

**Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный университет
генетики, биотехнологии и инженерии им. Н.И. Вавилова»**

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
д-р техн. наук, профессор
Рудик Ф. Я.

Саратов 2024

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|----|
| ВВЕДЕНИЕ | 6 |
| 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ | 16 |
| 1.1 Анализ состояния вопроса | 16 |
| Конструктивная характеристика лапы культиватора | 22 |
| 1.2 Анализ условий работы и изнашивания лап культиваторов | 26 |
| 1.3 Анализ способов восстановления и упрочнения | 32 |
| 1.3.1 Способы восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники | 33 |
| Дуговые и газотермические способы сварки и наплавки | 33 |
| Плазменная, микроплазменная, лазерная и электроннолучевая сварка и наплавка | 35 |
| Электроконтактная и индукционная наплавки | 37 |
| Наплавка с использованием высокотемпературного синтеза | 38 |
| Наплавка намораживанием | 39 |
| Газопламенная наплавка | 40 |
| Карбовибродуговой способ наплавки | 40 |
| Напыление | 41 |
| Электролитические покрытия | 44 |
| Пластическая деформация | 44 |
| Применение деталей, компенсирующих износ | 45 |
| Химико-термическое упрочнение | 48 |
| Электролизное борирование в расплавах солей | 54 |
| 1.4 Анализ применяемого оборудования | 57 |
| 1.5 Анализ применяемых материалов | 62 |
| 1.6 Постановка проблемы | 65 |
| 1.7 Выводы по главе | 66 |
| 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ | 68 |
| 2.1 Теоретическая оценка вариативного прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники..... | 69 |
| 2.2 Исследование диффузионных процессов насыщения поверхности восстанавливаемых деталей в расплаве электролита | 75 |

| | |
|--|------------|
| Химико-физическое исследование кинетики процесса электролизного борирования | 84 |
| 2.3 Исследование процесса электролизного борирования при упрочнении восстанавливаемых деталей | 93 |
| 2.4 Исследование процесса нагрева восстанавливаемых деталей при наплавке металлопорошка в жидком теплоносителе | 102 |
| Расчет толщины наплавленного слоя | 105 |
| 2.5 Исследование тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне | 106 |
| 2.6 Выводы по главе | 124 |
| 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ | 126 |
| 3.1 Методика исследования свойств теплоносителя | 129 |
| 3.2 Методика исследования процесса наплавки | 131 |
| 3.3 Методика исследования характера диффузии элементов | 134 |
| 3.4 Методика исследования структуры и механических свойств упрочняемых деталей | 135 |
| Методика исследования структуры наплавленных деталей | 135 |
| Методика исследования структуры борированных деталей | 136 |
| Методика исследования прочности сцепления наплавленного покрытия | 137 |
| Методика определения пористости покрытия | 138 |
| 3.5 Методика исследования механизма процесса электролизного борирования | 139 |
| 3.6 Методика проведения рентгенофазового анализа упрочненного слоя | 141 |
| 3.7 Методика масс-спектрального анализа упрочненного слоя | 142 |
| 3.8 Методика исследования хрупкости | 143 |
| 3.9 Методика лабораторных испытаний | 144 |
| 3.10 Методика исследования коррозионной стойкости | 146 |
| 3.11 Методика полевых ресурсных испытаний | 146 |
| 3.12 Обработка экспериментальных данных и оценка их точности | 151 |
| 4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ | 152 |
| 4.1 Результаты исследования процесса наплавки | 152 |

