания) и обоснованы их достоверные значения от 800 до 1900°C, которые обеспечивают заданные заказчиком толщины конечной продукции $y = 4,3 - 4,9$ мм.

4. В развитие полученной концептуальной модели технологии производства продукции из металломатричного слоистого композиционного материала Ti-Cu-C разработана блок-схема управления качеством продукции из данного материала, которая представляет собой совокупность элементов (технологических операций), каждый из которых связан входными и выходными потоками информации об исходных материалах, управляющих воздействиях (параметрах технологических операций) и характеристиках полуфабрикатов. Данная модель позволяет обосновать структуру системы информационного обеспечения для оперативного управления качеством новых металломатричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами.

Практическая значимость результатов

Обоснована технология изготовления нового металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C, отвечающая перспективным требованиям заказчика для применения в разработках авиационной, ракетно-космической и военной техники. Основными факторами, влияющими на показатели качества МСКМ, являются технологические параметры, одним из них является горячевакуумное прессование.

В результате экспериментальных исследований разработаны рекомендации по рационализации технологического процесса горячевакуумного прессования, а именно выдержка при 700°C в течение 30-60 минут с последующим поднятием температуры до 1000-1800°C и последующей выдержкой в течение часа при давлении 10 МПа с применением схемы

послойной выкладки с соотношением фольг титана и меди Cu- 55%, Ti -45%. Результаты диссертационной работы внедрены в ООО «Центр безопасности информации» (Королев), ФБУ «Авиалесоохрана» (Пушкино), в учебный процесс Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Технологический университет имени дважды Героя Советского Союза, летчика космонавта А.А. Леонова» для подготовки обучающихся по направлениям 27.03.02 «Управление качеством» (уровень образования - бакалавриат), 15.03.06 «Мехатроника и робототехника» (уровень образования - бакалавриат), 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов» (уровень образования - специалитет).

Методология и методы исследования

Исследования основаны на методологии системного и процессного подходов, а также применены методы графического и математического моделирования, сравнительный и риск-ориентированный анализ.

Положения, выносимые на защиту:

1. Основные теоретические положения построения подсистемы информационного обеспечения производства металломатричных слоистых композиционных материалов.
2. Структура системы информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричного слоистого композиционного материала Ti-Cu-C.
3. Комплекс математических и графических зависимостей показателей качества конечной продукции от параметров технологических операций, характеристик полуфабрикатов.
4. Модель управления качеством металломатричного слоистого композиционного материала Ti-Cu-C, основанная на методологии системного и процессного подходов и учитывающая особенности производства и пооперационный характер формирования показателей качества продукции.

Степень достоверности и апробация результатов

Степень достоверности результатов диссертационного исследования подтверждается адекватно применяемыми теоретическими положениями системного и процессного подходов, и методами математического моделирования, и результатами численных экспериментов.

Наиболее важные результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на следующих конференциях: 4-я Всероссийская научная конференция перспективных разработок молодых ученых «Молодежь и наука: шаг к успеху» (Курск, 2021 г.); XI Ежегодная научная конференции аспирантов «МГОТУ» «Инновационные аспекты социально-экономического развития региона» (Королев, 2021 г.); Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества». (Тула, 2023 г.); X Всероссийская научно-практическая интернет-конференция «Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии» (Белгород, 2025 г.).

Публикации

По теме диссертационного исследования опубликовано 8 статей, в том числе 2 в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 131 страницах, содержит 38 рисунков, 14 таблиц, список литературы из 113 наименований, 3 приложения на 3 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, определены объект и предмет исследования, сформулированы цели, задачи исследований и методы их решения, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации и публикациях.

В первой главе представлен обзор научно-технической литературы по современному состоянию исследований информационного обеспечения производства металломатричных композиционных материалов и технологии их изготовления.

В результате анализа исследований по управлению качеством выявлено, что оценке и управлению качеством информационного обеспечения композиционных материалов не

уделялось должного внимания, что не позволяло гарантировать использование качественной информации для управления. Следовательно, при применении информационных систем с ненадлежащим качеством, падает эффективность управления процессами, что приводит к ухудшению качества выпускаемой продукции.

Анализ литературных источников показал, что производство композиционных материалов сложный многостадийный процесс, который предусматривает высокую степень соответствия требуемым параметрам на каждой стадии изготовления. Таким образом, одним из основных факторов, влияющих на показатели качества МСКМ, является процесс изготовления. Следовательно, требуется изучить технологическую последовательность производства и оценить влияние отдельных стадий, а также влияние характеристик полуфабрикатов и оборудования на показатели качества конечной продукции.

Система информационного обеспечения предназначена для сбора, анализа и хранения информации, необходимой для принятия управленческих решений и прежде всего для обоснования технологии производства. Для управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов требуется научно обоснованная информационная подсистема (информационное обеспечение).

На основании проведенного анализа литературы сформулированы задачи, подлежащие исследованию.

Вторая глава посвящена разработке основных требований к подсистеме информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричных композиционных материалов и обоснованию структуры информационного обеспечения управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов.

Предлагаются следующие основные теоретические положения (требования) к подсистеме информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричных композиционных материалов:

- Информационную подсистему следует рассматривать как неотъемлемую часть системы управления качеством продукции.
- Информационная подсистема ориентирована на потребителя.
- Информационная подсистема предназначена для сбора, хранения, анализа ретроспективной и прогнозной информации для оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.
- Информационная подсистема должна включать следующие элементы: показатели качества конечной продукции, характеристики объекта управления (полуфабрикаты по каждой операции), управляющие воздействия, информацию обратной связи (по каждому полуфабрикату и конечной продукции), характеристики исходных материалов и параметров оборудования.
- Информационная подсистема должна иметь возможность обосновывать технологические параметры и характеристики полуфабрикатов для получения заданных показателей качества на основе соответствующих математических и графических моделей.
- Информационная подсистема должна прогнозировать возможность изготовления новой продукции с заданными свойствами с учетом технологических возможностей и на основе экспериментально полученных математических моделей.
- Информация должна отвечать требованиям по: достоверности, своевременности, полноте, а также другим требованиям исходя из специфических требований формирования информационных баз данных.
- Информационная подсистема должна иметь структурированную процедуру формирования информационной базы.

С учетом разработанных основных требований к подсистеме информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричных композиционных материалов предлагается следующая блок-схема формирования структуры информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричного композиционного материала (рис. 1).

