

На правах рукописи



ОЛЕШКО АЛЕКСЕЙ ЮРЬЕВИЧ

**УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛОКОМПОЗИТОВ
НА ОСНОВЕ ПРОЦЕССНО-ОРИЕНТИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ
РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ПРОИЗВОДСТВА
ПРОДУКЦИИ**

05.02.23 – Стандартизация и управление качеством продукции

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Королёв – 2020

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

Научный руководитель:

доктор технических наук, доцент
Антипова Татьяна Николаевна

Официальные оппоненты:

Клочков Юрий Сергеевич, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», начальник управления академического развития

Копылов Олег Андреевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение «4 ЦНИИ» Министерства обороны России, ведущий научный сотрудник

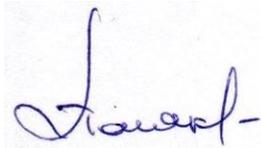
Ведущая организация: Акционерное общество «Корпорация «Московский институт теплотехники», г. Москва

Защита состоится « 17 » декабря 2020 г. в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.111.05 на базе ФГБОУ «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, ул. Ленина, 38, малый актовЫй зал.

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

Автореферат разослан « _____ » _____ 2020 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Полякова Марина Андреевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Продукция из композиционных материалов на металлической основе, армированных высокопрочными высокомодульными неметаллическими волокнами, является перспективным классом изделий из конструкционных материалов. В настоящее время их производство приобрело устойчивый характер, в том числе благодаря восстановлению отечественного производства волокон (бора, карбида кремния и др.). Такие металлокомпозиты по удельной прочности и жесткости в 2-3 раза превосходят традиционные конструкционные металлические материалы – стали, алюминиевые и титановые сплавы, что определяет высокую эффективность применения продукции на их основе в части снижения веса конструкций. Основными потребителями данной продукции являются предприятия, производящие ракетно-космическую технику, поэтому к изделиям предъявляются требования по качеству в соответствии с ГОСТ Р 56518-2015 на всех стадиях жизненного цикла.

По результатам анализа многолетней статистики выявления брака продукции данного класса основная доля несоответствий приходится на стадию жизненного цикла изделия – производства. Отличительной особенностью производства является одновременное изготовление композиционного материала и формирование из него изделия, когда при одних и тех же технологических параметрах необходимо обеспечить выполнение требований заказчика к продукции по физико-механическим свойствам материала и конструкции изделия.

Проблема обеспечения потребителей продукцией из волокнистых металлокомпозитов с заданными свойствами пока решается за счет наличия, как правило, не связанных между собой контрольных операций по каждому этапу технологии, что не гарантирует обеспечения заданных показателей качества конечной продукции. Причины несоответствий носят комплексный или системный характер, то есть качество продукции зависит от всех процессов, составляющих технологию получения волокнистого металлокомпозита. Применяемые в настоящее время технологические параметры часто не имеют достаточного научного обоснования.

Поэтому требуется совершенствование элементов методологии управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов, прежде всего, используя системный и процессный подходы на основе процессно-ориентированных моделей регулирования технологических операций производства изделий, а также выявление зависимостей влияния технологических параметров на показатели качества конечной продукции. Решение этой актуальной задачи позволит своевременно выявлять и устранять причины несоответствий и стабильно поставлять продукцию, отвечающую требованиям потребителей, используя принципиально новые подходы.

Степень разработанности темы исследования.

Научные разработки в области управления качеством в части формирования основных инструментов и методов контроля качества продукции предложены Н. Винером, Г. Л. Гантом, К. Исикава, Д. Кавакито, В. Парето, В. Шухартом и др. Особый интерес представляют исследования отечественных ученых, посвященные управлению качеством, стандартизации, вопросам разработки нормативной и технической документации Ю. П. Адлера, Б. В. Бойцова, В. В. Бойцова, Ю. С. Ключкова, Е. В. Плахотниковой и др., а также исследования показателей качества композиционных материалов, представленные в трудах Г. Г. Богатеева, Г. П. Гардымова, В. В. Жарикова, С. Е. Салибекова, М. Х. Шоршорова и др. Однако, вопрос об управлении качеством продукции из металлокомпозитов подробно в научно-технической литературе не освещен.

Целью работы является разработка обобщенной процессно-ориентированной модели технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозитов с последующей разработкой на её основе элементов пооперационного управления качеством продукции и их апробированием применительно к действующему производству.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- провести аналитический обзор современного состояния отечественных и зарубежных исследований по управлению качеством композиционных материалов и особенностям технологии их изготовления, обосновать перспективные задачи исследования;
- разработать процессно-ориентированную модель производства волокнистых металлокомпозитов и иерархически организованную информационную подсистему получения из них продукции;

– разработать концептуальную модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита;

– провести теоретические и экспериментальные исследования по применению разработанных элементов управления качеством продукции из композиционных материалов на примере получения боралюминиевых трубчатых элементов, а также разработать комплекс графических и математических зависимостей показателей качества данной продукции от параметров технологических операций. Разработать рекомендации по рациональным параметрам технологических операций получения боралюминиевых трубчатых элементов.

Научная новизна. В ходе проведения исследований получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана процессно-ориентированная модель производства продукции из волокнистых металлокомпозитов, позволяющая определить основные предварительные и окончательные операции, последовательность их выполнения и особенности получения продукции. Модель служит основой для обоснования модели управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита.

2. Сформулирована иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, позволяющая учитывать принцип приоритета критериев более высокого уровня управления (требования потребителя/заказчика), при этом установлены функциональные зависимости между свойствами перерабатываемых компонентов (исходные материалы, промежуточные продукты переработки) и параметрами технологических операций.

3. Разработана концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов, отличающаяся возможностью планировать экспериментальные исследования для обоснования рациональных управляющих воздействий (параметров технологических операций) и на основе информации обратной связи выстраивать структуру мониторинга производства изделий.

4. Получены графические и математические модели зависимостей, по проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям на примере производства боралюминиевых труб, которые позволяют обосновать необходимый интервал исходной прочности борного волокна 3300-3500 МПа, удерживающий снижение их прочности в допуске до 10 %, скорректировать значение скорости намотки борного волокна до 75 об/мин при рациональной продолжительности процесса в 3 часа, адаптировать технологические процессы под повышение предела прочности волокнистых металлокомпозитов свыше 1100 МПа для перспективных изделий ракетно-космического и гражданского назначения.

