

На правах рукописи



Маслова Екатерина Валерьевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ
ИЗГОТОВЛЕНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ
КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ**

2.6.14 – Технология силикатных и тугоплавких неметаллических материалов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Государственном научном центре Российской Федерации Акционерном обществе «Обнинское научно–производственное предприятие «Технология» им.А.Г.Ромашина»

Научный руководитель:

Харитонов Дмитрий Викторович,

доктор технических наук, заместитель директора научно-производственного комплекса по производственной деятельности – начальник цеха, АО «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина»

Официальные оппоненты:

Пантелеев Игорь Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой химической технологии тугоплавких неметаллических и силикатных материалов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)» СПбГИ (ТУ)

Иконников Константин Игоревич

кандидат технических наук, руководитель исследовательского центра специальной керамики Общества с ограниченной ответственностью «Научно-технический центр «Бакор» (ООО «НТЦ «Бакор»)

Ведущая организация:

Акционерное общество «Машиностроительное конструкторское бюро «Факел» имени академика П.Д.Грушина» (АО МКБ «Факел»)

Защита диссертации состоится «___»_____2024 г. в _____ на заседании диссертационного совета 24.1.078.04, созданного на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН), по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский проспект, д. 49, БКЗ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук (ИМЕТ РАН) и на сайте ИМЕТ РАН <https://www.imet.ac.ru>. Автореферат диссертации размещен на официальных сайтах ИМЕТ РАН <https://www.imet.ac.ru> и ВАК <https://vak.minobrnauki.gov.ru/main>.

Автореферат диссертации разослан «___»_____2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.1.078.04,
кандидат геолого-минералогических наук



Ивичева С.Н.

1 ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Важной составной частью конструкции радиоуправляемых ракет является антенный обтекатель, на который возлагаются сложные функции: защита антенного блока от аэродинамической нагрузки и от воздействия климатических факторов с обеспечением радиопрозрачности в заданном диапазоне частот. Антенный обтекатель представляет собой конструкцию из двух основных элементов: оболочка из радиопрозрачного материала и переходного металлического шпангоута.

В качестве радиопрозрачного материала для оболочки антенного обтекателя чаще всего применяют кварцевую керамику, получаемую по технологиям, разработанным еще в конце 60-х годов прошлого века.

Процесс изготовления оболочки из кварцевой керамики, обладающей комплексом необходимых свойств, состоит из десятков технологических операций и характеризуется высокой трудоемкостью и достаточно продолжительным технологическим циклом. Керамической технологии свойственно образование дефектов - раковины, включения, трещины и микротрещины. Дефекты могут быть вызваны неудовлетворительным качеством сырья или его подготовкой, неудовлетворительным формованием, сушкой, обжигом.

В керамических оболочках антенных обтекателей данные дефекты регламентированы, поэтому их образование может привести к технологическим потерям. Дополнительную сложность вносит проблема выявления причины образования дефектов, что приводит к повышенному уровню технологических потерь, и, как следствие, к срыву поставок изделий.

Начиная с 2014-2015 гг., наблюдается рост объемов государственных оборонных заказов (ГОЗ), а в 2022 г в показатель вырос в разы, поэтому в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» потребовалось наращивать объемы производства керамических антенных обтекателей на имеющихся производственных мощностях. В связи с этим возникла необходимость в сокращении технологического цикла изготовления антенных обтекателей и своевременной минимизации технологических потерь.

Техническое совершенствование базовых технологических операций изготовления керамической оболочки с заданным уровнем свойств - повышение эффективности технологии, которое приведет к сокращению технологических потерь и снижению трудоемкости изготовления антенного обтекателя, которое, в совокупности, с выработкой новых принципов и способов поиска и предотвращения возможных причин образования дефектов является актуальной задачей в современной оборонной промышленности.

Степень разработанности темы

АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» является разработчиком и единственным изготовителем в РФ радиопрозрачных керамических антенных обтекателей для ракет различного класса: «воздух-воздух», «воздух-поверхность»; «поверхность-воздух», «поверхность-поверхность».

Технологии шликерного литья в пористые формы водных шликеров на основе кварцевого стекла в промышленном масштабе были разработаны в 1970-х годах в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина». За время своего существования по результатам научно-исследовательских работ технология претерпевала различные усовершенствования начиная от изменения вида основного материала – кварцевого стекла, включая оптимизацию процесса получения водных высококонцентрированных вяжущих суспензий кварцевого стекла, а также решение задач по конструктивному улучшению технологической оснастки.

Проведенные исследования процесса измельчения кварцевого стекла в значительной части направлены на достижение возможности получать суспензию с высоким содержанием твердой фазы и седиментационной устойчивостью, оптимальной текучестью, достаточной для получения высокого качества изделий. Несмотря на достигнутый высокий уровень технологии, процессы

получения шликера требуют оптимизации для сокращения технологического цикла изготовления изделий и снижения технологических потерь.

Немаловажную роль в процессе формования керамической заготовки играет формовой комплект, а именно качество материала и геометрические особенности его деталей. В последние годы ряд исследований посвящен проблемам по улучшению качества материала поверхности деталей формовых комплектов. Формовые комплекты разрабатываются индивидуально для каждого вида изделия с учетом их геометрических особенностей. При росте объемов производства возникает необходимость увеличивать количество формовых комплектов для тех или иных изделий. Вопрос влияния геометрических особенностей деталей формового комплекта на образование дефектов, таких как трещины и сколы, в керамических заготовках остается недостаточно изученным и актуальным в условиях роста объема производства.

В научной литературе встречается ограниченное количество работ, посвященных дефектам и причинам их образования в керамических оболочках антенных обтекателей. Несколько работ посвящены методам их обнаружения и идентификации. В других работах установлено, что 95 % дефектов, приводящих к технологическим потерям и выявленных на стадии механической обработки, возникают на предыдущих операциях: формования и обжига заготовки. Отсутствуют исследования по разработке принципов и способов поиска и своевременного предотвращения причин образования дефектов, с последующим формированием рекомендаций по их устранению.

Цель работы заключается в повышении эффективности технологии изготовления керамических антенных обтекателей за счет снижения уровня образования дефектов и сокращения длительности производственного цикла.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

1. Провести анализ возникающих видов дефектов, научно-технический обзор и анализ производственных и технологических факторов, влияющих на образование дефектов в керамических оболочках.

2. Исследовать влияние качества исходного сырья на параметры технологического процесса изготовления и свойства материала изделий. Провести анализ факторов, способствующих оптимизации процесса измельчения кварцевого стекла.

3. Установить факторы, которые влияют на образование трещин в процессе формования заготовок. Разработать эффективный способ по их сокращению.

4. Спроектировать оснастку для повышения равномерности сушки заготовок и выполнить проверку ее эффективности путем физического эксперимента и определения влажности фрагментов заготовки.

5. Разработать комплекс инструментов по выявлению и предотвращению возможных причин образования дефектов, и последующего формирования оптимальных путей для снижения уровня дефектов в процессе изготовления оболочек антенных обтекателей.

Область исследования соответствует паспорту специальности 2.6.14 п. 2: «Физико-химические принципы технологии материалов и изделий из силикатных и тугоплавких неметаллических материалов, включают стадии подготовки исходных материалов, смешивания и гомогенизации компонентов, формования заготовок или изделий, их упрочнения, высокотемпературных процессов, обработки материалов и изделий для придания им требуемых свойств, формы и размеров. Конструирование изделий и оснастки. Технологические схемы производства материалов и изделий. Ресурсо- и энергосбережение».

Научная новизна диссертационного исследования заключается в научно-практическом совершенствовании технологии изготовления керамических антенных обтекателей и инструменте поиска и предотвращения причин образования дефектов:

1. Установлена причинно-следственная связь возникновения дефектов на различных технологических операциях изготовления крупногабаритных керамических изделий из кварцевой керамики. Разработан комплекс алгоритмов мониторинга качества и причин образования дефектов.