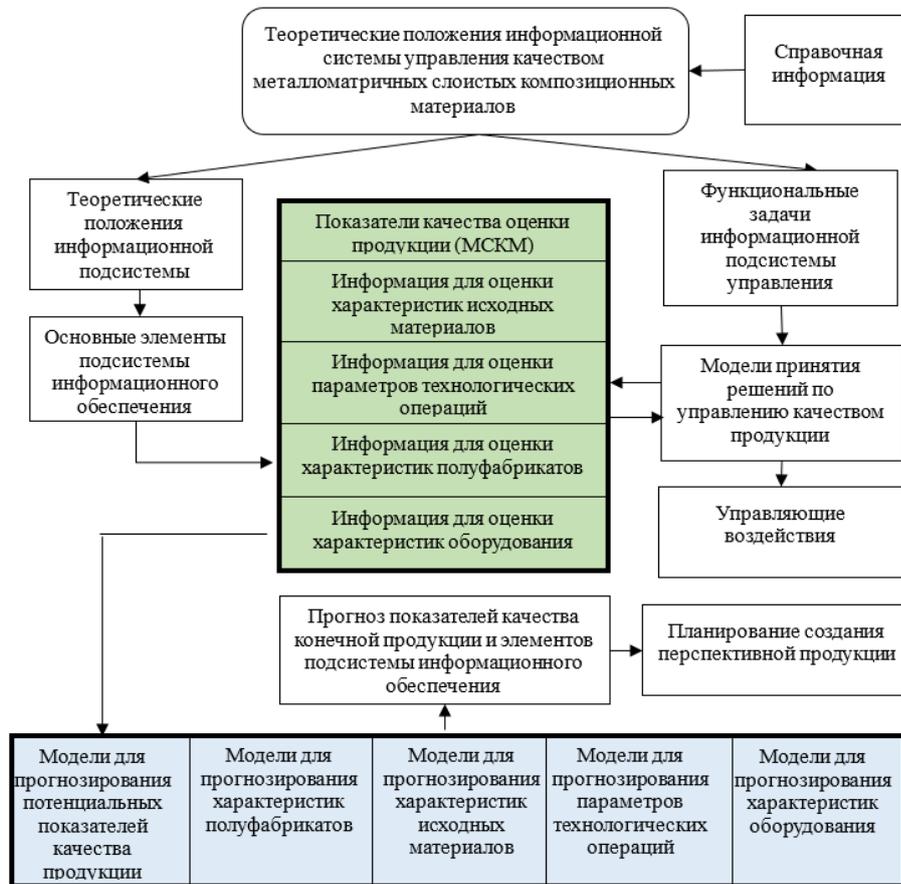


Рисунок 1 – Блок-схема формирования структуры информационного обеспечения управления качеством изделий из металломатричного композиционного материала

На основе проведенного анализа выявленных связей показателей качества с параметрами технологических операций и характеристиками оборудования и полуфабрикатов предлагается следующая структура информационного обеспечения оперативного управления качеством изделий из металломатричного композиционного материала (рис. 2) и математическая модель зависимости показателей качества от основных влияющих факторов (формула 1).

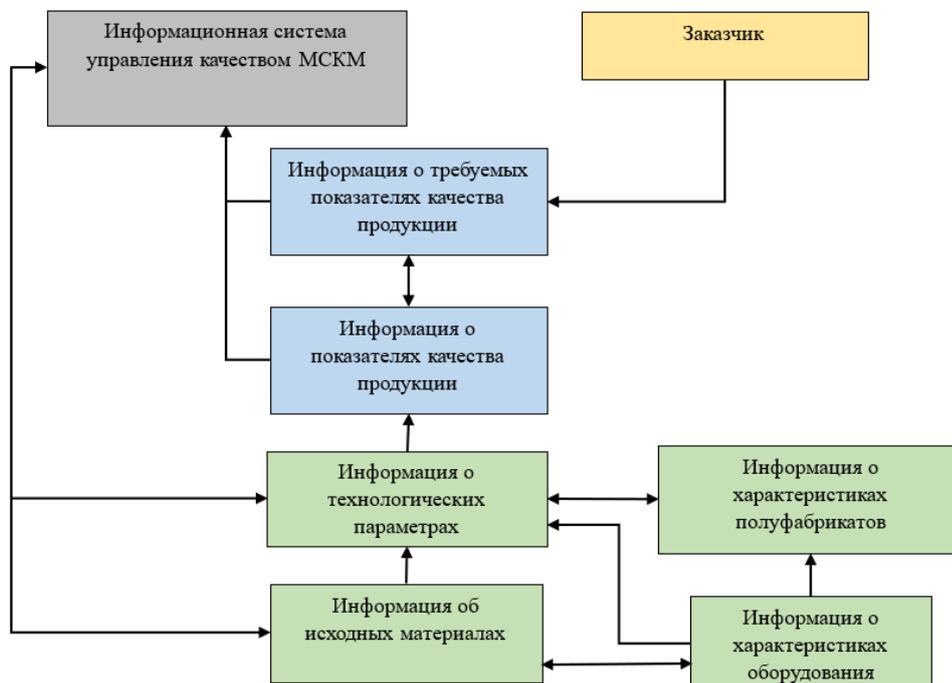


Рисунок 2 – Структура информационного обеспечения оперативного управления качеством изделий из металломатричного композиционного материала

$$y_i = f(a_i^1, \dots, a_i^n; x_i^1, \dots, x_i^n; c_i^1, \dots, c_i^n; b_i^1, \dots, b_i^n), \quad (1)$$

где a_i^n – i -ая характеристика n -ого исходного материала; x_i^n – i -ый параметр n -ой технологической операции; c_i^n – i -ая характеристика качества n -ого полуфабриката; b_i^n – i -ая характеристика n -ого оборудования; y_i – i -ый показатель качества конечной продукции (МСКМ).

В результате проведенных исследований разработаны основные теоретические положения построения информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов, на основе которых и выявленных связей между элементами, предложена структура информационного обеспечения, реализующая системный подход (рис. 1) и отвечающая требованиям предъявляемым к информации для оперативного управления, мониторинга и планирования производства изделий из металломатричных слоистых композиционных материалов.

Третья глава посвящена обоснованию структуры системы информационного обеспечения системы управления качеством металломатричного композиционного материала на примере системы Ti-Cu-C.

На первом этапе исследования разработана концептуальная модель технологии производства МСКМ-Ti-Cu-C, методологической основой которой является системный и процессный подходы к управлению качеством.