Теоретическая и практическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в разработке концептуальных моделей: процессно-ориентированной, иерархически организованной, модели управления, реализующих системный и процессный подходы, полученные регрессионные зависимости свойств конечной продукции из волокнистых металлокомпозитов от параметров получения и характеристик исходного материала. На основе проведенных экспериментальных исследований и полученных зависимостей разработаны рекомендации по рационализации технологических параметров для повышения показателей качества продукции АО «Композит» – боралюминиевых трубчатых элементов, используемых в штатных изделиях космических аппаратов, что отражено путем корректировки действующей технической документации:

– ТУ 1798-523-56897835-2011 Лента-полуфабрикат композиционного материала «алюминий-бор». Технические условия, выпущено Извещение об изменении № 932.2.06-2018 от 29.06.2018 в части дополнительного введения допустимого нижнего значения предела прочности борного волокна в составе боралюминиевой ленты-полуфабриката не менее 3150 МПа, что позволило использовать отечественное борное волокно с более широким спектром прочностных характеристик. Внедрение и применение отражено в Акте № 0140-10 от 26.03.2019 о результатах периодических испытаний ленты-полуфабриката за № М-658;

– 932.0400041.00-11ТП на получение ленты-полуфабриката из композиционного материала «алюминий-бор», рекомендуется в допустимом интервале скорости намотки борного волокна использовать рациональное значение 75 об/мин., что позволит сократить время выполнения операции на 15 %;

– ТП 932.02100.02000 на изготовление заготовок боралюминиевых трубчатых элементов, рекомендуется скорректировать значение параметров горячего прессования

заготовки боралюминиевой трубы учитывая относительное температурно-временное воздействие в найденном диапазоне 0,900-1,000, что позволит повысить прочностные свойства материала трубчатых элементов на 10 %.

Разработанные элементы управления качеством продукции позволили сократить количество несоответствий боралюминиевых трубчатых элементов на стадии производства на 55 %.

Методология и методы исследования. Методологическую основу диссертационного исследования составляют концептуальные основы системного и процессного подходов, методы сравнительного анализа, экспериментальные исследования, моделирования в том числе графического и математического.

Положения, выносимые на защиту:

1. Процессно-ориентированная модель технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозитов, основными элементами которой являются технологические операции, а связями – последовательность их выполнения.

2. Иерархически организованная информационная подсистема для получения продукции из композиционных материалов, учитывающая приоритетные требования заказчика.

3. Концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита, основанная на процессном подходе, учитывающая принципиальные особенности производства и пооперационное формирование качества продукции.

4. Графические и математические модели зависимостей показателей качества продукции от параметров технологических операций изготовления и показателей качества исходных материалов на примере производства боралюминиевых трубчатых элементов.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обеспечена изучением и анализом научно-технической литературы по теме диссертации, применением в ходе исследования известных и апробированных методов и подходов, экспериментальным подтверждением полученных результатов. Основные положения и наиболее важные научные и практические результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях различного уровня: VI конкурсная конференция молодых специалистов авиационных, ракетно-космических и металлургических организаций России «Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике» (г. Королёв, 2007 г.), III-VI Международные конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» (г. Суздаль, 2010, 2012, 2014, 2016 гг.), Молодёжная конференция «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике» (Звездный городок, 2011 г.), XIX Научно-техническая конференция молодых ученых и специалистов, посвященная 50-летию полета в космос Ю. А. Гагарина (г. Королёв, 2011 г.), V Ежегодная научная конференция аспирантов ФТА «Инновационные аспекты социально-экономического развития региона» (г. Королёв, 2014 г.), Всероссийская научно-техническая конференции «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» (г. Москва, 2016 г.).

Публикации. Основные результаты исследования изложены в 14-ти научных публикациях, из которых три представлены в журналах, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации, получен патент РФ. Список публикаций приведен в автореферате.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объём работы изложен на 135 страницах, содержит 9 таблиц, 36 рисунков, список литературы из 164 наименований и 7 приложений на 12 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и основные задачи для её решения, научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертационной работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации и методах исследования.

В первой главе дан обзор научно-технической литературы по современному состоянию исследований в области качества композиционных материалов и особенностям

технологии их изготовления. Изучены особенности систем управления качеством, схожие по этапам получения изделий из волокнистого композиционного материала, и подходы к формированию систем показателей качества продукции.

Анализ существующих систем управления качеством продукции, подобной по типу производства композитам, показал, что данные системы, как правило, учитывают широкий спектр факторов, воздействующих на готовую продукцию, начиная с внутренних факторов (опытно-конструкторские и научно-исследовательские работы, сотрудники предприятия, маркетинговые и логистические процессы, менеджмент предприятия, технологический процесс и т.д.) и заканчивая внешними факторами (нормативное регулирование, свойства исходного сырья и др.). Однако, выявлено, что с учётом специфики производства продукции из волокнистых металлических композиционных материалов (нестабильный ритм производства изделий, невысокий уровень автоматизации, влияющий на повышение роли человеческого фактора и др.) основным фактором воздействия на показатели качества продукции является технологический процесс её получения, включая закупку исходных материалов.

Для определения границ исследований данной работы выделен класс конструкционных композиционных материалов на металлической основе, армированных высокопрочными высокомодульными неметаллическими волокнами, ввиду многолетнего эффективного применения продукции на его основе в ракетно-космической отрасли.

Сделан вывод о целесообразности разработки элементов системы управления качеством продукции из композиционных материалов выделенного класса для получения изделий с заданными (потребителем/заказчиком) свойствами, путём регулирования параметров управления (поставщиком/изготовителем).

Вторая глава посвящена разработке процессно-ориентированной модели производства волокнистых металлокомпозитов и иерархически организованной информационной подсистеме получения из них продукции.

Методологической основой разработанной процессно-ориентированной модели, является процессный подход и причинно-следственная диаграмма Исикавы (Рисунок 1).

