

На правах рукописи



Буйлов Валерий Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ ПУТЕМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ
И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ НАПЛАВКОЙ
И БОРИРОВАНИЕМ**

**Специальность 4.3.1 – Технологии, машины и оборудование
для агропромышленного комплекса**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Саратов 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова».

Научный консультант **Рудик Феликс Яковлевич**, доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова»

Официальные оппоненты: **Лялякин Валентин Павлович**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ»

Гапич Дмитрий Сергеевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электроснабжение и энергетические системы», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет»

Кисель Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры общетехнических дисциплин и физики ФГБОУ ВО «Брянский государственный инженерно-технологический университет»

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Защита состоится «__» _____ 2024 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета 35.2.035.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н.И. Вавилова» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и инженерии имени Н. И. Вавилова» и на сайте: <http://www.vavilovsar.ru/>.

Отзывы на автореферат направлять по адресу: 410012, г. Саратов, пр. им. Петра Столыпина, 1, ученому секретарю диссертационного совета 35.2.035.03, e-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

**Ученый секретарь
диссертационного совета**

Василий Васильевич Чекмарёв

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие сельского хозяйства Российской Федерации на современном этапе определяют следующие основные документы: «Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2025 годы» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 14 июня 2012 года № 717 в редакции постановления Правительства Российской Федерации от 18 марта 2021 года № 415), «Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации» (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 21 января 2020 г. № 20) и «Стратегия развития сельскохозяйственного машиностроения России на период до 2030 года» (утверждена постановлением Правительства Российской Федерации от 7 июля 2017 года № 1455-р). В этих документах поставлены задачи развития научного и инновационного потенциала, технической и технологической модернизации производственной базы агропромышленного комплекса с целью снижения зависимости от импорта технологий, машин и оборудования.

Обеспечение продовольственной безопасности страны и наращивание экспортного потенциала сельскохозяйственной отрасли возможны при условии насыщения агропромышленного комплекса Российской Федерации не только необходимой, но и надежной техникой. Однако чем больше и разнообразнее парк машин и техники, тем дороже для сельхозтоваропроизводителя будут их техническая эксплуатация и обеспечение запасными частями.

Возрастающая интенсивность эксплуатации парка техники в аграрных хозяйствах повышает скорость изнашивания ее ресурсопределяющих деталей, что обуславливает снижение количественных показателей долговечности техники.

Мобильные машины в сельскохозяйственной отрасли применяют с различной прицепной и навесной техникой (плугами, культиваторами, сеялками и др.). Почвообрабатывающие операции при возделывании, например, зерновых культур составляют более 40 % общего объема работ. Долговечность эксплуатации прицепной и навесной техники определяется ресурсом их рабочих органов, который находится в пределах 150–1800 мото-ч. Наименьшая долговечность (150–350 мото-ч) наблюдается у рабочих органов культиваторов, стерневых сеялок и плугов. Следовательно, сельскохозяйственная техника больше времени будет простаивать в период полевых работ из-за замены изношенных рабочих органов. При этом потребность сельскохозяйственной отрасли в таких изделиях измеряется несколькими миллионами единиц. В связи с этим повышение долговечности этой техники путем увеличения ресурса восстановленных рабочих органов позволит снизить потери рабочего времени.

Величина износа рабочих органов сельскохозяйственной техники достигает нескольких миллиметров. Однако вышедшие из строя детали обладают необходимым запасом прочности и достаточными размерами, позволяющими восстанавливать их работоспособное состояние.

Основным сдерживающим фактором увеличения доли деталей, восстановленных по существующим технологиям, является их недостаточная долговечность, повышение которой может быть достигнуто путем разработки и применения новых эффективных технологий, позволяющих довести их послеремонтный ресурс до ресурса новых и даже превзойти его. Поэтому разработка инновационных технологий восстановления ресурсоопределяющих деталей актуальна.

Перспективными способами восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники являются наплавка в жидких теплоносителях и электролизное борирование.

На этом основании в диссертационной работе была поставлена научная проблема, решение которой заключалось в теоретическом прогнозировании долговечности восстановленных и упрочненных рабочих органов, а также в разработке и внедрении в производство новых технологий восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники наплавкой и борированием.

Актуальность проведения научно-исследовательских работ в направлении совершенствования и разработки технологий восстановления деталей обусловлена снижением затрат на запасные части в общих расходах на ремонт машин. При этом существует научно-техническая возможность довести их послеремонтный ресурс до ресурса новых и даже превзойти его. Это позволит повысить обеспеченность техникой сельскохозяйственное производство.

Актуальность работы подтверждена тем, что она была выполнена в соответствии с основными положениями Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2021 годы» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 21 мая 2013 г. № 426); «Федеральной научно-технической программы развития сельского хозяйства на 2017–2025 годы» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 25 августа 2017 г. № 996); Государственной программы Российской Федерации «Научно-технологическое развитие Российской Федерации» (утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 29 марта 2019 г. № 377); Государственной программы Саратовской области «Развитие сельского хозяйства и регулирование рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия в Саратовской области» № 750-П в редакции от 06.07.2020; Приоритетного научного направления ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова» «Модернизация инженерно-технического обеспечения АПК» (рег. № 01201151795).

Степень работанности темы. Основной причиной выхода из строя машин и техники является износ их основных деталей, что подтверждается выявленными закономерностями процессов трения и изнашивания деталей машин, которым посвящены научные работы следующих ученых: Ю. Н. Артемьева, М. А. Бабичева, В. А. Белого, Н. А. Буше, И. Н. Величкина, Ю. В. Волкова, М. А. Григорьева, В. И. Казарцева, В. Н. Кашеева, И. Р. Клейса, С. П. Козырева, Б. И. Костецкого, И. В. Крагельского, Р. В. Кугеля, Л. С. Лившица, И. А. Мишина, Г. А. Никитина, И. В. Петрова, А. С. Проникова, А. Ш. Рабиновича, М. М. Севернева, А. И. Селиванова, М. М. Тененбаума, В. Н. Ткачева, К. В. Фролова, М. М. Хрущева и др. Анализ работ этих исследователей показывает, что основным видом изнашивания деталей сельскохозяйственной техники является абразивный.

Процессы восстановления работоспособности и повышения долговечности деталей, как правило, включают в себя операции нанесения слоя материала на изношенные поверхности с целью получения их номинальных или ремонтных размеров. Эти вопросы освещены в научных трудах таких известных ученых, как Б. М. Аскинази, Г. Г. Баловнев, В. В. Березников, С. А. Богатырев, Ф. Х. Бурмукулов, Д. Г. Вадивасов, С. А. Величко, Е. Л. Воловик, И. С. Вороницын, Д. С. Гапич, В. А. Деев, Л. В. Дехтеринский, В. В. Ефремов, Б. П. Загородских, А. И. Иванов, В. И. Казарцев, В. А. Какуевичкий, Ю. А. Конкин, К. Т. Кошкин, В. С. Крамаров, Ю. Е. Кисель, В. М. Кряжков, И. С. Левитский, Л. Г. Лившиц, И. И. Луневский, В. П. Лялякин, М. А. Масино, Г. Д. Межецкий, И. А. Мишин, С. С. Некрасов, В. А. Наливкин, Ю. Д. Пашин, Ю. Н. Петров, А. В. Поляченко, Ф. Я. Рудик, А. И. Селиванов, П. В. Сенин, Н. Ф. Тельнов, И. Е. Ульман, В. И. Цыпцын, С. С. Черепанов, М. И. Черновол, В. И. Черноиванов, В. А. Шадричев, Г. П. Шаронов и др.

В своем большинстве разработки были направлены на использование технологий восстановления деталей со сравнительно небольшой величиной износа и сохраненной геометрической формой. При этом обеспечивался 80%-й ресурс. Восстановление с применением таких технологических процессов рабочих поверхностей почвообрабатывающих органов, эксплуатируемых в жестких условиях абразивного изнашивания, при котором величина износа режущих зон детали превышает десятки миллиметров, что приводит к изменению ее формы, не представляется возможным. Потребителя не может удовлетворить низкая износостойкость и, соответственно, небольшой ресурс восстановленной детали. Данные обстоятельства являются основной мотивацией разработки научно-производственных направлений восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники с прогнозируемым и управляемым ресурсом.

Цель работы – повышение ресурса почвообрабатывающей сельскохозяйственной техники путем разработки и применения эффективных инновационных технологий и технических средств восстановления и упрочне-

ния рабочих органов наплавкой в жидком теплоносителе и электролизным борированием.

Задачи исследования:

1. Провести анализ литературных источников для установления факторов, влияющих на ресурс рабочих органов почвообрабатывающей техники, технологий их восстановления и упрочнения, конструкций термического оборудования для наплавки и упрочнения, применяемых технологических материалов.

2. Предложить теоретический метод вариативного прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники. Теоретически обосновать, исследовать и разработать оптимальный состав теплоносителя для наплавки и электролизного борирования рабочих органов почвообрабатывающей техники, обеспечивающий повышенные показатели износостойкости и ресурса восстановленных деталей.

3. Разработать и исследовать теоретические модели оптимальных способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники наплавкой в жидком теплоносителе и электролизным борированием.

4. Обосновать конструктивные особенности печи-ванны для реализации предложенных технологий, разработать и экспериментально исследовать опытно-конструкторскую установку и определить ее технические характеристики.

5. Исследовать физико-механические свойства, химический и фазовый составы упрочненных поверхностей.

6. Провести лабораторные испытания на износ упрочненных образцов и сравнительные ресурсные испытания восстановленных рабочих органов почвообрабатывающей техники в реальных условиях эксплуатации.

7. Разработать технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники наплавкой в жидких теплоносителях и электролизным борированием и определить технико-экономическую эффективность результатов работы.

Объект исследования – процессы восстановления и упрочнения изношенных рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Предмет исследования – закономерности изменения фазового состава материала, механических и эксплуатационных свойств восстанавливаемых и упрочняемых поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники в зависимости от восстановительных материалов, способов и технологических режимов их нанесения.

Научную новизну работы представляют:

- теоретическая модель определения величин прогнозируемого ресурса при использовании различных технологий упрочнения и восстановления изнашиваемых поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- химико-физическое обоснование состава электролита для электролизного борирования поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- теоретическая модель диффузионно-кинетических процессов в расплаве электролита для определения технологических режимов электролизного борирования упрочняемых поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- теоретические модели тепломассообменных процессов в рабочем пространстве электродной печи-ванны для установления кинетики конвекции расплава теплоносителя при ее конструировании, определения технологических режимов электролизного борирования и наплавки восстанавливаемых и упрочняемых поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- теоретическая модель диффузионных процессов электролизного борирования поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- новые способы и особенности технологических процессов восстановления и упрочнения, а также оборудование и материалы для осуществления этих технологий обработки (авторское свидетельство № 1688981, патенты № 2107601, № 2114184, № 2139356, № 2164963, № 2325256, № 2241586, № 2392102, № 2572116);

- результаты исследования структуры, физико-механических и эксплуатационных свойств наплавленных и борированных покрытий при восстановлении и упрочнении рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается:

- 1) в физико-химическом обосновании и разработке состава электролита для электролизного борирования стальных поверхностей;

- 2) в разработке математических моделей определения:

- величин прогнозируемого ресурса восстановленных деталей при вариативном использовании различных технологий упрочнения и восстановления их рабочих поверхностей;

- диффузионно-кинетических процессов в расплаве электролита и насыщаемых поверхностях восстанавливаемых почвообрабатывающих органов;

- тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне при ее конструировании;

- 3) в разработке новой высокоэффективной конструктивной схемы электродной печи-ванны для использования на предприятиях технического сервиса при восстановлении и упрочнении рабочих органов почвообрабатывающей техники;

- 4) в обосновании технических мер по обеспечению одновременного достижения рабочими органами почвообрабатывающей техники предель-

ного состояния за счет соблюдения порядка установки их на почвообрабатывающем агрегате.

Методология и методы исследования. Методология исследований основана на соблюдении принципов объективности, системности и целостности. При проведении исследований соблюдали условие адекватности подходов и средств, позволяющих получать знания об объекте, близкие к их точным значениям. Методами проведения исследований являлись эмпирические, экспериментально-теоретические, математического моделирования, планирования экспериментов с вероятностно-статистическими оценками результатов с их анализом, синтезом и обобщением. При проведении экспериментальных исследований применяли современное оборудование и высокоточные приборы.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту.