2. Разработан 3D-метод комбинирования деталей формового комплекта, заключающийся в получении формообразующей полости с помощью 3D-изображений сердечника, модели и крупногабаритного изделия во всех вариантах взаимного расположения для выбора оптимального угла разворота, обеспечивающего соосность формового комплекта.

3. Установлены зависимости качества кварцевого концентрата и помола кварцевого стекла для получения крупногабаритных керамических изделий.

4. Определены зависимости скорости движения воздушного потока теплоносителя и его температуры на качество крупногабаритных заготовок при операции сушки.

Практическая значимость

1. Теоретически обосновано и доказано, что на образование дефектов в керамических оболочках могут влиять: процесс измельчения кварцевого стекла, геометрические параметры формовых комплектов, параметры и режимы сушки заготовок после формования.

2. Показано, что целесообразно использовать высший сорт кварцевого концентрата RQ-2K (меньшее содержание примесных элементов) для изготовления кварцевых труб и стержней. Наличие поверхностной кристаллизации на кварцевых трубах и стержнях не влияет на технологические параметры изготовления заготовок из кварцевой керамики и на ее физико-механические характеристики.

3. Установлен оптимальный интервал частоты вращения мельниц - 42,5-43,0 об/мин, который позволил снизить среднюю продолжительность помола более, чем на 25%.

4. Установлена возможность определения предпочтительного взаимного расположения (разворота вокруг оси) сердечника и формы, которое позволяет уменьшить несоосность основания будущей заготовки, в результате чего снижается доля трещин и сколов, более чем на 5%. Новизна технического решения подтверждается патентом Российской Федерации на изобретение № 2759878.

5. Разработанная конструкция воздуховода для сушки заготовок, обеспечивающая переменное поперечное сечение от основания до носка, увеличила равномерность сушки и снизила более, чем на 15% образование трещин в керамической оболочке. Новизна технического решения подтверждается патентом Российской Федерации на изобретение № 2773350.

6. Предложенные усовершенствования и разработанный комплекс алгоритмов установления причин образования дефектов позволили существенно нарастить производственные объемы выпуска продукции.

Методология и методы исследования

Содержание примесных элементов в кварцевом стекле определяли методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) на спектрометре iCAP 6300 DUO. Определение кристаллических фаз в кварцевом стекле и кварцевой керамике проводили методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Empyrean. Определение условной вязкости шликера проводили с помощью вискозиметра Энглера. Относительную влажность шликера определяли на анализаторе влажности марки AND MX-50. Для определения содержания частиц твердой фазы размером более 63 мкм проводили «мокрый» ситовой анализ, для определения количества частиц размером до 5 мкм использовали метод лазерной дифракции (статического лазерного рассеяния). Определение кажущейся плотности керамического материала осуществляли методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 2409-2014 «Огнеупоры. Метод определения кажущейся плотности, открытой и общей пористости, водопоглощения». Исследование прочностных характеристик керамических образцов проводили путем определения предела прочности материала при трехточечном статическом изгибе. Для выявления дефектов использовали метод визуально-оптического контроля.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Классификация причинно-следственной связи возникновения дефектов на различных технологических операциях изготовления крупногабаритных керамических изделий из кварцевой керамики.

2. Отсутствие влияния на технологические параметры изготовления заготовок из кварцевой керамики и на ее физико-механические характеристики используемого сорта концентрата (RQ-2К, RQ-3К), а также наличие поверхностной кристаллизации на кварцевых трубах и стержнях.

3. Оптимальный интервал частоты вращения мельниц, определенный из зависимости продолжительности помола от частоты вращения мельницы, - 42,5-43,0 об/мин, который позволяет снизить среднюю продолжительность помола на более чем 25% и сократить количество дефектов.

4. Различие в формовых комплектах - величина несоосности основания формообразующей полости деталей формового комплекта, которая влияет на образование трещин и сколов. Выбор оптимального угла разворота деталей формового комплекта приводит к снижению несоосности основания.

5. Конструкция воздуховода для сушки заготовок, который создает во внутренней полости зазор между воздуховодом и заготовкой сечением, увеличивающимся от основания до носка на 10%, повышающая равномерность сушки.

Личный вклад автора заключается постановке цели и задач, анализе научно-технической литературы, планировании и непосредственном участии в проведении экспериментальной работы, обработке и обобщении полученных экспериментальных и статистических данных, разработке методов повышения эффективности технологии производства керамических изделий, внедрении результатов исследований в технологический процесс производства, подготовке публикаций по теме работы.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследований свойств и структуры кварцевого стекла и керамики на его основе подтверждается их воспроизводимостью в лабораторных и производственных условиях, обеспечивается большим объемом статистически обработанных данных в части технологии изготовления керамических изделий и соответствием результатов промышленных экспериментов теоретическим данным.

Результаты исследования представлены на международных конференциях: Приоритетные направления развития науки и технологий: XXIX Международная научно-практическая конференция, Тула, 2021 г., Международная научно-практическая конференция, Комсомольск-на-Амуре, 2022 г.

Результаты диссертационной работы нашли применение в производстве керамических обтекателей в АО «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» (г. Обнинск).

Публикации Основные результаты диссертационной работы изложены в 15 публикациях, в том числе 7 статей в рецензируемых научных изданиях, включенных в перечень ВАК, 2 из них в журналах по научной специальности 2.6.14. Получено 5 патентов на изобретение и 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, и списка литературы из 103 наименований. Объем диссертации составляет 166 страниц машинописного текста, включая 59 рисунков и 19 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведены актуальность и степень разработанности темы исследования, цели и задачи, научная новизна, практическая значимость работы, методология и методы исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы.

В первой главе приведен обзор научной и патентной литературы по применяемым керамическим материалам в конструкции антенных обтекателей. Показано, что кварцевая керамика является наиболее широко применяемым материалом. Изучены особенности применяемых сырьевых материалов. Рассмотрены технологические операции изготовления антенных обтекателей. Установлено, что дефекты, заложенные на более ранних операциях, чаще всего обнаруживаются на этапе механической обработки. Выделены основные факторы и этапы, которые влияют на вероятность образования различных дефектов в керамических обтекателях.

В второй главе изложены методики входного контроля исходного сырья - кварцевого стекла, рентгенофазового анализа (РФА) для определения кристаллических фаз в кварцевом стекле и кварцевой керамике, определения основных свойств шликера и физико-механических характеристик кварцевой керамики. Описан метод визуально-оптического контроля на наличие дефектов в изделиях.

В третьей главе приведены результаты анализа видов дефектов, образующихся в керамических обтекателях, и их соотношение. Представлены результаты фрактографических и микроструктурных исследований дефектов.

Статистический анализ видов дефектов, выявленных в изделиях за 2018-2020 гг., показал, что наибольшую долю составляют трещины (68 %), после них - включения, несоответствие свойств, скол носка (несоответствие высоты) раковины и прочие дефекты. Результаты статистического анализа представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Виды дефектов и их соотношение в керамических обтекателях за 2018-2020 гг.

Проведенные фрактографические и микроструктурные исследования в работе показали, что трещины могут быть формовочными (сформированные на этапе набора заготовки или ее сушки) или обжиговые (образованные в процессе обжига в монолитном, сформированном материале). Поверхность формовочных трещин на изломе шероховатая с неровными границами. Поверхность обжиговых трещин гладкая с ровными границами, их микроструктура не отличается от характерной микроструктуры материала заготовки. В состав большинства включений входят основные элементы: O и Si, которые являются основными элементами материала самой заготовки

Природа образования большей части исследованных дефектов связана с формированием микроструктуры материала.