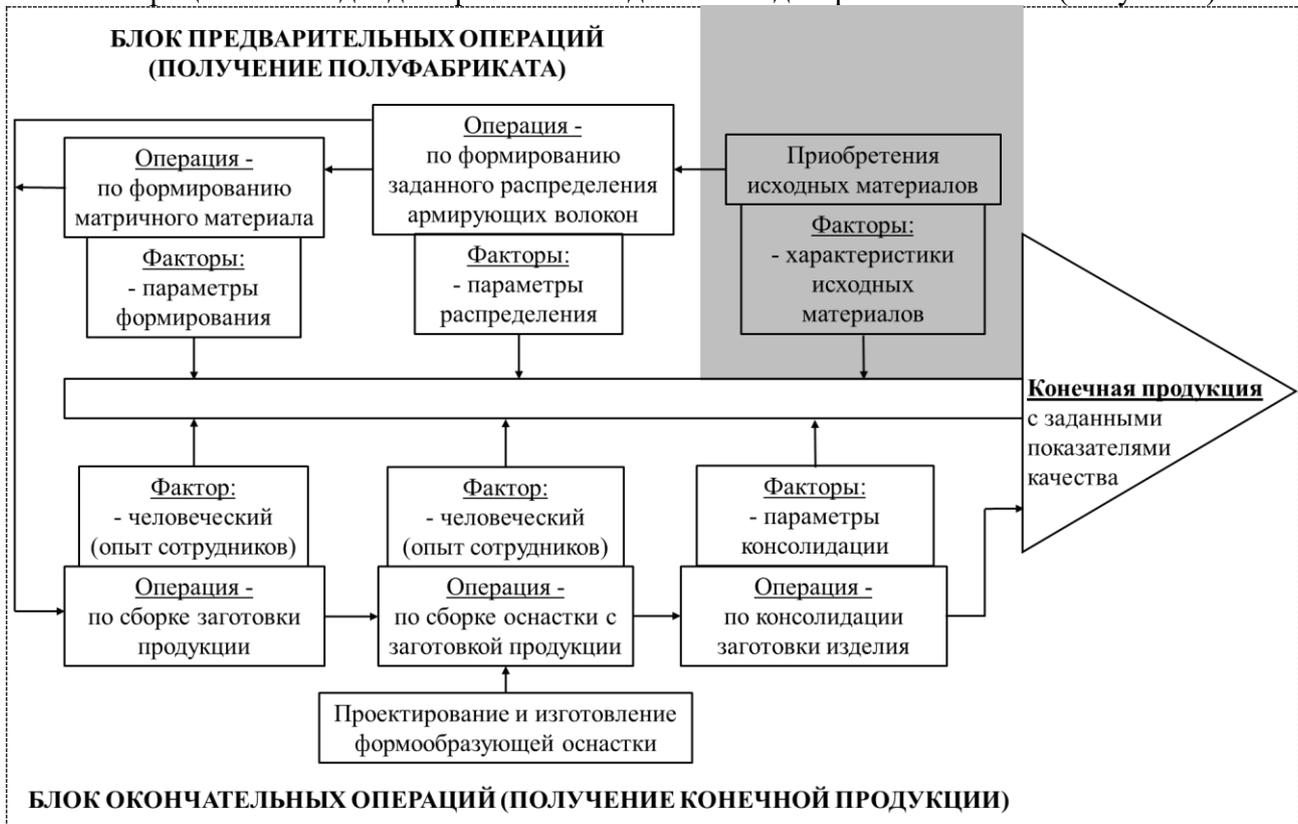


Рисунок 1 – Процессно-ориентированная модель технологии изготовления продукции из волокнистых металлокомпозитов

Представленная модель для выделенного класса металлокомпозитов состоит из двух основных блоков: предварительного изготовления полуфабриката и получения на его основе конечной продукции. Каждый из двух блоков содержит основные элементы – операции,

определяет технологические связи между ними и последовательность выполнения, а также факторы, воздействующие на качество промежуточной (полуфабрикат) и конечной (изделие) продукции.

На первой стадии производства приобретаются основные и вспомогательные материалы. Исходные характеристики материалов являются факторами, воздействующими на показатели качества конечной продукции, при этом ведущую роль играет волокно, в значительной мере определяющее механические свойства.

На первой технологической операции (блока предварительных операций) формируется равномерное распределение армирующих волокон, параметры которого оказывают воздействие на технико-экономические показатели качества продукции. При этом волокно с зафиксированным упорядоченным распределением может использоваться далее в качестве самостоятельного полуфабриката.

Вторая технологическая операция этого блока предназначена для соединения упорядоченных волокон и матричного материала в требуемом соотношении, ее параметры оказывают существенное влияние на такие показатели качества конечной продукции, как прочностные характеристики металлокомпозита. На выходе операции формируется полуфабрикат волокно-матрица.

Полуфабрикаты используются в блоке окончательных операций для сборки заготовки изделия с последующим ее заключением в формообразующую оснастку. Необходимым условием и неотъемлемой частью при осуществлении операций является предварительное проектирование и изготовление формообразующей оснастки. Эти операции практически не поддаются автоматизации, и правильность их исполнения в значительной мере зависит от человеческого фактора (квалификации и опыта исполнителей), который оказывает непосредственное влияние на показатели качества продукции, такие, как геометрические параметры изделия, схема армирования и др.

Завершающей операцией, которая окончательно формирует металлокомпозит и изделие из него, является консолидация заготовки. Параметры консолидации в значительной степени оказывают влияние на показатели качества в части физико-механических характеристик готовой продукции.

Процессно-ориентированная модель служит основой для разработки комплекса моделей управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов путём обоснованного регулирования технологических операций производства изделий. Одним из обязательных элементов системы управления является информационная подсистема.

Информационная подсистема имеет иерархическую структуру и включает показатели качества продукции, параметры технологических операций, показатели качества исходных материалов (Рисунок 2).



Рисунок 2 – Иерархически организованная информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов

Предлагается выделить два уровня подсистемы: уровень заказчика (1) и технологический уровень (2).

Уровень заказчика отражает требования заказчика к продукции и включает показатели качества продукции. В соответствии с ГОСТ Р 56518-2015 требования заказчика (потребителя) – это набор критериев, формализующих цели в виде показателей качества продукции в техническом задании, где в роли заказчика представляет Федеральный государственный орган или другой государственный орган. На рисунке 3 представлены в структурированном виде типичные показатели качества (свойства) продукции из волокнистого металлокомпозита.