1. Закономерности протекания процессов наплавки в жидком теплоносителе и электролизного борирования деталей, позволяющие осуществить математическое моделирование:

- прогнозирования величин ресурсных показателей восстановленных рабочих органов почвообрабатывающей техники;
- диффузионно-кинетических процессов в расплаве электролита при проведении электролизного борирования;
- тепломассообменных процессов в печи-ванне при ее конструировании и установлении технологических режимов;
- диффузионных процессов в системе «обрабатываемая поверхность – стальная сердцевина детали»;
- процесса нагрева детали при наплавке в электродной печи-ванне.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния состава материала ремонтной детали и основных параметров технологических режимов на механизм формирования структуры, механических и эксплуатационных свойств упрочненного слоя и технологических особенностей восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники.

3. Оценка экономической эффективности предлагаемых технических решений.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность результатов исследований обеспечена применением сертифицированных приборов и стандартных методик исследований, достижением необходимой сходимости теоретических и экспериментальных данных, их подтверждением при практической реализации разработок в лабораторных и производственных условиях. Математическое моделирование тепломассообменных процессов при описании объекта исследований базировалось на использовании основополагающих теорий термоди-

намических систем, которые согласуются с опубликованными данными других исследователей.

Рабочие органы почвообрабатывающей техники, восстановленные по разработанным технологиям на предприятиях технического сервиса, прошли эксплуатационную проверку в аграрных хозяйствах Саратовской, Волгоградской и Пензенской областей.

Основные научные положения, результаты исследований, выводы и практические рекомендации диссертации представлены и одобрены на всероссийских и международных научно-практических конференциях, семинарах и совещаниях: ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ им. Н. И. Вавилова» (1998–2021 гг.); ФГБОУ ВО «Саратовский ГТУ им. Гагарина Ю. А.» (2003 г.); Западно-Казахстанского АТУ им. Жангир хана (г. Уральск, 2004 г.); «Агроуниверсал – 2015», (г. Ставрополь, 2015 г.); Таджикского АУ им. Шириншо Шотемура (г. Душанбе, 2017 г.); ФГБОУ ВО «Белгородский ГАУ им. В. Я. Горина» (2019 г.); ФГБОУ ВО «Пензенский ГУ» (2005 г.); 2-й специализированной агропромышленной выставке «САРАТОВ-АГРО 2011» (2011 г.), секции по механизации сельского хозяйства научно-технического Совета министерства сельского хозяйства Саратовской области (22 апреля 2022 года); Министерстве сельского хозяйства и продовольствия Самарской области (17 мая 2022 года).

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном исполнении всех этапов работы: критический обзор известных способов и средств восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники, постановка научной проблемы, постановка цели и задач исследований, формулировка рабочей гипотезы, теоретическое исследование способов электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе, формирование концепции технического решения конструкции установки для электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе, составление программы и частных методик исследований, проведение лабораторных исследований борированных и наплавленных образцов и эксплуатационных исследований почвообрабатывающей техники, укомплектованной восстановленными и упрочненными рабочими органами, обработка и анализ результатов экспериментальных исследований, апробация результатов теоретических и экспериментальных исследований, подготовка публикаций по теме диссертации, подача заявок на изобретения.

Публикации результатов исследований. По результатам исследований опубликовано 87 работ, в т. ч., 17 статей в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК РФ, 5 статей в изданиях, включенных в международные базы Web of Science и Scopus, 8 патентов РФ на изобретения, 1 а.с., 1 монография. Общий объем публикаций – 46,7 печ. л., из которых 26,4 печ. л. принадлежит соискателю.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, рекомендаций производству, перспектив дальней-

шей разработки темы, списка литературы из 312 наименований, из которых 28 на иностранном языке, и 12 приложений. Работа изложена на 256 страницах, содержит 86 рисунков и 12 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснованы ее актуальность, научная новизна, практическая ценность, изложены научные положения, выносимые на защиту.

В первой главе «Состояние вопроса. Постановка проблемы» представлен анализ состояния исследуемой проблемы, изложены конструктивно-технологические особенности рабочих органов почвообрабатывающей техники на примере стрельчатых лап культиваторов. Дан анализ условий их работы и изнашивания в зависимости от места установки на культиваторе. Определены три такие характерные зоны расположения рабочих органов. В первом ряду вне следов движителя трактора изнашивание происходит на 12–15 % интенсивнее, чем во втором ряду. В первом ряду по следу движителя трактора и во втором ряду по следу опорного колеса они изнашиваются в 1,4–1,8 раза интенсивнее, чем соседние.

Установлено, что наименьшая долговечность (150–350 мото-ч) наблюдается у рабочих органов культиваторов, стерневых сеялок и плугов (рисунок 1). В связи с этим повышение их долговечности за счет увеличения ресурса рабочих органов при восстановлении позволит снизить непроизводственные энергетические потери и финансовые расходы.

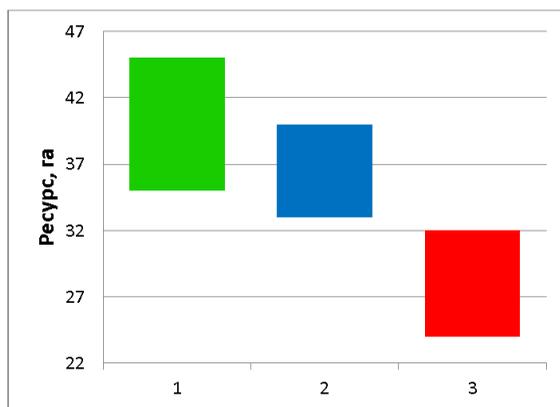


Рисунок 1 – Долговечность: 1 – лемехов плугов; 2 – лап сеялок; 3 – лап культиваторов

Для обеспечения равноизносостойкости рабочих органов культиватора необходимо разработать технологии их восстановления с упрочнением. Выявлена техническая возможность для разработки технологических способов восстановления стрелчатых лап культиваторов. Проанализированы применяемые способы их восстановления и упрочнения.

В результате анализа определены перспективные способы восстановления рабочих органов посредством использования упрочненных компенсирующих деталей. При этом упрочнение необходимо проводить либо наплавкой в жидких теплоносителях, либо электролизным борированием, так как данные способы обеспечивают покрытия с высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

Анализ показал, что при упрочняющей наплавке деталей в жидких теплоносителях перспективно использование самофлюсующихся составов металлопорошков на никелевой основе, которые позволяют получать покрытия, обладающие высокой твердостью и износостойкостью.

Во второй главе *«Теоретическое обоснование технологий восстановления и упрочнения рабочих органов культиваторов»* на основе оценки вариативного прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники изложены теоретические аспекты обоснования принятия технологических и конструктивных решений, способствующих достижению поставленной цели и выполнению задач исследования.

Оценка количественного показателя долговечности работы почвообрабатывающей техники базируется на изучении стохастической природы процесса потери работоспособного состояния при эксплуатации. Ресурс рабочих органов такой техники оценивается площадью поля, обработанной одним рабочим органом до перехода в неработоспособное состояние.

Физико-механические закономерности абразивного изнашивания поверхностей деталей строятся на теории усталостного разрушения с учетом энергетической теории термодинамики необратимых процессов, базирующейся на использовании методов исследования механики напряженно-деформированного состояния и разрушения сплошной среды, а также неоднородного тела, имеющего покрытие.

Стохастическое взаимодействие абразивных частиц с поверхностью детали описывается частотой контактов абразивных частиц с одним и тем же микроскопическим участком поверхности детали, а также их расположением и количеством в произвольный момент времени. При абразивном изнашивании необходимо учитывать временной и пространственный факторы, так как это способствует более полному формализованному описанию данного процесса. Временным фактором в этом случае является частота контактов абразивных частиц с одной и той же микроскопической зоной поверхности детали до наступления момента отделения субмикро-

частицы металла с поверхности детали. Пространственным фактором будет взаимодействие соседних микроскопических зон упругопластических деформаций поверхностного слоя детали от воздействия абразивных частиц в произвольный момент времени.

Теоретическое прогнозирование их долговечности основывалось на моделировании процесса разрушения поверхности с использованием концепции аккумулялирования повреждений при абразивном изнашивании, что позволило получить выражение для прогнозирования ресурса почвообрабатывающих рабочих органов при эксплуатации: обращусь

$$S^{(T)} = \frac{k^{(\Sigma)} HV^{2,5} V_{из}^{(T)} \sigma_B n^{(\sigma)}}{h_{гл}^{(p)} R_{аб}^3 (\sigma_{сж}^{аб})^{2,5} v_k^n H_{тв}^{(p)}},$$

где $S^{(T)}$ – ресурс рабочих органов при эксплуатации, га; $k^{(\Sigma)}$ – интегральный коэффициент, га/м/с; HV – твердость режущей части, МПа; $V_{из}^{(T)}$ – величина предельного износа рабочего органа, м³; σ_B – предел прочности стали, МПа; $n^{(\sigma)}$ – число циклов нагружения; $h_{гл}^{(p)}$ – глубина обработки почвы, м; $R_{аб}$ – средний радиус абразивных частиц, м; $\sigma_{сж}^{аб}$ – предел прочности абразива на сжатие, МПа; v_k^n – поступательная скорость потока почвы, м/с; $H_{тв}^{(p)}$ – твердость почвы, МПа.

На рисунке 2 приведены результаты расчетов для деталей из сталей 30 и 65Г, обработанных по различным технологиям и работающих в одинаковых условиях.

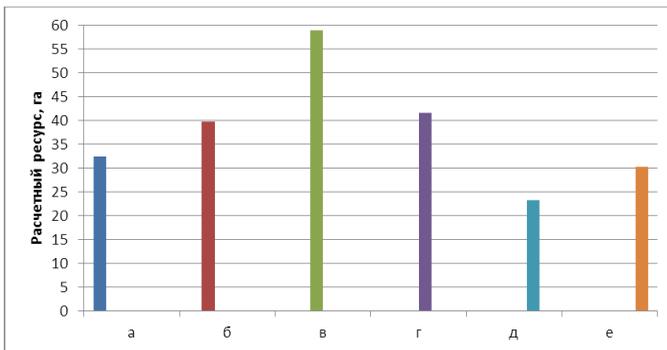


Рисунок 2 – Результаты прогнозирования величины ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники, восстанавливаемых и упрочняемых по технологиям: а – цементация стали 30; б – электроискровое легирование стали 30; в – борирование стали 30; г – наплавка в жидком

теплоносителе стали 30; δ – закалка стали 65Г; e – газотермическая наплавка стали 30

Анализ и расчетная оценка прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники обусловили проведение теоретических и экспериментальных исследований поставленной проблемы.

Движение ионов в расплаве рабочей среды исследовали путем изучения процессов миграции, диффузии и конвекции. При этом значимыми технологическими параметрами, определяющими интенсивность электролизного процесса, приняты величина потока катионов бора и их концентрация, предельная катодная плотность тока, концентрационное перенапряжение и потенциал выделения бора.

Установлены составы рабочей среды, позволяющие проводить электролизное борирование и наплавку (таблица 1).

Таблица 1 – Составы теплоносителей для электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе

Обозначение состава теплоносителя	Химический состав, %
А (существующий)	тетраборат натрия – 80 фтористый натрий – 20
Б (существующий)	тетраборат натрия – 100
В (предлагаемый)	тетраборат натрия – 52–58 борный ангидрид – 14–18 поташ – 15–17 метасиликат натрия – 5–7 фторцирконат калия – 4–5

Кинетика процесса электролиза такова, что ион под действием силы электрического поля мигрирует с определенной скоростью в вязкой среде, степень миграции описывается его подвижностью. Диффузия ионов, в свою очередь, определяется градиентом их концентрации, а конвективная составляющая перемещения этих ионов обеспечивается скоростью движения расплавленной среды. Исходя из этого поток J_i , состоящий из ионов, перемещающихся в расплавленной вязкой движущейся среде, описывается системой:

$$J_i = C_i \bar{V} - D_i \text{grad} C_i + C_i D_i Z_i^z F E_{\text{эл}} / R_y T, \quad (1)$$

где C_i – концентрация i -го иона, моль/л; \bar{V} – поле скоростей течения расплавленной сплошной среды, м/с; D_i – коэффициент диффузии i -го иона, $\text{м}^2/\text{с}$; Z_i^z – заряд i -го иона; $E_{\text{эл}}$ – напряженность электрического поля в расплаве; R_y – универсальная газовая постоянная; T – температура среды, °С.

