

**БАСОВ СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ**

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ УПРОЧНЕНИЯ ШНЕКОВ  
ЭКСТРУДЕРОВ ДИФфуЗИОННЫМ БОРИРОВАНИЕМ  
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНЫМ НАГРЕВОМ В ОБМАЗКАХ**

Специальность: 4.3.1. Технологии, машины и оборудование для  
агропромышленного комплекса

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре сопротивления материалов и деталей машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева».

**Научный руководитель:** **Скороходов Дмитрий Михайлович**  
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры сопротивления материалов и деталей машин ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева»

**Официальные оппоненты:** **Федоров Сергей Константинович**  
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана

**Катаев Юрий Владимирович**  
кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории «Техническое обслуживание, ремонт и рециклинг сельскохозяйственной техники» ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Удмуртский государственный аграрный университет»

Защита состоится 19 декабря 2024 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.030.03 на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, тел.: 8(499)976-17-14.

Юридический адрес для отправки почтовой корреспонденции (отзывов): 127434, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета [www.timacad.ru](http://www.timacad.ru).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 35.2.030.03,  
кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ Николай Николаевич Пуляев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В условиях современной геополитической обстановки одной из основных задач в сфере АПК России является развитие животноводства. Важнейшей составляющей для животноводства является производство кормов, а также совершенствование методов и технических средств их получения. За последние годы количество импортной техники в животноводческой отрасли значительно увеличилось и составляет около 95%, что требует безотлагательного совершенствования технологии ремонта данной техники, и в частности, разработки новых технологий упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин.

Учитывая постоянно возрастающую потребность в количестве кормов, а также высокие требования к качеству корма, большое распространение получили комбикорма. Внедрение комбикорма в рацион коров повышает их удои на 10...20% при снижении затрат корма на 7 ... 15%, что в свою очередь снижает себестоимость продукции.

В приготовлении концентрированных кормов широко используются экструдеры. Наибольшая доля рынка экструдеров в мире представлена Китаем (18,6%), Италией (17%), Германией (12%). Россия по производству экструдеров занимает 5 место (9%). Поставляемые запасные части, в том числе рабочие органы экструдеров, тоже являются импортными. Учитывая санкционные условия, в которых находится Российская Федерация, стоимость запасных частей в разы увеличилась, а их доставка осуществляется через параллельный импорт.

Главным рабочим органом экструдеров является шнек. Экструдеры классифицируются по принципу работы шнека, бывают экструдеры одношнековые, многошнековые. Шнеки в свою очередь делятся на однозаходные, многозаходные, с переменным диаметром, с переменным шагом, разной площадью сечения и др. Экструдеры и используемые в них шнековые рабочие органы подбираются исходя из технологических мощностей предприятия, объёмов производства и видов перерабатываемых компонентов. Высокие температурные режимы работы шнеков экструдеров (до 180°C), высокое давление, возникающее в процессе прессования корма (до 5 МПа), повышенная влажность кормосмесей (до 30%), наличие источников абразива в виде твердых частиц зерна и других компонентов, а также наличие химически активных веществ и неправильная эксплуатация экструдеров приводят к интенсивному коррозионно-механическому износу шнеков.

Из-за отсутствия доступных способов восстановления и повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров большинство животноводческих предприятий вынуждены закупать импортные запасные части несмотря на усложнённую их доставку, а на рынке все чаще появляются некачественные запасные части, установка которых в эксплуатацию приводит к их быстрому износу, что влечёт за собой экономические затраты на приобретение новых деталей, а также к простоям оборудования.

Существующие методы восстановления и упрочнения шнеков экструдеров недостаточно надёжны и эффективны, их сложно использовать в современном производстве. Поэтому разработка новых методов и средств упрочнения шнеков, повышающих их долговечность и работоспособность, является актуальной задачей.

**Степень разработанности.** Повышению надёжности сельскохозяйственных машин и их рабочих органов посвящены работы Черноиванова В.И., Дидманидзе О.Н., Ерохина М.Н., Лялякина В.П., Голубева И.Г., Гайдара С.М., Новикова В.С., Казанцева С.П., Леонова О.А., Апатенко А.С., Виноградова В.В., Левшина А.Г., Аулова В.Ф., Федорова С.К., Кабдушевой А.С., Мартыновой Д.В., Попова В.П., Ханина В.П., Зинюхина Г.Б., Антимонова С.В., Сидоренко Г.А., Трифонова Г.И., Денисова В.А., Ишкова А.В. и других ученых.

Анализ современных способов повышения долговечности шнековых рабочих органов экструдеров показал, что с учетом их эксплуатации и износов, наиболее перспективным для упрочнения шнеков экструдеров, в том числе после восстановления их геометрической формы, является метод диффузионного борирования в обмазках сверхвысокочастотным нагревом. Из-за недостаточной изученности данный метод требует проведения исследования по его внедрению в производственный процесс на запасных частях сложной формы поверхности.

**Цели исследования.** Разработка технологии упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ условий эксплуатации, основных причин выхода из строя шнековых рабочих органов и выбор перспективного метода их упрочнения.
2. Исследовать термодинамические условия получения боридного покрытия сверхвысокочастотным нагревом.
3. Обеспечить синхронизацию поступательного движения индуктора с вращательным движением шнека экструдера.
4. Разработать экспериментальную установку для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.
5. Установить оптимальные режимы сверхвысокочастотного нагрева диффузионного борирования в обмазках.
6. Исследовать физико-механические свойства полученных боридных покрытий.
7. Разработать технологию упрочнения шнековых рабочих органов экструдеров, повышающую их долговечность.
8. Дать оценку экономической эффективности применения разработанной технологии упрочнения шнеков экструдеров кормов.

**Объект исследования.** Боридное покрытие на рабочей поверхности шнека экструдера, полученное путём сверхвысокочастотного нагрева.

**Предмет исследования.** Упрочнённый слой рабочей поверхности шнека экструдера, полученный путем сверхвысокочастотного нагрева в обмазках.

**Научная новизна.** Теоретически доказана возможность образования боридного покрытия в условиях кратковременного сверхвысокочастотного нагрева при сохранении исходных свойств основы деталей. Получена математическая модель процесса диффузионного борирования методом сверхвысокочастотного нагрева в обмазках и обоснованы параметры поступательного движения индукционного нагревателя с вращательным движением шнекового рабочего органа в процессе упрочнения его рабочей поверхности.

**Теоретическая и практическая значимость работы:**

- определены термодинамические условия получения боридного покрытия сверхвысокочастотным нагревом.
- разработана математическая модель процесса диффузионного борирования методом сверхвысокочастотного нагрева в обмазках
- разработана технология повышения долговечности шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках;
- разработана установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом СВЧ (патент РФ на изобретение RU 2820894);
- разработана программа, формирующая G-code генерации частоты вращения шнекового рабочего органа и возвратно-поступательного движения индукционного нагревателя (патент на ЭВМ №20224669388);
- упрочнение шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом позволяет увеличить ресурс шнеков экструдеров в 1,5 раза.

**Методология и методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились по известным методикам, на современном лабораторном оборудовании института механики и энергетики имени В.П. Горячкина. Боридные покрытия получены на разработанной установке для восстановления и упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом. Результаты испытаний обрабатывались с использованием вычислительных средств и программы «Microsoft Excel 2013».

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- термодинамические условия получения боридного покрытия при температуре сверхвысокочастотного нагрева до 1150°C;
- физико-механические характеристики упрочняющего покрытия;
- результаты испытаний, упрочненных шнеков экструдеров;
- технико-экономическая оценка результатов исследований.

**Степень достоверности и апробация результатов.** Материалы диссертации доложены, обсуждены и одобрены в рамках следующих мероприятий:

- Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной

Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.;

- 72-ой Международной студенческой научно-практической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко, 2019 г.;

- 4-я Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова, г. Курск, 2023 г.;

- Международной научно-технической конференции, г. Воронеж, 2023г.;

- Патент на изобретение № 2820894 С1. Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом токами высокой частоты. Заявл. 18.10.2023: опубл. 11.06.2024. Бюл. № 17. – 8 с.

- Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669388 «Программа формирования G-Code для управления установкой упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом ТВЧ». Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2024 г. Бюл. № 8.

**Публикации результатов исследований.** Основные положения и научные результаты диссертационной работы опубликованы в 10 научных работах, из них 3 статьи, рекомендованных ВАК РФ, патент на изобретение № 2820894 и свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669388.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, не включая приложения, и содержит 30 таблиц и 45 рисунков, 6 приложений. Список литературы включает 142 источника.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, дана общая характеристика проблемы, изложены цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования, основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе «Анализ вопроса. Задачи и цель исследования»** изложены результаты анализа ранее выполненных исследований по вопросам упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин методом диффузионного борирования. Рассмотрены условия работы шнеков кормовых экструдеров, основные их геометрические и физико-механические параметры. Приведена классификация шнеков кормовых экструдеров, изложены основные причины их износа, проведён анализ дефектов кормовых экструдеров и рассмотрены пути решения повышения долговечности. Сделаны основные выводы, определена цель и задачи исследования.

Экструдеры предназначены для получения высококачественных гранулированных комбикормов. Комбикорма позволяют эффективно

использовать совмещение питательных веществ зерновых культур и аминокислот, необходимых для нормального роста как взрослого скота, так и молодняка.

Структура кормов (рисунок 1) применяемых в процессе экструдирования выглядит следующим образом: зерновые компоненты составляют 60 до 90%, бобовые и злаковые травы от 20 до 30% (размером не более 10 мм), мясные компоненты от 5 до 10%; минералы от 1 до 2%, до 1 % аминокислот и добавка витаминов до 0,05 % от общей массы корма.