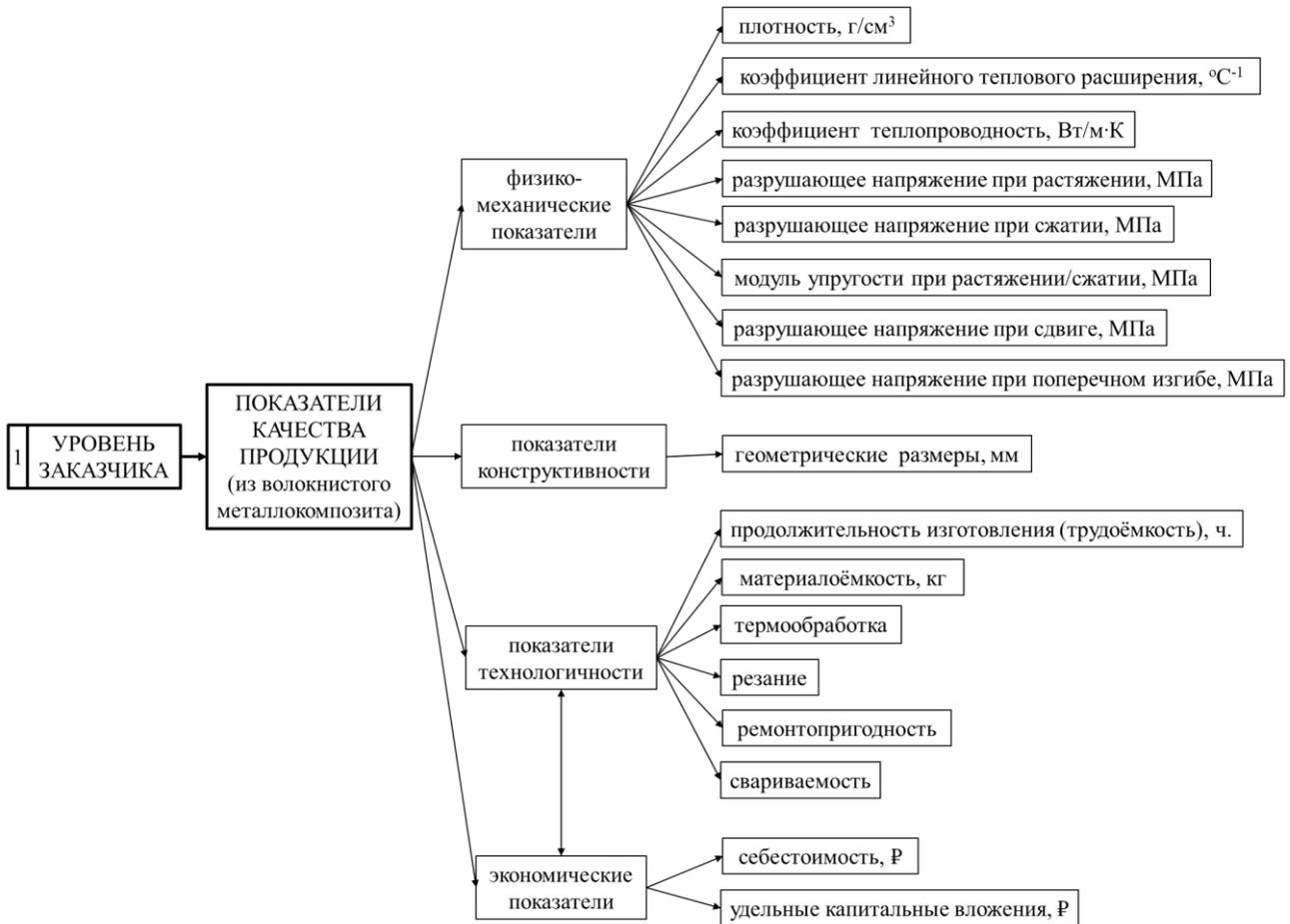


Рисунок 3 – Структура показателей качества продукции из конструкционного металлокомпозиата, армированного волокнами

Выбор показателей качества продукции из металлокомпозиата, армированного волокнами, обусловлен необходимостью учета специальных требований (п. 7.2.2 ГОСТ Р 56518-2015) в условиях эксплуатации изделий в несущих конструкциях, отвечающих требованиям заказчика.

Второй уровень информационной подсистемы (технологический), включает комплекс параметров, характеризующих ряд технологических операций, а также блок свойств исходного сырья (рисунок 4).



Рисунок 4 – Комплекс параметров технологических операций и показателей качества исходных материалов

Комплекс параметров технологических операций необходим для обоснования управляющих воздействий, а показатели качества исходных материалов служат для обеспечения входного контроля их свойств. При этом все элементы технологического уровня связаны между собой функциональными зависимостями.

Иерархически организованная информационная подсистема получения продукции реализует принцип приоритета критериев более высокого уровня управления.

В третьей главе разработана концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита.

Системы моделей регулирования производства рассматриваемого класса металлокомпозитов – это множество взаимосвязанных элементов, каждый из которых прямо или косвенно связан с любым другим элементом. В соответствии с теоретическими положениями системного подхода изменение хотя бы одного элемента гарантирует качественное изменение всей системы. Таким образом, качество работы системы является свойством целого, которое в свою очередь определяется качеством работы её частей и характером связей между ними, не являясь простой суммой этих качеств.

На рисунке 5 представлена концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита, разработанная на основе классической блок-схемы управления, которую предлагается рассматривать как основополагающую. При построении данной модели были учтены особенности технологии получения композиционных материалов.

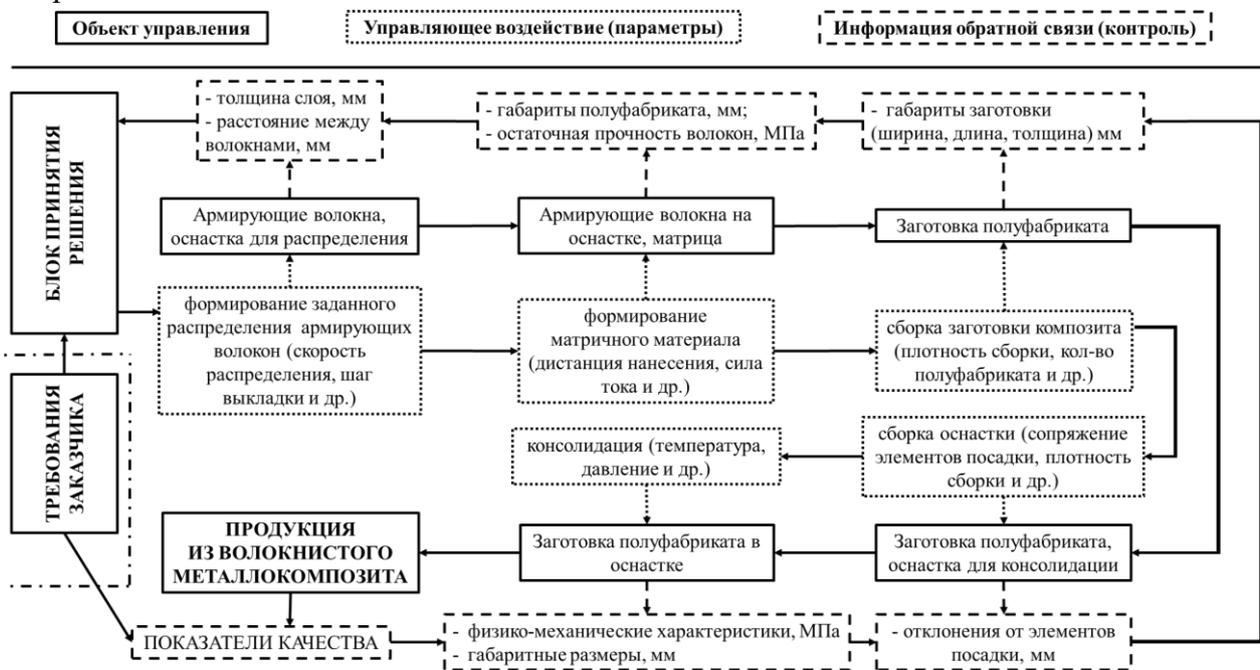


Рисунок 5 – Концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита

Объект управления предлагается представить, как совокупность элементов, полученных в результате проведения каждой технологической операции. Каждый элемент характеризуется рядом параметров $X_1, X_2 \dots X_i$.