Композиционный материал МСКМ- Ti-Cu-C изготавливается путем выполнения ряда последовательных технологических процессов (операций). Концептуальная модель технологии производства МСКМ-Ti-Cu-C представлена на рис. 3. Результатом выполнения каждой технологической операции является соответствующий полуфабрикат, который переходит на следующую стадию и данный процесс может быть представлен как поток вещества. Концептуальную модель можно представить как систему взаимосвязанных элементов-технологических взаимосвязанных элементов, каждый из которых характеризуется комплексом технологических параметров.

Полученную модель можно применять ко всему подклассу слоистых композиционных материалов, а также при составлении аналогичных моделей для материалов, изготавливаемых методом выкладки, таких как полимерные композиционные материалы.

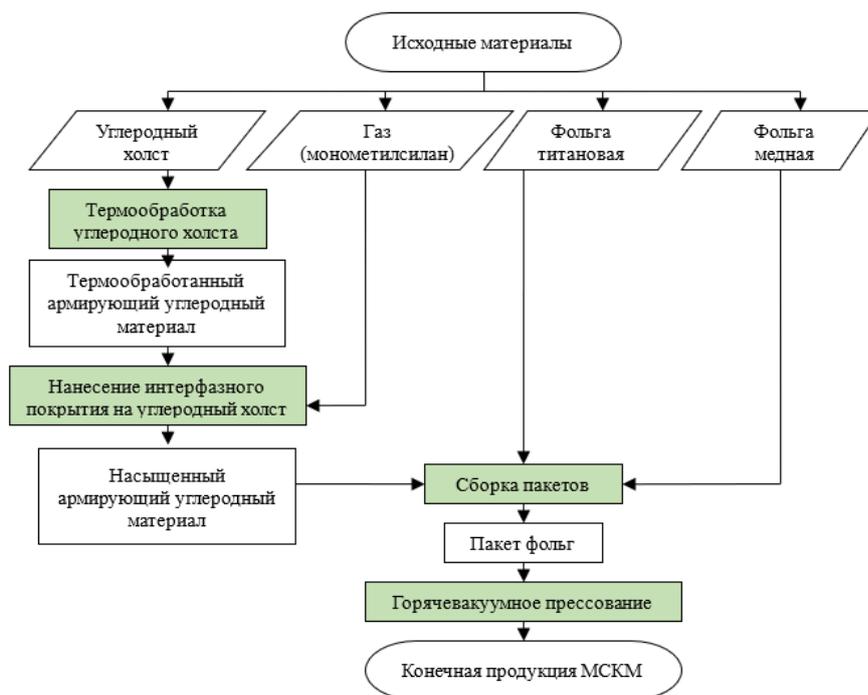


Рисунок 3 – Концептуальная модель технологии производства МСКМ- Ti-Cu-C

Результатом прохождения всех технологических операций является конечная продукция МСКМ- Ti-Cu-C. Показатели качества продукции отражают требования заказчика с учётом специфики применения данного композиционного материала и частично опираются на ГОСТ 56656-2015, ГОСТ 56465-2015, ГОСТ 56683-2015. На рис. 4 представлена модель

показателей качества конечной продукции металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C. Отличительной особенностью данной модели являются новые показатели теплостойкости и термической усталости для обеспечения требований заказчика.

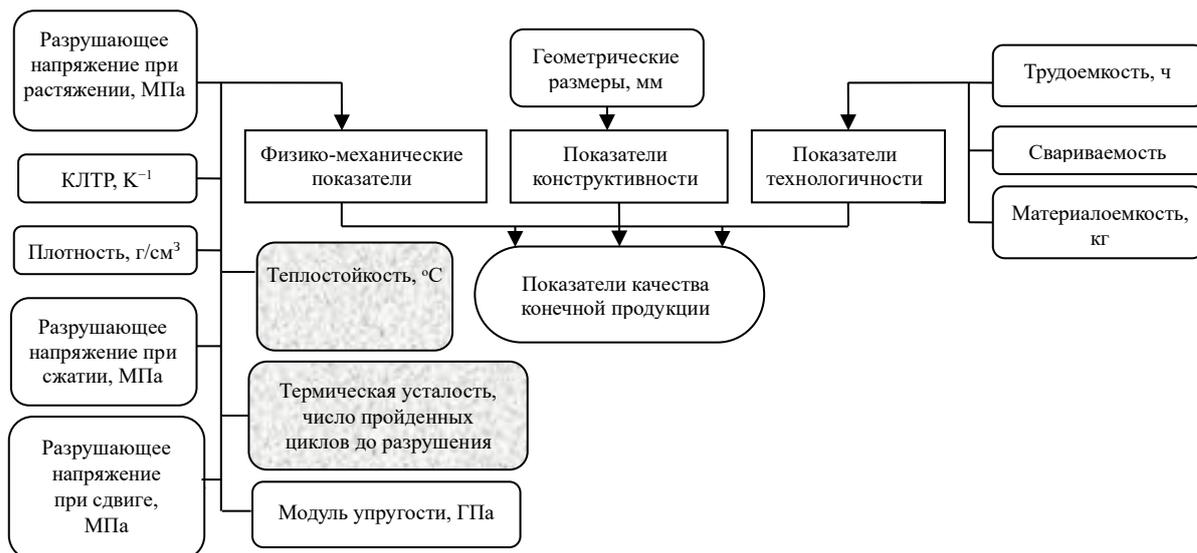


Рисунок 4 – Модель структуры показателей качества конечной продукции металломатричного слоистого композиционного материала Ti-Cu-C

Для обеспечения контроля качества исходных материалов (газа монометилсилана, углеродного холста, фольг титана и меди) разработан алгоритм входного контроля, включающий численные характеристики данных материалов: длина, ширина, толщина, содержание примесей и качественные характеристики внешнего вида, являющихся информационной основой этапа входного контроля закупаемого сырья.

Одним из важнейших элементов системы информационного обеспечения управления качеством металломатричного слоистого композиционного материала является информационный блок параметров технологических операций (управляющих воздействий), структура которого определяется спецификой новой технологии производства металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C.

Для обоснования влияния характеристик оборудования (объем рабочей зоны печи химического осаждения из газовой фазы) на параметр технологической операции (скорость осаждения) проведены следующие экспериментальные исследования.

Исследовалась операция нанесения интерфазного покрытия на армирующий углеродный материал на четырёх различных видах установок (по 15 образцов на каждую установку) с идентичными технологическими параметрами (давление, температура и т.д.). Определялась скорость осаждения интерфазного покрытия на образцах, расположенных в одинаковых зонах реактора.

Следует отметить, что в зоне первого образца наблюдается наибольшее варьирование скорости осаждения между установками (0,75 мкм/ч), что обусловлено самым большим объемом рабочей зоны печи.