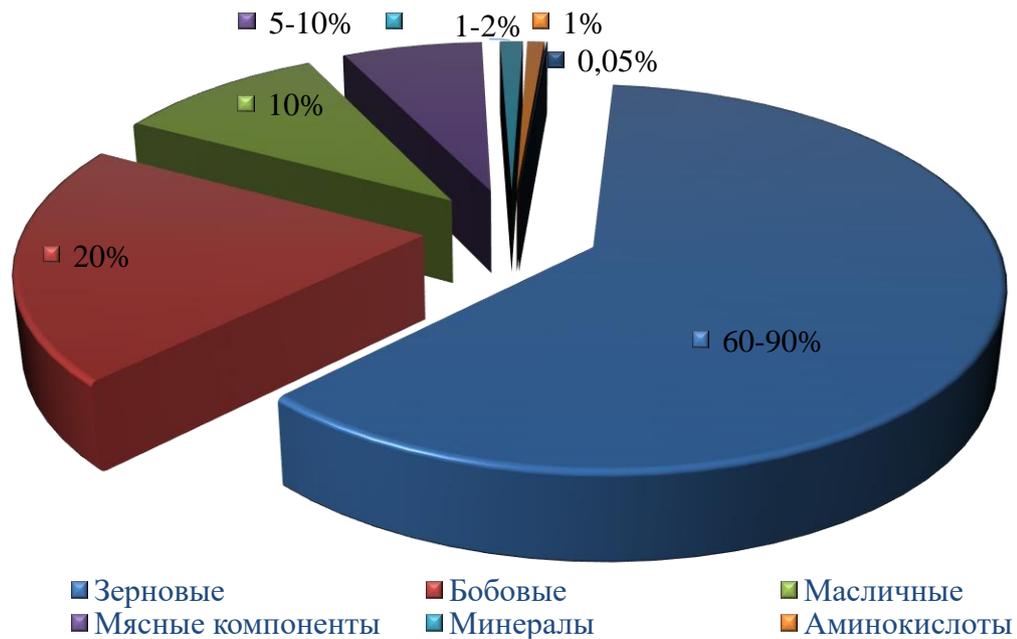


Рисунок 1 – Структура кормов, применяемых в процессе экструдирования

Зерновое сырьё в составе экструдата является его основным компонентом. Механические характеристики зернового сырья характеризуются модулем упругости и коэффициентом поперечной деформации, пределом прочности. Они непостоянны и изменчивы при различной влажности. Зерновая оболочка отличается своей прочностной характеристикой, а при взаимодействии с металлом в процессе экструдирования зерно выступает в качестве абразива, способного изнашивать шнек экструдера в процессе его работы.

Основные компоненты кормов также включают: углеводы, белки, жиры, витамины, минералы, воду и ферменты. Так, к примеру, химический состав пшеничных зёрен мягких сортов включает следующие элементы: белки (от 8% до 22%); углеводы (представлены крахмалом, сахарами, клетчаткой); жиры (порядка 2%); витамины (Н, Е, D, К, Р, В1, В2, В3, В6, В9 и каротин); минеральные вещества (калий, магний, кальций, хром, фосфор, железо, кремний, цинк, марганец, сера, кобальт, молибден, фтор, медь, селен, ванадий, йод) и ферменты.

Технологический процесс экструдирования включает в себя зоны экструдирования (загрузка, нагрев, дозирование и охлаждение) и процессы, происходящие в каждой зоне (рисунок 2).

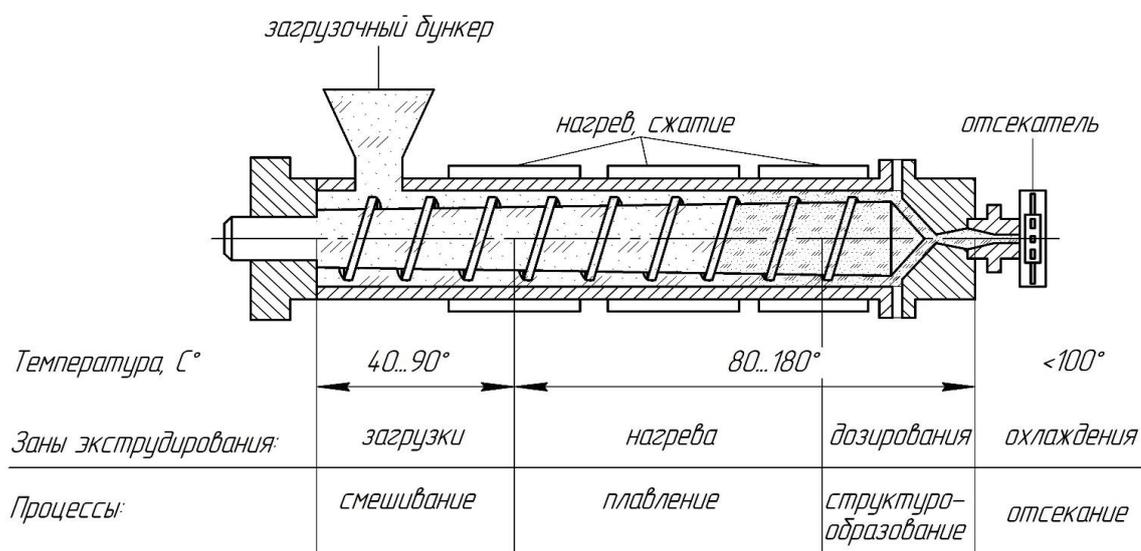


Рисунок 2 – Зоны и процессы экструдирования

Кормовое сырье поступает в загрузочный бункер и перемешивается шнеком экструдера, при этом температура в зоне смешивания составляет от 40 до 90 °С. Сырье транспортируется рабочей толкающей поверхностью шнека в зону плавления. Происходит нагрев перерабатываемого сырья до температуры 180 °С, повышается влажность кормосмесей (10-30%), возрастает давление прессования сырья (3-5 МПа), в результате чего происходит структурообразование сырья. Следом идет замедление химических реакций, снижение температуры перерабатываемого сырья и в зоне охлаждения происходит процесс отсекания готового продукта в виде жгута. Отсекание производят режущие элементы (ножи-отсекатели), которые закреплены рядом с матрицей.

Учитывая физико-механические параметры и химический состав перерабатываемого сырья, наличия источников абразива в виде твердых частиц зерна и других компонентов, а также условия работы главного рабочего органа экструдера - шнека, все это в совокупности, приводит к их коррозионно-механическому изнашиванию (рисунок 3).



Рисунок 3 – Коррозионно-механический износ шнека кормового экструдера

Коррозионно-механическое изнашивание рабочей поверхности шнеков чаще происходит в зоне дозирования из-за повышенной температуры, высокого давления и времени пребывания материала в этой зоне. Растительная масса, состоящая из зёрен и растительных волокон, под большим давлением и температурой постепенно стирает поверхностный слой рабочей поверхности шнека, вызывая увеличения зазора между шнеком и цилиндром. Так для нового шнека, диаметром 60 мм, расчетный зазор - 0,06 мм, тогда как у изношенного рабочий зазор становится 0,4 мм. Дальнейшая эксплуатация такого шнека приводит к некачественной переработке экстрагируемого сырья. Коррозионно-активную среду создают бобовые культуры, злаки и другие культуры. Химические реакции образуются при взаимодействии металла с влагой. Аммиак переходит в гидрат окиси аммония и вызывает щелочную реакцию.

Проведённый анализ частоты отказов экструдеров в сельскохозяйственных компаниях Москвы, Московской области, Нижегородской и Воронежской областей показывает, что наиболее распространённой причиной отказа экструдера является выход из работоспособного состояния шнека - 59% от общего числа отказов.

На долю России приходится 9% производства экструдеров для пищевой промышленности. Первое место по производству экструдеров занимает Китай – 18,6%, второе место - Италия – 17%, третье место Германия – 12%. Исходя из современных санкционных условий, в которых находится Российская Федерация, оригинальные запасные шнековые рабочие органы стали значительно дороже по стоимости, а на рынок все чаще поступают некачественные шнеки, не соответствующие необходимым физико-механическим параметрам. В связи с этим необходимо совершенствование технологии ремонта данного вида техники, в том числе разработки новых отечественных технологий, повышающих долговечность и увеличивающих ресурс работы их составляющих.

Наиболее перспективным методом упрочнения рабочей поверхности шнеков кормовых экструдеров является диффузионное борирование сверхвысокочастотным нагревом в обмазках. Данный способ позволяет получить износостойкие и коррозионностойкие покрытия при кратковременном сверхвысокочастотном нагреве и сохранении исходных свойств основы деталей.

Восстановлением и упрочнением деталей сельскохозяйственных машин методом борирования, процессов происходящих при диффузионном борировании посвящены исследования В.П. Лялякина, С.П. Казанцева, В.Ф. Аулова, В.В. Виноградова, Н.М. Мишустина и др. ученых. Однако, до настоящего времени, недостаточно исследован процесс диффузионного борирования при сверхвысокочастотном нагреве в обмазках на деталях сложной геометрической формы.

Исходя из вышеизложенного сформулированы требования к разрабатываемой технологии:

- получение упрочняющего покрытия с микротвёрдостью не менее 14000 МПа;
- получение упрочнённого слоя толщиной не более 4-9 мкм;

- покрытие должно обеспечивать увеличение износостойкости в 1,5...2 раза в сравнении с серийными деталями;

- технология должна обеспечивать нанесение покрытий на труднодоступные поверхности шнекового рабочего органа;

- уменьшение времени обработки;

- экономическая эффективность разрабатываемой технологии.