На основании проведенной работы установлен перечень возможных этапов образования дефектов в процессе изготовления керамического антенного обтекателя (рисунок 2).



Рисунок 2 - Дефекты и возможные этапы образования в керамических антенных обтекателях в процессе их изготовления

Согласно данным, представленным на рисунке 2, чаще всего вероятные причины образования дефектов могут быть связаны с качеством исходного сырья, особенностями формовочной оснастки, заложены в процессе приготовления шликера и (или) сушки заготовки.

В четвертой главе представлены результаты исследований влияния массовой доли примесей исходного кварцевого концентрата и дополнительной очистки плавиковой кислотой кварцевых труб на параметры шликера, процесса формования и обжига и на свойства материала получаемых заготовок, оптимизации процесса измельчения кварцевого стекла, в результате чего определена оптимальная загрузка мельницы помола, получена зависимость продолжительности помола кварцевого стекла от частоты вращения мельниц для получения шликера с оптимальным зерновым составом и установлен оптимальный интервал частоты вращения мельниц.

Для исследования влияния химического состава исходного кварцевого концентрата (сорта) на качество получаемых труб и заготовок из кварцевой керамики трубы были разделены на три группы:

- группа 1: кварцевые трубы, запущенные в производство, которые не имели следов кристаллизации на поверхности;
- группа 2: кварцевые трубы, запущенные в производство, на которых при входном контроле наблюдались следы кристаллизации в виде точек, рисок, пятен, но при проведении РФА на порошке кристаллических фаз не было обнаружено.
- группа 3: кварцевые трубы, запущенные в производство с кристаллизацией сплошным слоем, но при проведении РФА в порошке кристаллических фаз не было обнаружено.

Отдельно рассмотрены партии труб, изготовленных из кварцевого концентрата сорта RQ-2K (меньшее содержание примесных элементов) и трубы из сорта RQ-3K, травленные в плавиковой кислоте HF.

Статистический анализ массовой доли элементов-примесей, содержащихся в вышеописанных трубах, показал:

- по массовой доле Fe, Mn, Cu, Na и Ti группы 1, 2, 3 значительно не различаются;

- медиана распределения массовой доли Са в трубах группы 3 составляет значение, близкое к нулю, тогда как в группах 1 и 2 на порядок больше и больше рассеяние;
- распределение содержания Mg в партиях труб группы 3 значимо уже, меньше разброс;
- разброс содержания Al в партиях труб группы 3 значимо возрос по сравнению с группами 1 и 2;
- медиана распределения массовой доли К в трубах группы 3 значимо меньше и меньше рассеяние, чем в группах 1 и 2;
- разницы в массовой доле примесей в партиях труб, изготовленных из кварцевых концентратов сортов RQ-3К и RQ-2К не обнаружено.

Сравнительные данные по плотности и прочности при изгибе двух типов оболочек, изготовленных из различных групп труб представлены на рисунках 3 и 4.

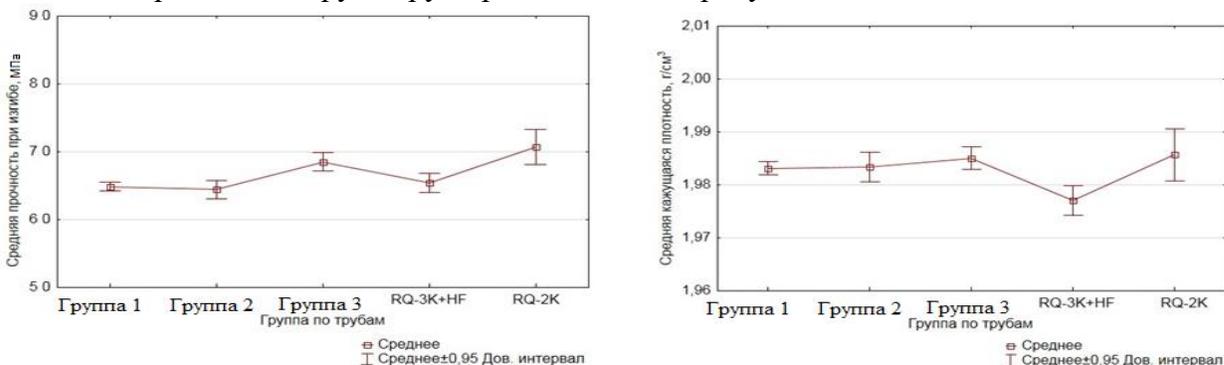


Рисунок 3 – Диаграмма размаха средней плотности и прочности при изгибе материала изделий высотой ≈ 500 мм

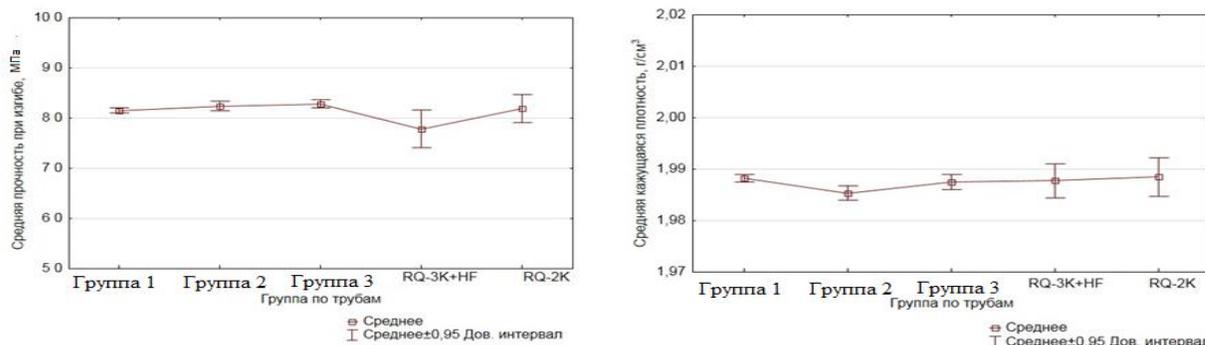


Рисунок 4 – Диаграмма размаха средней плотности и прочности при изгибе материала изделий высотой ≈ 1000 мм

По полученным зависимостям можно сделать вывод, что значения предела прочности при изгибе и кажущейся плотности материала изделий, изготовленных из различных групп труб, значимо не отличаются.

Электронно-микроскопический анализ фрагментов изделий, изготовленных из кварцевых труб разных групп, показал, что микроструктура всех образцов соответствует микроструктуре материала НИАСИТ (рисунок 5). Наличие кристаллических образований и микротрещин на сколах фрагментов заготовок не установлено.

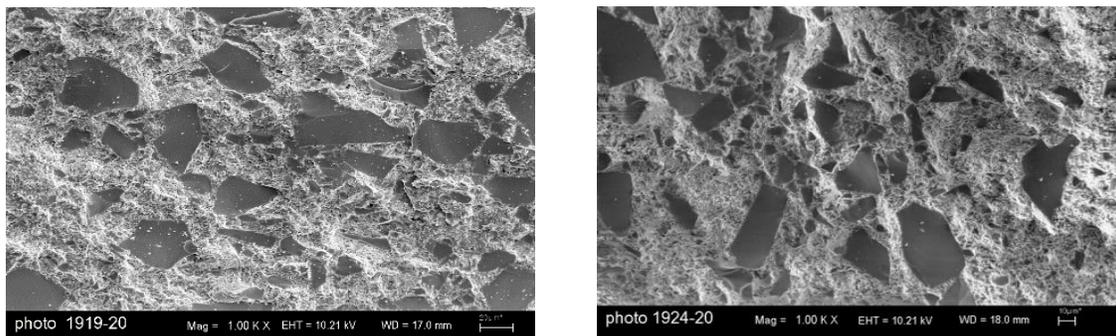


Рисунок 5 - Типичная микроструктура НИАСИТа образцов от исследуемых изделий.