Установлено, что характеристики оборудования влияют на параметры технологических операций, следовательно, необходимо включить в информационную подсистему изготовления металломатричных слоистых композиционных материалов блок характеристик оборудования. В диссертации обоснованы характеристики оборудования применяемого в процессе выполнения технологических операций для изготовления МСКМ.

Для обоснования включения в информационную базу характеристик полуфабрикатов, являющихся результатом выполнения каждой технологической операции, были проведены экспериментальные исследования.

Изучалась зависимость толщины конечного материала (мм) от толщины полуфабриката (мм), полученного на операции нанесения интерфазного покрытия.

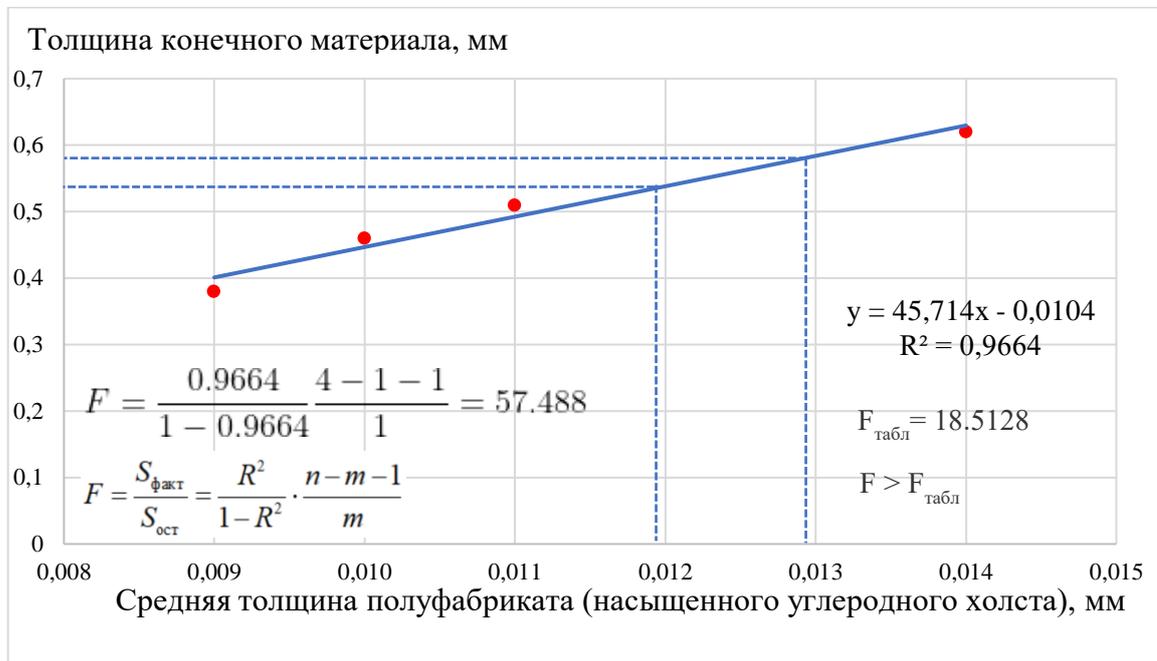


Рисунок 5 – Графическая и математическая зависимости показателя качества продукции (толщины конечного материала - Y) от средней толщины полуфабриката (насыщенного углеродного холста), мм (X)

В каждую печь загружалось по 30 термообработанных углеродных каркасов. В каждой из четырех печей при одинаковых технологических параметрах были получены партии из тридцати насыщенных армирующих углеродных материалов (холстов), имеющих различные толщины. Было рассчитано среднее значение толщины холста для каждой партии. После партии применялись при сборке пакетов с одинаковым количеством слоев фольг меди, титана и углеродных насыщенных холстов. Затем был проведён процесс горячевacuумного прессования четырех пакетов на одной установке при одинаковых параметрах температуры, давления, степени вакуумирования и были получены образцы конечного материала с разной толщиной.

По результатам экспериментальных исследований построены графическая и математическая модели в виде парной линейной регрессии толщины конечного материала от средней толщины единичного полуфабриката (рис. 5), которая позволяет обосновать требуемые характеристики полуфабрикатов для получения заданного показателя качества (толщины конечной продукции) и обеспечивает реализацию требований теоретических положений построения подсистемы информационного обеспечения производства металломатричных слоистых композиционных материалов. Например, для получения толщины конечной продукции $y = 0,55 - 0,58$ мм средняя толщина единичного полуфабриката (X) должна быть равна $0,0119 - 0,0129$ мм. Статистическая значимость математической модели ($y = 45.714x - 0.0104$) подтверждена высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9664$) и критерием Фишера. Так же установлено, что характеристики полуфабрикатов влияют на показатели качества конечной продукции. Следовательно, необходимо включить в информационную подсистему управления качеством изделий из металломатричных слоистых композиционных материалов блок характеристик полуфабрикатов.

Для оценки влияния характеристик оборудования (объем рабочей зоны, скорость нагрева и др.) на последней операции – горячего вакуумного прессования, на показатели качества конечной продукции проводилось экспериментальное исследование с целью выявления зависимости толщины конечного материала (мм) от применяемого оборудования. В данном исследовании идентичными являются технологические параметры (давление, температура и т.д.). Результатом данной технологической операции является конечная продукция – металломатричный слоистый композиционный материал, одним из главных показателей которого является толщина. По требованиям заказчика допускается варьирование данного показателя $0,02$ мм. В результате эксперимента выявлены колебания средних толщин конечного материала (от $0,16$ до $0,24$ мм), что обусловлено различными характеристиками

оборудования. Выявлено, что варьирование толщины конечного материала существенно отличается от требований заказчика.

Для оценки варьирования были рассчитаны разности между максимальными и минимальными значениями толщины конечной продукции для каждой установки. Значение варьирования рассчитано по формуле $\Delta = h_{\max} - h_{\min}$. Выявлено, что установка 2 и 3 не соответствует предъявляемым заказчиком требованиям. Следовательно, установлено влияние характеристик оборудования на показатели качества конечной продукции и необходимо включить в информационную подсистему управления качеством изделий из металломатричных слоистых композиционных материалов блок характеристик оборудования.

В результате проведенных исследований установлено, что информационная подсистема является основой оперативного управления качеством изделий из МСКМ и постоянно действующего мониторинга и должна состоять из следующих блоков: показателей качества, характеристик исходных материалов, полуфабрикатов, оборудования и параметров технологических операций.

На основании составленных моделей предлагается следующая система оперативного управления качеством изделий из металломатричного слоистого композиционного материала с учетом требования заказчика (рис. 6), где:

1. Блок показателей качества продукции из металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C: y_i (см. рис. 4).