Термодинамически такая система рассматривается как расплав, состоящий из катионов бора, натрия и анионов кислорода. При приложении к

расплаву разности потенциалов ионы бора и натрия будут разряжаться на катоде, а ионы кислорода – на аноде.

В таблице 2 приведены результаты расчета концентрации катионов бора в объеме расплавленной сплошной среды по формуле:

$$C_2^0 = 0,01\varphi_2\rho_{\text{stm}}, \quad (2)$$

где φ_2 – молярная доля катионов бора;

ρ_{stm} – плотность расплавленной сплошной среды, кг/м³.

Таблица 2 – Результаты расчета концентрации катионов бора

Расплав теплоносителя	Коэффициент диффузии бора, $\times 10^{-11}$ м ² /с	Концентрация катионов бора, $\times 10^3$ моль/м ³	Кинематическая вязкость расплава, $\times 10^{-4}$ м ² /с	Число Прандтля, $\times 10^6$	Температура расплава, °С	Плотность расплава, $\times 10^3$ кг/м ³	Динамическая вязкость расплава, Н·с/м ²	Радиус иона бора, $\times 10^{-12}$ м
А	9,75	9,5	2,5	2,6	950	2,0	0,5	23
Б	10,1	13,3	1,9	1,9	950	2,1	0,4	23
В	10,1	14,8	2,0	1,98	950	2,0	0,4	23

Количественную оценку последовательности выделения натрия и бора при электролизе боратно-натриевых расплавов проводили путем сравнения напряжений разложения соответствующих электролитических ячеек оксида натрия (E_1) и борного ангидрида (E_2):

$$E_1 - E_2 = (3\Delta G_{1,T_{\text{cr}}}^0 - \Delta G_{2,T_{\text{cr}}}^0) / 6F + R_y T \ln \left((\varphi_2)^{0,33} (\varphi_1)^{-1} \right) / F + (0,33(\varphi_1)^2 - (\varphi_2)^2) Q_{\text{см}} / 2F. \quad (3)$$

где $3\Delta G_{1,T_{\text{cr}}}^0$, $\Delta G_{2,T_{\text{cr}}}^0$ – изменения энергии Гиббса разложения оксида натрия и борного ангидрида (стандартные условия) соответственно, Дж/моль; F – число Фарадея, Кл/моль; R_y – универсальная газовая постоянная, Дж/(°С · моль); T – температура процесса, °С; φ_1, φ_2 – молярные доли ионов натрия и бора соответственно; $Q_{\text{см}}$ – энергия смешения, Дж.

Изменение изобарного потенциала реакций разложения определяли для термодинамической температуры, при которой ведется борирование, учитывая изменение изобарного потенциала в стандартных условиях и

химические потенциалы реагирующих веществ. К тому же при высоких температурах могут возникать фазовые переходы. Следовательно, это изменение определяется с учетом закона Вант-Гоффа (таблица 3).

Таблица 3 – ЭДС поляризации при электролизе

Изменение изобарного потенциала реакции разложения, кДж/моль		Мольная доля катионов		Энергия Гиббса, кДж	ЭДС поляризации, В
оксида натрия	борного ангидрида	натрия	бора		
248	978	0,26	0,74	-293	1,316

В результате физико-химического обоснования применения предлагаемого состава для электролизного борирования стальных деталей установлено, что оксид натрия устойчивее борного ангидрида (ЭДС поляризации положительна). Следовательно, атомы бора восстанавливаются на поверхности катода.

Теоретическая модель, описывающая движение ионов в расплаве электролита, учитывает процессы миграции, диффузии и конвекции. Процесс конвективной диффузии в объеме расплава при малой плотности заряда в нем является стационарным, так как стоки ионов на граничной поверхности не влияют на диффузию. При этом учитываются закон сохранения вещества, несжимаемость электролита, постоянство температуры, а также независимость коэффициента диффузии от концентрации ионов.

Поверхность катода считается равнодоступной и полубесконечной для процесса электролиза ионов, так как радиус кривизны этой поверхности и ее линейные размеры многократно превышают толщину пограничного слоя Прандтля.

Поскольку миграция в вязкой среде не может компенсировать падение концентрации катионов бора, то доставка необходимого их количества обеспечивается диффузией, которая определяется градиентом концентрации, действием электрического поля и конвективной составляющей перемещения, обеспечиваемой скоростью движения расплава электролита. Исходя из этого, математическая модель диффузионного потока катионов бора на катод в пограничном слое примет вид:

$$J_2^{D,K} = D_2 \left(\frac{\partial C_2}{\partial y} \right)_{y=0} = 0,68 C_2^0 b_k (w_k^*)^{0,5} (v^p z)^{-0,5} (D_2^2 v^p)^{0,33}, \quad (4)$$

где D_2 – коэффициент диффузии катионов в пограничном слое, м²/с; C_2 – концентрация катионов в пограничном слое, моль/л; C_2^0 – концентрация катионов в объеме расплава, моль/л; b_k и l_k – ширина и длина поверхности катода, м; w^k – величина скорости движения расплава вдоль поверхности катода, м/с; v^p – кинематическая вязкость расплава, м²/с; z^k – координата по оси, направленной вдоль поверхности катода, м.

Результаты расчетов приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты расчетов диффузионного потока и предельной катодной плотности тока

Скорость конвективного движения расплава, м/с	Состав расплава электролита и параметры технологического процесса электролизного борирования								
	А			Б			В		
	Диффузионный поток катионов бора, $\times 10^{-5}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	Толщина диффузионного слоя, $\times 10^{-4}$ м	Предельная катодная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$	Диффузионный поток катионов бора, $\times 10^{-5}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	Толщина диффузионного слоя, $\times 10^{-4}$ м	Предельная катодная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$	Диффузионный поток катионов бора, $\times 10^{-5}$ моль/($\text{м}^2 \cdot \text{с}$)	Толщина диффузионного слоя, $\times 10^{-4}$ м	Предельная катодная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$
0,01	2,54	14,2	377,5	3,55	13,5	574,8	3,95	13,7	634,3
0,05	5,68	6,3	850,8	7,94	6,0	1293	8,83	6,1	1424
0,10	8,03	4,5	1191	11,23	4,2	1847	12,5	4,3	2021
0,15	9,84	3,7	1448	13,75	3,5	2217	15,3	3,5	2483
0,20	11,36	3,2	1675	15,88	3,0	2586	17,7	3,1	2803
0,26	12,95	2,78	1928	18,1	2,65	2928	20,1	2,69	3230

Кинетика этого процесса определяется интенсивностью диффузии катионов бора через пограничный слой Прандтля, где замедляется течение электрохимической реакции из-за влияния концентрационного перенапряжения. Для его уменьшения необходимо снизить градиент концентрации катионов бора в прикатодном слое за счет увеличения скорости их движения в расплаве электролита, что достигается интенсификацией конвективного перемешивания электролита путем создания в нем градиента температуры.

Исходя из данных теоретического моделирования диффузионно-кинетического процесса движения катионов бора установлено, что поток катионов бора и их концентрация в объеме расплава электролита предлагаемого состава и в прикатодном слое на 11–56 % больше, чем у существующих составов, а предельная катодная плотность тока при этом выше на 10,3–67,5 %. Результаты расчетов позволяют обоснованно утверждать, что интенсивность электролизного борирования при использовании расплава электролита предлагаемого состава значительно выше, чем при применении существующих составов.

Моделирование процессов, происходящих в рабочем пространстве печи-ванны, основывается на законах Навье – Стокса, Лоренца, Рэлея – Бенара и Овербека – Буссинеска о неизотермическом течении вязкой сплошной среды в поле сил тяжести. При ее нагревании в печи-ванне с электродным нагревом возникает тепловая конвекция, так как образуются вертикальные и горизонтальные температурные градиенты.

На основании трансляционной инвариантности по оси y переменные в уравнениях неізотермического движения вязкой сплошной среды, тепло-массопереноса и неразрывности зависят от двух пространственных координат: вертикальной z и горизонтальной x , которые перпендикулярны оси конвективных валов (рисунок 3).

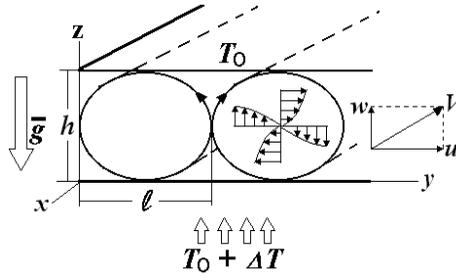


Рисунок 3 – Конвективные валы при вертикальных температурных градиентах: $u(y, z, t)$, $w(y, z, t)$ – компоненты поля скоростей по осям y и z , м/с; h – средняя высота слоя расплавленной сплошной среды (характерный размер конвективного вала в вертикальном направлении z), м; l – характерный размер конвективного вала в горизонтальном направлении y ; T_0 – температура нагрева верхней горизонтальной и левой вертикальной поверхностей, °С; ΔT – разность температур поверхностей, °С; \bar{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²; V – поле скоростей течения расплавленной сплошной среды, м/с

Аналитическое определение составляющих скоростей течения сплошной среды основано на теории неізотермического течения вязкой среды в кольцевом канале и моделируется системами уравнений неізотермического движения вязкой сплошной среды, тепло-массопереноса и неразрывности без учета нелинейных членов, а конфигурация температурного поля выглядит следующим образом (рисунок 4).

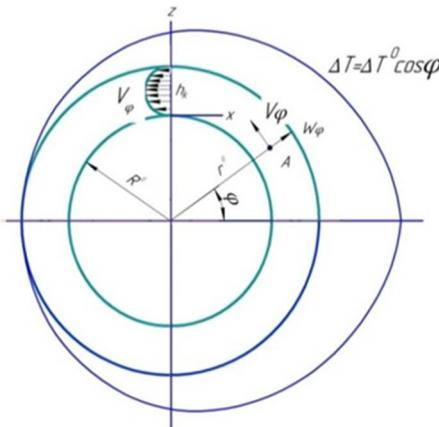


Рисунок 4 – Расчетная схема неізотермического движения вязкой сплошной среды при горизонтальных температурных градиентах: V_φ – проекция (тангенциальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с; W_φ – проекция (нормальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с; h_k – величина канала, м; R^p – характерный размер цилиндрической поверхности, м; ΔT^0 – максимальный температурный перепад по горизонтали, °С; r^p – полярный радиус, м; φ – полярный угол, град

Введем функцию тока $\psi(y, z, t)$, такую, чтобы выполнялись соотношения $u = -\partial\psi/\partial z = -\psi_z$ и $w = \partial\psi/\partial y = \psi_y$.

Проведя преобразования и введя коэффициент p^ε , получим выражения для определения скоростей конвекции в рабочем пространстве печи-ванны, разделенном на левую (L) и правую (P) зоны:

$$u_L = -\frac{\pi}{h_L} \psi_{1L}(t) \sin \frac{\pi y}{L} \cos \frac{\pi z}{h_L} - p \frac{\varepsilon}{v_L^p} (T_8 - T_7) \sin \frac{\pi y}{L} \cos \frac{\pi z}{h_L}; \quad (5)$$

$$w_L = \frac{\pi}{L} \psi_{1L}(t) \cos \frac{\pi y}{L} \sin \frac{\pi z}{h_L} + p \frac{\varepsilon}{L} \frac{h_L}{v_L^p} (T_8 - T_7) \cos \frac{\pi y}{L} \sin \frac{\pi z}{h_L};$$

$$u_P = -\frac{\pi}{h_P} \psi_{1P}(t) \sin \frac{\pi y}{L} \cos \frac{\pi z}{h_P} - p \frac{\varepsilon}{v_P^p} (T_8 - T_9) \sin \frac{\pi y}{L} \cos \frac{\pi z}{h_P}; \quad (6)$$

$$w_P = \frac{\pi}{L} \psi_{1P}(t) \cos \frac{\pi y}{L} \sin \frac{\pi z}{h_P} + p \frac{\varepsilon}{L} \frac{h_P}{v_P^p} (T_8 - T_9) \cos \frac{\pi y}{L} \sin \frac{\pi z}{h_P},$$

где β – коэффициент теплового расширения расплавленной сплошной среды, $1/^\circ\text{C}$.

На основе метода элементарных балансов и уравнений неизотермического течения расплавленной вязкой сплошной среды в гравитационном поле получена тепловая модель электродной печи-ванны (рисунок 5).