| | |
|--|------------|
| Кинетика температуры расплава теплоносителя в печи-ванне | 152 |
| Температура плавления металлопорошка | 153 |
| Нагрев детали для наплавки | 154 |
| Определение деформации наплавляемой детали | 155 |
| 4.2 Влияние режимов наплавки на структуру покрытия и подложки | 155 |
| 4.3 Исследование взаимодиффузии компонентов подложки и покрытия | 160 |
| 4.4 Прочность сцепления покрытия | 164 |
| 4.5 Обоснование механизм процесса электролизного борирования | 165 |
| 4.6 Результат исследования микроструктуры борированного слоя | 168 |
| 4.7 Результаты исследования микротвердости борированного слоя | 170 |
| 4.8 Результаты рентгенофазового анализа упрочненного слоя | 172 |
| 4.9 Результаты масс-спектрального анализа | 174 |
| 4.10 Хрупкость диффузионных слоев | 177 |
| 4.11 Результаты лабораторных испытаний на изнашивание | 179 |
| 4.12 Коррозионная стойкость диффузионных слоев | 181 |
| 4.13 Выводы по главе | 183 |
| 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ | 185 |
| 5.1 Обоснование технологических особенностей используемого теплоносителя и его компонентов | 185 |
| Анализ технологических особенностей теплоносителя | 185 |
| 5.1.1 Исследование технологических свойств жидкого теплоносителя при его взаимодействии с деталью | 187 |
| 5.1.2 Исследование процесса потери массы теплоносителя | 188 |
| 5.1.3 Исследование стабильности состава предлагаемого теплоносителя | 189 |
| 5.2 Технологические особенности процесса наплавки на деталь металлопорошка в жидком теплоносителе | 190 |
| 5.2.1 Определение смачивающей способности расплавленного порошка | 194 |
| 5.2.2 Исследование изменения химического состава наплавляемого материала | 195 |

| | |
|--|-----|
| 5.2.3 Исследование толщины слоя, наплавленного металлопорошком | 195 |
| 5.3 Математическая модель и алгоритм проектирования конструкции установки для электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе | 196 |
| 5.4 Особенности технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов | 202 |
| 5.5 Результаты эксплуатационных испытаний восстановленных стрелчатых лап культиваторов | 207 |
| 5.6 Техничко-экономическая эффективность технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов | 212 |
| 5.7 Выводы по главе | 218 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 221 |
| РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ | 224 |
| ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ | 224 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | 225 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 256 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А | 257 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б | 258 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В | 259 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г | 266 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д | 293 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Е | 313 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Ж | 325 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ З | 329 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ И | 389 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ К | 433 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Л | 454 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ М | 455 |

ВВЕДЕНИЕ

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 работы при возделывании, например, зерновых культур составляют более 40 % работ от общего объема. 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 разработанности 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. Величина, Ю. В. Волкова, М. А. Григорьева, В. И. Казарцева, В. Н. Кащеева, 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. Хруще-

ва 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. Бурумкулов, 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. Какуевицкий, 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 упрочнения 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, определении 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 предельного 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 термодинамических 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 доложены и одобрены:

- на научно-практических конференциях Саратовского ГАУ (г. Саратов, 1996–2021 гг.);
- на Международном постоянно действующем научно-техническом семинаре «Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники» (Саратовский ГАУ, г. Саратов, 1996–2021 гг.);
- на Международной научно-практической конференции «Совершенствование технологии и организации обеспечения работоспособности машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов» (Саратовский ГТУ, г. Саратов, 2003 г.);
- на Международной научно-практической конференции «Народное хозяйство Западного Казахстана: состояние и перспективы развития» (Западно-Казахстанский АТУ, г. Уральск, 2004 г.);
- на Международных научно-практических конференциях Саратовского ГАУ, посвященных: 100-летию со дня рождения А. Ф. Ульянова (г. Саратов, 2005 г.); 75-летию со дня рождения В. Г. Кобы (г. Саратов, 2006 г.); 70-летию со дня рождения А. Г. Рыбалко (г. Саратов, 2006 г.); 100-летию со дня рождения профессора Д. Г. Вадивасова (г. Саратов, 2009 г.); 70-летию профессора В. Ф. Дубинина (г. Саратов, 2010 г.); 75-летию со дня рождения профессора А. Г. Рыбалко (г. Саратов, 2011 г.); 100-летию со дня рождения Г. П. Шаронова (г. Саратов, 2012 г.);
- на 2-й Всероссийской научно-практической конференции «Защитные покрытия в машиностроении и приборостроении» (Пензенский ГУ, г. Пенза, 2005 г.);
- на научно-практической конференции, посвященной 119-й годовщине со дня рождения академика Николая Ивановича Вавилова (Саратовский ГАУ, г. Саратов, 2006 г.);
- на научно-практической конференции «Научное обеспечение АПК» 2-й специализированной агропромышленной выставки «САРАТОВ-АГРО 2011» (Саратовский ГАУ, г. Саратов, 2011 г.);
- на XI-й Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию факультета механизации сельского хозяйства, в рамках XVII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2015» (г. Ставрополь, 2015 г.);

- на Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, достижения и тенденции развития», посвященной 70-летию факультета механизации сельского хозяйства (Таджикский АУ, г. Душанбе, 2017 г.);
- на Национальной научно-практической конференции «Актуальные проблемы разработки, эксплуатации и технического сервиса машин в агропромышленном комплексе», посвященной 40-летию Белгородского ГАУ (Белгородский ГАУ, г. Белгород, 2019 г.);
- на заседании секции по механизации сельского хозяйства научно-технического Совета министерства сельского хозяйства Саратовской области (22 апреля 2022 года);
- на совещании Министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области (17 мая 2022 года).