2. Блок исходных материалов: a_i^1 – характеристики гидросплетенного углеродного холста; a_i^2 – характеристики газа монометилсилана; a_i^3 – характеристики фольг титана и меди.

3. Блок технологических (управляющих) параметров: X_i^1 – технологические параметры на этапе термообработки углеродного армирующего холста (температура, время выдержки); X_i^2 – технологические параметры на этапе нанесения интерфазного покрытия на углеродный армирующий холст (температура, время выдержки, давление, скорость осаждения, расход газа); X_i^3 – технологические параметры на этапе формирования пакетов фольг (толщина, схема выкладки); X_i^4 – технологические параметры на этапе горячего вакуумного прессования (температура, время выдержки, давление, степень вакуумирования).

4. Блок характеристик полуфабрикатов: C_i^1 – характеристики термообработанного углеродного холста; C_i^2 – характеристики термообработанного углеродного холста с нанесенным интерфазным покрытием; C_i^3 – характеристики пакета с чередующимися в определенном порядке углеродного холста, фольги титана и фольги меди.

5. Блок характеристик оборудования: b_i^1 – характеристики муфельной печи; b_i^2 – характеристики печи химического осаждения из газовой фазы; b_i^3 – характеристики ручных гильотинных ножниц; b_i^4 – характеристики вакуумной печи горячего прессования.

После получения конечной продукции необходимо провести анализ соответствия металломатричного слоистого композиционного материала требованиям заказчика. Требования заказчика представляют собой численные характеристики (показатели качества), обусловленные предполагаемым применением материала (поставленной цели).

Следовательно, неотъемлемой частью оценки качества продукции является блок сравнения показателей качества продукции (МСКМ) с предъявляемыми требованиями от заказчика по следующей формуле:

$$K_{n \min} \leq y_i < K_{n \max},$$

где $K_{n \min}$ – минимальные требуемые показатели качества конечной продукции, полученные от заказчика;

$K_{n \max}$ – максимальные требуемые показатели качества конечной продукции, полученные от заказчика;

y_i – показатели качества конечной продукции.

Если данные требования выполняются, продукция отправляется заказчику, если результат не соответствует, тогда требуется проведение анализа полученных результатов и внесение изменений в систему управления получения металломатричного слоистого композиционного материала.

На основании математической модели зависимости показателей качества от основных влияющих факторов (формула 1) впервые предложен комплекс математических зависимостей

характеристик качества полуфабрикатов для каждой операции и показателей качества конечной продукции.

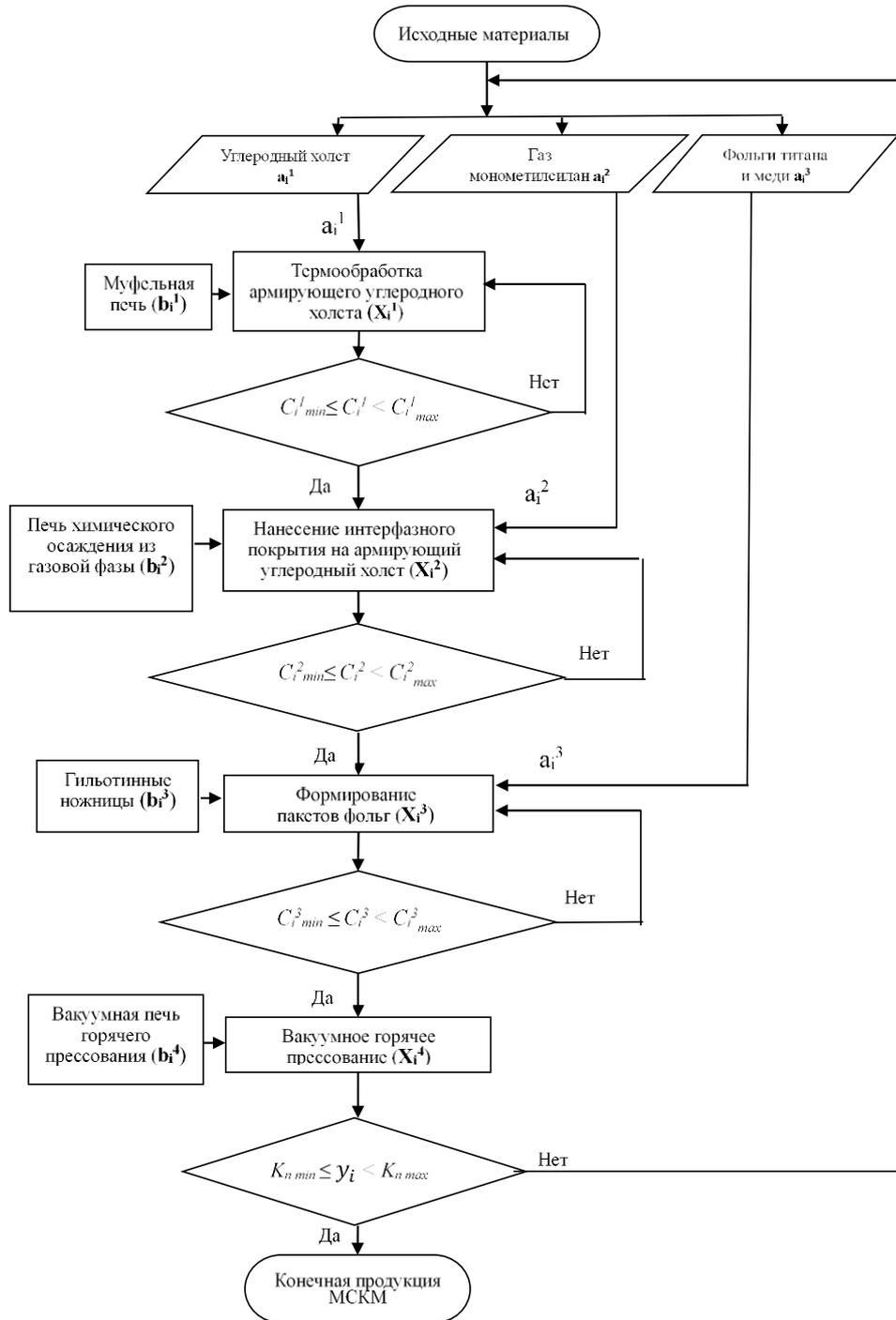


Рисунок 6 – Блок-схема системы управления качеством изделий из металломатричного слоистого композиционного материала