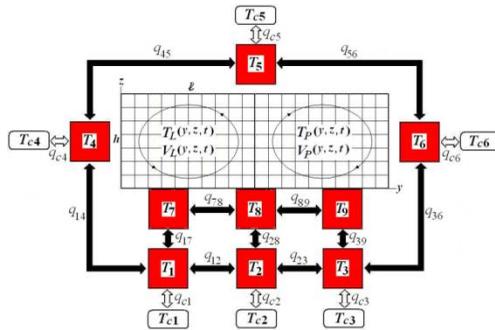


Рисунок 5 – Схема тепловой модели электродной печи-ванны: \longleftrightarrow – тепловые связи между объемами; \longleftrightarrow – тепловые связи с окружающей средой; $T_1(t)$, $T_2(t)$, $T_3(t)$ – температуры дна, $^\circ\text{C}$; $T_4(t)$, $T_6(t)$ – температуры боковых стенок, $^\circ\text{C}$; $T_5(t)$ – температура крышки, $^\circ\text{C}$; $T_7(t)$, $T_8(t)$, $T_9(t)$ – температуры расплавленной сплошной среды в придонном слое, $^\circ\text{C}$; T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} , T_{c4} , T_{c5} , T_{c6} – температуры среды, окружающей печь-ванну, $^\circ\text{C}$; q_{ij} – теплопроводимость между элементарными объемами, Вт/ $^\circ\text{C}$; q_{ci} – теплопроводимость от элементарных объемов в окружающую среду, Вт/ $^\circ\text{C}$; $T_L(y, z, t)$, $T_P(y, z, t)$ – поля температур сплошной среды в «левой» и «правой» зонах ванны, $^\circ\text{C}$; $V_L(y, z, t)$, $V_P(y, z, t)$ – поля скоростей движения сплошной среды в «левой» и «правой» зонах ванны, м/с

Математическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне позволила теоретически определить скорости конвективного движения расплавленной сплошной среды, а также задавать, проверять и уточнять параметры конструкции печи, теплофизические характеристики материалов и сред. Данные математического моделирования были использованы при конструировании опытно-промышленной установки.

Увеличение скорости конвекции расплава электролита создает на поверхности катода равновесную концентрацию атомов бора (граничное условие 1-го рода). Это обеспечивает постоянный поток атомов бора через границу раздела «диффузионный слой – металл» (граничное условие 2-го рода).

При теоретическом моделировании борлируемая деталь представлена полубесконечной пластиной, на поверхности которой наблюдается постоянная концентрация атомов бора. В начальный момент времени бора в детали нет. На границах раздела фаз происходят скачкообразные изменения значений концентрации бора и коэффициентов диффузии. Предположим, что коэффициенты диффузии неизменны в пределах каждой из фаз. В этом случае в соответствии с соотношением Эйнштейна – Смолуховского границы раздела фаз перемещаются параболически при условии, что коэффициенты диффузии бора имеют постоянные значения. Для нахождения положения этих границ необходимо установить значения верхних пределов интегрирования:

$$k_1 = 0,5Y_0^\Gamma (D_1^B t)^{-0,5}; \quad k_2 = 0,5Y_1^\Gamma (D_2^B t)^{-0,5}; \quad k_3 = 0,5Y_2^\Gamma (D_3^B t)^{-0,5},$$

где k_1, k_2, k_3 – верхние пределы интегрирования, учитывающие вероятности перемещения атомов бора соответственно в фазах моноборида железа, борида дижелеза и твердого раствора бора в γ -железе; Y_0^Γ – граница жидкой и твердой фаз, м; Y_1^Γ – граница (толщина) слоя моноборида железа, м; Y_2^Γ – граница (общая толщина) слоев моноборида железа и борида дижелеза, м; D_1^B, D_2^B и D_3^B – коэффициенты диффузии бора соответственно в фазах моноборида железа, борида дижелеза и твердого раствора бора в гамма-железе

Определение концентрации бора в детали с учетом начальных условий по формулам:

$$\begin{aligned} C^1(y,t) &= C_1^B - (C_1^B - C_1^\Gamma) \Phi_{c_0}^0(y) / \Phi_1^1(Y_1^\Gamma); \\ C^2(y,t) &= C_2^B - (C_2^B - C_2^\Gamma) (\Phi_{c_0}^0(y) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)) / (\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)); \\ C^3(y,t) &= C_3^B \Phi_c^0(y) / \Phi_3^2(Y_2^\Gamma), \end{aligned} \quad (7)$$

где $C^1(y; t)$, $C^2(y; t)$, $C^3(y; t)$ – концентрации бора на глубине y от поверхности соответственно для моноборида железа, борида дижелеза, твердого раствора бора в гамма-железе, %; C_1^B , C_2^B , C_3^B – концентрации бора на левой стороне межфазной границы соответственно для моноборида железа, борида дижелеза и твердого раствора бора в гамма-железе при температуре насыщения, %; C_1^* , C_2^* , – концентрации бора на правой стороне межфазной границы соответственно для моноборида железа и борида дижелеза при температуре насыщения, %; D^C – коэффициент диффузии углерода в стали при температуре насыщения, m^2/c ;

$\Phi_1^1(Y_1^\Gamma)$, $\Phi_2^1(Y_2^\Gamma)$, $\Phi_2^2(Y_2^\Gamma)$, $\Phi_3^2(Y_2^\Gamma)$, $\Phi_n^0(y)$, $\Phi_{n0}^0(y)$ – вероятностные функции ошибок Лапласа на соответствующих границах.

В результате преобразований получена система трансцендентных уравнений для нахождения границ боридов:

$$\frac{(C_1^B - C_1^*)(D_1^B t)^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma) \right) E_1^1(Y_1^\Gamma) - (C_2^B - C_2^*)(D^C t)^{0,5} \Phi_1^1(Y_1^\Gamma) E_2^1(Y_1^\Gamma)}{Y_1^\Gamma (C_1^* - C_2^B) \pi^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma) \right) \Phi_1^1(Y_1^\Gamma)} = \frac{1}{2}; \quad (8)$$

$$\frac{(C_2^B - C_2^*)(D_2^B t)^{0,5} \Phi_3^2(Y_2^\Gamma) E_2^2(Y_2^\Gamma) - C_3^B (D^C t)^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma) \right) E_3^2(Y_2^\Gamma)}{Y_2^\Gamma (C_2^B - C_3^B) \pi^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma) \right) \Phi_3^2(Y_2^\Gamma)} = \frac{1}{2}, \quad (9)$$

где $E_1^1(Y_1^\Gamma)$, $E_2^1(Y_1^\Gamma)$, $E_2^2(Y_2^\Gamma)$, $E_3^2(Y_2^\Gamma)$ – пределы интегрирования.

Таким образом, с учетом начальных и граничных условий системы уравнений (8), (9) возможно решение задач по определению изменения концентрации, расположения и процентного содержания всех образующихся фаз при электролизном борировании деталей.

Математическое моделирование нагрева детали при наплавке проводили с учетом особенностей происходящих процессов. На этом основании для назначения рациональных режимов наплавки детали важным является определение характера и закономерностей изменения ее температуры.

В данном случае исследовали пластину толщиной H^{II} (рисунок 6) с начальной равномерно распределенной температурой $T_2^*(z, 0)$. В произвольный момент времени температура этой пластины – $T_2^*(z, t)$, где z –

текущая координата, м; t – текущий момент времени, с. Эти величины имеют следующие области определения: $Z_0^* \leq z \leq (Z_0^* + H^{\text{II}})$, $t \geq 0$.

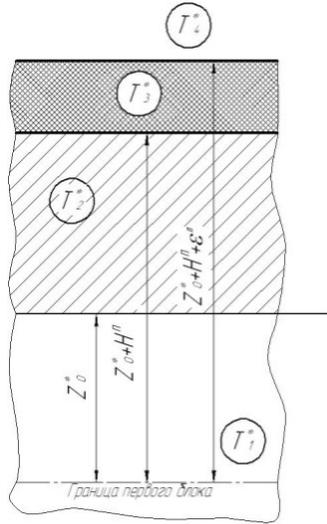


Рисунок 6 – Схема наплавляемого образца

На поверхность пластины с верхней стороны нанесен слой суспензии толщиной ε^{II} . В нем также имеет место равномерное начальное распределение температуры $T_3^*(z, 0)$. В произвольный момент времени температура этого слоя – $T_3^*(z, t)$. Область определения текущей координаты и времени: $(Z_0^* + H^{\text{II}}) \leq z \leq ((Z_0^* + H^{\text{II}}) + \varepsilon^{\text{II}})$, $t \geq 0$.

Пластину помещают в однородную среду с равномерным начальным распределением температуры под пластиной и над ней – $T_1^*(z, 0) = T_4^*(z, 0)$. В произвольный момент времени температура этой среды под пластиной – $T_1^*(z, t)$, над ней – $T_4^*(z, t)$. Область определения текущей координаты и времени: $0 \leq z \leq Z_0^*$, $t \geq 0$ и $((Z_0^* + H^{\text{II}}) + \varepsilon^{\text{II}}) \leq z \leq \infty$, $t \geq 0$.

Требуется найти распределение температуры в каждой зоне пластины и вокруг нее в любой момент времени ($T_1^*(z, t)$, $T_2^*(z, t)$, $T_3^*(z, t)$ и $T_4^*(z, t)$).

Учитывая большой перепад температур, заключаем, что имеет место стационарный тепловой поток. Теплообмен происходит по закону Ньютона

на – Рихмана. Этот теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1^*}{\partial t} = k_1^p \frac{\partial^2 T_1^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_2^*}{\partial t} = k_2^p \frac{\partial^2 T_2^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_3^*}{\partial t} = k_3^p \frac{\partial^2 T_3^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_4^*}{\partial t} = k_4^p \frac{\partial^2 T_4^*}{\partial z^2}, \end{array} \right. \quad (10)$$

где $k_1^p, k_2^p, k_3^p, k_4^p$ – коэффициенты температуропроводности, м²/с, $k_1^p = k_4^p = k^p$ и $k_2^p = k_3^p$.

Граничные условия четвертого рода определяются законом Фурье и могут быть представлены системой дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\left\{ \begin{array}{l} (-\lambda_1^*) \frac{\partial T_1^*(Z_0^*; t)}{\partial z} + q_1^* = 0; \\ (-\lambda_2^*) \frac{\partial T_2^*(Z_0^*; t)}{\partial z} + q_2^* = 0; \\ (-\lambda_3^*) \frac{\partial T_2^*(Z_0^* + H^{II}; t)}{\partial z} + q_3^* = 0; \\ (-\lambda_4^*) \frac{\partial T_3^*(Z_0^* + H^{II}; t)}{\partial z} + q_4^* = 0; \\ (-\lambda_5^*) \frac{\partial T_3^*((Z_0^* + H^{II}) + \varepsilon^{II}; t)}{\partial z} + q_5^* = 0; \\ (-\lambda_6^*) \frac{\partial T_4^*((Z_0^* + H^{II}) + \varepsilon^{II}; t)}{\partial z} + q_6^* = 0. \end{array} \right. \quad (11)$$

Поскольку теплообмен происходит между разнородными средами, то были выбраны следующие граничные условия: $q_1^* = q_2^* = \alpha(T_2^* - T_1^*)$, $q_3^* = q_4^*$, $q_5^* = q_6^* = \alpha(T_3^* - T_4^*)$, $\lambda_1^* = \lambda_2^* = \lambda_5^* = \lambda_6^* = \lambda_{\text{стм}}$, $\lambda_3^* = \lambda_m$, $\lambda_4^* = \lambda_5^* = \lambda_{\text{ст}}$, где $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \lambda_3^*, \lambda_4^*, \lambda_5^*, \lambda_6^*$ – коэффициенты теплопроводности, Вт/(°С·м); $q_1^*, q_2^*, q_3^*, q_4^*, q_5^*, q_6^*$ – плотность теплового потока, Вт/м²; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(°С·м²).

Решение задачи нагрева деталей при наплавке их в жидком теплоносителе было осуществлено методом конечных элементов.

В третьей главе «Программа и методики экспериментальных исследований» приведены программа, представлены оборудование и методики экспериментальных исследований. При составлении программы исследований были приняты во внимание цель, поставленная в работе, и вытекающие из нее задачи с учетом данных, известных по литературным источникам.

Программа экспериментальных исследований включала в себя:

- лабораторные исследования с целью проверки теоретических предположений и обоснования основных режимных параметров упрочнения дополнительной ремонтной детали;
- полевые испытания с целью проведения сравнительной оценки ресурса рабочих органов культиваторов.