**Во второй главе** изложено теоретическое обоснование упрочнения рабочих органов экструдеров диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом.

Сформирована модель теоретических исследований и теоретические основы определяющих параметров физико-механических свойств шнековых рабочих органов (рисунок 4).

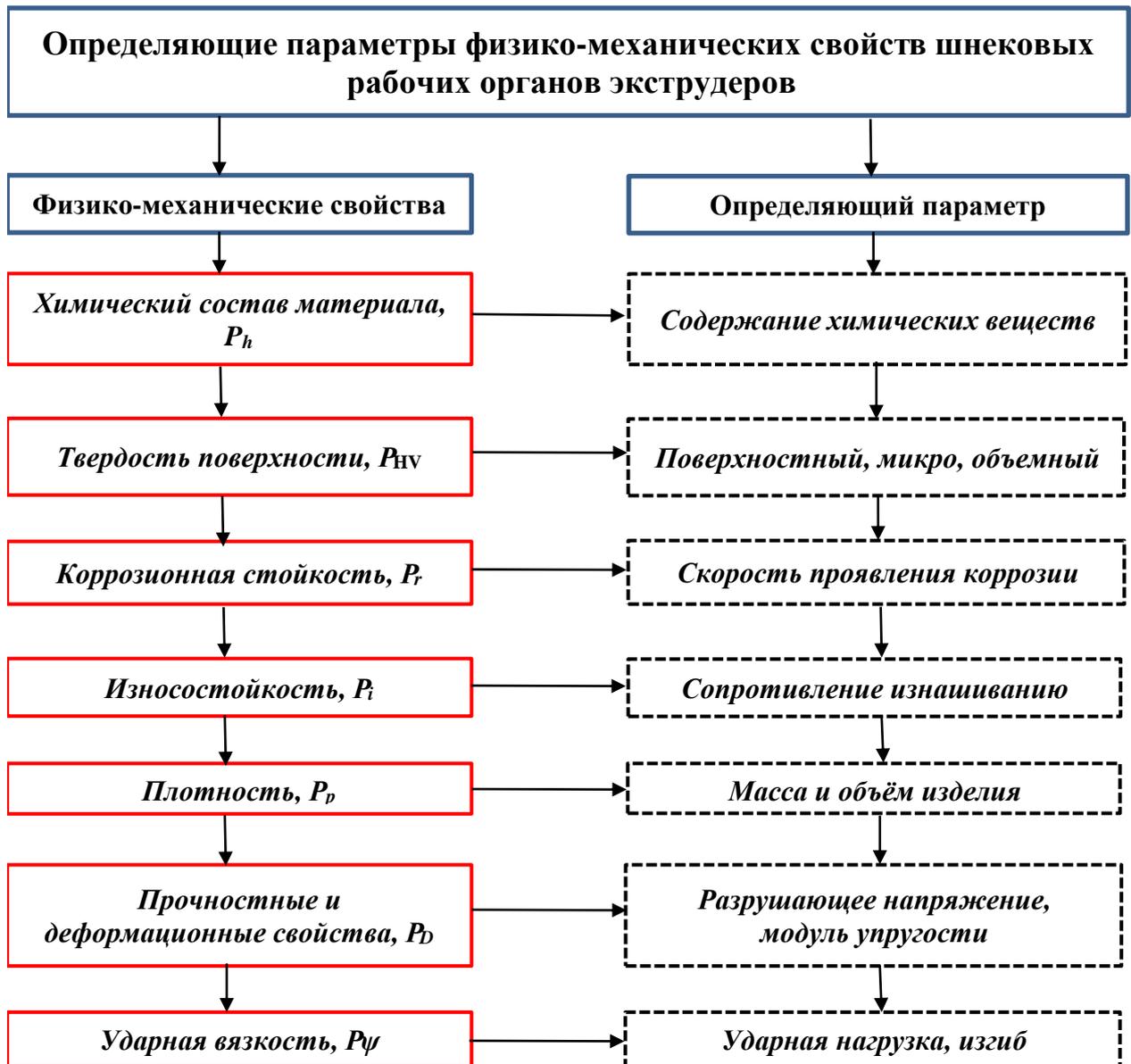


Рисунок 4 – Определяющие параметры физико-механических свойств шнековых рабочих органов экструдеров

Отсюда целевая функция соответствия физико-механическим свойствам будет иметь выражение:

$$P_f = f(P_h, P_{HV}, P_r, P_i, P_p, P_D, P_\psi) \rightarrow 1, \\ \text{при } Z_{\text{сум}} \rightarrow \text{optim}, \\ \Delta f \rightarrow \text{min.} \quad (1)$$

где  $P_h$  - соответствие химическому составу материала;  $P_{HV}$  - соответствие твердости поверхности;  $P_r$  - соответствие коррозионной стойкости;  $P_i$  - соответствие износостойкости;  $P_p$  - соответствие плотности,  $P_D$  - соответствие прочностным и деформационным свойствам;  $P_\psi$  - соответствие уровню ударной вязкости;  $Z_{\text{сум}}$  - суммарные затраты на изготовление шнековых рабочих органов, соответствующих физико-механическим параметрам;  $\Delta f$  – возникновение дефекта шнековых рабочих органов.

Целевая функция соответствия физико-механическим свойствам позволяет получить все необходимые параметры при изготовлении шнекового рабочего органа экструдера эталонного образца. При этом суммарные затраты на изготовление шнековых рабочих органов, соответствующих параметрам эталонного шнека, стремятся к оптимальным параметрам. Возникновение дефектов шнековых рабочих органов минимальны.

Для получения покрытий, применимых для упрочнения шнеков экструдеров, актуальным методом является нагрев борлируемой стали и насыщающей среды с использованием сверхвысокочастотного нагрева (СВЧ). Данный метод позволяет совмещать процессы диффузионного борирования из жидкой и твердой среды и переводить их в химическое взаимодействие между железом (Fe) и бором (B) на поверхности сталей.

Основным нововведением выбранного способа упрочнения является совмещение диффузионного борирования в обмазках с СВЧ-нагревом. Способ СВЧ нагрева отличается от остальных, более традиционных, тем, что получаемое тепло идет напрямую в объём материала и не растрчивается на нагрев окружающего газа, тем самым делая данный метод нагрева крайне энерго-эффективным.

Для описания процесса комбинирования диффузионного борирования в обмазках с СВЧ нагревом необходимы основные параметры опытной поверхности: электрическая проводимость, магнитная проницаемость и абсолютная диэлектрическая проницаемость. Комплексная диэлектрическая константа будет выражаться следующим уравнением:

$$\underline{\varepsilon}_{ges} = \varepsilon_0 \cdot [\varepsilon_r^| - j\varepsilon_r^{||}] = \varepsilon_0 \cdot \underline{\varepsilon}_r. \quad (2)$$

Постоянная проницательность выражается:

$$\underline{\mu}_{ges} = \mu_0 \cdot [\mu_r^| - j\mu_r^{||}] = \mu_0 \cdot \underline{\mu}_r, \quad (3)$$

где,  $\varepsilon_r^|$  - диэлектрическая проницаемость;  $\varepsilon_r^{||}$  - реактивная составляющая константы, состоящая из произведения коэффициента потерь ( $\tan \delta$ ) на диэлектрическую проницаемость ( $\varepsilon_r^|$ );  $\underline{\varepsilon}_{ges}$  - комплексная диэлектрическая константа;  $\underline{\mu}_{ges}$  - комплексная проницаемость;  $\varepsilon_0 = 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{\text{A}\cdot\text{s}}{\text{V}\cdot\text{m}}$  -

электрическая постоянная;  $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$  - магнитная постоянная;  $\varepsilon_r^{\perp}$  - диэлектрическая проницаемость;  $\mu_r^{\perp}$  - действительная часть магнитной проницаемости;  $\mu_r^{\parallel}$  - реактивная часть магнитной проницаемости;  $\underline{\varepsilon}_r$  - относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu_0$  - реактивная диэлектрическая проницаемость.

Учитывая данные параметры в частном диапазоне, получаем уравнения Гельмгольца:

$$\nabla^2 \underline{\vec{E}}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \underline{\vec{E}}(\vec{r}), \quad (4)$$

$$\nabla^2 \underline{\vec{H}}(\vec{r}) = \omega^2 \cdot \underline{\mu}_{ges} \cdot \underline{\varepsilon}_{ges} \cdot \underline{\vec{H}}(\vec{r}). \quad (5)$$

Передаваемая энергия электромагнитных волн выражается уравнением Максвелла и приводит к теореме Пойнтинга в частном диапазоне:

$$P_{ein} = \frac{1}{2} \int_F^1 [\underline{\vec{E}} \times \underline{\vec{H}}^*] \cdot \underline{\vec{n}}^0 dF = \frac{1}{2} \int_F^1 \underline{\vec{S}} \cdot \underline{\vec{n}}^0 dF. \quad (6)$$

Полученные уравнения подходят для нагрева однородного материала, тогда как при упрочнении шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках СВЧ-нагревом электромагнитное поле СВЧ-диапазона воздействует на материалы, имеющие различную диэлектрическую проницаемость. Возникающая при поглощении электромагнитной энергии СВЧ-диапазона объёмная мощность  $q_v$  определяется по формуле:

$$q_v = \begin{cases} \frac{P_{ir}}{\delta F(1-\varepsilon)}, & 0 \leq x \leq \delta; \\ 0, & x > \delta, \end{cases} \quad (7)$$

где  $P_{ir}$  - поглощаемая материалом мощность излучения при отсутствии отражений;  $\delta$  - глубина проникания электромагнитного излучения в материал;  $F$  - площадь сечения СВЧ-индуктора;  $\varepsilon$  - пористость слоя материала.