Модель состоит из основных блоков, каждый из которых представляет собой набор соответствующих ему функциональных элементов:

- объект управления – продукция из волокнистого металлокомпозита, являющаяся совокупностью элементов (армирующие волокна, матричный материал, полуфабрикат и др.);
- блок принятия решений, где обосновывается, в том числе экспериментально, комплекс управляющих воздействий;
- управляющие воздействия – параметры технологических операций (температура, давление, время и др.);
- информация обратных связей – данные, полученные в процессе мониторинга или межоперационного контроля, о продукции из волокнистого металлокомпозита или его элементов, изменяемых или приобретающих новые характеристики (габаритные размеры, шаг выкладки, физико-механические свойства и др.).

Движение элементов объекта управления по технологическим операциям сопровождается двумя обязательными процессами: изменения свойств в результате управляющих воздействий и снятия информации об изменении свойств элементов объекта управления. При этом, если информация обратной связи входит в диапазон нормативных значений (технологической и/или технической документации), то элементы объекта управления продолжают движение по технологическим процессам. Если нет, то элементы объекта управления возвращаются на предыдущие операции для корректировки свойств путём повторного управляющего воздействия либо отбраковки. Таким образом, в результате последовательных управляющих воздействий формируется волокнистый металлокомпозит, который характеризуется количественными показателями качества и должен соответствовать требованиям заказчика. Критерий соответствия качества продукции требованиям заказчика (потребителя) определяется следующей формулой

$$a_i < X'_i \leq b_i, \quad (1)$$

где X'_i – i -й показатель качества продукции из волокнистого металлокомпозита, a_i и b_i – конечные значения допустимого интервала варьирования численного значения данного показателя.

Разработанная концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита позволяет планировать экспериментальные исследования для обоснования рациональных управляющих воздействий и на основе информации обратной связи выстроить структуру мониторинга производства изделий.

Составной частью работы стала разработка экспресс-методики оценки прочностных свойств на растяжение армирующих моноволокон по радиусугиба для осуществления контроля характеристик волокна в процессе его переработки. Необходимость разработки экспресс-методики заложена в создание уникальных прочностных свойств металлокомпозиту за счёт высокопрочных армирующих волокон. Поэтому возможность оперативного межоперационного контроля, где на волокно оказывается то или иное воздействие, является одной из первоочередных локальных задач при производстве волокнистых металлокомпозитов в части управления качеством продукции.

Теоретическим обоснованием для проведения оценки прочности на растяжение армирующего волокна по радиусугиба является, в частности, известное правило Вейбулла для хрупких материалов, согласно которому между значениями прочности при изгибе и растяжении существует пропорциональная зависимость. Установлена корреляция между величиной среднего радиусагиба волокна и значением его прочности при растяжении, полученным при прямом нагружении волокна на испытательной машине (проведено порядка 600 параллельных испытаний). На основании проведенных исследований построен градуировочный график для определения значений прочности волокна по радиусугиба. На 10-ти ступенчатой пирамидке с диаметрами колец от 5 мм до 70 мм испытываются до разрушения 30 образцов (необходимое количество для достоверного значения радиусагиба), а среднее значение полученного результата подставляется в графическую зависимость (Рисунок 6).

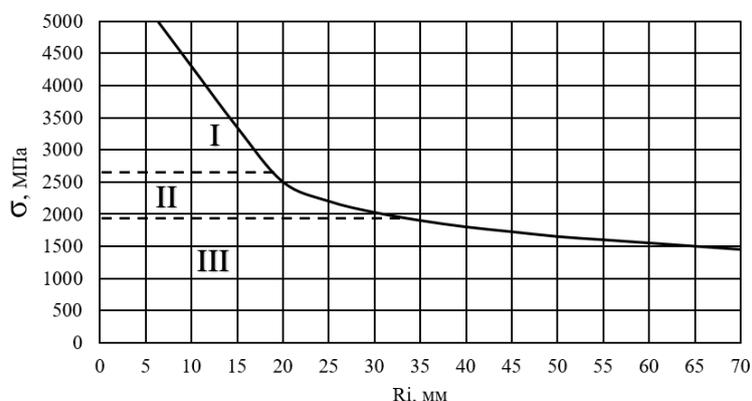


Рисунок 6 – Градуировочный график оценки прочности моноволокон по радиусугиба

График состоит из двух практически линейных участков с разными углами наклона, плавно соединенных между собой (I и III). Такой вид градуировочной кривой связан с характером дефектов, вызывающих разрушение армирующих волокон под действием растягивающих напряжений при изгибе. Известно, что разрушение высокомодульного

высокопрочного армирующего волокна, как хрупкого материала, определяется наличием внутренних и поверхностных дефектов структуры. Низкопрочному волокну (прочность менее 2000 МПа) соответствует линейный участок с малым углом наклона. Как правило, армирующее волокно с низкой прочностью помимо внутренних дефектов характеризуется наличием значительного числа поверхностных дефектов в виде структурных несовершенств (зерен аномальной величины и формы), включений и др., которые являются концентраторами напряжений и приводят к преждевременному разрушению волокна при относительно низком уровне напряжений. Прочное армирующее волокно (прочность более 2500 МПа), которому соответствует второй линейный участок, имеет более совершенную структуру поверхности, и его разрушение в основном происходит по внутренним дефектам при более высоком уровне растягивающих напряжений. Промежуточный криволинейный участок градуировочного графика относится к смешанному типу разрушения.

Методика проста в исполнении, не требует применения специального испытательного оборудования и позволяет провести оценку прочностных свойств армирующих моноволокон непосредственно в производственных условиях. Также она не задействует привлечения трудоёмких испытаний при прямом нагружении волокна на разрывной машине с предварительным вклеиванием и сушкой образцов в специализированных рамках.

Экспресс-методика позволяет сократить время испытаний по сравнению с прямыми нагружениями волокна на разрывной машине с 3 часов до 10 минут и соответствует точности измерений не менее, чем на 90 %. Методика включена в действующую техническую документацию поставщиков и потребителей армирующих волокон (ТУ 2112-065-00209013-2009, ТУ 1798-523-56897835-2011) и применялась при проведении экспериментальных исследований.

В четвёртой главе представлен пример применения результатов исследования на опытно-промышленном производстве боралюминиевых трубчатых элементов в АО «Композит» для обеспечения заданных требований качества продукции путём обоснования рациональных параметров технологических операций.

Данный вид продукции полностью соответствует ряду критериев рассматриваемого класса изделий из волокнистого металлокомпозита. Композиционный материал – боралюминий – представляет собой алюминиевую матрицу, армированную высокопрочными высокомодульными борными волокнами. Наиболее эффективным является применение боралюминия в виде трубчатых элементов в составе высоконагруженных несущих конструкций штатных космических аппаратов, что позволяет снизить вес таких конструкции на 20-40 % по сравнению с алюминиевыми и титановыми сплавами.