Первая операция – термообработки углеродного армирующего холста:

$$C_i^1 = f(a_i^1; x_i^1; b_i^1), \quad (2)$$

C_i^1 – характеристики термообработанного углеродного холста;

Вторая операция – нанесение интерфазного покрытия на армирующий углеродный холст:

$$C_i^2 = f(c_i^1; a_i^2; x_i^2; b_i^2), \quad (3)$$

C_i^2 – характеристики термообработанного углеродного холста с нанесенным интерфазным покрытием;

Третья операция – формирование пакетов фольг:

$$C_i^3 = f(c_i^2; a_i^3; x_i^3; b_i^3), \quad (4)$$

C_i^3 – характеристики пакета с чередующимися в определённом порядке углеродного холста, фольги титана и фольги меди;

Четвертая операция – вакуумное горячее прессование:

$$y_i = f(C_i^3; x_i^4; b_i^4) \quad (5)$$

В результате экспериментального исследования выявлено, что значение каждого i -ого технологического воздействия на n -ой операции - X_i^n зависит от характеристик оборудования (b_i^n) на каждом этапе технологического процесса и должно выполняться следующие неравенство:

$$X_i^n \leq b_i^n \quad (6)$$

Принципиальной новизной модели (рис. 6) системы управления является структура, состоящая из элементов, связанных вещественными и информационными потоками, которая основана на технологии производства металломатричного слоистого композиционного материала с учетом характеристик оборудования и требований пооперационного контроля характеристик полуфабрикатов, что гарантирует требуемый уровень качества конечной продукции.

В разработанных в настоящее время системах управления качеством композиционных материалов структура информационного обеспечения «как правило» направлена только на решение оперативных задач управления. Однако в связи с этим невозможно выполнение перспективных задач планирования для чего необходима прогнозная информация, которая может быть получена только на основе соответствующих математических моделей. Для оценки возможности технологии, для разработки перспективных материалов с улучшенными свойствами проведено экспериментальное исследование зависимости показателя качества продукции (толщина) от основного технологического параметра (температура спекания) на последней технологической операции. Однако при проведении эксперимента диапазон варьирования температуры спекания ограничен от 800 до 1900°C, что связано с возможностями оборудования и физико-механическими процессами.

На рис. 7 представлена графическая и математическая модель зависимости толщины конечной продукции (h , мм) от температуры спекания: статистическая значимость математической модели ($y = -0,0006x + 5,3804$) подтверждена высоким коэффициентом детерминации ($R^2 = 0,9936$) и критерием Фишера.

Данная модель позволяет обосновано управлять одним из ключевых технологических параметров (температура спекания) согласно требованиям заказчика – получение требуемой толщины изделия.

Кроме того, данная модель позволяет спрогнозировать диапазон толщины конечной продукции в зависимости от температуры спекания. По результатам проведенных экспериментальных исследований обоснована возможность обеспечения толщины конечной продукции как одного из основных показателей качества металломатричного слоистого композиционного материала в диапазоне от 4,3 до 4,9 мм.

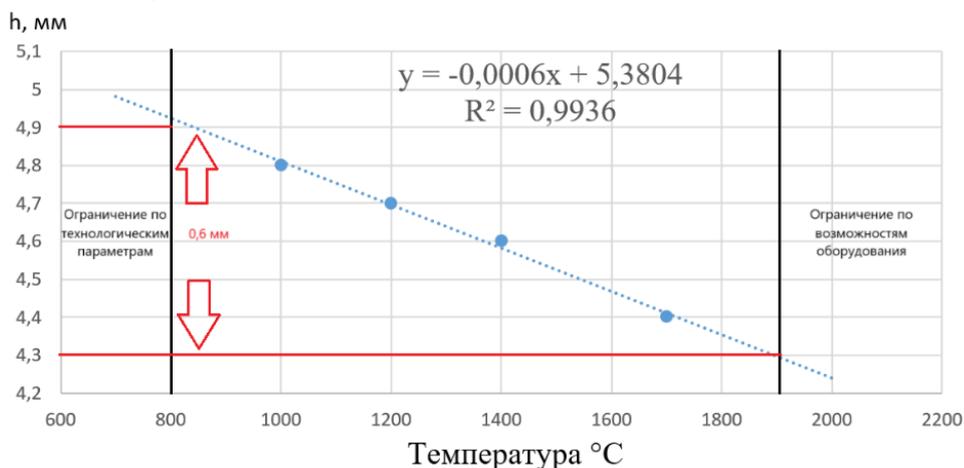


Рисунок 7 – Графическая и математическая модель зависимости толщины конечной продукции (h , мм) от температуры спекания

В результате проведенных исследований доказано, что информационная подсистема кроме блоков для оперативного управления качеством металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C должна содержать блок прогнозной информации, включая соответствующие математические модели, обоснование которых является перспективной задачей исследования.

Четвертая глава посвящена созданию металломатричного композиционного материала армированного углеродными волокнами для применения в элементах газотурбинного двигателя с заданными заказчиком показателями качества.

Для решения данной задачи были изучены материалы, подготовленные специалистами Института металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН. В 2004 году был разработан новый экспериментальный материал металломатричный волокнистый композиционный материал «Ti -углеродное волокно», получаемый засыпкой углеродного волокна в титановый расплав. Однако полученный материал не в полной мере соответствовал новым требованиям заказчика, в том числе по физико-механическим характеристикам.

В 2020 году эксперименты по получению композиционного материала Ti-C были продолжены на базе АО «Композит» с применением других отличных от примененных ранее технологий при непосредственном участии автора, а именно:

1. Литья с применением прута сплава титана BT-14.
2. Литья с применением порошка титана марки BT-1-0.

На первом этапе исследований был проведен эксперимент по возможности внедрения расплава титана (BT-14) в высокопористый армирующий каркас Ипресскон® с интерфазным покрытием карбида кремния.

Данный эксперимент показал возможность внедрения титановой матрицы в углеродный каркас, однако, как видно на рисунке 8, внедрение оказалось неравномерным. На рисунке 8 (б) отчетливо видны три точки, в которых расплав прошел на всю толщину образца. Несмотря на применение интерфазного покрытия во всех пяти проведенных экспериментах с изменением температуры (800-1650°C) и прилагаемого давления (5-15 МПа) было зафиксировано взаимодействие филаментов с матричным материалом с образованием карбида титана. Это привело к утончению волокна на 50 % и к снижению прочностных характеристик материала, что делает невозможным применение данного материала в перспективных элементах авиационной и ракетной промышленности.