Проведенный анализ термического оборудования позволяет утверждать о необходимости разработки установки для осуществления электролизного борирования дополнительных ремонтных деталей или наплавки на них присадочных материалов в расплаве теплоносителя.

В процессе эксплуатации печей-ванн, предназначенных для химико-термической обработки и наплавки деталей в жидких теплоносителях, их состав изменяли по следующим причинам: попадание в теплоноситель оксидов с изделий и деталей самой печи-ванны, вынос теплоносителя вместе с деталью, его выгорание и испарение.

Для исследования состава летучих компонентов над расплавом теплоносителя был использован масс-спектрометр МИ-1305 (рисунок 7).



Рисунок 7 – Масс-спектрометрическая установка МИ-1305

При таком виде нагрева могут происходить разъедание поверхности и, как следствие, изменение размеров. Для процессов электролизного борирования и наплавки важно знать разъедающую активность теплоносителя. Вместе с тем необходимо учитывать также его летучесть и токсичность. В этой связи важно изучить взаимодействие расплавленного теплоносителя с поверхностями наплавляемого изделия и присадочного материала, а также состав парогазовой фазы над зеркалом ванны.

Процесс наплавки деталей можно разделить на два этапа, следующих друг за другом непрерывно.

Сначала наплавляемая деталь нагревается до температуры солидуса присадочного материала, при этом происходит плавление легкоплавких компонентов шихты. Затем нагрев продолжается до достижения температуры ликвидуса шихты или даже несколько выше. Эти параметры технологического процесса представляют научный интерес, поэтому важна достоверность их определения. Фазовые превращения при плавлении присадочного материала сопровождаются повышенным поглощением энергии, что уменьшает темп роста температуры. После окончания процесса плавления за счет скрытой теплоты темп роста температуры снова возрастает. Поэтому для определения критических точек наплавляемого материала была разработана методика исследований. Характер плавления присадочного порошка изучали с помощью высокотемпературного микроскопа марки НМ-100 «Union» (рисунок 8).



Рисунок 8 – Высокотемпературный микроскоп НМ-100

Физико-химическое взаимодействие расплава присадочного материала с поверхностью твердого тела, начинается с ее смачиваемости, т. е. равномерного распределения расплава, что является необходимым условием получения прочного неразъемного соединения. В соответствии со вторым началом термодинамики это физическое взаимодействие представляет собой экзергоническую реакцию, которая сопровождается уменьшением свободной поверхностной энергии.

Диффузию элементов по толщине покрытия исследовали с помощью рентгеновского микроанализатора «Супер Проб 733» с приставкой для рентгеноспектрального локального анализа (рисунок 9).



Рисунок 9 – Рентгеноструктурный микроанализатор «Супер Проб 733»

При равномерном и быстром нагреве изделий их деформации минимальны, т. е. имеется возможность сохранения исходных размеров, что важно при ремонтной наплавке. Поэтому была создана методика оценки характера возможного коробления нагреваемых деталей при электролизном борировании и наплавке.

Воздействие высокой температуры создает благоприятное условие для гетерогенной диффузии в зоне сплавления. Контактующие фазы взаимодействуют в соответствии с их химическими потенциалами. Распределение элементов при наплавке зависит от следующих факторов: их растворимости в твердой и жидкой фазах, температуры, длительности контактирования, градиента концентрации и диффузионной подвижности атомов.

Исследование структуры проводили с помощью оптических и электронных микроскопов (рисунок 10). При этом оценивали качество нанесенного слоя на предмет наличия неметаллических включений, раковин, пор и трещин.



Рисунок 10 – Металлографический микроскоп МИМ-8М

Количественный фазовый анализ упрочненного слоя осуществляли рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3М в фильтрованном FeK_α -излучении с фокусировкой по Брегу-Брентано (рисунок 11).



Рисунок 11 – Рентгеновский дифрактометр ДРОН-3М

На практике определение фазового состава упрочненного слоя затруднительно из-за сложного химического состава сплавов и их взаимодействия. Наплавочные материалы, планируемые для упрочнения деталей, по

составу отличаются от металла основы и их взаимодиффузию на линии сплавления необходимо оценить, поскольку это влияет на механические и служебные свойства покрытия, а также на ресурс детали. Новизна предложенных способов наплавки и борирования обуславливает необходимость разработки методик для проведения исследований механических свойств и износостойкости покрытий.

Сравнительные ресурсные испытания стрелчатых лап проводили на агрегатах из двух культиваторов КПС-4, агрегатированных с тракторами Т-150К при культивации чистых паров, а также при обработке почвы под посев технических культур и яровых зерновых на полях, почвы которых были либо черноземом обыкновенным, либо суглинком (средним или тяжелым). Для получения сравнимых показателей опытные варианты восстановленных стрелчатых лап чередовали с лапами, восстановленными по существующей технологии и серийными (рисунки 12 и 13). Вышедшие из строя лапы заменяли серийными, и дальнейшего наблюдения за ними не производили.

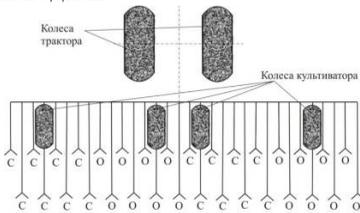


Рисунок 12 – Схема расстановки рабочих органов на 2-культиваторном агрегате: О – рабочие органы, восстановленные по предлагаемым технологиям; С – серийные рабочие органы (новые или восстановленные по существующей технологии)

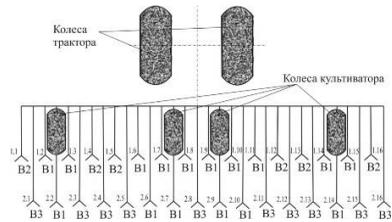


Рисунок 13 – Схема расстановки рабочих органов, восстановленных по предлагаемым технологиям, на 2-культиваторном агрегате: В1 – рабочие органы, восстановленные и упрочненные 2-сторонним борированием; В2 – рабочие органы, восстановленные и упрочненные 1-сторонним борированием; В3 – рабочие органы, восстановленные и упрочненные наплавкой в жидком теплоносителе

Планирование экспериментов и обработку результатов производили с помощью математических методов.

Для получения максимальной достоверности опытных данных при проведении экспериментов создавали условия, при которых были сведены к минимуму ошибки измерений, а также применяли методы математической статистики при обработке и оценке точности результатов наблюдений.

При измерении соответствующих величин выбирали методы и приборы, обеспечивающие наибольшую точность. Тарировку и настройку при-

боров производили перед началом, в процессе и в конце опытов. Изучаемые параметры замеряли в определенной последовательности и в необходимом количестве. В процессе опытов строго контролировали факторы, влияющие на результаты эксперимента, что позволяло своевременно обнаружить аномальные результаты и исключить их.

Обработку экспериментальных данных и построение графиков осуществляли по средним величинам наименьших квадратов.

В четвертой главе «Анализ результатов экспериментальных исследований» представлены результаты экспериментальных исследований применения процессов наплавки в жидком теплоносителе и электролизного борирования при упрочнении и восстановлении рабочих органов почвообрабатывающей техники в лабораторных и производственных условиях.

Восстановление деталей наплавкой в жидких теплоносителях характеризуется комплексной взаимосвязью ряда факторов. Выразить эту взаимосвязь в удобном для практического использования аналитическом виде не представляется возможным. В работе при решении задач применены расчетный и экспериментальный подходы к изучению и разработке оптимального сочетания теоретических закономерностей и экспериментальных показателей. Данные, полученные в процессе исследования, обеспечили возможность разработки новых технологий, позволяющих рабочим органам достичь нормативного ресурса и даже превысить его.

При исследовании нагрева детали для наплавки установлено, что изменение температуры в зоне сплавления, определенное экспериментально, отличается от расчетных значений в допустимых пределах 3–5 % (рисунок 14).

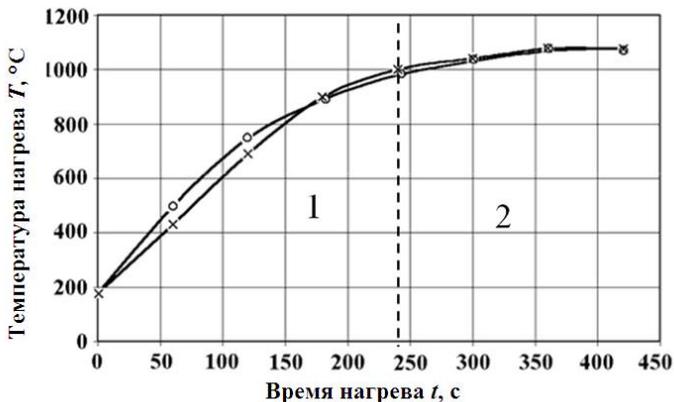
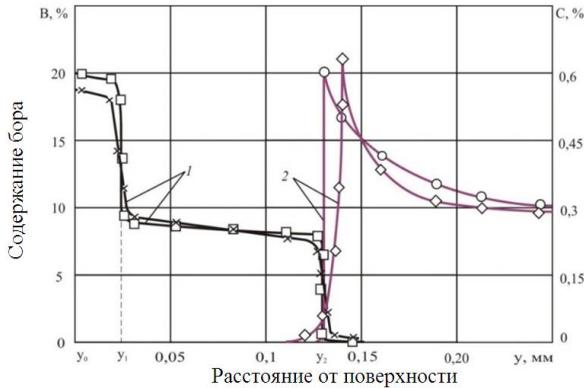


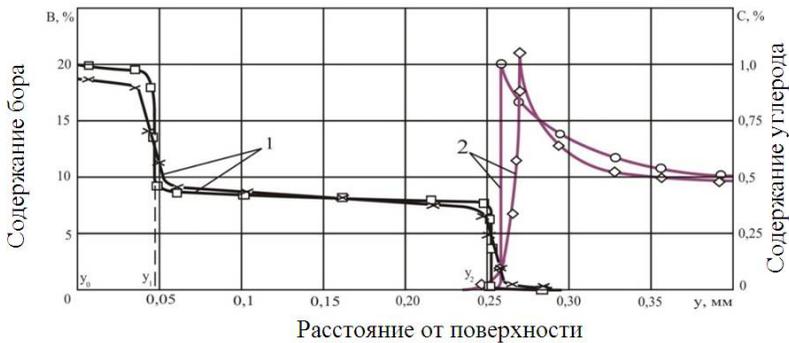
Рисунок 14 – Время нагрева в расплаве теплоносителя: х – теоретическое изменение температуры; о – экспериментальное изменение температуры

Определено, что при увеличении скорости движения расплава электролита в 2,6 раза толщина образующегося борированного слоя увеличи-

вается в 1,8–2,0 раза. При этом возрастает количество оттесненного углерода. Расчеты и экспериментальные исследования борированных образцов позволили установить в образцах из стали 30 (рисунок 15) количество углерода в начале переходной зоны: при скорости движения расплава электролита 0,1 м/с – 0,63 %, а при 0,26 м/с – 1,0 %.



a



б

Рисунок 15 – Количество бора (1) и углерода (2) в стали 30 при скорости движения теплоносителя: *a* – 0,1 м/с; *б* – 0,26 м/с; □, ○ – расчетное; ×, ◇ – экспериментальное

Фазовые переходы в упрочненных слоях толщиной 0,11–0,18 мм сопровождаются значительным изменением концентрации бора: с 16 до 9 % на границе раздела фаз моноборида железа и борида дижелеза и с 7 до 0,7 % на границе раздела борида дижелеза и твердого раствора бора в α -железе (см. рисунок 15).

Анализом данных, представленных на рисунке 15, установлено, что диффузионный борированный слой, полученный на стали 30, состоит из

переплетающихся столбчатых кристаллов (рисунок 16).

Исследования слоя показали, что поверхностная зона, имеющая более темный оттенок (рисунок 16), представляет собой моноборид железа, обладающий более высокими твердостью (17,1...19,7 ГПа) и износостойкостью по сравнению с расположенным ниже боридом дижелеза. Последний обладает меньшей твердостью (12,6...17,0 ГПа) и хрупкостью (зона, имеющая более светлый оттенок). Бориды обоих типов имеют столбчатое игольчатое строение. Между концами игл борида дижелеза, вблизи границы с основным металлом, находятся включения твердого раствора бора в α -железе. Расположенная за боридным слоем α -фаза по строению отличается от боридов, ее величина зависит от количества углерода в стали. При этом образуется соотношение высокобористой и низкобористой фаз 20 на 80 % соответственно. Такое строение упрочненного слоя обеспечивает высокие механические и эксплуатационные свойства восстановленной детали.