Для выбора оптимального режима СВЧ-нагрева необходимо поддерживать температуру нагрева по слоям упрочняемой поверхности шнека для возможности протекания процесса диффузионного борирования. Для определения распределения температуры по слоям рассматриваемой системы «металл – борсодержащая шихта» (рисунок 5) требуется провести расчёт значений теплоёмкости и теплопроводности, исходя из этого математическая модель будет иметь вид:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}T) + I_q, \quad (8)$$

где  $c$  - удельная теплоёмкость системы;  $\rho$  - средняя плотность системы;  $T$  - температура системы;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности системы;  $I_q = \frac{P}{V}$  - поглощение борсодержащей шихты;  $P$  - мощность СВЧ-излучения;  $V = \pi L(R_2^2 - R_1^2)$  - объём системы;  $L$  - длина обрабатываемого участка шнека;  $R_1$  - наружный радиус покрытия;  $R_2$  - внутренний радиус покрытия;  $R_3$  - внешний радиус шнека;  $T_c$  - температура системы;  $T_{\text{раб}}$  - температура обработки.

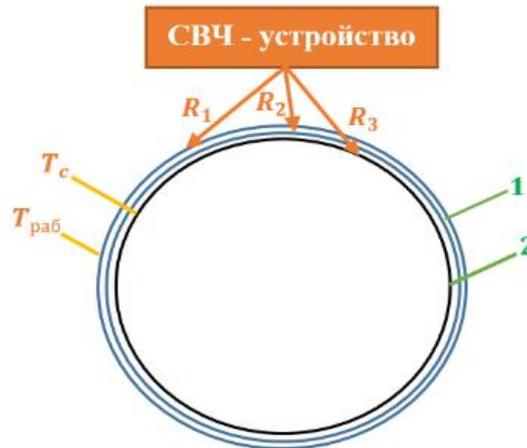


Рисунок 5 – система «металл – борсодержащая шихта»:  
1 - борсодержащая шихта; 2 – шнек.

Средняя плотность рассматриваемой системы характеризуется через выражение:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{V} (\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2), \quad (9)$$

где  $m$  – общая масса системы;  $\rho_{1,2}$  – плотности покрытия металла и борсодержащей шихты;  $v_i = \pi L (R_{i+1}^2 - R_i^2)$  – объем  $i$ -го слоя;  $i = 1, 2$ .

Отсюда следует, что характер изменения температуры в борсодержащем покрытии и на поверхности металла будет описываться следующими уравнениями

$$T(R_1 < r \leq R_2) = T_c + \frac{c_1}{\lambda_1} \ln \frac{r}{R_1}, \quad (10)$$

$$T(R_2 < r \leq R_3) = T_{\text{раб}} + \frac{c_1}{\lambda_2} \ln \frac{r}{R_3}. \quad (11)$$

Разработанная математическая модель позволяет утверждать, что протекание процесса диффузионного борирования возможно с использованием СВЧ-нагрева. Кроме этого, СВЧ-нагрев позволяет рассчитывать значения рабочих параметров системы, что обеспечивает более гибкий подход к подбору борсодержащих шихт и режимов работы.

Теоретически установлена возможность применения СВЧ-нагрева за короткие промежутки времени (от 15 с до 60 с), для нагрева поверхности стали до температуры 900-1000°C, а также улучшения равномерности покрытий. Это способствует фазовой и структурной гомогенизации за счет экзотермических реакций. Введение раскислителей во флюсы помогает защитить металл от окисления и убрать шлаки.

Для создания установки упрочнения шнеков экструдеров исследован процесс поступательного движения индукционного нагревателя и вращательного движения шнека. Для обеспечения данного процесса определены следующие параметры:

Вращающееся движение шнека:

угол поворота шнека по времени можно описать, как:

$$\theta(t) = \omega t. \quad (12)$$

линейная скорость поверхности шнека (где радиус шнека считается):

$$v_{\text{шнек}} = r \cdot \omega, \quad (13)$$

где  $\omega$  — угловая скорость шнека (рад/с),  $r$  — радиус шнека (м),  $t$  — время (с).

Поступательное движение индуктора:

положение индуктора во времени может быть описано, как:

$$d(t) = v_{\text{индуктор}} \cdot t, \quad (14)$$

где  $v_{\text{индуктор}}$  — скорость поступательного движения индуктора (м/с),  $d$  — расстояние, на которое индукция перемещается по оси (м).

Шнек экструдеров вращается, и, чтобы индукция корректно проходила по всем участкам шнека, её движение нужно согласовать с углом поворота шнека.

В зависимости от длины шнека  $L$  количество полных оборотов, необходимое для упрочнения рабочей поверхности индуктором за время  $t$  определяется:

$$N(t) = \frac{\theta(t)}{2\pi} = \frac{\omega t}{2\pi}. \quad (15)$$

Линейное расстояние, которое проходит шнек за это время, составит:

$$S_{\text{шнек}}(t) = N(t) \cdot C = \frac{\omega t}{2\pi} \cdot 2\pi r = \omega r t. \quad (16)$$

В этом уравнении  $S_{\text{шнек}}(t)$  представляет собой расстояние, которое шнек проходит по своей оси за время  $t$ .

Рассмотренные закономерности движения были использованы для создания управляющей программы разрабатываемой установки.

Чтобы индуктор корректно взаимодействовал с вращающимся шнеком, нужно чтобы линейное движение индуктора соответствовало расстоянию, пройденным шнеком, при этом можно установить, что:

$$v_{\text{индуктор}} = \omega r. \quad (17)$$

Разрабатываемая методика позволяет создавать улучшенные боридные покрытия, которые значительно повышают долговечность и эффективность работы металлических компонентов в экструдерах, что актуально для промышленного применения.

**В третьей главе** представлена программа и методики экспериментальных исследований.

На базе кафедры сопротивления материалов и деталей машин разработана экспериментальная установка (рисунок 6) для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках (Патент на изобретение RU №2820894).

Для управления установки разработана программа (рисунок 7), формирующая G-Code управления (патент ЭВМ №20224669388). В программу вводят технические параметры упрочняемых шнеков экструдера, формирующих G-Code, на основе которых автоматически рассчитывается скорость вращения четырёхосной поворотной оси установки, в которой закрепляется упрочняемый шнек и скорость линейного перемещения сверхвысокочастотного индукционного нагревателя.