По результатам исследований опубликовано 87 работ, в т. ч., 17 статей в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК, 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.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, рекомендаций производству, перспектив дальнейшей 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.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

1.1 Анализ состояния вопроса

Надежность сельскохозяйственных машин и техники определяет эффективность их использования. Она закладывается на этапах проектирования и производства. Если при этом обеспечиваются высокие параметры, то сельскохозяйственная техника способна длительно выполнять агротехнологические операции по установленным режимам в соответствующих природно-климатических условиях при соблюдении требований эксплуатационно-ремонтной документации [2, 8, 43–49].

Известно, что надежность сельскохозяйственных машин и техники является комплексным свойством, включающим в себя долговечность, безотказность, ремонтпригодность и сохраняемость. Все приведенные свойства, за исключением сохраняемости, проявляются в процессе эксплуатации.

Основным свойством, полностью применимым к сельскохозяйственной технике, является долговечность. Согласно определению, долговечность характеризует работу техники в течение всего срока эксплуатации с учетом того, что продолжительная работа неосуществима без выполнения необходимых технических обслуживаний и ремонтов. Это свойство оценивается суммарной наработкой техники до предельного состояния. Производительное расходование как доремонтного, так и межремонтного ресурса техники является важной задачей сельскохозяйственного производства при использовании по назначению [12, 41, 45, 51, 57, 58]. Величина ресурсов сельскохозяйственной техники зависит от ресурсов тех сопряжений и деталей, отказ которых влечет за собой необходимость восстановления их работоспособности, а также ремонта техники. Затраты на ремонтно-восстановительные мероприятия должны быть оптимальны в смысле себестоимости принятой единицы наработки техники в течение всего межремонтного ресурса [12, 13, 16, 19]. Простой сельскохозяйственной техники из-за отказов в период выполнения агротехнологических операций могут повлечь за собой нарушение оптимальных сроков проведения полевых работ, что ведет к возможному снижению урожайности зерновых культур до 30 % [4, 19–21].

Также следует отметить, что в связи с постоянно возрастающими экологическими требованиями при использовании природных ресурсов большое значение приобретает развитие технологий многократного использования деталей машин и существенного увеличения износостойкости их рабочих поверхностей и, соответственно, их ресурса [37–49].

Состояние сервисного обслуживания в стране в настоящее время таково, что техническая готовность парка машин и техники не превышает 70–80 % [4, 7–10]. Из-за недостаточной обеспеченности техникой аграрных хозяйств сезонная нагрузка на имеющийся ее парк может увеличиваться до 4–5 раз с соответствующим ухудшением технологии обработки почвы [8, 11, 15, 16].

Повышение интенсивности эксплуатации как новой, так и отремонтированной сельскохозяйственной техники в современных условиях неизбежно ведет к необходимости разработки высокоэффективных технологических способов изготовления и восстановления ресурсопределяющих деталей, увеличивающих их долговечность [17–21] и, соответственно, повышающих качество выполняемых работ.

В связи с этим повышение надежности сельскохозяйственных машин и техники при ремонте путем увеличения их межремонтного ресурса будет способствовать снижению количества ремонтов и повышению эффективности сельскохозяйственного производства.

При оптимизации затрат на ремонт сельскохозяйственной техники необходимо учитывать расходы на запасные части. В себестоимости ремонта затраты на запасные части составляют около 50–70 % [7–21]. При этом на долю восстановленных деталей в этих расходах приходится не более 30–50 %.

Основным сдерживающим фактором увеличения номенклатуры восстанавливаемых деталей при ремонте сельскохозяйственных машин и техники является их низкая долговечность. Повышение долговечности и оптимизация расходов могут быть достигнуты путем разработки и применения эффективных современных научно обоснованных способов восстановления работоспособности ресурсопределяющих деталей, позволяющих довести их послеремонтный ресурс до ресурса новых и даже превзойти его [2, 10–21, 37–49, 51, 53, 58]. Это позволит повысить

обеспеченность техникой сельскохозяйственное производство и, несомненно, снизить расходы на производимые работы [3, 5–7, 11].