Рисунок 16 – Микроструктура зоны боридного слоя на стали 30 при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с ($\times 500$)

Результаты лабораторных испытаний образцов, борированных и наплавленных в жидком теплоносителе хромоникелевым порошком ПР-Н67Х18С5Р5, позволяют сделать вывод о том, что они обладают более высокой износостойкостью (рисунок 17). Величина их износа на 35–70 %

ниже по сравнению с образцами из стали 65Г и стали 30, наплавленной газотермическим способом, что подтверждает прогнозируемые значения.

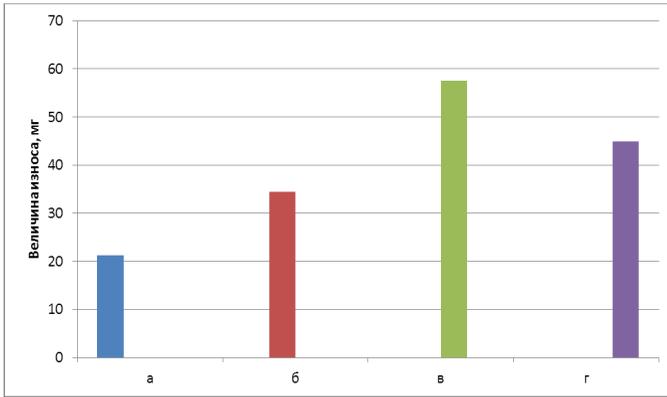


Рисунок 17 – Результаты сравнительных лабораторных исследований упрочненных образцов на износ: *а* – борированная сталь 30; *б* – сталь 30, наплавленная в жидком теплоносителе; *в* – закаленная сталь 65Г; *г* – сталь 30, наплавленная газотермическим способом

В пятой главе «Исследование особенностей разработки технологий и технических средств восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники и оценка их экономической эффективности» представлены особенности разработки технологий электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе.

В процессе эксплуатации происходит изменение химического состава теплоносителя. Установлено, что при непрерывной работе в течение 160 ч первые 80 ч он стабилен (рисунок 18).

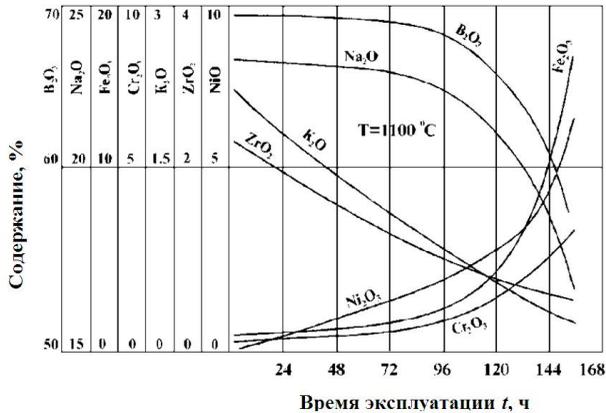


Рисунок 18 – Изменение химического состава предлагаемого теплоносителя

Затем из-за насыщения расплава оксидом железа более 5 % наблюдается резкое изменение его химического состава, что требует замены теплоносителя, но из-за его выноса с деталями необходимо добавлять свежий теплоноситель. Это позволяет удерживать стабильный состав теплоносителя длительное время.

Разработанная математическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне, являющаяся основой для конструирования реальной установки, была реализована по алгоритму, представленному на рисунке 19.

Разработанная программа позволяет моделировать процессы, происходящие в рабочем пространстве печи-ванны, для конструктивно различного расположения электродов, а также интенсивность теплоотвода в окружающую среду.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что скорость течения теплоносителя или интенсивность конвекции в предлагаемой конструкции электродной печи-ванне (рисунок 20) возрастает в 2,5–4,0 раза по сравнению с существующей конструкцией с донным расположением электродов.

Электроды, соединенные попарно и расположенные на стенках корпуса и днище ванны, создают силовые линии, которые пронизывают рабочее пространство ванны в зоне нагрева детали.

При проведении технологических операций упрочнения или восстановления деталь 16 (см. рисунок 20), закрепленную на державке 17, погружают в расплав теплоносителя, выдерживают в течение заданного времени и подвергают дальнейшей обработке согласно техническим требованиям технологического процесса.

Технологические операции восстановления работоспособности деталей осуществляют на оборудовании предприятия технического сервиса. Техническая оснащенность производства в сочетании с наличием квалифицированных кадров позволяет обеспечить высокую производительность труда и выпуск изделий, отвечающих нормам технических требований. Важная роль в этом процессе принадлежит соблюдению технологической дисциплины и контролю качества.

У стрелчатых лап, выработавших ресурс, изношенную часть лезвия отрубали на кривошипном прессе или удаляли абразивной резкой. На кривошипном прессе из углеродистой стали вырубали компенсирующие дополнительные детали, которые затем подвергали электролизному борированию с соблюдением режимов, приведенных ниже.

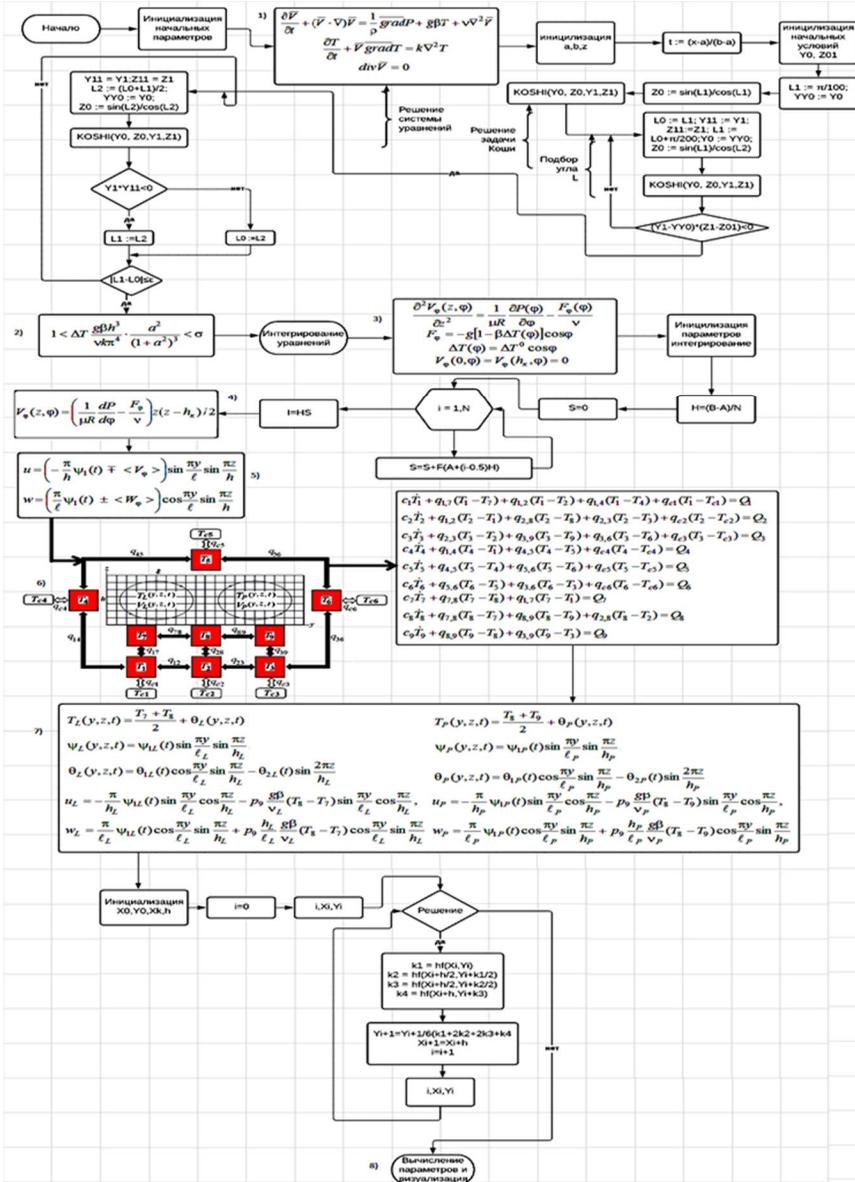


Рисунок 19 – Алгоритм математической модели тепломассообменных процессов в печи-ванне



a

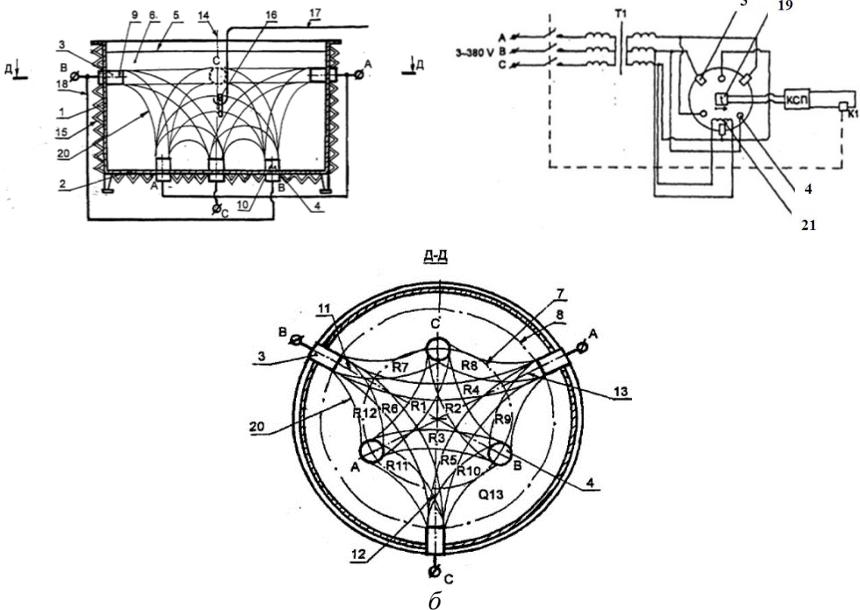


Рисунок 20 – Электродная печь-ванна: *a* – общий вид; *б* – схема: 1 – корпус; 2 – днище; 3 и 4 – группы электродов; 5 – уровень расплава; 6 – расплав теплоносителя; 7 и 8 – концентрические окружности расположения электродов; 9 и 10 – оси симметрии электродов; 11, 12 и 13 – плоскости; 14 – ось симметрии корпуса; 15 – теплообменник; 16 – деталь; 17 – державка; 18 – электрические шины; 19 – температурные датчики; 20 – силовые линии; 21 – нагревательная спираль

Аналогично изготавливали ремонтные детали, которые затем наплавляли металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5 с тыльной стороны лезвия с соблюдением следующих режимов.

Режимы борирования: температура расплава – 930 °С; плотность тока – 0,20 А/см²; время выдержки – 1,7 ч; скорость движения теплоносителя – 0,26 м/с.

Режимы наплавки: температура расплава – 1100 °С; время выдержки – 0,25 ч; толщина слоя – 0,26...0,28 мм; скорость движения теплоносителя – 0,26 м/с.

После электролизного борирования или наплавки металлопорошком в жидком теплоносителе ремонтную деталь соединяли с остовом лапы неразъемно (рисунок 21) или разъемно (рисунок 22).



а



б

Рисунок 21 – Схема восстановления стрелчатой лапы культиватора приваркой ремонтной детали: а – электроконтактной сваркой; б – электродуговой сваркой

По окончании борирования или наплавки поверхность пластины была покрыта слоем застывшего теплоносителя, для его отделения угловую пластину опускали в ванну с водой. При этом происходила ее закалка, после чего необходим низкий отпуск.

При сварке среднеуглеродистой стали с высокоуглеродистой марганцовистой сталью 65Г возможно образование трещин как в основном металле, так и в сварном шве. Для получения качественных соединений необходимо предварительный подогрев изделия до 200...300 °С.



Рисунок 22 – Стрельчатые культиваторные лапы, восстановленные постановкой ремонтной детали и упрочненные: *а* – наплавкой в жидком теплоносителе; *б* – односторонним борированием; *в* – двусторонним борированием

Эксплуатационные испытания в полевых условиях позволяют получить окончательный ответ об эффективности принятых технологических и технических решений. Они дают практически полную информацию о ресурсе стрельчатых лап культиваторов, восстанавливаемых по различным технологиям. Для этого стрельчатые лапы устанавливали на культиватор (рисунок 23, *а*). После наработки 15 га (рисунок 23, *б*) у лап, восстановленных борированием и наплавкой в жидком теплоносителе, наблюдался незначительный износ.