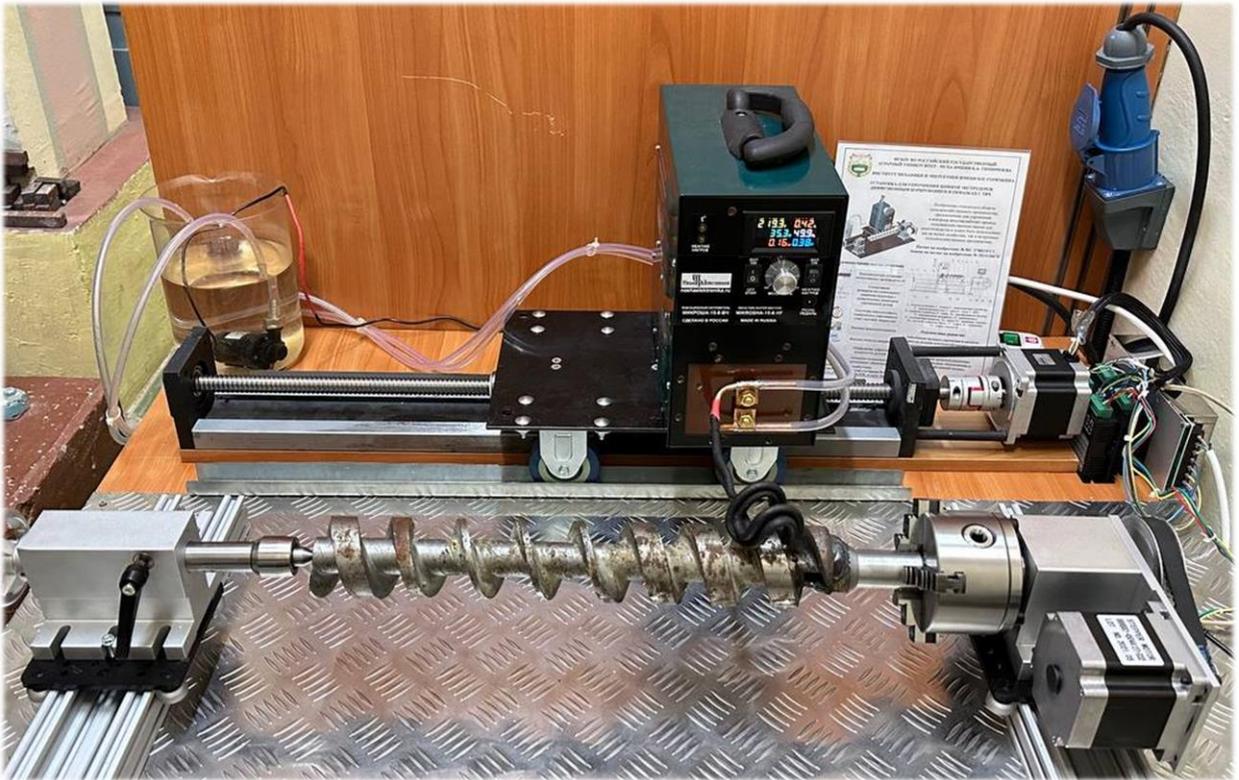


Рисунок 6 – Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках

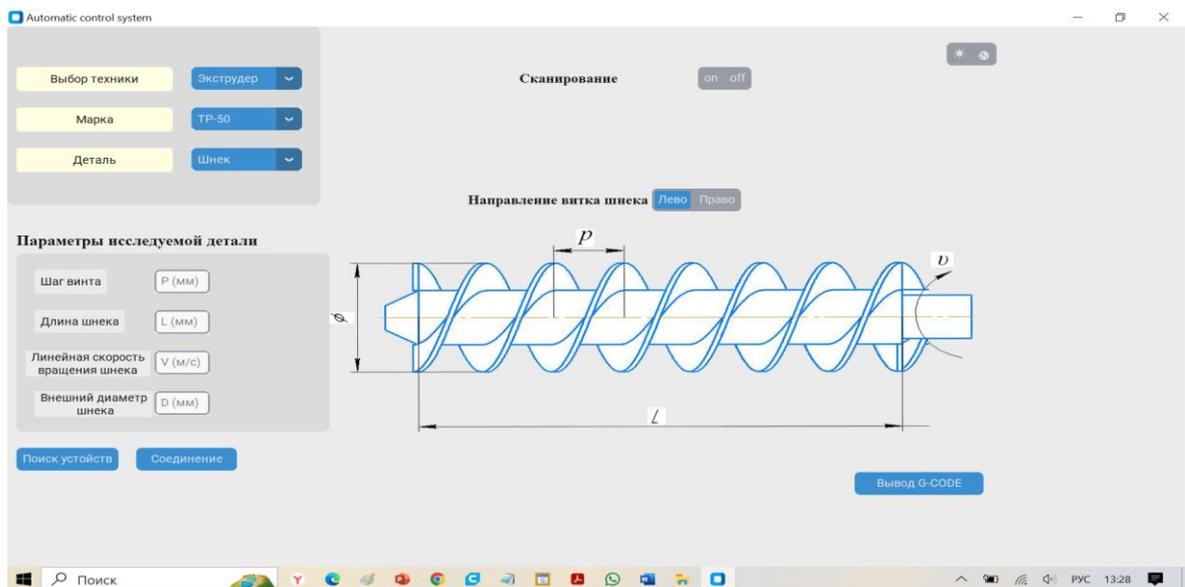


Рисунок 7 – Интерфейс программы формирующая G-Code управления

Определены факторы, влияющие на процесс упрочнения шнеков экструдеров разработанным устройством (рисунок 8).

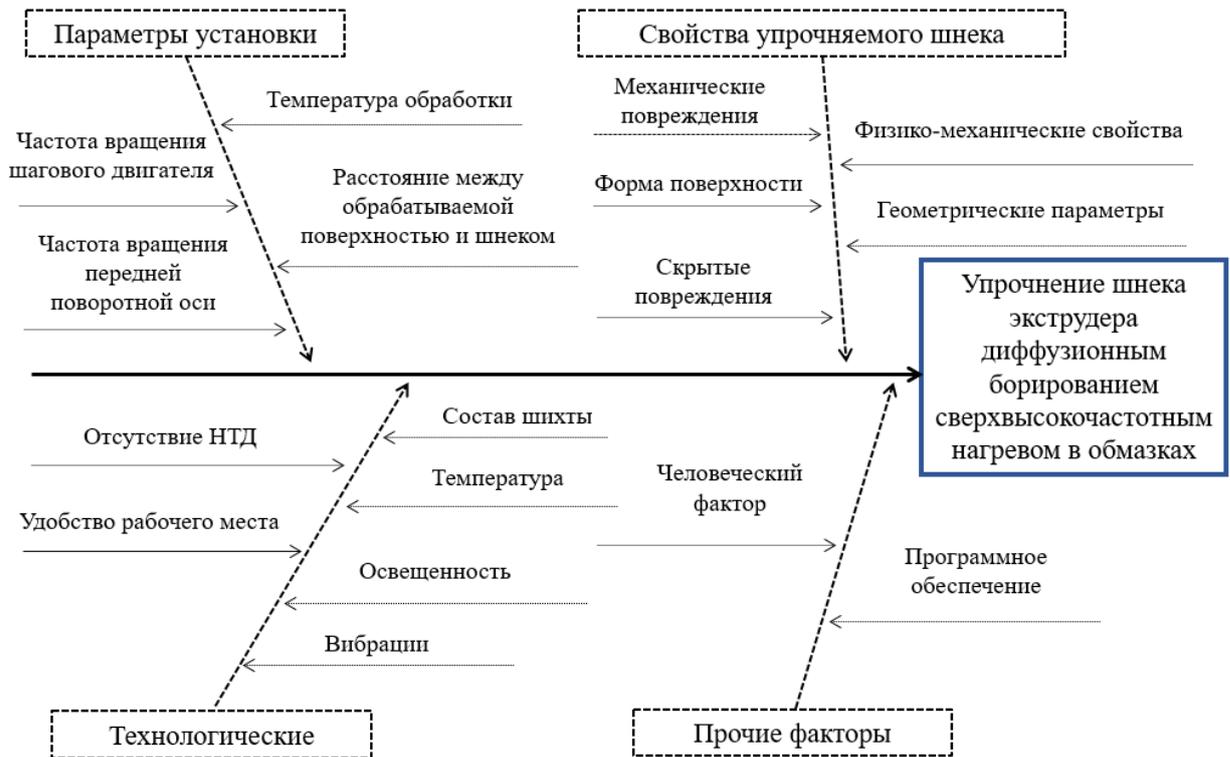


Рисунок 8 – Факторы, влияющие на процесс упрочнения шнеков экструдеров разработанной установкой

Наиболее значимыми факторами являются: состав шихты, физико-механические свойства металла, температурный режим нагрева, частота вращения и время обработки шнека.

Эксперимент проводился на экспериментальных заготовках сталей 12Х18Н, 12ХМФ, 45, 65Г. На поверхность экспериментальных образцов наносилась борированная шихта (рисунок 9), в составе которой использовались:  $V_4C$  – 89%, флюс «БУРА» – 5%,  $NH_4Cl$  – 6 %.



Рисунок 9 - Экспериментальные образцы с нанесённой шихтой

Измерение микротвердости покрытий проводили твердомере Виккерса Металаб 421 на котором испытания производятся способом вдавливания алмазного индентера пирамидальной формы с определенным испытательным усилием на поверхность образца для испытаний. Угол индентера при вершине  $136^\circ$ . Испытание производится под действием нагрузки 0,2Н и 1Н в течение 15 с. Определение размеров диагоналей отпечатка осуществлялось инвертированным металлографическим микроскопом.

Износостойкость образцов исследовали на машине трения СМЦ-2 в условиях граничной смазки согласно ГОСТу 23.203-79.

Для определения коррозионной стойкости опытные образцы испытывали в 10%-ных растворах концентрированных кислот: азотной, серной и щелочи (NaOH).

Образцы подвергались сверхвысокочастотному нагреву. Температурный режим регулировался преобразователем напряжения и составлял от 850 до 1250°C.

Контроль температурного режима рабочей поверхности шнека экструдера осуществлялся пирометром, максимальная температура измерения которого составляет 1500°C. Выдержка образцов под сверхвысокочастотным нагревом от 5 с. до 2,5 мин.

**В четвертой главе** представлены результаты экспериментальных исследований.

Установлено, что при нагреве шихты до температуры выше 1050 °C на всех образцах отмечается повышенная склонность к трещинообразованию. Перегрев приводит к отпуску стали, после чего требуется повторная закалка детали. Для исключения перегрева детали диапазон температуры борирования был принят в пределах от 900 до 1050 °C.

Установлена зависимость толщины боридного слоя от температуры насыщения, которая подчиняется экспоненциальному закону (рисунок 10). Для формирования боридного слоя толщиной 250 мкм в течение 125 секунд температура нагрева должна составлять 1050 °C.

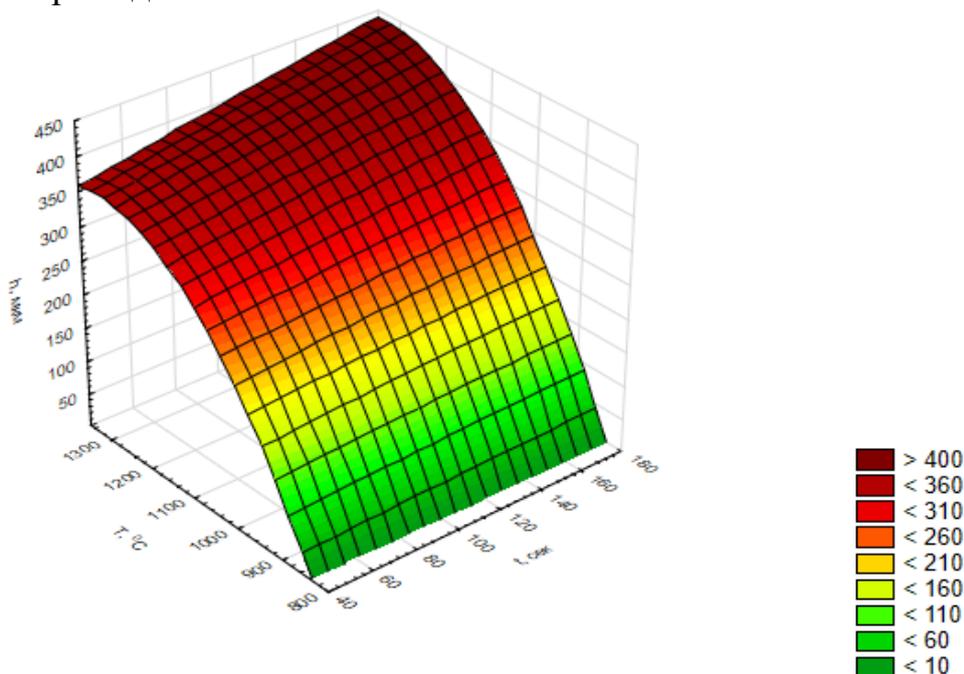


Рисунок 10 – Зависимость толщины боридного покрытия от времени выдержки и температуры сверхвысокочастотного нагрева

Получена математическая модель процесса диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом. Функция отклика зависимости толщины боридного покрытия от времени выдержки и температуры сверхвысокочастотного нагрева имеет вид:

$$h = -2488,1003 - 0,7005t + 4,3907T - 0,0004t^2 + 0,001tT - 0,0017T^2 \quad (18)$$

Установлен оптимальный режим сверхвысокочастотного борирования в обмазках: состав шихты:  $B_4C$  – 89%, флюс «БУРА» - 5%,  $NH_4Cl$  – 6 %, время нагрева 125 с., температура нагрева 1050°C. Полученный режим обеспечивает получение толщины боридного слоя 250 мкм.