Для боралюминиевых трубчатых элементов конкретизирована процессно-ориентированная модель производства, которая позволила разделить объект исследования на составные элементы управления и выявить особенности процесса получения и факторы влияющие на показатели качества продукции, такие, как исходные физико-механические характеристики борного волокна, параметры плазменного напыления матричного материала, человеческий фактор при выполнении сборочных операций, параметры горячего прессования заготовки полуфабриката и др.

Конкретизирована концептуальная модель управления качеством для боралюминиевых трубчатых элементов, что дало возможность установить системные связи между назначением изделия в ракетно-космической технике и его прочностными свойствами, а также между показателями качества основных (борное волокно, алюминиевая проволока) и вспомогательных (внутренняя оболочка – тонкостенные стальные трубы) исходных материалов и техническими возможностями используемого в производстве оборудования для намотки волокна, плазменного напыления алюминия и горячего прессования изделия.

Подтверждением системных связей для определения необходимых экспериментальных исследований по обоснованию управляющих воздействий на качество боралюминиевых трубчатых элементов проведен анализ статистических данных с применением инструмента контроля качества – диаграммы Парето по выявлению видов нарушений и оценке доли каждого из них в общем количестве несоответствий при изготовлении порядка 10 000 единиц продукции за 20-ти летний период. Определено 9,02 % несоответствий продукции, что соответствует потерям порядка 6,3 млн. рублей в год (в ценах 2019 года). Выявлены причины появления несоответствий продукции, что позволило обосновать поиск следующих зависимостей:

– потери прочности (на растяжение) борного волокна от термомеханического воздействия при плазменном напылении алюминия;

– значений разрушающих напряжений при растяжении материала боралюминиевых трубчатых элементов от термомеханического воздействия в процессе горячего прессования.

Технологическая операция плазменного нанесения матричного материала (алюминий) на монослой борных волокон является окончательной при формировании боралюминиевой ленты-полуфабриката. В эксперименте использовали четыре группы образцов борного волокна с различной исходной прочностью. Пределы прочности в каждой группе выбирали согласно действующим ТУ 2112-065-00209013-2009 в пределах от 2500 МПа до 4500 МПа, таким образом, что шаг в каждой группе составлял 500 МПа. Напыление проводили на плазменной установке УПУ-3Д при одинаковых параметрах. После напыления образцы борного волокна извлекали из матрицы (механически) и испытывали для определения разрушающих нагрузок (на растяжение) с последующим определением среднего значения прочности волокон для каждой группы.

В результате проведенных экспериментов получены графическая (Рисунок 7) и математическая регрессионные зависимости потери прочности борного волокна в результате воздействия плазменного напыления матричного материала от значений исходной прочности волокна. Математическая модель представлена в виде степенной зависимости

$$y = 2e - 18x^{5,3027}, \quad (2)$$

где y – потеря прочности борного волокна (%), x – исходная прочность борного волокна (МПа). При этом значение R^2 – квадрат множественного коэффициента корреляции равен 0,954 и указывает на степень точности полученного значения.

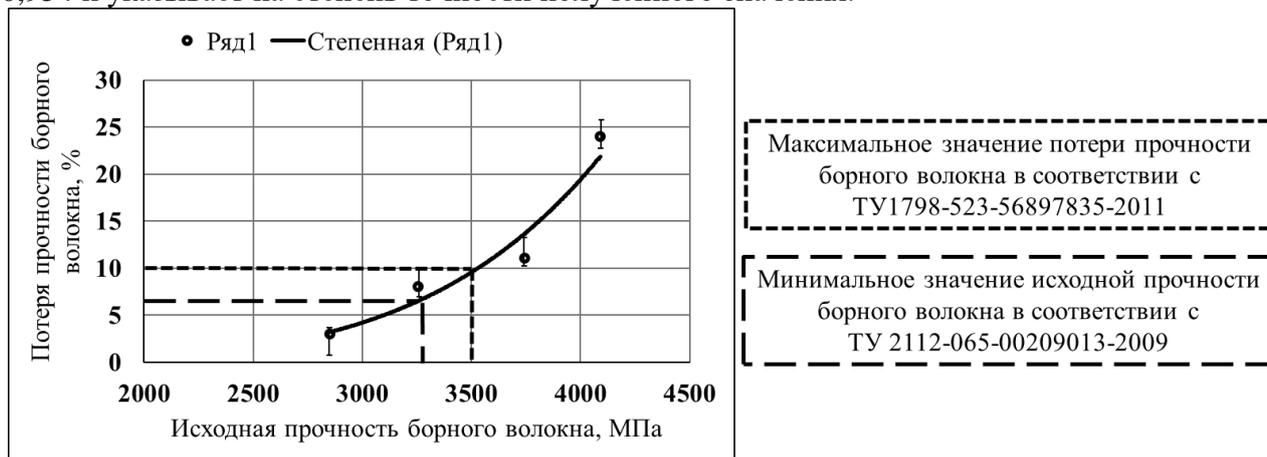


Рисунок 7 – Регрессионная зависимость потери прочности борного волокна от его исходной прочности

Из графика видно, что при увеличении исходной прочности борного волокна потеря его прочности после плазменного напыления алюминия также увеличивается. Применяв разработанную «иерархически организованную информационную подсистему», можно установить, что требования заказчика диктуют ограничения в виде допустимого максимального значения потери прочности борного волокна (ТУ 1798-523-56897835-2011) $\leq 10\%$ и значения исходной прочности волокна не менее 3300 МПа, соответствующего нижней границе интервала, предусмотренного ТУ 2112-065-00209013-2009. В результате получен интервал исходной прочности борного волокна от 3300 МПа до 3500 МПа, удовлетворяющий требованиям двух технических условий, что позволяет прогнозировать изменение свойств материала на этапе проектирования изделия.

Технологическая операция горячего прессования заготовки из ленты-полуфабриката является окончательной в формировании боралюминиевого трубчатого элемента. По действующему технологическому процессу (ТП 932.02100.02000) изготовлены пять боралюминиевых труб одного размера ($\varnothing 75 \times 520 \times 2$ мм) по пяти различным технологическим режимам. Каждый режим отличался от предыдущего изменением значений основных параметров: температура (Т) на 10°C , время (t) на 5 минут и при постоянном давлении (Р) (в соответствии с допусками в действующем технологическом процессе). Далее образцы материала всех пяти труб испытывали на разрывной машине типа EU-100 для определения разрушающих нагрузок при осевом растяжении.

В результате проведённого эксперимента получены графическая (Рисунок 8) и математическая модели зависимостей прочности материала трубчатых элементов от параметров горячего прессования. Математическая модель представлена в виде степенной зависимости

$$y = 1100,7x^{-0,346}, \quad (3)$$

где y – прочность материала трубчатых элементов (МПа), x – режим горячего прессования заготовки изделия. При этом значение R^2 – квадрат множественного коэффициента корреляции равен 0,9637 и показывает высокую степень точности полученных результатов.