Основной причиной выхода из строя машин и техники является результат процесса изнашивания – износ их основных деталей, что подтверждается, например, следующим высказыванием: «... главной причиной выхода из строя машин является не их поломка, а износ подвижных сопряжений и рабочих органов под влиянием трения» [29].

Выявлению закономерностей процессов трения и изнашивания деталей машин посвящены научные работы 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. Пронилова, А. Ш. Рабиновича, М. М. Севернева, А. И. Селиванова, М. М. Тененбаума, В. Н. Ткачева, К. В. Фролова, М. М. Хрущева и других ученых.

Анализ работ этих исследователей показывает, что ведущим видом изнашивания деталей сельскохозяйственной техники является абразивный.

Процессы восстановления работоспособности изношенных деталей, как правило, включают в себя операции нанесения слоя материала на восстанавливаемые поверхности, например, валов (коленчатых, ступенчатых, шлицевых и др.), осей и посадочных мест корпусов, когда величина износа измеряется десятными долями миллиметра, с целью получения номинальных или ремонтных их размеров после механической обработки. Эти процессы исследовали такие известные ученые, как Б. М. Аскинази, Г. Г. Баловнев, В. В. Березников, С. А. Богатырев, Ф. Х. Бурумкулов, 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. Какуевицкий, 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. Это, как правило, относится к деталям мобильной сельскохозяйственной техники, например, ее двигателей, топливной и гидравлической аппаратуры, коробок передач и ведущих мостов.

Долговечность мобильной сельскохозяйственной техники в 80 % случаев определяется ресурсом двигателя, а долговечность двигателя – ресурсами таких деталей, как коленчатый вал, детали цилиндропоршневой группы и прецизионные детали дизельной топливной аппаратуры. Известно, что эти детали работают до замены или восстановления 2000–6000 мото-ч (рисунок 1.1) [15, 18–21, 37, 45, 47, 48, 57, 58].

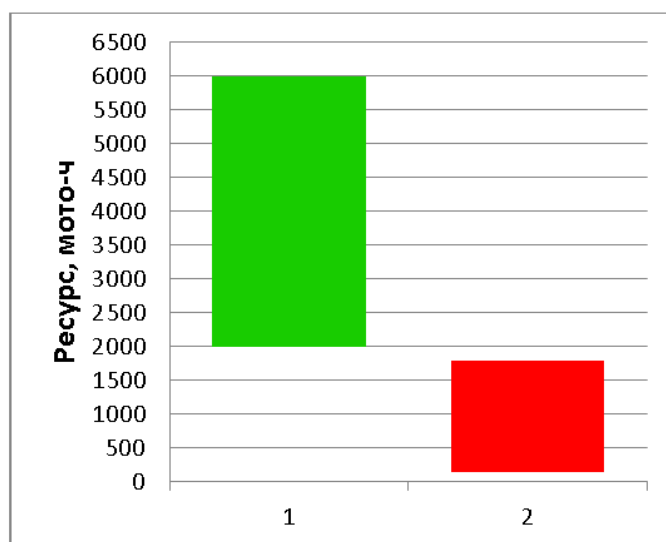


Рисунок 1.1 – Долговечность ресурсопределяющих деталей:
 1 – мобильной сельскохозяйственной техники (коленчатые валы, прецизионные детали дизельной топливной аппаратуры и детали цилиндропоршневой группы);
 2 – прицепной и навесной техники (дисковые рабочие органы лушильников, борон и сеялок, лемеха плугов, лапы сеялок и культиваторов)

Мобильные машины в сельскохозяйственной отрасли (за исключением самоходных комбайнов) применяют с различной прицепной и навесной техникой (плугами, культиваторами, сеялками и др.). Они выполняют при возделывании, например, зерновых культур более 40 % работ от общего их объема. К этим работам относятся следующие их виды: вспашка, культивация, боронование, посев, дискование и прикатывание [22–24]. При этом величина износа их ресурсопределяющих рабочих органов достигает нескольких миллиметров, претерпевает из-

менения и форма деталей. Такие величины износов рабочих поверхностей деталей меняют их геометрическую форму, размеры, шероховатость поверхности, а также увеличивают тяговое сопротивление техники и энергоемкость выполняемых операций при снижении показателей качества работ. Однако вышедшие из строя детали могут обладать необходимым запасом прочности и достаточными размерами, позволяющими их использовать вторично путем восстановления работоспособного состояния [27–36, 49–56, 59–71].