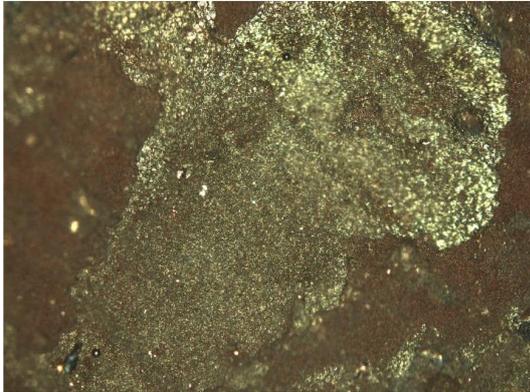


Рисунок 11 – Микроструктура боридного слоя на стали 65Г (x100)

На рисунке 11 представлена микроструктура боридного слоя на стали 65Г. Рентгеноспектральный анализ подтвердил образование однофазных боридных слоёв ( $Fe_2B$ ) при температуре 1050 °С.

На рисунке 12 показаны результаты измерения твердости сталей 65Г, 45, 12ХМФ, 12Х18Н до и после диффузионного борирования сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

Исходная твёрдость исследуемых сталей до сверхвысокочастотного нагрева и после практически остается неизменной, что будет обеспечивать несущую способность покрытия в условиях эксплуатации.

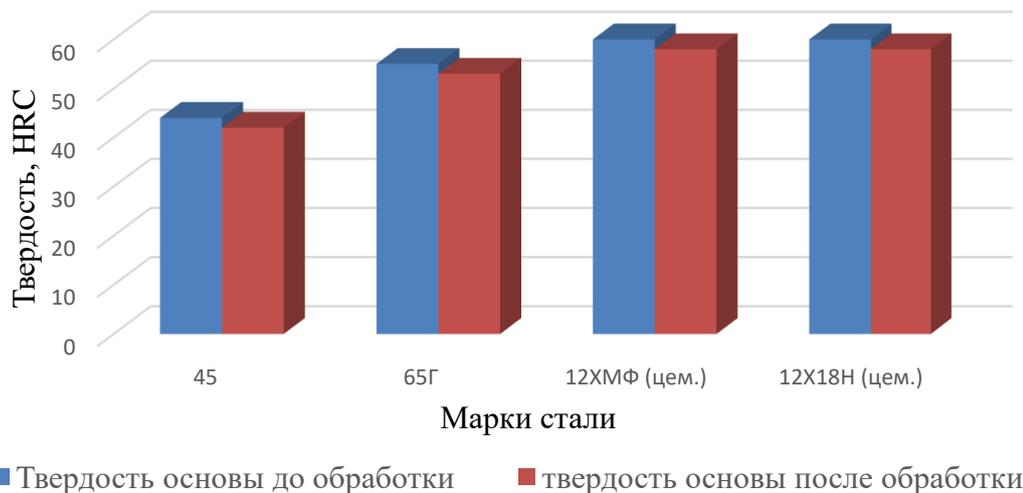


Рисунок 12 – Твёрдость стали до и после диффузионного борирования

Стабильный уровень твёрдости объясняется кратковременным температурным воздействием, в течение которого не происходил их отпуск. Это позволяет оставлять технологию завода-изготовителя шнеков экструдеров без изменений. Борирование выполняется как финишная операция.

Таким образом, доказана возможность образования боридного покрытия в условиях кратковременного сверхвысокочастотного нагрева при сохранении исходных свойств основы деталей. Это согласуется с теоретическими предпосылками, изложенными в главе 2 диссертационного исследования.

Результаты измерения микротвёрдости на сталях 65Г, 45, 12ХМФ, 12Х18Н показывают, что её уровень повышается при наличии легирующих элементов

(рисунок 13). Это объясняется образованием не только боридов железа, но и боридов хрома, молибдена и никеля.

Борирование наплавленного слоя на полученном оптимальном режиме позволяет получить покрытие твердостью 14800 МПа.

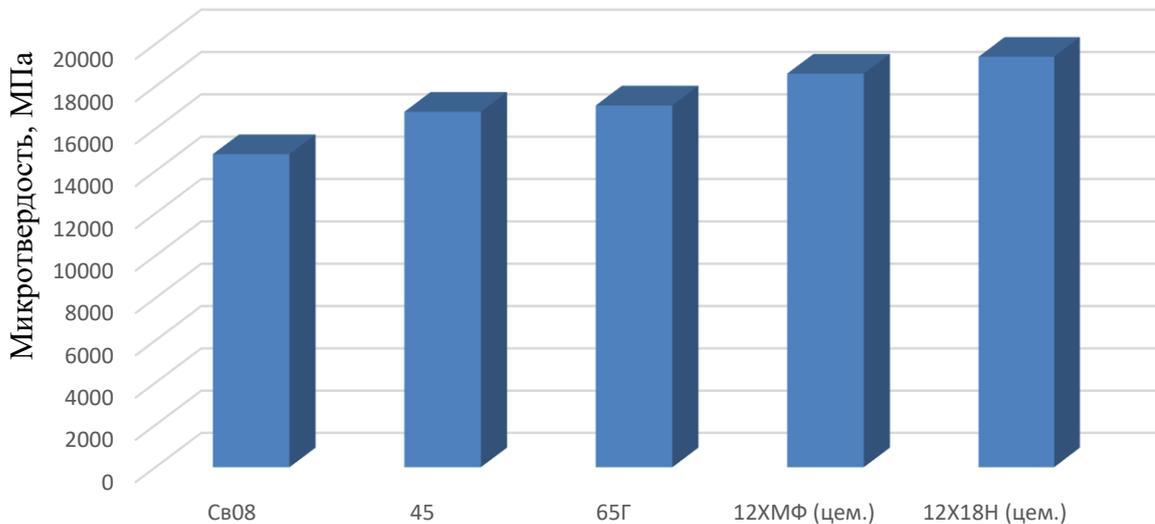


Рисунок 13 – Измерение микротвёрдости боридных покрытий на исследуемых образцах

Испытания на машине трения опытных образцов из сталей 65Г и 12Х18Н (цементация), подвергнутых борированию, показали увеличение износостойкости в 2...2,5 раза в сравнении с серийными (рисунок 14).

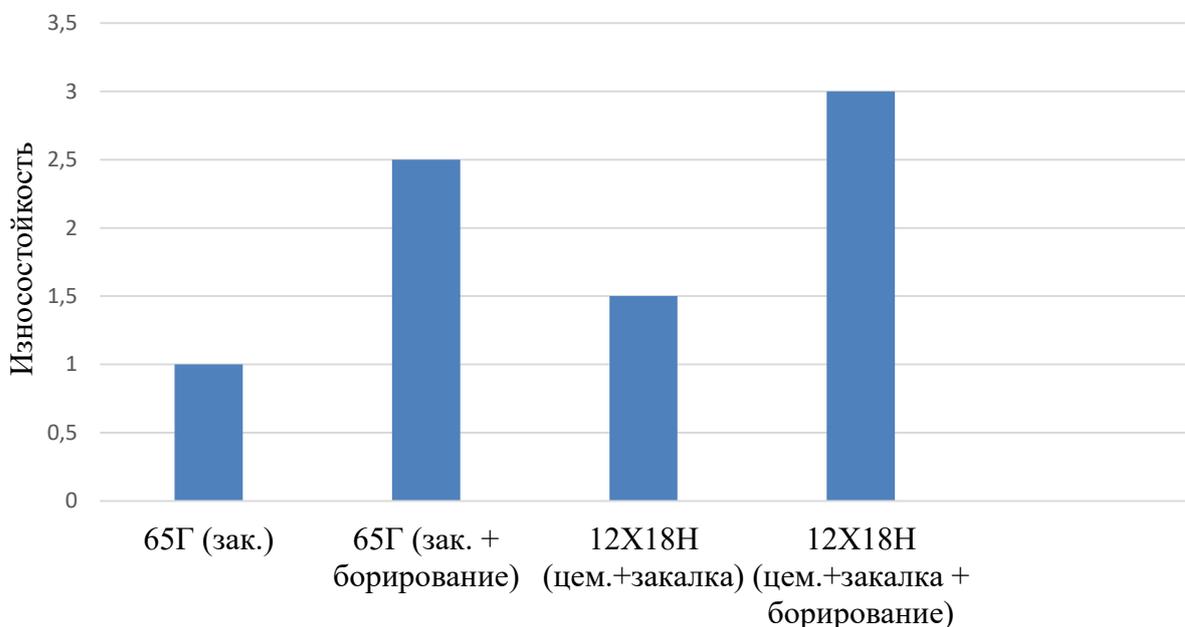


Рисунок 14 – Сравнительный анализ относительной износостойкости исследуемых образцов

Сравнительные испытания коррозионной стойкости образцов были проведены на сталях 65Г, 45. На сталь 45 было нанесено упрочнённое покрытие диффузионным борированием в обмазках сверхвысокочастотным нагревом при

температуре 1050 °С при времени выдержки 125 с. Испытания проводили в 10 % растворах  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и  $\text{NaOH}$  в течение 100 ч.