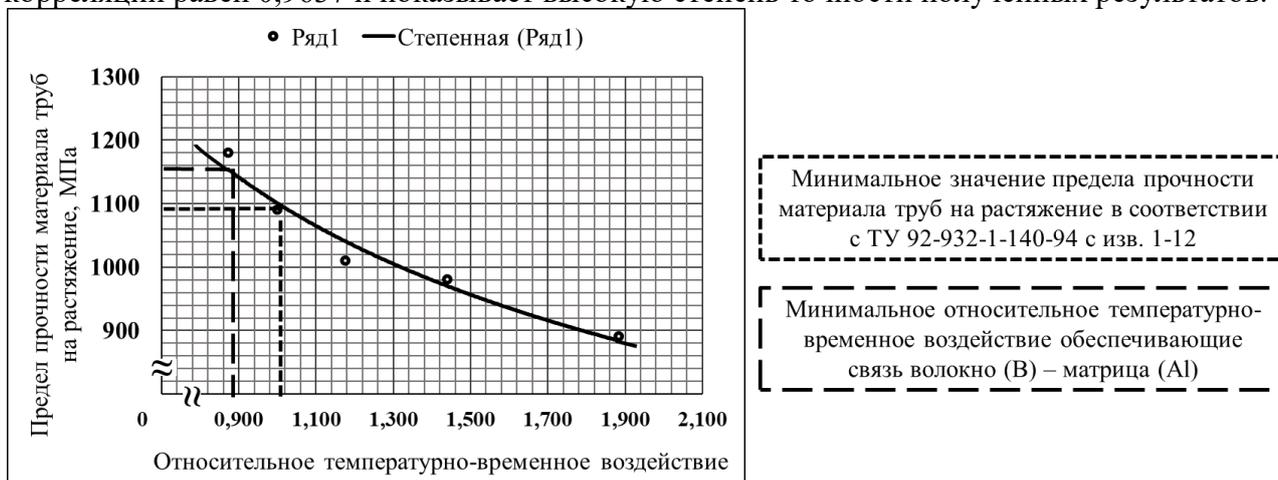


Рисунок 8 – Регрессионная зависимость потери прочности материала боралюминиевых трубчатых элементов от относительного температурно-временного воздействия в процессе горячего прессования

По оси «X» отображено относительное температурно-временное воздействие, его можно представить как отношение штатного режима, принятое за 1,000, к четырём остальным экспериментально взятым значениям температуры и времени при одинаковом давлении в процессе горячего прессования.

Из графика видно, что при уменьшении температурно-временного воздействия на боралюминиевую заготовку прочность материала увеличивается. В тоже время процесс горячего прессования должен обеспечивать связь между волокном и матрицей для формирования металлокомпозита и учитывать требования заказчика в соответствии с «иерархически организованной информационной подсистемой» по прочности материала продукции (1080 МПа, ТУ 92-932-1-140-94). Данные требования позволили получить диапазон значений режима горячего прессования 0,900-1,000, что даёт возможность рассматривать перспективу повышения свойств материала боралюминиевых трубчатых элементов.

Поскольку одним из основных показателей качества продукции из волокнистых металлокомпозитов является показатель технологичности, сопряженный с блоком экономических показателей, был проведён дополнительный эксперимент по поиску решений для снижения продолжительности одной из наиболее трудоёмких операций – намотки борного волокна.

Намотка борного волокна является первым этапом технологии производства промежуточной продукции – боралюминиевой ленты-полуфабриката. В экспериментальном исследовании использовали борные волокна с одинаковой исходной прочностью (ТУ 2112-065-00209013-2009). Намотка проводилась на специализированном станке по шести режимам (каждый режим имел пять повторений) с замером продолжительности намотки барабана и последующим определением среднего значения.

В результате проведённого эксперимента получены графическая (Рисунок 9) и математическая модели зависимостей продолжительности процесса намотки борного волокна от скорости вращения барабана. Данные зависимости представляют собой регрессионные модели, построенные методом наименьших квадратов с использованием пакетов прикладных программ Excel. Данная математическая модель представляет собой полиномиальную зависимость второй степени

$$y = 0,0018x^2 - 0,2636x + 12,934, \quad (4)$$

где y – продолжительность выполнения технологической операции (часы), x – скорость вращения барабана при намотке борного волокна (об/мин). При этом значение R^2 – квадрат множественного коэффициента корреляции равен 0,9643, что свидетельствует о высокой степени точности полученной зависимости.

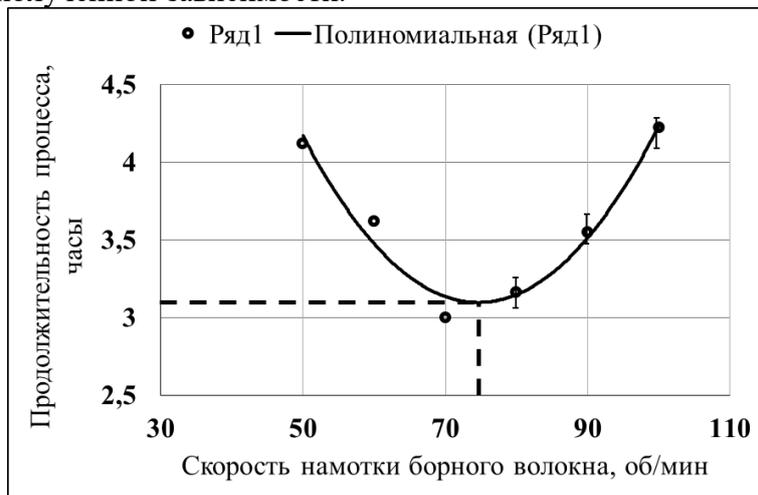


Рисунок 9 – Графическая модель зависимости продолжительности выполнения операции намотки борного волокна от скорости вращения барабана

Из графика видно, что с увеличением скорости вращения барабана до определённого значения продолжительность намотки снижается, но затем возрастает. Это связано с появлением обрывов борного волокна в процессе намотки, что делает дальнейшее увеличение скорости вращения барабана нецелесообразным.

Полученные зависимости позволяют обосновать требуемое значение основного параметра намотки борного волокна – скорости вращения барабана, равное 75 об/мин и снизить продолжительность операции на 15 %.

Кроме того, полученный комплекс графических и математических моделей позволяет учитывать изменения требований заказчика при применении продукции выделенного класса композитов в перспективных разработках ракетно-космической техники и изделиях гражданского назначения. Использование разработанных элементов управления качеством продукции позволило снизить количество несоответствий на 55 %, что в денежном выражении соответствует 3,5 млн. рублей в год (в ценах 2019 года).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что с учётом специфики производства продукции из металлических композиционных материалов, армированных волокнами, основным фактором воздействия на показатели качества продукции является технологический процесс ее получения. В этой связи целесообразно обеспечить управление качеством указанной продукции путём управления параметрами технологических операций и свойствами исходных материалов, подтверждёнными теоретической и экспериментальной базами исследований.