Долговечность эксплуатации прицепной и навесной техники для мобильных сельскохозяйственных машин определяется ресурсом их рабочих органов, который в зависимости от условий работы, вида выполняемых операций и конструктивно-технологических характеристик этих деталей составляет 150–1800 мото-ч (см. рисунок 1.1) [33, 34, 51, 69].

Наибольшей долговечностью (1000–1800 мото-ч) обладают дисковые рабочие органы луцильников, борон и сеялок (рисунок 1.2). Их ремонт осуществляют проточкой с тыльной стороны [18, 47]. Наименьшая долговечность (150–350 мото-ч) наблюдается у рабочих органов культиваторов, стерневых сеялок и плугов (см. рисунок 1.2) [33, 34, 59, 69–71].

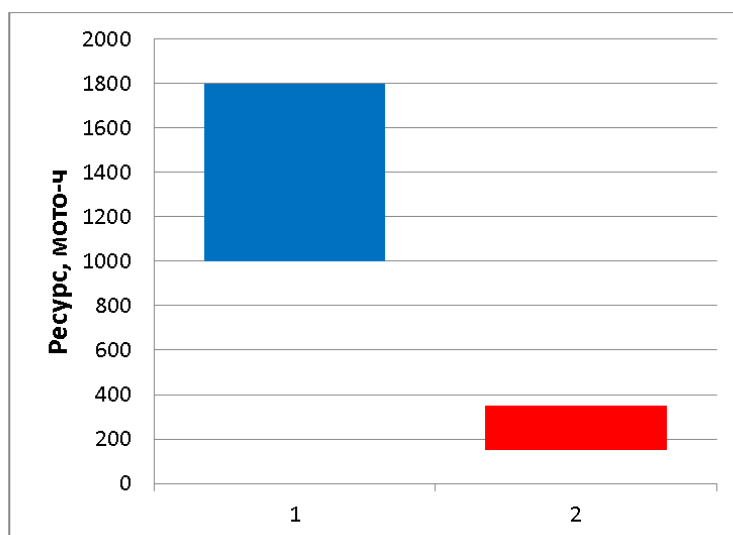


Рисунок 1.2 – Долговечность ресурсопределяющих деталей прицепной и навесной сельскохозяйственной техники:
1 – дисковых рабочих органов луцильников, борон и сеялок;
2 – лемехов плугов, лап сеялок и культиваторов

Ресурс рабочих органов культиваторов, стерневых сеялок и плугов неодинаковый. Наиболее низкая долговечность (24...32 га) характерна для рабочих органов культиваторов (рисунок 1.3) [59–66, 69–71].

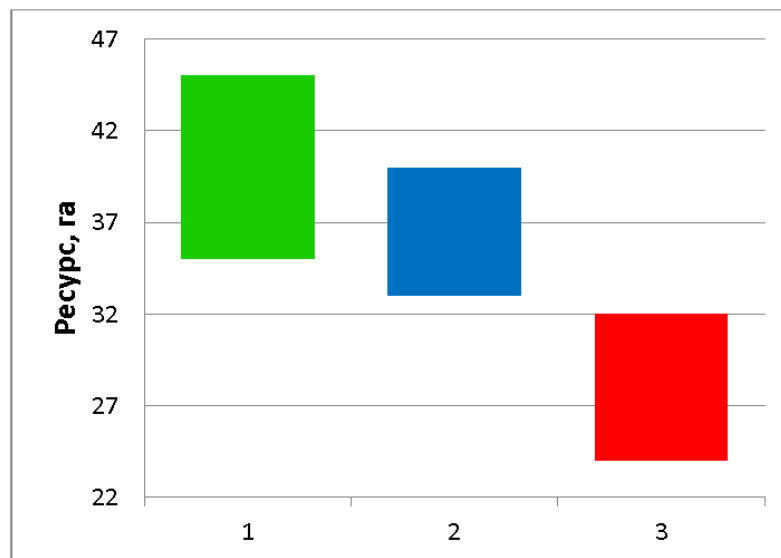


Рисунок 1.3 – Долговечность: 1 – лемехов плугов; 2 – лап сеялок; 3 – лап культиваторов

Таким образом, сельскохозяйственная техника больше времени простаивает 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 непроизводительные потери рабочего времени и финансовые расходы.