РФА образцов от изделий, на которых была обнаружена поверхностная кристаллизация, показал, в поверхностной корке в зоне кристаллизации обнаружены α -кristобалит SiO_2 (тетр.) и β -кristобалит SiO_2 (куб.). Вне зоны дефекта на поверхности обнаружены очень слабые следы α -кristобалита (тетр.). При анализе порошка (в объеме образца от зоны дефекта) кристаллических фаз не обнаружено

Для оптимизации процесса измельчения кварцевого стекла проведен расчет и оценка по основным величинам, характеризующим помол: степень заполнения барабана мелющими телами (шарами) $\varphi_{\text{ш}}$, суммарное заполнение барабана $\varphi_{\text{с}}$, показатель активной зоны измельчения α , эффективная плотность мелющих тел $\Delta\rho$. По результатам расчета и проведенных экспериментов выбрано наиболее оптимальное соотношение кварцевого стекла и мелющих тел – 1 : 1,8. Проведена серия помолов, основные параметры которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные параметры, характеризующие различные помолы в шаровой мельнице.

Параметры	По плану экспериментальных работ			Действующая технология
	1 вариант	2 вариант	3 вариант	
Трубы из кварцевого стекла, кг	45	55	55	60
Мелющие тела, кг	81	99	99	78
Соотношение масс. стекло : мелющие тела	1 : 1,8	1 : 1,8	1 : 1,8	1 : 1,3
Скорость вращения барабана, об/мин	46	46	42	46
Плотность шликера, г/см ³	1,87	1,87	1,87	1,87-1,90
Содержание частиц размером более 63 мкм, %	5,2	6,4	5,4	4,0 – 7,6
Содержание частиц размером менее 5 мкм, %	24,90	24,40	24,90	20 - 35
Средняя продолжительность помола, ч	56	35	20	28-35
Кол-во шликера, л	32	34	34	38
Истирание шаров за помол, кг	12,0	9,2	6,0	7,0
Производительность мельницы, л/ч	0,57	0,70	1,7	1,36

Учитывая все критерии эффективности помола, можно сказать, что помол по варианту 3 является более эффективным.

Согласно известной формуле по определению рекомендуемого интервала частот для обеспечения каскадного режима для мельниц, используемых в производстве антенных обтекателей, данный интервал составляет 40,2...46 об/мин. При указанных скоростях можно получать шликер с разным зерновым составом. Зависимость продолжительности помола кварцевого стекла от частоты вращения мельниц получена по данным 1500 помолов, которая представлена на рисунке 6. Определен оптимальный интервал частоты вращения мельниц - 42,5 - 43,0 об/мин, при котором средняя продолжительность помола снижается больше, чем на 25% и при этом достигается оптимальный зерновой состав шликера, который позволяет снижать уровень дефектов.

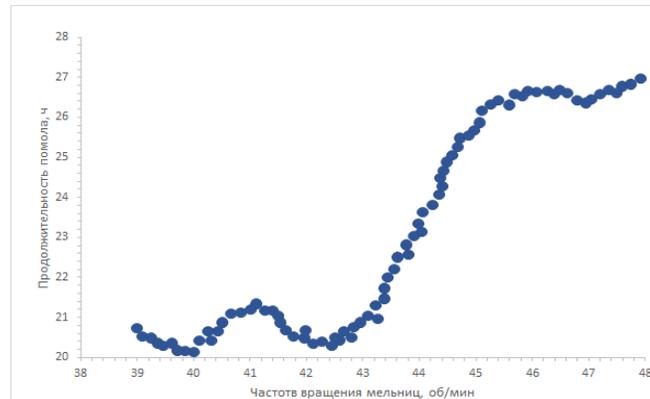


Рисунок 6 - Зависимость продолжительности помола кварцевого стекла от частоты вращения мельниц.

В ходе исследования влияния качества исходного сырья было показано, что нецелесообразно использовать высший сорт кварцевого концентрата RQ-2K для изготовления кварцевых труб и дополнительно их очищать плавиковой кислотой HF. Наличие поверхностной кристаллизации на кварцевых трубах и стрелках не влияют на технологические параметры изготовления заготовок из кварцевой керамики и на ее физико-механические характеристики.

В ходе оптимизации процесса измельчения кварцевого стекла получена зависимость продолжительности помола кварцевого стекла от частоты вращения мельниц для получения шликера с оптимальным зерновым составом. Определен оптимальный интервал частоты вращения мельниц - 42,5 – 43,0 об/мин. Это позволило снизить среднюю продолжительность помола более чем на 25 % и сократить количество дефектов на 10 %.

В пятой главе представлены результаты совершенствования технологии формования керамических заготовок, исследования влияния геометрических параметров формообразующих полостей на качество заготовок, разработан метод комбинирования деталей формовых комплектов, установлена зависимость влияния скорости движения воздушного потока теплоносителя и его температуры на качество заготовок после операции сушки, за счет применения воздухопровода разработанной конструкции получена высокая равномерность сушки всех участков изделия.

В производстве антенных обтекателей одного наименования используется одновременно несколько формовых комплектов. Основные элементы формового комплекта: сердечник и модель изготавливают путем нанесения на их металлический каркас последовательно двух слоев ПКМ с различным наполнителем. При сборке формового комплекта возможны различные варианты совмещения относительно друг друга сердечника и гипсовой формы, изготовленной по модели. Таким образом, геометрия заготовок определяется геометрией и взаимным расположением формообразующих поверхностей «модели» и сердечника. Разворот и индивидуальные геометрические размеры модели и сердечника формируют теоретическую будущую керамическую заготовку, т.е. формообразующую полость.

Было сделано предположение, что геометрические особенности формообразующих полостей могут влиять на результаты формования и обжига заготовок, в частности на образование трещин керамики. Диаграмма с результатами анализа влияния выбора формового комплекта на образование трещин и сколов керамики приведена на рисунке 7.

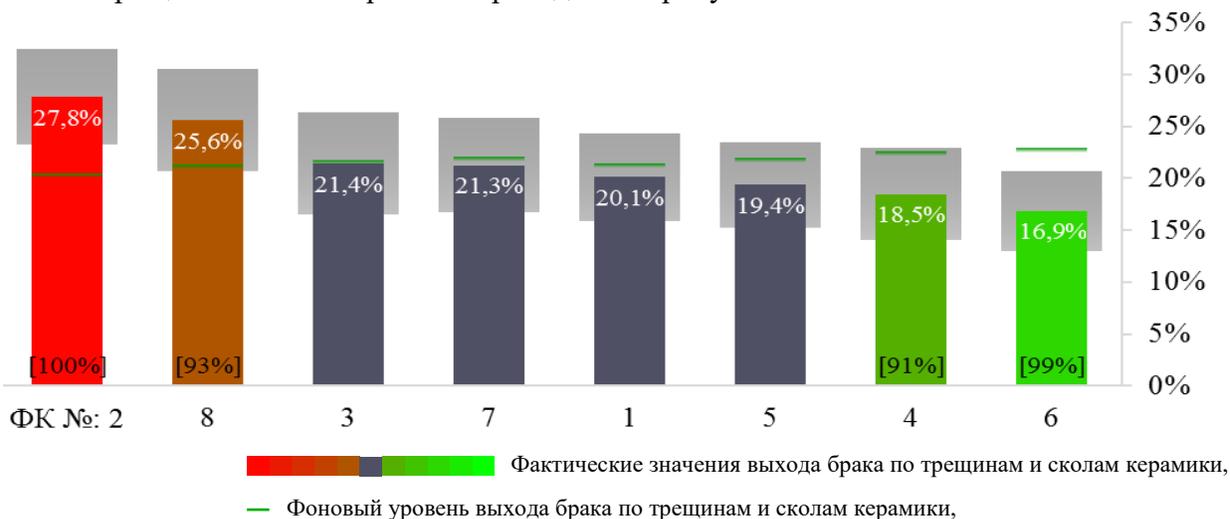


Рисунок 7 - Диаграмма оценки влияния выбора формового комплекта на образование трещин и сколов за трехлетний период. Статистическая достоверность выявленных различий между разными ФК.