2. С использованием системного и процессного подходов разработана процессно-ориентированная модель производства продукции из волокнистых металлокомпозитов, которая позволяет определять совокупность основных необходимых технологических операций и последовательность их выполнения с учетом особенностей получения продукции. Модель представляет собой целостную систему и дает возможность установить системные связи между назначением изделия и его свойствами, а также между показателями качества продукции и техническими возможностями процесса производства данного изделия. Сформулирована информационная подсистема получения продукции из композиционных материалов, которая состоит из двух иерархических уровней. Первый уровень системы включает показатели качества продукции и отражает требования заказчика к объекту. Второй уровень информационной подсистемы (технологический) включает комплекс параметров, характеризующих ряд технологических операций, а также блок показателей качества исходных материалов. Иерархическая структура информационной подсистемы позволяет

реализовать принцип приоритета целей более высокого уровня управления, в данном случае предприятий ракетно-космической отрасли.

3. Разработана концептуальная модель управления качеством продукции из волокнистого металлокомпозита, которая рассматривает каждый объект изучения как целостную систему и одновременно как функциональный элемент для учета обратных связей. Целью построения концептуальной модели является обоснование ее основных подсистем управления, определение состава основных ее элементов, задание границ и среды системы для управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов.

4. Проведён комплекс теоретических и экспериментальных исследований на примере производства боралюминиевых трубчатых элементов (АО «Композит»), по результатам которых построены графические и математические модели зависимостей. Это позволило обосновать необходимый интервал исходной прочности борного волокна от 3300 до 3500 МПа удерживающий снижение их прочности в допуске до 10 %, скорректировать значение скорости намотки борного волокна до 75 об/мин при рациональной продолжительности процесса в 3 часа, адаптировать технологические процессы под повышение предела прочности волокнистых металлокомпозитов не менее 1200 МПа для перспективных изделий ракетно-космического и гражданского назначения. Комплекс проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволил снизить количество несоответствий на 55 % и сэкономить материальных средств на 3,5 млн рублей в год (в ценах 2019 года).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

В изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Олешко, А.Ю. Исследование компактирования плазменно-напыленного матричного материала боралюминиевых металлокомпозитов / А.Ю. Олешко, В.И. Потапов, В.И. Цыруль // Перспективные материалы. – № 11. – 2011. – С. 373-375.

2. Олешко, А.Ю. Разработка математических моделей для определения оптимальных параметров операций технологического цикла получения трубчатых элементов из боралюминия для нагруженных конструкций / А.Ю. Олешко, Т.Н. Антипова // Конструкции из композиционных материалов – межотраслевой научно-технический журнал. – 2017. – № 3(147). – С. 28-33.

3. Антипова Т.Н. Методические основы управления качеством продукции из волокнистых металлокомпозитов / Т.Н. Антипова, А.Ю. Олешко // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. – 2020. – Т.18. – № 1. – С. 55-62. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2020-18-1-55-62>

Публикации в других изданиях:

4. Олешко, А.Ю. Получение полуфабриката волокнистого композиционного материала А1-В / А.Ю. Олешко // «Новые материалы и технологии в авиационной и ракетно-космической технике»: сборник материалов VI конкурсной конференции молодых специалистов авиационных, ракетно-космических организаций России, часть I. – Королёв: ИПК «Машприбор», 2007. – С. 73-75.

5. Олешко, А.Ю. Получение ленты-полуфабриката металлического композиционного материала «алюминий-бор» / А.Ю. Олешко // «Новые материалы и технологии в ракетно-космической технике»: сборник материалов молодежной конференции, том I. – Звездный городок: ЦПК им. Ю.А. Гагарина, 2011. – С. 167-170.

6. Олешко, А.Ю. Боралюминиевые трубчатые элементы в несущих конструкциях космических аппаратов (КА) / А.Ю. Олешко, Е.Н. Щербакова // Труды – Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. – Королёв: РКК «Энергия» им. С.П. Королева, 2012. – серия XII, № 1-2, часть 1. – С. 148-151.

7. Олешко, А. Ю. Улучшение борного волокна химической полировкой для армирования алюминия / А.Ю. Олешко, Д.В. Сидоров, В.В. Тимонин, Е.Н. Щербакова // «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества»: сборник материалов IV Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – М: ИМЕТ РАН, 2012. – С. 261-262.

8. Олешко, А.Ю. Совершенствование процесса прессования боралюминиевых трубчатых элементов / А.Ю. Олешко, Е.Н. Щербакова, Г.Д. Саранчук // «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества»: сборник материалов V Международной

конференция с элементами научной школы для молодежи. – М: ИМЕТ РАН, 2014. – С. 155-157.

9. Олешко, А.Ю. Управление качеством процесса изготовления боралюминиевых трубчатых элементов / А.Ю. Олешко, Т.Н. Антипова // «Инновационные аспекты социально-экономического развития региона»: сборник статей по материалам участников V ежегодной конференции аспирантов ФТА. – М.: Издательство «Научный консультант», 2014. – С. 382-386.

10. Антипова, Т.Н. Управление качеством технологических процессов: Коллективная монография / Т.Н. Антипова, А.А. Лабутин, А.Ю. Олешко. – М.: Издательство «Научный консультант», 2015. – С. 132-148.

11. Олешко, А.Ю. Получение боралюминиевых трубчатых элементов для несущих конструкций космических аппаратов / А.Ю. Олешко, В.И. Цыруль, Н.Е. Лещев, Е.Н. Корзова, Т.К. Потапова // «Роль фундаментальных исследований при реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года»: сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции. – Москва: ФГУП ВИАМ, 2016. – С. 1-9.

12. Олешко, А.Ю., Концептуальные положения системы управления качеством производства боралюминиевых трубчатых элементов ферменных конструкций космических аппаратов / А.Ю. Олешко, Т.Н. Антипова // Информационно-технологический вестник. – 2016. – № 3. – С. 108-113.

13. Олешко, А.Ю. Получение металлического композиционного материала, армированного волокнами карбида кремния / А.Ю. Олешко, Е.Н. Корзова, Н.Е. Лещев, Т.К. Потапова // «Функциональные нано материалы и высокочистые вещества»: сборник материалов VI Международной конференции с элементами научной школы для молодежи. – М: ИМЕТ РАН, 2016. – С. 155-156.

Охранные документы:

1. Пат. 2455162 Российская Федерация, МПК В29D 23/00. Устройство для изготовления труб из композиционных материалов. Потапов В.И., Тимофеев А.Н., Цыруль В.И., Потапова Т.К., Олешко А.Ю.; заявитель и патентообладатель ОАО «Композит». – № 2010152210/05, заявл. 21.12.2010, опубл. 10.07.2012. – 8 с.