Следующий контрольный осмотр, проведенный через 30 га после начала испытаний (рисунок 23, *в*), показал большие величины износа лап, восстановленных борированием и наплавкой в жидком теплоносителе. При этом уже были сняты с испытаний лапы, восстановленные газотермической наплавкой, из-за достижения ими предельного состояния (таблица 5).



Рисунок 23 – Контроль стрельчатых лап культиватора: *а* – начало испытаний; *б* – после наработки 15 га; *в* – после наработки 30 га

Анализ условий работы и изнашивания стрельчатых лап культиваторов (рисунок 24) показал, что наиболее интенсивное их изнашивание происходит при движении по следам тракторных движителей и опорных колес культиватора. Серийные лапы,двигающиеся по этим следам, через 25...26 га наработки достигают предельного состояния (см. таблицу 5).

При комплектации культиватора стрельчатыми лапами, восстановленными борированием и наплавкой в жидком теплоносителе, его ресурс повысился 1,8 раза по сравнению с агрегатом, укомплектованным стрельчатыми лапами, восстановленными газотермической наплавкой (рисунок 25).

Таблица 5 – Результаты эксплуатационных испытаний
стрельчатых лап культиваторов, установленных по следу движителя

Стрельчатые культиваторные лапы	Ресурс, га	Линейный износ, мм		Радиус кромки, мм
		носки	крыльев	
Новые серийные	25,8	31,2	15,7	2,8
Восстановленные по существующей технологии	26,7	30,2	14,7	2,5
Восстановленные по предлагаемым технологиям				
с двусторонним борированием	47,3	28,7	14,3	1,8
с односторонним борированием	33,8	29,1	14,1	1,7
с наплавленным слоем	30,5	28,8	14,6	1,9

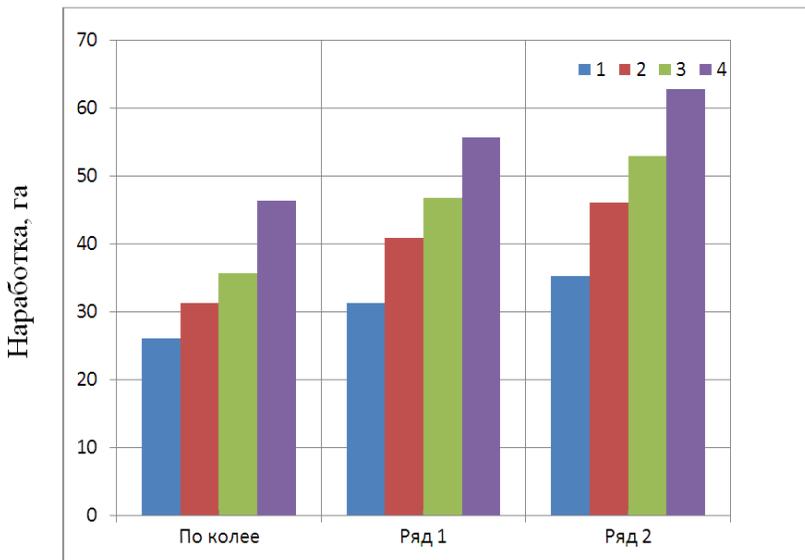


Рисунок 24 – Результаты ресурсных испытаний культиваторов, укомплектованных рабочими органами, восстановленными следующими способами:
1 – существующий способ восстановления; 2 – восстановление с упрочнением наплавкой; 3 – восстановление с односторонним борированием; 4 – восстановление с двусторонним борированием

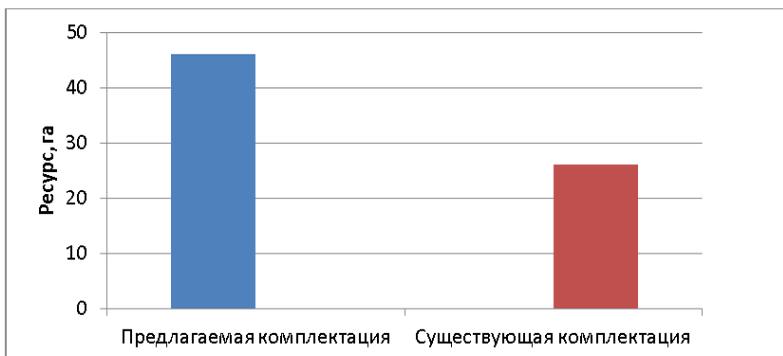


Рисунок 25 – Результаты ресурсных испытаний культиваторов

Расчет технико-экономической эффективности внедрения технологий восстановления культиваторной лапы борированием и наплавкой в жидком теплоносителе показал, что значения действительных критериев эффективности у предлагаемых технологий в 1,57–1,72 раза меньше, чем у существующего технологического процесса газотермической наплавки. Таким образом, технологические процессы восстановления культиваторной лапы борированием и наплавкой в жидком теплоносителе предпочтительнее с технико-экономической точки зрения.

Годовой экономический эффект от восстановления культиваторных лап при годовой программе 50000 шт. составил 2650 тыс. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Решая поставленную научную проблему повышения долговечности почвообрабатывающей техники посредством совершенствования и разработки технологий восстановления и упрочнения рабочих органов электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе, позволяющие повысить ресурс отремонтированной техники в 1,8 раза по сравнению с новой.

1. Анализ литературных источников и исследования дефектного состояния показал, что более 60 % стрелчатых лап культиваторов выходят из строя ввиду линейного износа носка (до 30 мм) и крыльев по ширине (до 15 мм). При этом определено, что интенсивность изнашивания лап, установленных в различных местах на раме культиватора (первый либо второй ряд, по следам движителей и опорных колёс), значительно различается. Менее интенсивно (на 12–15 %) по отношению к лапам первого ряда изнашиваются лапы, установленные во втором ряду, а лапы, перемещающиеся по следам, оставляемым опорными колесами культиватора и движителя трактора, изнашиваются в 1,4–

1,8 раза интенсивнее. В результате сравнительного анализа существующих технологий и данных прогнозирования долговечности установлен перспективный способ восстановления стрелчатых лап культиваторов за счет использования дополнительной компенсирующей детали, подвергаемой упрочнению теоретически обоснованными и усовершенствованными методами электролизного борирования и наплавки в жидких теплоносителях.

2. Предложен теоретический метод вариативного прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники. Определен состав электролита для электролизного борирования: тетраборат натрия – 52–58 %; борный ангидрид – 14–18 %; поташ – 15–17 %; метасиликат натрия – 5–7 %; фторцирконат калия – 4–5 %. Установлены значения потенциалов выделения натрия и бора ($E_1 = -2,89$ В, $E_2 = -1,57$ В), разность которых позволяет утверждать, что катионы бора будут восстанавливаться до атомарного состояния на катоде. Определены режимные параметры технологии электролизного борирования стальных образцов: рабочая температура процесса насыщения – 930 °С; катодная плотность тока – 0,20 А/см²; время проведения процесса – 1,7 ч при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с. Разработанный состав теплоносителя обеспечивает проведение электролизного борирования, закалки и наплавки деталей. Выгорание компонентов разработанного состава в 1,30–1,35 раза меньше чем у существующего состава. Токсичные выделения отсутствуют.

3. Математическим моделированием процесса установлена зона оптимальной загрузки печи-ванны, расположенная на расстоянии 0,03 м от ее боковой стенки. Определены зоны солидуса (990...1000 °С) и ликвидуса (1025...1035 °С) для металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5. Экспериментально подтверждены оптимальные режимы наплавки: температура – 1030 °С, время выдержки – 60 с, содержание связующего – 5 %. При соблюдении этих режимов были получены оптимальные значения технических показателей: пористость покрытия – 5 %; взаимодиффузия элементов покрытия и подложки – 0,4 мкм; прочность сцепления – 350 МПа. Расчетное значение толщины наплавленного слоя практически совпадает с экспериментально определенным ее значением (отклонение ± 5 %).

4. Разработанная теоретическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне, связывающая ее режимные и конструктивные параметры, обуславливает технологическую и техническую взаимосвязь установки, позволяет задавать необходимую скорость конвекции теплоносителя 0,1...0,26 м/с, что в 2 раза увеличивает толщину упрочненного слоя при электролизном борировании.

5. Установлено, что борированный слой состоит из моноборида железа, борида дижелеза и твердого раствора бора в альфа-железе. Определено влияние скорости конвекции электролита и количества углерода в стали на глубину диффузии бора и образующегося соотношения высокобористой и низкобористой фаз (20 на 80 %). Экспериментальные значения практиче-

ски совпали с расчетными (отклонения ± 5 %). Установлено влияние скорости конвекции электролита и количества углерода в образце на микротвердость борированного слоя: моноборид обладает микротвердостью 17,1...19,7 ГПа, а борид дижелеза – 12,6...17,0 ГПа при скорости конвекции 0,26 м/с.

6. В результате лабораторных испытаний установлено, что в условиях абразивного изнашивания износостойкость образцов из стали 30, борированных при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с, повышается в 2–3 раза. Образцы из стали 30, наплавленные в жидком теплоносителе хромоникелевым порошком ПР-Н67Х18С5Р5, обладают высокой износостойкостью – величина их износа на 35–70 % ниже по сравнению с образцами из стали 30, наплавленными газотермическим способом, и закаленными образцами из стали 65Г. При этом определенные соотношения величин износов образцов подтверждены соотношениями теоретически прогнозируемых показателей ресурса. Сравнительные ресурсные испытания показали, что ресурс культиватора, укомплектованного рабочими органами, восстановленными и упрочненными электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе, повысился в 1,8 раза. Ресурс экспериментальных рабочих органов выработался после обработки 47 га, а восстановленных по существующей технологии – после обработки 26 га. Результаты эксплуатационных испытаний подтвердили адекватность расчетной модели. Расчетное значение превышения ресурса – 1,95 раза, а фактически полученное значение – 1,8 раза (погрешность составила 8 %).

7. Предложены технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники, а также разработана, изготовлена и апробирована установка для их реализации. Годовой экономический эффект от внедрения предлагаемых технических решений при годовой программе 50000 деталей – 2650 тыс. руб. При этом значение действительного критерия эффективности восстановления культиваторной лапы по предлагаемой технологии практически в 2 раза меньше по сравнению с существующей. Таким образом, предложенная технология восстановления культиваторной лапы предпочтительнее с технико-экономической точки зрения.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

Полученные результаты рекомендуется использовать предприятиями технического сервиса при выполнении технологических процессов восстановления и упрочнения деталей.

Использованные в работе расчетные подходы могут найти применение на предприятиях, проектирующих и изготавливающих почвообрабатывающую технику с целью повышения ее ресурса.

Предлагаемые технические решения рекомендуется использовать также при конструировании и модернизации технологического оборудования для термической и химико-термической обработки деталей.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Дальнейшие исследования и конструкторские разработки рационально направить:

- на расширение номенклатуры восстанавливаемых рабочих органов почвообрабатывающей и посевной техники;
- на разработку новых материалов для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственных машин и техники;
- на совершенствование и разработку установок для упрочнения деталей сельскохозяйственных машин и техники;
- на теоретическое моделирование при разработке и модернизации технологических процессов восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственных машин и техники.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах

*В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных
ВАК Минобрнауки РФ*

1. **Буйлов, В. Н.** Механизм процесса электролизного борирования / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 4. – С. 31–32.

2. **Буйлов, В. Н.** Экспериментально-теоретическое обоснование упрочнения рабочих органов культиваторов при ремонте / В. Н. Буйлов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 5. – С. 38–40.

3. **Буйлов, В. Н.** Шлак для упрочнения и восстановления деталей сельскохозяйственной техники / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 4. – С. 23–25.

4. **Буйлов, В. Н.** Применение электродной печи-ванны при восстановлении деталей / В. Н. Буйлов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 5. – С. 37–38.

5. **Буйлов, В. Н.** Разработка конструкции трехфазной электродной печи-ванны / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2007. – № 2. – С. 61–62.

6. **Буйлов, В. Н.** Влияние температуры электрода на толщину наносимых покрытий электроискровым способом / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Научное обозрение. – 2010. – № 6. – С. 34–38.

7. **Буйлов, В. Н.** Восстановление лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Сельский механизатор. – 2011. – № 4. – С. 38.

8. **Буйлов, В. Н.** Математическое моделирование тепломассообменных процессов при обработке деталей в электродной печи-ванне / В. Н. Буйлов, С. А. Пронин // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2011. – № 7. – С. 46–49.