а

б

Рисунок 8 – Внешний вид образца, полученного после насыщения расплавом титанового сплава BT-14: а) вид сверху, место контакта с расплавом; б) вид снизу, не контактирующий с расплавом на начальном этапе

После получения неудовлетворяющих результатов в первом эксперименте был проведен второй эксперимент для проверки возможности внедрения титанового порошка в углеродный каркас. В ходе эксперимента было произведено нанесение порошка титана марки BT-1-0 на образец. После чего проведена операция горячевакuumного прессования при температуре (800-1650°C) и прилагаемом давлении (5-15 МПа). Данный метод показал более равномерное проникновение матричного материала, однако на меньшую глубину. Внешний вид образца представлен на рис. 9.

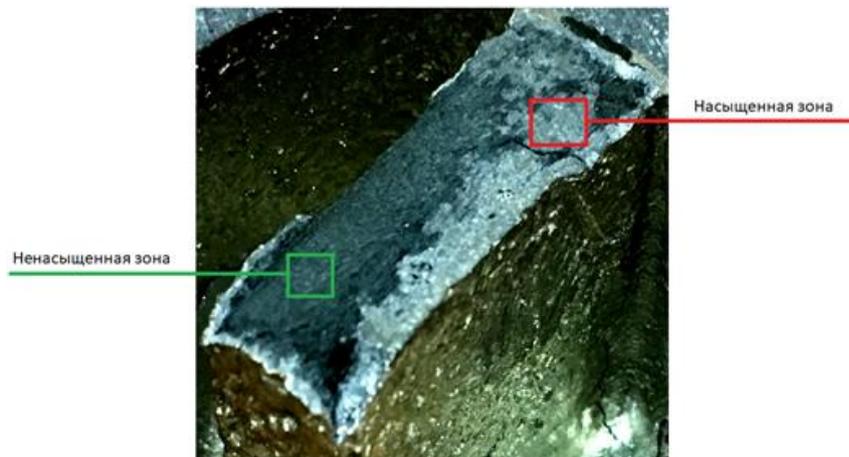


Рисунок 9 – Внешний вид образца после проведения процесса насыщения порошком BT-1-0

Насыщение образцов на всю толщину является трудно реализуемым в связи с химической реакцией образования карбида титана, который препятствует дальнейшему проникновению матричного материала. Химическое взаимодействие в данном методе слишком сильное даже при наличии интерфазы карбида кремния на волокнах. Таким образом, в результате применения двух представленных технологий не удалось получить требуемый материал.

После чего автором была выдвинута гипотеза о возможности создания металломатричного слоистого композиционного материала (МСКМ) системы Ti-Cu-C с применением барьерных слоев, замедляющих деструкцию армирующего материала.

Для подтверждения данной гипотезы были проведены эксперименты по пропитке углеродного каркаса расплавом титана с применением барьерных слоев, а именно фольги меди и покрытия карбида кремния (SiC). Данное исследование показало, что при пропитке углеродного органоморфного каркаса расплавом титана происходит взаимодействие с интерфазным слоем SiC и углеродным волокном. Использование меди, не образующей карбидов с углеродом, позволяет снизить это взаимодействие примерно на 30% (рис. 10).

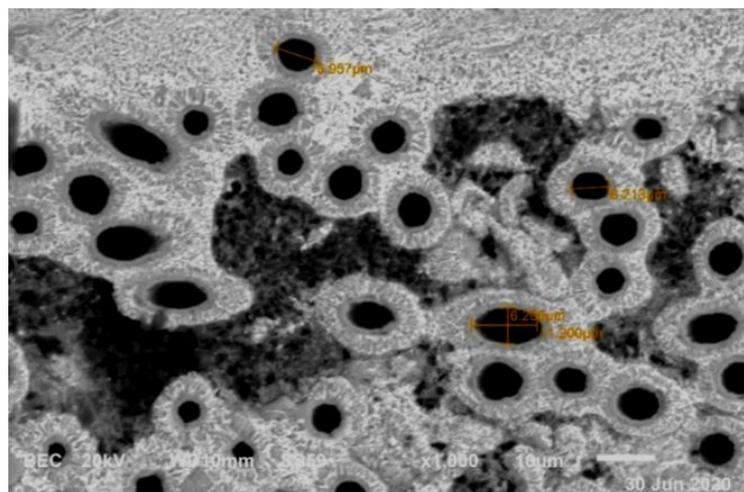


Рисунок 10 – Микроструктура образца с диаметром филаментов 6,5 мкм

Для минимизации химического взаимодействия использовался метод послойной выкладки спрессованного гидросплетенного углеродного холста с интерфазным покрытием SiC и фольгой титана BT -1-0 с применением инертной к углероду фольги меди, в результате было выявлено, что межфиламентное пространство заполнено сплавом Ti-Cu-C.

Для создания КМ было выбрано весовое соотношение Ti – 40-60 %, Cu – 40-60%, так как данный интервал имеет наиболее тугоплавкие соединения: Ti_2Cu , $TiCu$ и Ti_3Cu_4 . Для соответствия данному соотношению была разработана схема выкладки, представленная в табл. 1. В зависимости от требований заказчиков можно нарастить толщину получаемого конечного продукта с соблюдением структуры пакета фольг для сохранения требуемых

свойств, а также можно менять их чередование с барьерными слоями фольги меди и углеродными гидросплетенными холстами для получения новых свойств.

Таблица 1 – Схема послойной выкладки пакета фольг

№	Слой	Толщина фольги, мкм
1	Cu	30
2	Ti	50
3	Cu	30
4	C-(SiC)	10
5	Cu	30
6	Ti	50
7	Cu	30
8	C-(SiC)	10
9	Cu	30
10	Ti	50
11	Cu	30
Суммарная толщина фольги, мкм		350

Для обоснования технологических параметров (температура, давление, время выдержки) был проведен ряд экспериментов, в результате определены наиболее приемлемые параметры для проведения процессов горячевакуумного прессования, а именно выдержка при 700°C в течение 30-60 минут с последующим поднятием температуры до 1000-1800°C и последующей выдержкой в течение часа при давлении 10 МПа с применением схемы послойной выкладки (табл. 1) с соотношением фольг титана и меди Cu- 55%, Ti- 45%. Потеря диаметра филамента составила 12-15% при данных параметрах технологического процесса.

Для анализа соответствия показателей качества металломатричного слоистого композиционного материала требованиям заказчика были изготовлены 10 образцов и проведены испытания, в результате которых получены: среднее значение разрушающего напряжения при растяжении, МПа и модуль упругости, представленные в табл. 2. Был проведен сравнительный анализ показателей качества металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C и его аналогов (табл. 2).