Для определения какие именно геометрические параметры формообразующих полостей приводят к повышенному образованию трещин и сколов выбраны ФК №6 и №8, т.к. в течение анализируемого трехлетнего периода гипсовая форма для ФК №6 изготавливалась только моделью №1, а гипсовая форма для ФК №8 – только моделью №2. Если модели №1 и №2 существенно отличаются геометрическими параметрами, то могут быть обнаружены и отличия геометрических параметров формообразующих полостей.

Для определения отличительных признаков необходимо было сравнить геометрию формообразующих полостей, составленных тремя сочетаниями формообразующих деталей:

1. Сердечник № 6 и «модель» № 1,
2. Сердечник № 8 и «модель» № 2,
3. Сердечник № 8 и «модель» № 1.

Цифровые изображения формообразующих полостей в ФК были получены путем совмещения 3D-отображений сердечников и соответствующих «моделей».

Для статистического анализа данных по геометрии формообразующих полостей предложено использовать классификацию видов разнотолщинности, приведенную на рисунке 8.

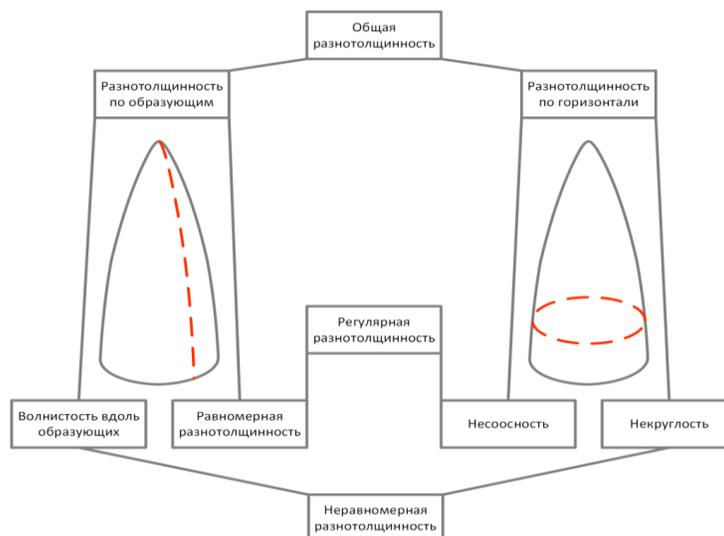


Рисунок 8 – Принятая классификация видов разнотолщинности.

В таблице 2 описаны метод расчета принятых видов разнотолщинности. Важнейшим из этих параметров необходимо считать именно несоосность основания, так как она не корректируется на этапе сборки формового комплекта.

Таблица 2. Методика расчета статистических параметров, характеризующих различные виды разнотолщинности формообразующих полостей.

Параметр	Способ расчета
Общая разнотолщинность (%)	Коэффициент вариации для выборки известных значений толщины формообразующей полости
Равномерная разнотолщинность (%)	Разность между «общей разнотолщинностью» и «другими видами разнотолщинности»
Другие виды разнотолщинности (%):	Коэффициент вариации для выборки отклонений значений толщины формообразующей полости от значений линейной зависимости толщины от расстояния до основания полости
«Волнистость» вдоль образующих (%)	Разность между «другими видами разнотолщинности» и значением параметра «несоосность и некруглость»
Несоосность и некруглость (%)	Коэффициент вариации для выборки отклонений значений толщины формообразующей полости от средних значений толщины полости на выбранном расстоянии до основания полости
Несоосность основания (мм)	Отклонение положения оси вращения сердечника относительно оси вращения модели на условном расстоянии 0 мм от до основания полости, определяемое исходя из геометрических данных

Анализируемые формообразующие полости в большей степени различаются значениями вклада «несоосность и некруглость», разница между минимальным и максимальным значениями которого составляет 20% (таблица 3).

Таблица 3. Коэффициент вариации значений толщины полостей в формовых комплектах для трех сочетаний сердечников и моделей.

Параметр	Сердечник № 6 с моделью № 1	Сердечник № 8 с моделью № 2	Сердечник № 8 с моделью № 1
Несоосность и некруглость	1,22%	1,06%	1,02%

Рассчитаны и проанализированы абсолютные значения несоосности внутренних и наружных поверхностей формообразующих полостей (таблица 4).

Таблица 4. Абсолютные значения несоосности основания формообразующих полостей.

Параметр	Сердечник № 6 с моделью № 1	Сердечник № 8 с моделью № 2	Сердечник № 8 с моделью № 1
Несоосность основания	0,16 мм	0,52 мм	0,19мм
Выход брака по трещинам и сколам, %	17,3	25,6	не реализовано

При анализе принято во внимание, что и сердечник, и модель могут обладать собственной несоосностью относительно своих фланцев, т.е. разные взаимные расположения (развороты вокруг оси друг относительно друга) сердечника и модели/формы приводят к отличающимся параметрам несоосности формообразующей полости. В таблице 5 приведены результаты анализа возможных вариантов разворота для сочетания сердечников №6 и №8 и модели №1.

Таблица 5. Результаты анализа данных по толщине полости в ФК №8 и №6 при использовании гипсовых форм модели №1 для четырех вариантов разворота сердечника.

Параметр	Угол разворота сердечника							
	Сердечник № 8 с моделью № 1				Сердечник № 6 с моделью № 1			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
Несоосность основания, мм	0,20	0,20	0,15	0,21	0,2	0,09	0,14	0,21

Результатом анализа несоосности формообразующих полостей является найденная возможность выбора предпочтительного взаимного расположения (разворота вокруг оси) сердечника и формы.

Предположение о том, что снижение несоосности основания формообразующей полости и выбор оптимального угла разворота сердечника приведет к уменьшению технологических потерь проверено в производстве керамических обтекателей. Установлено, что ФК №8 перестал демонстрировать худшие результаты и доля образования дефектов в заготовках снизилась до среднестатистического значения.

На основе полученных результатов был разработан метод комбинирования деталей формовых комплектов:

1. Проведение 3D-измерений вновь изготовленных или отремонтированных модели и сердечника.

2. Совмещение полученных 3D-изображений по фланцам с выравниванием позиций посадочных мест для крепления сердечника и модели в трех (или) четырех вариантах взаимного расположения (разворота друг относительно друга).

3. Выбор оптимальной «пары» модели и сердечника и их взаимного расположения (угол разворота), основанного на наименьшем значении несоосности основания.

4. Нанесение меток на каркас формы и сердечника и сборка формового комплекса по нанесенным меткам для обеспечения наименьшей несоосности основания будущей заготовки.

Работа по дальнейшему снижению уровня трещин направлена на оптимизацию процесса сушки отформованных заготовок. Проведен анализ видов трещин, которые обнаруживаются после их обжига. На рисунке 9 представлена диаграмма видов трещин после обжига и их соотношение.