9. **Буйлов, В. Н.** Увеличение толщины твердосплавных покрытий / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Сельский механизатор. – 2011. – № 11. – С. 26.

10. **Буйлов, В. Н.** Моделирование процесса электроискрового наращивания изношенных поверхностей / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2013. – № 8. – С. 47–50.

11. **Буйлов, В. Н.** Результаты исследований твердосплавных электроискровых покрытий / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко, С. А. Пронин // Аграрный научный журнал. – 2013. – № 12. – С. 38–42.

12. **Буйлов, В. Н.** Исследование массопереноса электрода при электроискровом упрочнении деталей / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Научное обозрение. – 2014. – № 3. – С. 98–102.

13. **Буйлов, В. Н.** Причины нарушения работоспособности рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, А. В. Русинов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 3. – С. 61–64.

14. **Буйлов, В. Н.** Расчетная оценка применения расплавов электролита при упрочнении восстановленных рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов / В. Н. Буйлов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 5. – С. 77–82.

15. **Буйлов, В. Н.** Расчетная оценка прогнозирования ресурса упрочненных при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов / В. Н. Буйлов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 70–74.

16. **Буйлов, В. Н.** Расчетное обоснование выделения катионов бора и натрия из расплавленной рабочей и нагревательной среды при упрочнении восстановленных деталей / В. Н. Буйлов, Ф. Я. Рудик, И. В. Люляков // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 4. – С. 70–74.

17. **Буйлов, В. Н.** Расчетная оценка влияния скорости конвекции расплавленной рабочей и нагревательной среды при упрочнении восстановленных деталей / В. Н. Буйлов, Ф. Я. Рудик, И. В. Люляков // Аграрный научный журнал. – 2021. – № 4. – С. 70–74.

В авторских свидетельствах и патентах

18. А. с. 1688981 СССР, МКИ⁵ В22 F 7/04. Способ получения износостойкого покрытия / В. А. Деев, **В. Н. Буйлов**, В. К. Петряков, Н. К. Бизик, В. Г. Медяник, Е. И. Сафонов, П. П. Ткаченко (СССР). – № 4731647 ; заявл. 16.08.89 ; опубл. 07.11.91, Бюл. № 41.

19. Пат. 2107601 Российская Федерация, МКП6 В 23 К 35/362. Флюс для электродуговой сварки / Деев В. А., Петряков В. К., **Буйлов В. Н.**, Богатырев С. А.; заявитель и патентообладатель НПЦ «Волгоагротехника». – № 96111652/02 ; заявл. 11.06.96 ; опубл. 27.03.98, Бюл. № 9.

20. Пат. 2114184 Российская Федерация, МКП6 С 21 D 1/34, В 23 К 35/362. Шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов / **Буйлов В. Н.**, Загородских Б. П., Синичкин В. П., Петряков В. К., Сафонов В. В., Богатырев С. А., Нестеров А. Л. ; заявители и патентообладатели В. Н. Буйлов, Б. П. Загородских, В. П. Синичкин, В. К. Петряков, В. В. Сафонов, С. А. Богатырев, А. Л. Нестеров. – № 97115191/02 ; заявл. 12.09.97 ; опубл. 27.06.98, Бюл. № 18.

21. Пат. 2139356 Российская Федерация, МКП6 С 21 D 1/44. Трехфазная электродная печь-ванна / **Буйлов В. Н.**, Богатырев С. А., Петряков В. К., Сафонов В. В., Морозов А. А. ; патентообладатели В. Н. Буйлов, С. А. Богатырев, В. К. Петряков, В. В. Сафонов, А. А. Морозов. – № 98122490/02 ; заявл. 15.12.98 ; опубл. 10.10.99, Бюл. № 28.

22. Пат. 2164963 Российская Федерация, МКП7 С 23 С 8/02. Способ бोरирования деталей / **Буйлов В. Н.**, Богатырев С. А. ; заявители и патентообладатели Буйлов В. Н., Богатырев С. А. – № 2000109616/02 ; заявл. 14.04.2000 ; опубл. 10.04.2001, Бюл. № 10.

23. Пат. 2325256 Российская Федерация, МПК7 В 23 Р 6/00. Способ восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин / **Буйлов В. Н.**, Люляков И. В., Волосевич Н. П., Бойков В. М., Пронин С. А. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». – № 2006109888/02 ; заявл. 10.10.2007 ; опубл. 27.05.2008, Бюл. № 15.

24. Пат. 2241586 Российская Федерация, МКП7 В 23 Р 6/00. Способ восстановления деталей почвообрабатывающих машин / **Буйлов В. Н.**, Люляков И. В. ; патентообладатели В. Н. Буйлов, И. В. Люляков. – № 2003127933/02 ; заявл. 16.09.2003 ; опубл. 10.12.2004, Бюл. № 34.

25. Пат. № 2392102(13) С1, РФ, В 23 Н 9/00. Способ восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин / **Буйлов В. Н.**, Люляков И. В., Еременко В. С. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». – № 2008142690/02 ; заявл. 27.10.2008 ; опубл. 20.06.2010, Бюл. № 17.

26. Пат. 2572116 Российская Федерация, МПК В 23 Р 6/00, А 01 В 15/04. Способ восстановления плужных лемехов / **Буйлов В. Н.**, Люляков И. В., Косачев Р. М. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н. И. Вавилова». – № 2014131672/02 ; заявл. 30.07.2014 ; опубл. 27.12.2015, Бюл. № 36.

В научных изданиях, включенных в базы Web of Science и Scopus

27. **Builov, V. N.** Investigation into the Process of Electrolysis Borating of Steel Parts / V. N. Builov, I. V. Lyulyakov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2018. – Vol. 54. – Issue 4. – P. 338–344.

28. **Buylov, V. N.** Forecasting of the Soil Processing Units Working Bodies Resource / V. N. Buylov, I. V. Lyulyakov, S. A. Makarov, A. V. Danilin, V. V. Chekmarev // 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 422 (2020) 012115 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/422/1/012115.

29. **Buylov, V. N.** Identifying Reasons for Failure of Soil Processing Units of Working Bodies / V. N. Buylov, I. V. Lyulyakov, A. V. Pavlov, A. V. Rusinov, G. D. Mezheritsky // 6th International Conference on Agriproducts Processing and Farming IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 422 (2020) 012116 IOP Publishing doi:10.1088/1755-1315/422/1/012116.

30. **Buylov, V. N.** Calculated Estimation of Influence of Convection Rate of Molten Working and Heating Medium during Hardening of Restored Parts / V. N. Buylov, F. Ya. Rudik, I. V. Lyulakov, A. V. Danilin, A. V. Pavlov // Journal of Physics : Conference Series this link is disabled, 2022, 2176(1), 012042.

31. **Buylov, V. N.** Calculated Substantiation of Isolation of Boron and Sodium Cations from Molten Working and Heating Medium during Hardening of Restored Parts / V. N. Buylov, F. Ya. Rudik, I. V. Lyulakov, S. A. Makarov, A. V. Pavlov // Journal of Physics: Conference Series this link is disabled, 2022, 2176(1), 012046.

В сборниках научных трудов, материалах конференций и семинаров

32. **Буйлов, В. Н.** Использование нагрева в жидких теплоносителях для наплавки, химико-термического и термического упрочнения / В. Н. Буйлов, В. П. Синичкин // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ : матер. Межгосуд. науч.-техн. семинара. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 1998. – Вып. 10. – С. 42–45.

33. **Буйлов, В. Н.** Оценка некоторых свойств жидкого теплоносителя / В. Н. Буйлов, В. П. Синичкин // Повышение эффективности использования и ресурса сельскохозяйственной техники. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 1999. – Ч. I. – С. 53–56.

34. **Буйлов, В. Н.** Технологические свойства шлака для наплавки и термоупрочнения / В. Н. Буйлов // Проблемы экологичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 1999. – Вып. 11. – С. 25–26.

35. **Буйлов, В. Н.** Конструкция печи-ванны для наплавки и термоупрочнения / В. Н. Буйлов // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 1999. – Вып. 11. – С. 37–38.

36. **Буйлов, В. Н.** Борирование наплавленных деталей / В. Н. Буйлов // Повышение надёжности сельскохозяйственной техники при эксплуатации и ремонте. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2001. – С. 48–52.

37. **Буйлов, В. Н.** Теоретические основы повышения долговечности деталей сельскохозяйственной техники / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2003. – С. 107–109.

38. **Буйлов, В. Н.** Электролизное борирование деталей при их восстановлении наплавкой / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Совершенствование технологии и организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2003. – С. 241–242.

39. **Буйлов, В. Н.** Структура и свойства материала ремонтной детали при восстановлении стрелчатых лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Народное хозяйство Западного Казахстана : состояние и перспективы развития : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уральск : Западно-Казахстанский аграрно-технический университет им. Жангир хана, 2004. – С. 308–309.

40. **Буйлов, В. Н.** Структурно-фазовый состав диффузионных покрытий при электролизном борировании сталей / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2005. – С. 78–81.

41. **Буйлов, В. Н.** Диффузионная кинетика процесса электролизного борирования / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения А. Ф. Ульянова. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2005. – С. 36–39.

42. **Буйлов, В. Н.** Диффузионная кинетика процесса упрочнения рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Защитные покрытия в машиностроении и приборостроении : матер. 2-й Всерос. науч.-практ. конф. – Пенза, Пенз. гос. ун-т, 2005. – С. 39–42.

43. **Буйлов, В. Н.** Теоретические основы кинетики диффузионных процессов при электролизном борировании / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2006. – С. 44–46.

44. **Буйлов, В. Н.** Способ восстановления стрелчатых лап / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию со дня рождения А. Г. Рыбалко. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2006. – С. 43–45.

45. **Буйлов, В. Н.** Упрочнение почворежущих элементов при их восстановлении / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2006. – С. 33–35.

46. **Буйлов, В. Н.** Экспериментально-теоретическое обоснование упрочнения режущих элементов рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2006. – С. 55–57.

47. **Буйлов, В. Н.** Совершенствование технологии ремонта и упрочнения лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Матер. конф., посвящ. 119-й годовщине со дня рожд. акад. Н. И. Вавилова. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2006. – С. 3–5.

48. **Буйлов, В. Н.** Экспериментально-теоретическое обоснование электролизного борирования режущей части стрелчатых лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания : матер. Межгосуд. науч.-техн. семинара. – Саратов : Саратов. гос. агр. ун-т, 2007. – Вып. 19 – С. 179–183.

49. **Буйлов, В. Н.** Совершенствование технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Проблемы экономичности и эксплуатации дви-

гателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2009. – С. 34–37.

50. **Буйлов, В. Н.** Эксплуатационные испытания лап культиваторов, восстановленных по новой технологии / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рожд. проф. Вадисова Д. Г. / под ред. В. В. Сафонова. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2009. – С. 20–24.

51. **Буйлов, В. Н.** Влияние температуры электрода на толщину получаемого покрытия при электроискровом легировании / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию проф. Дубинина В. Ф. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2010. – С. 24–26.

52. **Буйлов, В. Н.** Повышение эффективности технологического процесса упрочнения лезвий рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко, Р. М. Косачев // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Межгос. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2012. – Вып. 25. – С. 30–33.

53. **Буйлов, В. Н.** Ресурсосберегающая технология восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко, Р. М. Косачев // Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники: матер. Межгос. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова. – Саратов : Сарат. гос. агр. ун-т, 2013. – Вып. 26. – С. 21–24.

54. **Буйлов, В. Н.** Разработка технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, А. А. Жиздюк // Наука и инновации в XXI веке : актуальные вопросы, достижения и тенденции развития : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию факультета механизации сельского хозяйства. – Душанбе : Таджикский аграр. ун-т им. Ш. Шотемур, 2017. – С. 73–75.

55. **Буйлов, В. Н.** Технология восстановления рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, А. А. Жиздюк // Наука и инновации в XXI веке : актуальные вопросы, достижения и тенденции развития : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию факультета механизации сельского хозяйства. – Душанбе : Таджикский аграр. ун-т им. Ш. Шотемур, 2017. – С. 78–79.

56. **Буйлов, В. Н.** К вопросу об условиях работы и изнашивания стрельчатых лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко, С. А. Пронин // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : сб. науч. статей ; под общ. ред. А. Т. Лебедева. – Ставрополь : АГРУС Ставропольского гос. агр. ун-та, 2017. – С. 3–5.

В монографии

57. **Буйлов, В. Н.** Ремонт рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов : [монография] / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков. – Саратов, 2007. – 134 с.