Таким образом, диффузионное борирование приводит к повышению коррозионной стойкости образцов в различных средах в 1,7...2 раза, что позволяет рекомендовать боридные покрытия для восстановления и упрочнения деталей оборудования в процессах механизации животноводства.

Для обеспечения оптимального времени борирования (125 с) необходимо, при создании программы управления установкой, согласовать скорости вращательного движения шнека и поступательного движения индуктора. На рисунке 15 показано влияние времени процесса и температуры нагрева на угловую скорость вращения шнека экструдера.

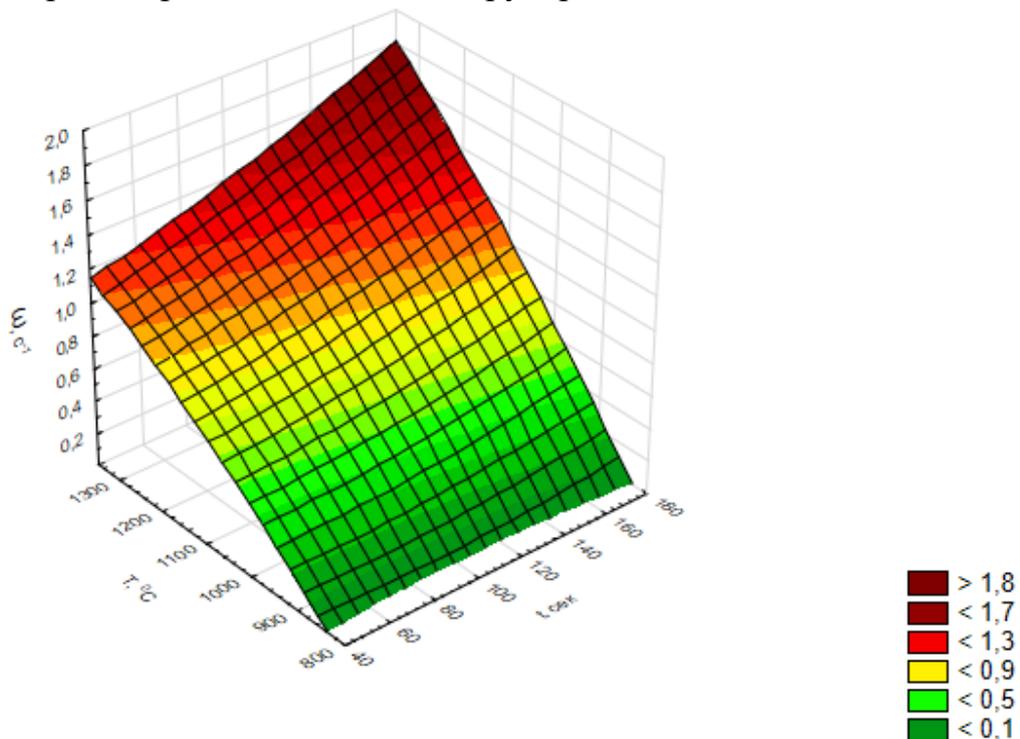


Рисунок 15 – Зависимость необходимой угловой скорости вращения шнека для образования боридного покрытия

Определена скорость движения индуктора 0,2 м/мин, угловая скорость вращения шнека  $0,8 \text{ с}^{-1}$ .

Эксплуатационные испытания шнеков экструдеров упрочненных диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках проводились на базе предприятия СПК «Путь к Новой Жизни». На базе предприятия используется 6 экструдеров ES-110.

За наблюдаемый период с февраля 2024 года по сентябрь 2024 года отказов экспериментальных шнеков не наблюдалось.

Выполненные исследования позволили разработать структурную схему новой технологии упрочнения шнеков экструдеров (рисунок 16).

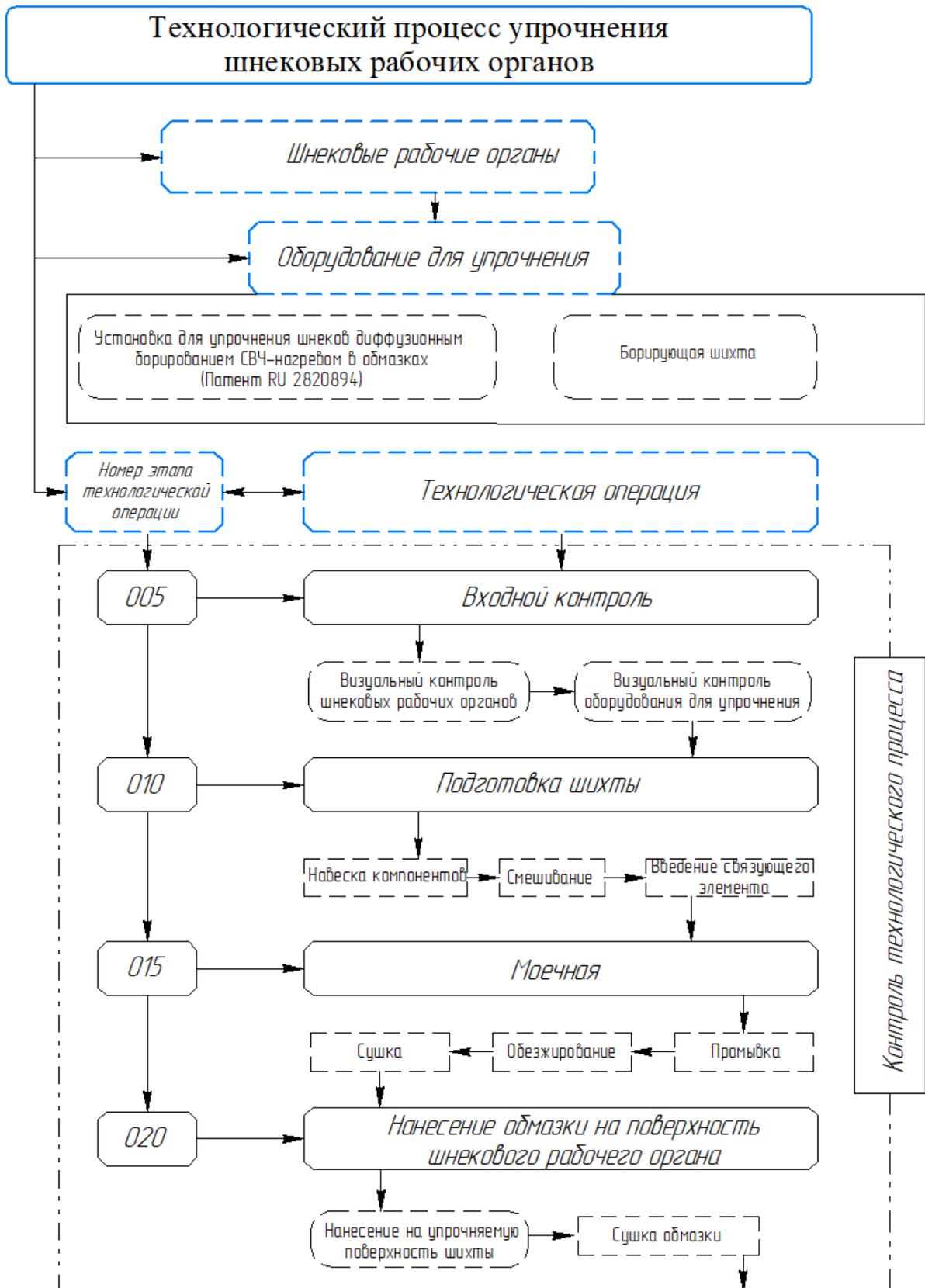
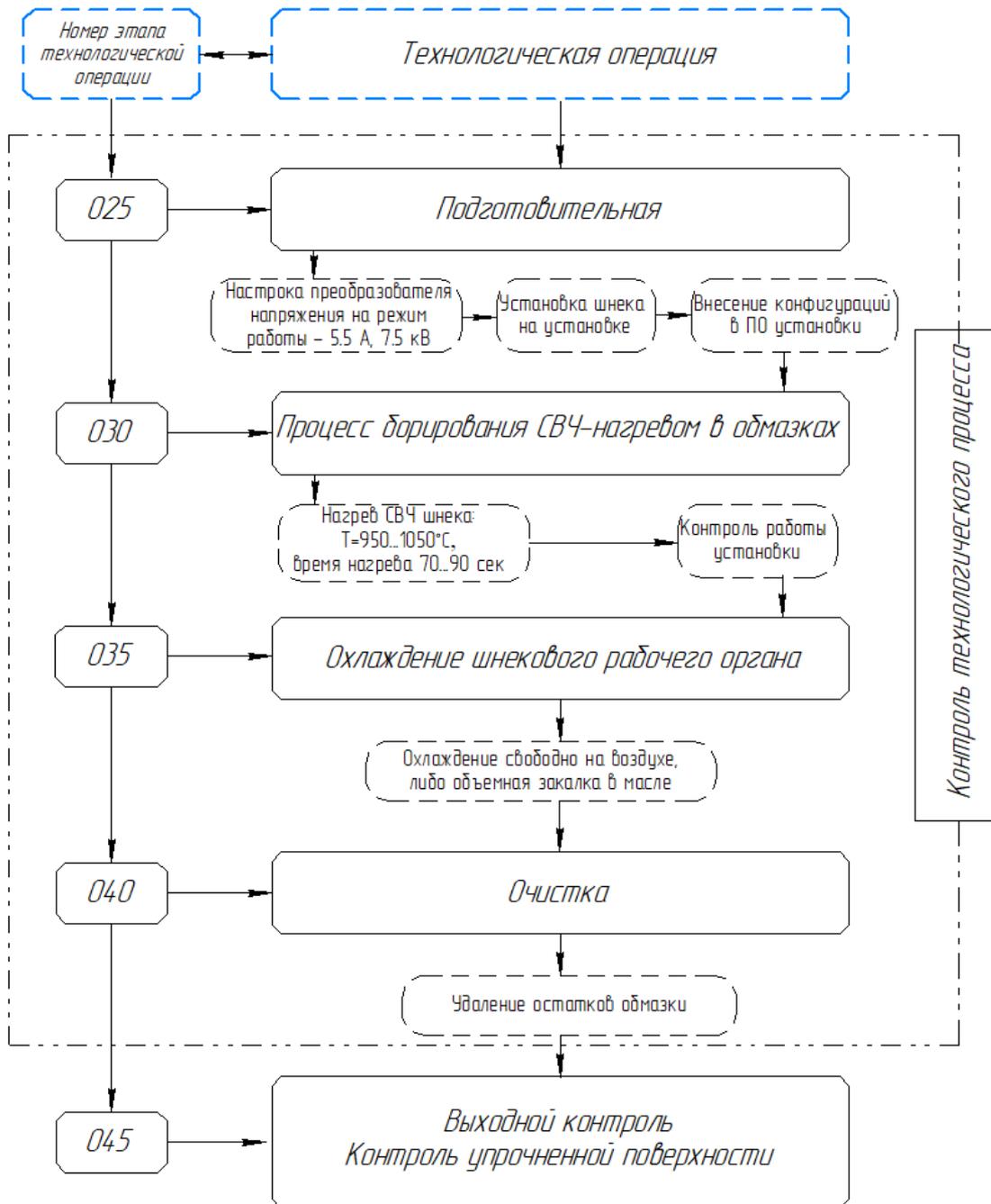