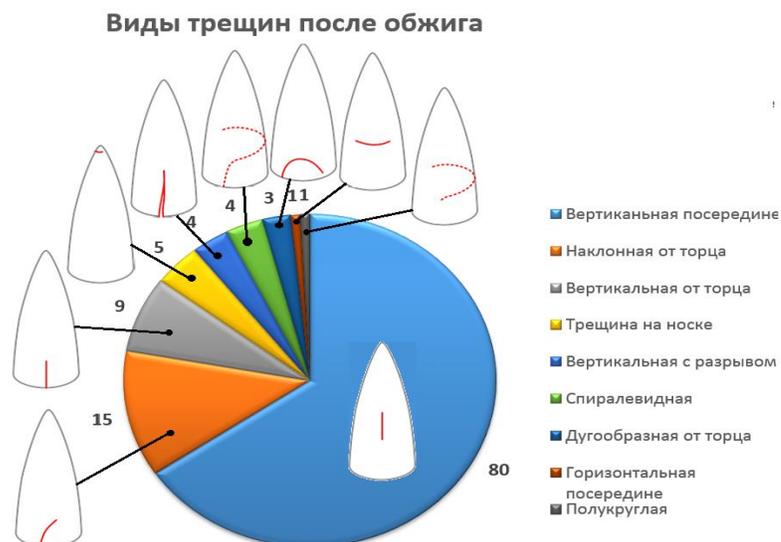


Рисунок 9 - Виды трещин на заготовках после обжига и их соотношение.

Преобладающим видом трещин является – вертикальная посередине заготовки. Вероятно, поток горячего воздуха из воздуховода локально пересушивает и создает градиент влажности по толщине заготовки. Установлено, что имеющиеся способ и устройство для сушки заготовок приводят к неравномерности сушки разных участков.

Для обеспечения равномерности сушки заготовок предложена идея новой конструкции воздуховода для вентилятора (рисунок 10).

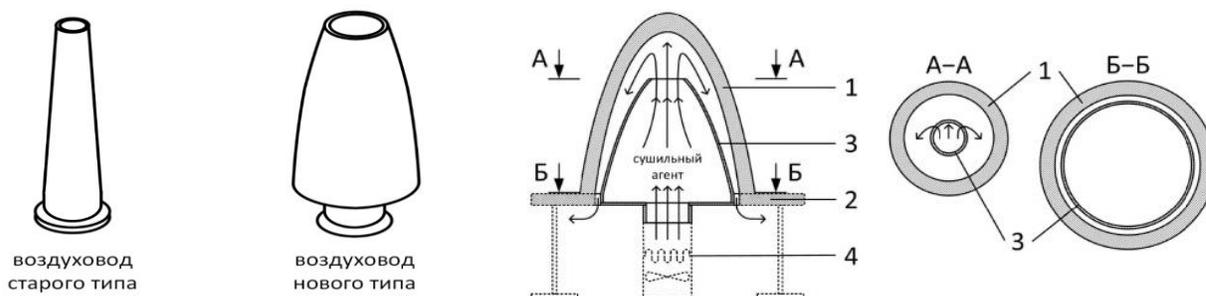


Рисунок 10 - Эскизы воздухопроводов старого и нового типов: 1 – керамическая заготовка; 2 – платформа; 3 – воздухопровод; 4 – тепловентилятор.

Отличительным признаком нового воздуховода является то, что площадь поперечного сечения полости между внутренней поверхностью изделия и наружной поверхностью воздуховода, имеет переменное значение: на уровне выходного отверстия воздуховода величина площади просвета между наружной поверхностью газохода и внутренней поверхностью изделия на 10% больше, чем величина площади просвета на уровне входа воздуховода в полость изделия.

Для подтверждения эффективности воздуховода предложенной конструкции были смоделированы физические процессы сушки заготовки по начальным и принятым условиям (рисунок 11):

- Воздух – несжимаемый идеальный газ со значениями $C_p=1006,43$ Дж/кг·К, $\lambda=0,0242$ Вт/м·К, $\mu=1,7894e-5$ Па·с.

- Свойства материала заготовки со значениями $\rho=1910$ кг/м³, $C_p=750$ Дж/кг·К, $\lambda=0,9$ Вт/м·К.

- Параметры на входе: скорость (три варианта значений 0,5; 1,0; 1,5 м/с), давление, температура.

- Параметры на выходе: нулевое избыточное давление при абсолютном атмосферном.
- Внутренняя стенка заготовки: связанное конвективное тепловое взаимодействие с обтекающим воздухом.
- Наружная стенка заготовки: естественная конвекция $10 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ с окружающим воздухом 28°C .
- Стенки воздуховода и торец оболочки: адиабатная граница.

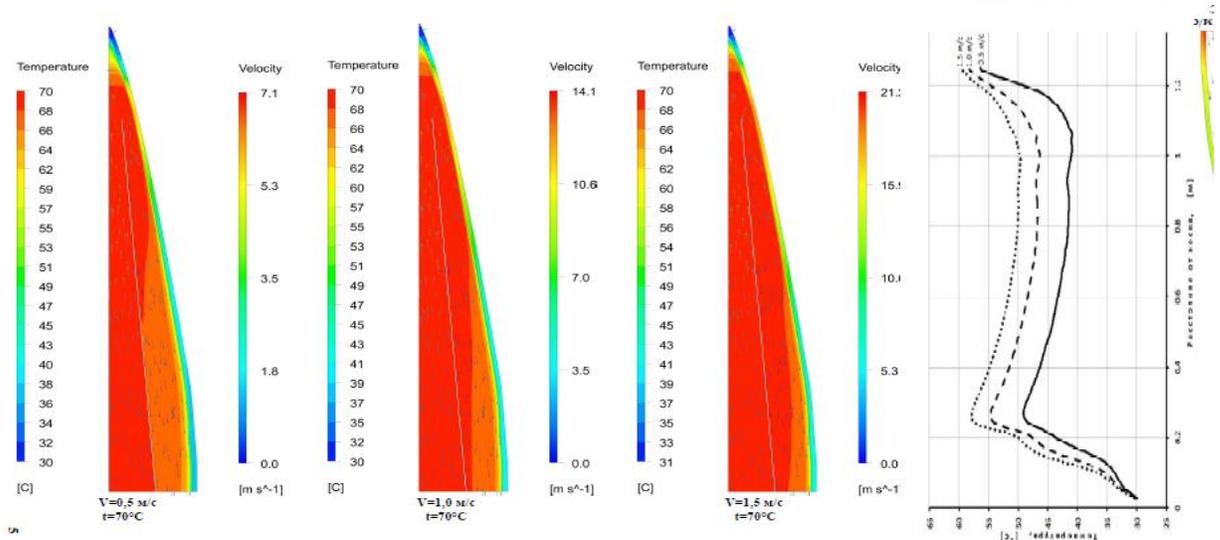


Рисунок 11 - Модель физических процессов при сушке заготовки с воздуховодом предложенной конструкции.

При скорости 3 м/с параметры движения в разнотолщинном зазоре не изменяются по высоте, тем самым обеспечивая равномерность температуры.

Повышение равномерности сушки происходит благодаря компенсации эффектов повышения фугитивности паров жидкости и снижения температуры подогретого сушильного воздуха в направлении его движения в полости, ограниченной наружной поверхностью воздуховода и внутренней поверхностью изделия, за счет постепенного уменьшения площади поперечного сечения указанной полости в направлении от уровня выходного отверстия воздуховода до уровня входа воздуховода в полость изделия. Пороговое значение 10% для разницы величин площадей поперечного сечения рассматриваемой полости выбрано для разграничения эффективно работающих конфигураций, обеспечивающих повышение равномерности сушки изделий, и конфигураций, когда компенсации эффектов повышения фугитивности паров жидкости и снижения температуры подогретого воздуха в направлении его движения не происходит.

Эффективность предложенной конструкции воздуховода оценивали по экспериментальной выборке керамических заготовок, высушенных с использованием действующего воздуховода и предложенной конструкции. Влажность образцов материала определяли гравиметрическим методом. Значения влажности заготовок перед сушкой находились в интервале 6-7%. В таблице 6 для двух способов приведены средние значения влажности образцов.