Таблица 2 – Результаты сравнительного анализа показателей качества полученного металломатричного слоистого композиционного материала и его аналогов

Наименование материала	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа δ_b	Требуемый заказчиком показатель разрушающего напряжения при растяжении, МПа δ_b	Модуль упругости, ГПа	Требуемый заказчиком показатель модуля упругости, ГПа
Ti-ВМН-РК	867	≥ 870	121	≥ 200
Ti-ВМН-S	697		198	
Композиционный материал системы Ti-Cu-C	921		206	

На основании полученных данных можно сделать вывод, что полученный материал достиг требуемого заказчиком показателя разрушающего напряжения при растяжении, МПа, что на 6,23% лучше, чем у ближайшего конкурента и на 5,86% больше требуемого заказчиком показателя.

В результате проведенных исследований подтверждена выдвинутая гипотеза и был получен новый металломатричный слоистый композиционный материал системы Ti-Cu-C, отвечающий перспективным требованиям авиационной и ракетно-космической техники, например, элементам газотурбинного двигателя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сформулированы основные теоретические положения (требования) построения подсистемы информационного обеспечения управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов, реализующие принципы системного и процессного подходов, ориентированные на требования потребителя (заказчика) и представляющие собой структурированную систему, гарантирующую получение качественной информации для оперативного управления и планирования создания перспективных материалов.

2. В результате проведенных исследований разработана структура информационного обеспечения управления качеством изделий из МСКМ, которая состоит из следующих блоков: показателей качества, характеристик исходных материалов, полуфабрикатов, оборудования и параметров технологических операций. Структура в полной мере отвечает требованиям основных теоретических положений построения подсистемы информационного обеспечения по полноте и достоверности информации для реализации всех функций управления, и содержит:

- характеристики состояния объекта управления на всех этапах технологии до и после управляющих воздействий, которые следует рассматривать как информацию обратной связи;
- технологические параметры, характеризующие управляющие воздействия;
- показатели качества продукции, которые отражают требования заказчика и служат для оценки степени их реализации.

3. Проведены экспериментальные исследования, по результатам которых, построены математические и графические зависимости показателя качества конечной продукции (толщина) от характеристики полуфабриката (средняя толщина насыщенного углеродного холста) и показателя качества конечной продукции (толщина) от параметра технологической операции (температуры спекания). Это позволило обосновать значения толщины полуфабриката 0,0119 - 0,0129 мм, которые обеспечивают получение толщины конечной продукции 0,55 - 0,58 мм, а так же адаптировать параметр технологической операции температуры спекания в пределах от 800 до 1900°C для достижения требования показателя качества конечной продукции (толщина от 4,3 - 4,9 мм), которые обеспечивают заданные заказчиком требования.

4. Разработана блок-схема (модель) управления качеством продукции из металломатричного слоистого композиционного материала Ti-Cu-C, которая позволила обосновать структуру системы информационного обеспечения оперативного управления качеством с заданными потребительскими свойствами.

5. В результате экспериментальных исследований подтверждена выдвинутая гипотеза и создан принципиально новый материал – металломатричный слоистый композиционный материал системы Ti-Cu-C. Доказано, что полученный материал отвечает требованиям заказчика, в том числе один из главных показателей качества достиг значения разрушающего напряжения при растяжении 921 МПа, что на 6,23% лучше, чем у ближайшего конкурента и на 5,86% больше требуемого заказчиком показателя.

Данные материалы имеют перспективу широкого применения и для высоконагруженных элементов газотурбинных двигателей.

Разработаны рекомендации по рационализации технологического процесса горячевакuumного прессования, а именно, выдержка при 700°C в течение 30 минут с последующим поднятием температуры до 1000-1800°C и последующей выдержкой в течение часа при давлении 10 МПа с применением схемы послойной выкладки с соотношением фольг титана и меди Cu- 55%, Ti -45%, что обеспечило достижение требуемой заказчиком рабочей температуры и толщины изделия.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих изданиях

Статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК России:

1. Антипова, Т.Н. Обоснование структуры информационного обеспечения системы управления качеством металломатричных слоистых композиционных материалов с заданными потребительскими свойствами / Т.Н. Антипова, Д.С. Бабкин // Вестник Магнитогорского

государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2024. –Т. 23. – №2. – С. 153-162.

2. Антипова, Т.Н. Повышение эффективности информационного обеспечения управления качеством композиционных материалов для авиационной и космической техники / Т.Н. Антипова, Д.С. Бабкин // Известия Тульского государственного университета. – 2024. – № 3. – С. 446-452.

Статьи в прочих научных изданиях

1. Бабкин, Д.С. Насыщение углеродных высокопористых органоморфных каркасов металлом / Д.С. Бабкин // Сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – Том 4. – С. 135-145.

2. Бабкин, Д.С. Применение вакуумного горячего прессования при создании металломатричных композиционных материалов / Д.С. Бабкин, В.Г. Исаев // Инновационные аспекты социально-экономического развития региона: сборник статей по материалам участников XI Ежегодной научной конференции аспирантов «МГОТУ» – М.: Издательство «Научный консультант», 2021. – С.27-33.

3. Антипова, Т.Н. Моделирование процесса вакуумного горячего прессования при создании металломатричных композиционных материалов / Т.Н. Антипова, Д.С. Бабкин // Информационно-технологический вестник. – 2022. – № 1(31). – С. 162-169.

4. Антипова, Т.Н. Разработка процессно-ориентированной модели технологии создания металломатричных композиционных материалов с применением вакуумного горячего прессования / Т.Н. Антипова, Д.С. Бабкин // Информационно-технологический вестник. – 2022. – № 4 (34). – С. 147-155.

5. Бабкин, Д.С. Управление качеством создания композиционных материалов для авиационной и космической техники: теория и практика / Д.С. Бабкин, Т.Н. Антипова // Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества»: сборник докладов. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2023. – С. 224 -229.

6. Бабкин, Д.С. Разработка металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C с применением барьерных слоев / Д.С. Бабкин // Информационно-технологический вестник. – 2024. – № 4 (38). – С. 137-143.

7. Бабкин, Д.С. Экспериментальное исследование влияния технологических параметров изготовления композиционных материалов на качество металломатричного слоистого композиционного материала системы Ti-Cu-C / Д.С. Бабкин // X Всероссийская научно-практическая интернет-конференция «Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025.

8. Антипова, Т.Н. Повышение эффективности управления качеством композиционных материалов для авиационной и космической техники / Т.Н. Антипова, Д.С. Бабкин // X Всероссийская научно-практическая интернет-конференция «Актуальные проблемы менеджмента качества, стандартизации и метрологии». – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2025.