Рисунок 16 – Структурная схема технологического процесса борирования сверхвысокочастотным нагревом в обмазках



Продолжение рисунка 16 - Структурная схема технологического процесса борирования сверхвысокочастотным нагревом в обмазках

Для восстановления изношенных шнеков экструдеров в структурной схеме рекомендуется ввести дополнительную операцию, на подготовительном этапе, в виде вибродуговой наплавки рабочей поверхности шнека экструдера с использованием сварочной проволоки Св08. После наплавки производится механическая обработка до номинальных размеров с финишным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках. Наплавка производится на разработанной нами установке. Для этого требуется перенастройка согласования вращательного движения шнека, поступательного движения сварочной головки и скорости подачи проволоки.

**В пятой главе** приведены результаты расчета экономического эффекта от внедрения разработанной технологии.

Экономический эффект от использования разработанных рекомендаций по восстановлению и упрочнению шнеков экструдеров ES-110 составляет 2525000 руб. в год при заданной программе ремонта - 1984 шнека в год.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Шнеки экструдеров в кормопроизводстве АПК работают в условиях коррозионно-механического изнашивания. Рабочий процесс экструзии кормосмесей протекает при давлении прессования 2,0...5,0 МПа, температуре нагрева до 180°C, влажности 10...30%. Перспективным методом упрочнения шнеков экструдеров является диффузионное борирование сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

2. Теоретически доказана возможность протекания процесса борирования в условиях сверхвысокочастотного нагрева поверхности стальных деталей.

3. Решен вопрос синхронизации поступательного движения индуктора с вращательным движением шнека экструдера с целью обеспечения качества получаемых покрытий.

4. Разработана новая установка, позволяющая упрочнять шнековые рабочие органы экструдеров диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

5. Оптимальный режим сверхвысокочастотного борирования в обмазках: состав шихты:  $V_4C$  – 89%, флюс «БУРА» - 5%,  $NH_4Cl$  – 6 %, время нагрева 125 с., температура нагрева 1050°C, скорость движения индуктора 0,2 м/мин, угловая скорость вращения шнека  $0,8\text{ с}^{-1}$ .

6. Получены покрытия толщиной 250 мкм на основе боридов железа  $Fe_2B$  и  $FeB$ . Микротвердость покрытия на уровне 14800 МПа обеспечила повышение износостойкости упрочненных образцов из сталей 65Г и 12Х18Н (цементация) в 2...2,5 раза в сравнении с серийными. Покрытия увеличивают коррозионную стойкость деталей в 1,7...2 раза.

7. Разработана новая технология упрочнения шнеков экструдеров кормов диффузионным борированием сверхвысокочастотным нагревом в обмазках.

8. Технология принята внедрению в СПК «Путь к Новой Жизни» Нижегородской области. Годовой экономический эффект на программу в 1984 шнеков составит 2,5 млн. руб.

### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных перечнем ВАК Российской Федерации:

1. **Басов, С.С.** Обоснование выбора метода упрочнения шнеков кормовых экструдеров / С.С. Басов // Естественные и технические науки. – 2024. – № 4(191). – С. 288-294. – DOI 10.25633/ETN.2024.04.06. – EDN SZRHBY.

2. **Басов, С.С.** Условия эксплуатации шнеков экструдеров в кормопроизводстве для животноводства / Д.М. Скороходов, А.Н. Скороходова, С.С. Басов // Агроинженерия. – 2024. – Т. 26, № 4. – С. 19-26. – DOI 10.26897/2687-1149-2024-4-19-26. – EDN FTWEAY.

3. **Басов, С.С.** Исследование микротвердости боридных покрытий, полученных на стали 65Г из различных составов борлирующих смесей / Д.М. Скороходов, С.С. Басов, В.А. Денисов, А.С. Свиридов // Технический сервис машин. – 2021. – № 2(143). – С. 144-150. – DOI 10.22314/2618-8287-2021-59-2-144-150. – EDN DEJMUUF.

#### **Научные статьи, материалы конференций, тезисы докладов:**

4. **Басов, С.С.** Устройство для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках в ТВЧ / С.С. Басов // Реинжиниринг и цифровая трансформация эксплуатации транспортно-технологических машин и робототехнических комплексов : Сборник статей Московской международной межвузовской научно-технической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (г. Москва, 19-20 декабря 2023 г.), посвященной 100-летию со дня рождения ветерана Великой Отечественной Войны, заслуженного деятеля науки и техники, заслуженного изобретателя РФ, д.т.н., профессора Николая Федоровича Тельнова, Москва, 19–20 декабря 2023 года. – Москва: Российский государственный аграрный университет - Московская сельскохозяйственная академия им. К.А. Тимирязева, 2024. – С. 219-223.

5. **Басов, С.С.** Анализ видов износа и методов упрочнения шнеков кормовых экструдеров / С.С. Басов // Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов : сборник научных статей 4-й Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика А.А. Байкова, Курск, 15 сентября 2023 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2023. – С. 42-46.

6. **Басов, С.С.** Применение борирования в твердой фазе для упрочнения рабочих органов экструдеров / С.С. Басов, Д.М. Скороходов, И.Ю. Игнаткин, Н.В. Серов // Современное перспективное развитие науки, техники и технологий : сборник научных статей Международной научно-технической конференции, Воронеж, 12 октября 2023 года. – Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2023. – С. 74-77. – DOI 10.47581/2023.ТМ-03.Basov-01.

7. **Басов, С.С.** Метод борирования с нагревом ТВЧ для упрочнения режущих элементов почвообрабатывающих машин / Д. М. Скороходов, С.С. Басов // Доклады ТСХА, Москва, 03–05 декабря 2019 года. Том Выпуск 292, Часть I. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. – С. 623-625.

8. **Басов, С.С.** Борирование с использованием ТВЧ нагрева / С.С. Басов // Сборник студенческих научных работ : по материалам докладов, 72-й Международной студенческой научно-практической конференции, посвященной 145-летию со дня рождения А.Г. Дояренко, Москва, 26–29 марта 2019 года. Том Выпуск 26. – Москва: Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2019. – С. 18-20.

#### **Патенты, свидетельства о регистрации баз данных и ПЭВП:**

9. Патент на изобретение № 2820894 С1. Установка для упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом токами высокой частоты. Российская Федерация, МПК С23С 8/70 / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, С.В. Золотарев, Д.М. Скороходов, С.С. Басов, И.Ю. Игнаткин, О.М. Мельников, Н.В. Серов, А.Е. Павлов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева». – № 2023126676: заявл. 18.10.2023; опубл. 11.06.2024. Бюл. № 17. – 8 с.

10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024669388 «Программа формирования G-Code для управления установкой упрочнения шнеков экструдеров диффузионным борированием в обмазках нагревом ТВЧ». Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет - МСХА имени К.А. Тимирязева» Авторы: Скороходов Д.М., Ерохин М.Н., Павлов Я.Д., Карпов В.И., Казанцев С.П., Игнаткин И.Ю., **Басов С.С.** Заявка № 2024667715. Дата поступления 31 июля 2024 г. Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 16 августа 2024 г. Бюл. № 8.