Таблица 6. Влажность фрагментов заготовок в зависимости от способа сушки.

Высота от основания заготовки, мм	Средние значения влажности образцов заготовок после прерывания процесса сушки, %	
	Старый воздуховод	Новый воздуховод
20	2,3	1,5
420	1,9	1,4
820	1,4	1,2
1220	0,8	1,1

Установлено, что выход годных изделий после обжига при использовании предложенного воздуховода составил – 96%, при использовании старого воздуховода – 81%. Предложенная конструкция воздуховода успешно внедрена в технологию изготовления керамических заготовок антенных обтекателей.

В ходе исследования особенностей формования заготовок установлено, что за различие формовых комплектов в образовании трещин и сколов отвечают неравномерность толщины и несоосность основания формообразующей полости. Разработан метод комбинирования деталей формовой оснастки, основанный на определении оптимального взаимного расположения модели и сердечника, который позволяет формовать заготовки с наименьшей несоосностью основания. Данный метод привел к снижению дефектов на 5%.

Исследование особенностей процесса сушки керамических заготовок позволило разработать новую конструкцию воздуховода. Показано, что при сушке керамических заготовок антенных обтекателей с его использованием позволяет повысить равномерность сушки всех участков заготовки. Полученная равномерность сушки снижает более, чем на 15% образование трещин в теле заготовки, выявляемых на протяжении всего производственного цикла изготовления.

В шестой главе проведена оценка эффективности предложенных методов усовершенствования технологии изготовления керамических обтекателей, разработан комплекс методов выявления причин образования дефектов, с помощью которого возможно оперативно предпринимать меры по их исключению или существенному снижению.

Для оценки качества производственного процесса используется принятый на производстве коэффициент запуска (Кз) за отчетный период выпуска продукции (месяц, квартал, год), рассчитывается по формуле (1):

$$K_z = \frac{N_z}{N_r}, \quad (1)$$

- где N_z - запущенное в производство (на операцию) число заготовок, N_r – число годных изделий (заготовок) на конец периода.

В случае увеличения показателя выше нормативно установленного значения, производится расследование причин ухудшения качества, разработка и реализация плана мероприятий по их устранению.

Для управления качеством керамических изделий со сложной технологической цепочкой изготовления требуется постоянный контроль состояния оснастки и оборудования для их изготовления, используемого сырья, регулярные проверки навыков и знаний ответственных исполнителей, и, как результат, выявление параметров, ответственных за выход в брак изделий. В качестве инструмента управления качеством разработан алгоритм, позволяющий анализировать и

своевременно выявлять аномалии и сбои в технологической цепочке изготовления изделий и предлагать возможные варианты решения сложившейся проблемы.

При разработке алгоритма были учтены подвиды трещин, представленных на рисунке 2, периодичность возникновения дефекта (постоянная или периодическая, по исполнителю или по расположению) и результаты исследований данной работы.

Принципиальная схема комплекса алгоритмов поиска причины образования дефектов и выдачи рекомендаций по их устранению представлены на рисунке 12. По каждому виду дефекта разработан свой алгоритм.

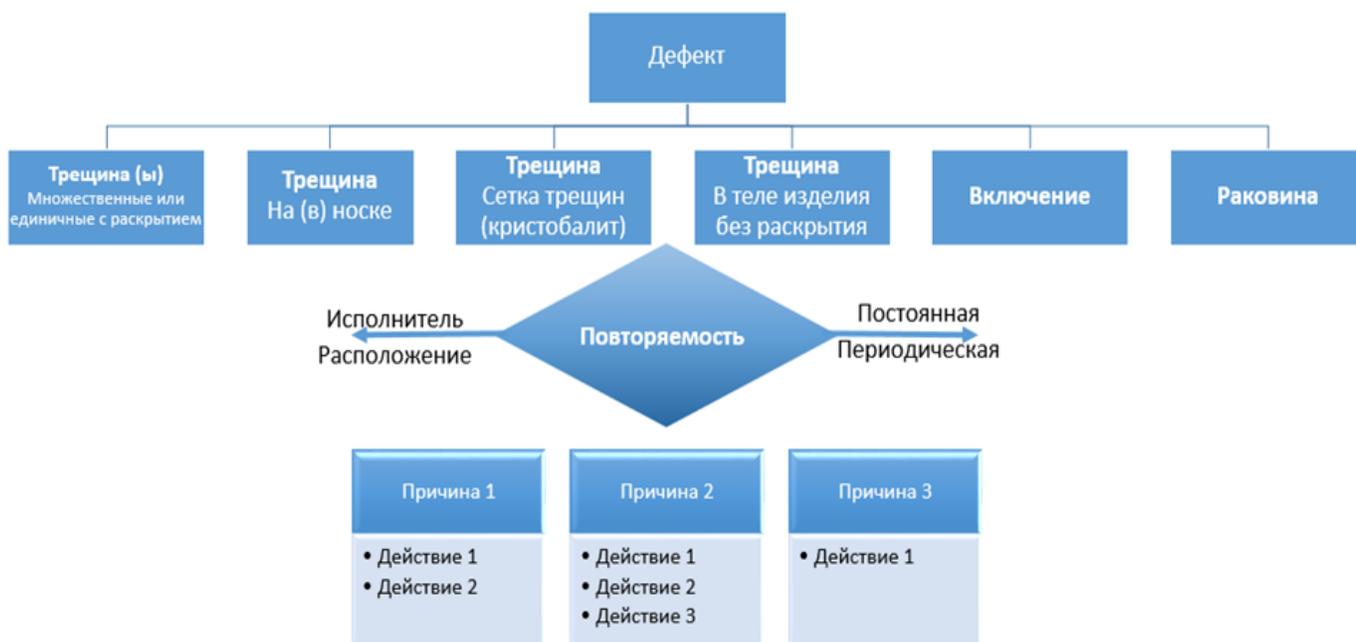


Рисунок 12 - Принципиальная схема комплекса алгоритмов поиска причины образования дефектов и выдачи рекомендаций по их устранению.

Эффективность предложенных усовершенствований нельзя оценивать лишь с точки зрения снижения доли дефектов и длительности технологических операций. Одним из важнейших показателей является также сокращение единиц технологического оборудования и специальной оснастки, предназначенных для производства определенного количества изделий. Анализуются только технологические операции, усовершенствованные в результате проведенных исследований и дающие наибольший экономический эффект. В основу расчета был взят объем отгруженных изделий за 1,5 года после внедрения предложенных усовершенствований. Результаты анализа представлены в таблице 7.

Таблица 7. Расчет эффективности усовершенствованной технологии на примере одного типа изделия.

Показатели для производства	Технология без усовершенствования	Усовершенствованная технология, действующий алгоритм
Кз общий	1,8	1,45
Шликер, л	111024	89436
Исходное сырье, т	185	149
Количество помолов, шт	3084	2484
Количество помолов в 1 мельнице в год (с учетом простоя на ремонт и средней продолжительности помола), шт	277	404
Количество мельниц (с учетом суточной потребности для формования), шт	11	8
Количество формовых комплектов (с учетом простоя на перегипсовку), шт	13	11
Трудоемкость изготовления заготовки, чел/ч	89633	72205
Итоговая экономическая эффективность (расчет по кварцевому стеклу, трудоемкости изготовления заготовки), руб	63 117 570	

Предложенные усовершенствования и разработанный комплекс алгоритмов поиска причин дефектов позволили существенно нарастить производственные объемы выпуска продукции. Для выполнения запрашиваемых объемов изделий потребовалось лишь подготовить незадействованные помещения и расширить участок по подготовке сырья для приготовления шликера и формования заготовок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложено решение важной научно-технической задачи, направленной на повышение эффективности технологии изготовления керамических антенных обтекателей. В ходе достижения установленной цели в диссертационной работе получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Показано, что вероятные причины образования дефектов в оболочках антенных обтекателей могут быть связаны с особенностями формовочной оснастки, заложены в процессе помола кварцевого стекла и (или) сушки заготовки.

2. Установлено, что наличие поверхностной кристаллизации на кварцевых трубах и стрелках не влияет на технологические параметры изготовления заготовок из кварцевой керамики и на ее физико-механические характеристики.

3. Определена оптимальная загрузка шаровой мельницы для получения шликера на основе кварцевого стекла с требуемыми параметрами суспензии, при которой соотношение кварцевое стекло : мелющие тела составляет 1:1,8. Установлена зависимость продолжительности помола кварцевого стекла от частоты вращения мельниц, на основании которой определена оптимальная частота вращения мельниц – 42,5-43,0 об/мин, которая позволяет сократить продолжительность помола кварцевого стекла на 25%, что приводит к снижению уровня образования дефектов.

4. Показано, что на образование трещин и сколов влияет различие формовых комплектов, которое связано с несоосностью основания формообразующей полости. Разработан метод комбинирования деталей формовочной оснастки, позволяющий получать заготовки с

наименьшей несоосностью основания и снижает долю трещин и сколов в керамических заготовках, более чем на 5%.

5. Доказана эффективность использования для сушки керамических заготовок воздуховода предложенной конструкции, которая обеспечивает воздушный зазор между заготовкой и воздуховодом, поперечное сечение которого увеличивается от основания до носка на 10%. Полученная равномерность сушки снижает более чем на 15% образование трещин в теле заготовки, выявляемых на протяжении всего производственного цикла изготовления.

6. Разработан комплекс алгоритмов мониторинга и управления качеством, действий по выявлению причин образования дефектов в керамических обтекателях, который позволяет оперативно предпринимать меры по их исключению или существенному снижению.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Охлупин, Ю. С. Уменьшение разнотолщинности формообразующей полости с использованием 3D-измерений оснастки для формования керамических изделий с целью снижения выхода брака по трещинам и сколам / Ю. С. Охлупин, Е. В. Маслова, Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина // Современные наукоемкие технологии. – 2021. – № 10. – С. 75-82.

2. Маслова, Е. В. Влияние массовой доли примесей на кристаллизацию кварцевых труб и качество заготовок из кварцевой керамики / Е. В. Маслова, М. С. Тычинская, Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина // Приоритетные направления развития науки и технологий : XXIX Международная научно-практическая конференция, Тула, 28 октября 2021 года. – Тула, 2021. – С. 206-211.

3. Патент № 2759878 С1 Российская Федерация, МПК С04В 33/28, В28В 1/26. Способ формования керамических заготовок: № 2021107916: заявл. 25.03.2021: опубл. 18.11.2021 / Д.В. Харитонов, Е.В. Маслова, А.А. Анашкина, М.Ю. Русин, А.С. Хамицаев, Г.Н. Савенков, Ю.С. Охлупин. – 5 с.

4. Патент № 2759211 С1 Российская Федерация, МПК В28В 1/26, С04В 33/28. Способ формования крупногабаритных керамических изделий: № 2021112479: заявл. 29.04.2021: опубл. 10.11.2021 / Д.В. Харитонов, А.А. Анашкина, М.Н. Нефедов, Е.В. Маслова, А.К. Хмельницкий, Д.О. Лемешев. – 8 с.

5. Харитонов, Д. В. Статистическое управление процессом повышения производительности производства наукоемких керамических изделий / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, А. А. Анашкина, Е. В. Маслова // Современные наукоемкие технологии. – 2022. – № 8. – С. 97-102.

6. Патент №2773350 С1 Российская Федерация, МПК F26В 3/04. Способ сушки полых изделий: 2021133257: заявл. 16.11.2021 : опубл. 02.06.2022. / Д.В. Харитонов, П.Л. Клыков, Ю.С. Охлупин, Е.В. Маслова, А.А. Анашкина, Д.А. Михалевский, М.Ю. Русин. – 12 с.

7. Харитонов, Д. В. Экономическая эффективность инновационных операций неразрушающего контроля / А. И. Амосов, А. В. Терехин, А. А. Анашкина, Е. В. Маслова // Компетентность. – 2022. – № 9-10. – С. 38-43.

8. Харитонов, Д. В. Керамические изделия. Инновационные операции неразрушающего контроля / Д. В. Харитонов, А. И. Амосов, А. В. Терехин, А.А. Анашкина, Е. В. Маслова // Компетентность. – 2022. – № 7. – С. 21-25.

9. Харитонов, Д. В. Исследование влияния кристаллизации материала труб из кварцевого стекла на качество заготовок из кварцевой керамики / Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина, М. С. Тычинская, Е. В. Маслова, А.С. Хамицаев // Стекло и керамика. – 2022. – Т. 95, № 4(1132). – С. 16-22.

Kharitonov, D. V Investigation of the Influence of the Crystallization of Quartz-Glass Pipe Material on the Quality of Quartz Ceramic Workpieces / D. V.Kharitonov, A. A. Anashkina, M. S. Tychinskaya [et al.] // Glass and Ceramics. – 2022. – Vol. 79, No. 3-4. – P. 130-134.

10. Чернышев, И. А. Факторы, влияющие на спекание и фазовые изменения керамики на основе кварцевого стекла при термообработке / И. А. Чернышев, Е. В. Маслова, Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина // Новые огнеупоры. – 2022. – № 2. – С. 27-31.

Chernyshev, I. A. Factors Influencing Sintering and Phase Changes During the Heat Treatment of Quartz Ceramics / I. A. Chernyshev, E. V. Maslova, D. V. Kharitonov, A. A. Anashkina // Refractories and Industrial Ceramics. – 2022. – Vol. 63, No. 1. – P. 74-77.

11. Маслова, Е. В. Разработка инструментов анализа производственных данных в программно-аппаратном управленческом комплексе, интегрированном в производство керамических изделий / Е. В. Маслова, Д. В. Харитонов, А. А. Анашкина, А. В. Грошев // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению : Материалы Международной научно-практической конференции, Комсомольск-на-Амуре, 07–11 февраля 2022 года. – Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2022. – С. 124-127.

12. Патент № 2796118 С1 Российская Федерация, МПК В28В 1/26, В22С 1/18, С04В 28/14. Способ изготовления гипсовых форм для литья керамических изделий: № 2022127947: заявл. 28.10.2022: опубл. 17.05.2023 / А. А. Анашкина, В. В. Северенкова, Д. В. Харитонов, Е. В. Маслова, М.Ю. Русин, С.М Кубахов. – 7 с.

13. Патент № 2798973 С1 Российская Федерация, МПК В02С 17/00. Способ изготовления футеровки шаровых мельниц для получения водного шликера кварцевого стекла: № 2022112810: заявл. 12.05.2022: опубл. 29.06.2023 / Д. В. Харитонов, Е. В. Маслова, А. А. Анашкина, М.Ю. Русин, А.В. Терехин, А.К. Хмельницкий, В.В. Северенкова. – 7 с.

14. Харитонов, Д. В. Применение критерия Пирсона для оценки стабильности технологического процесса / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, А. А. Рамазанова, Е. В. Маслова // Современные наукоемкие технологии. – 2023. – № 9. – С. 61-67.

15. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2022618222 от 05.05.2022. Программный модуль "Диспетчеризация" производственного автоматизированного управленческого комплекса "ПАУК": дата получения: / Д. В. Харитонов, А. В. Грошев, С.А. Баршевцев, Е. В. Маслова, А. А. Анашкина, А.К. Хмельницкий.