Разработанные способы восстановления работоспособности деталей машин приведенных выше авторов напрямую применить для восстановления почвообрабатывающих рабочих органов не всегда представляется возможным из-за больших величин износа, формы изделий, повышенных требований к долговечности в тяжелых условиях эксплуатации. Поэтому научно-технические задачи по разработке новых технологий восстановления работоспособности и упрочнения рабочих поверхностей таких деталей требуют дальнейшего научного изучения. Ввиду того, что условия механического нагружения и воздействия абразивной среды в процес-

се эксплуатации рабочих органов плугов, стерневых сеялок и культиваторов аналогичны, считаем возможным проведение научных исследований на одном типе рабочего органа и разработку на базе этих исследований технологических процессов восстановления и упрочнения. При этом необходимо учитывать, что долговечность одних рабочих органов минимальна по сравнению с другими. Исходя из анализа условий работы, таким изделием принят рабочий орган культиватора (рисунок 1.4), поэтому выбор был остановлен на его дальнейшем детальном изучении.

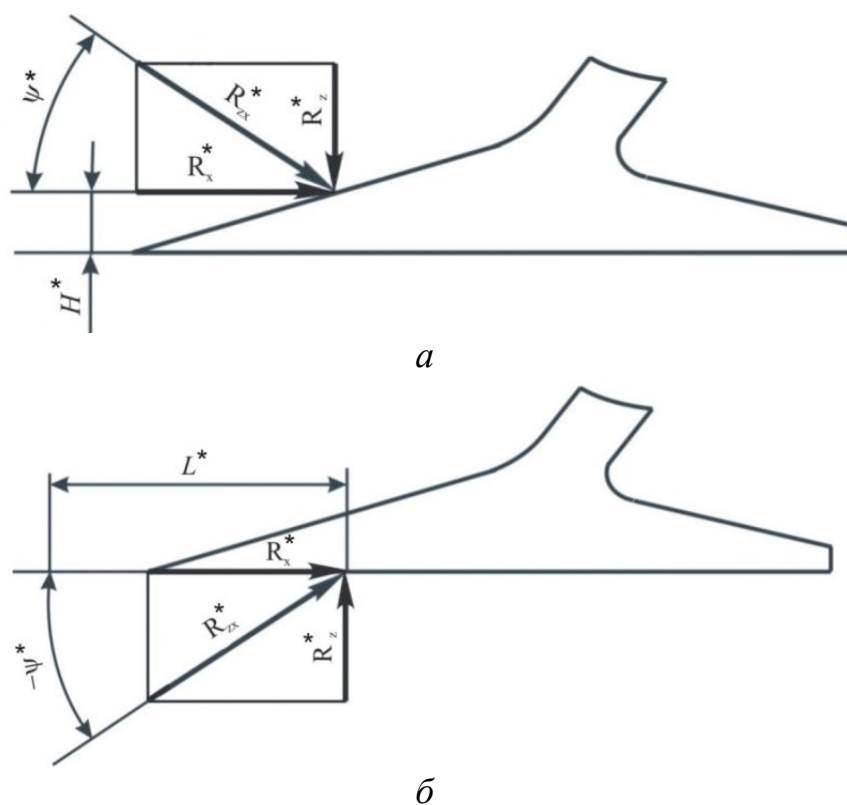


Рисунок 1.4 – Рабочий орган культиватора с действующими усилиями:
 а, б – реакция почвы R_{Σ}^* и ее составляющие R_x^* , R_z^* соответственно в периоды
 нормальной и аварийной эксплуатации

Конструктивная характеристика лапы культиватора

Культивации подвергают как всю поверхность поля, так и междурядья пропашных культур с целью разрыхлить осевший и уплотнившийся за зиму поверхностный слой почвы, что позволяет улучшить теплообмен и уничтожить ранние всходы сорняков. Эту операцию повторяют 2–3 раза. При этом первую обработку проводят на глубину 10...12 см, а последующие – на 6...8 см [23–25, 73].

Эту операцию осуществляют прицепной и навесной техникой, которая делится на следующие типы: паровые; пропашные; универсальные культиваторы и растениепитатели. Их оснащают рабочими органами следующих типов: лапы, окучники, подкормочные ножи и игольчатые диски (рисунок 1.5) [22, 72–76].

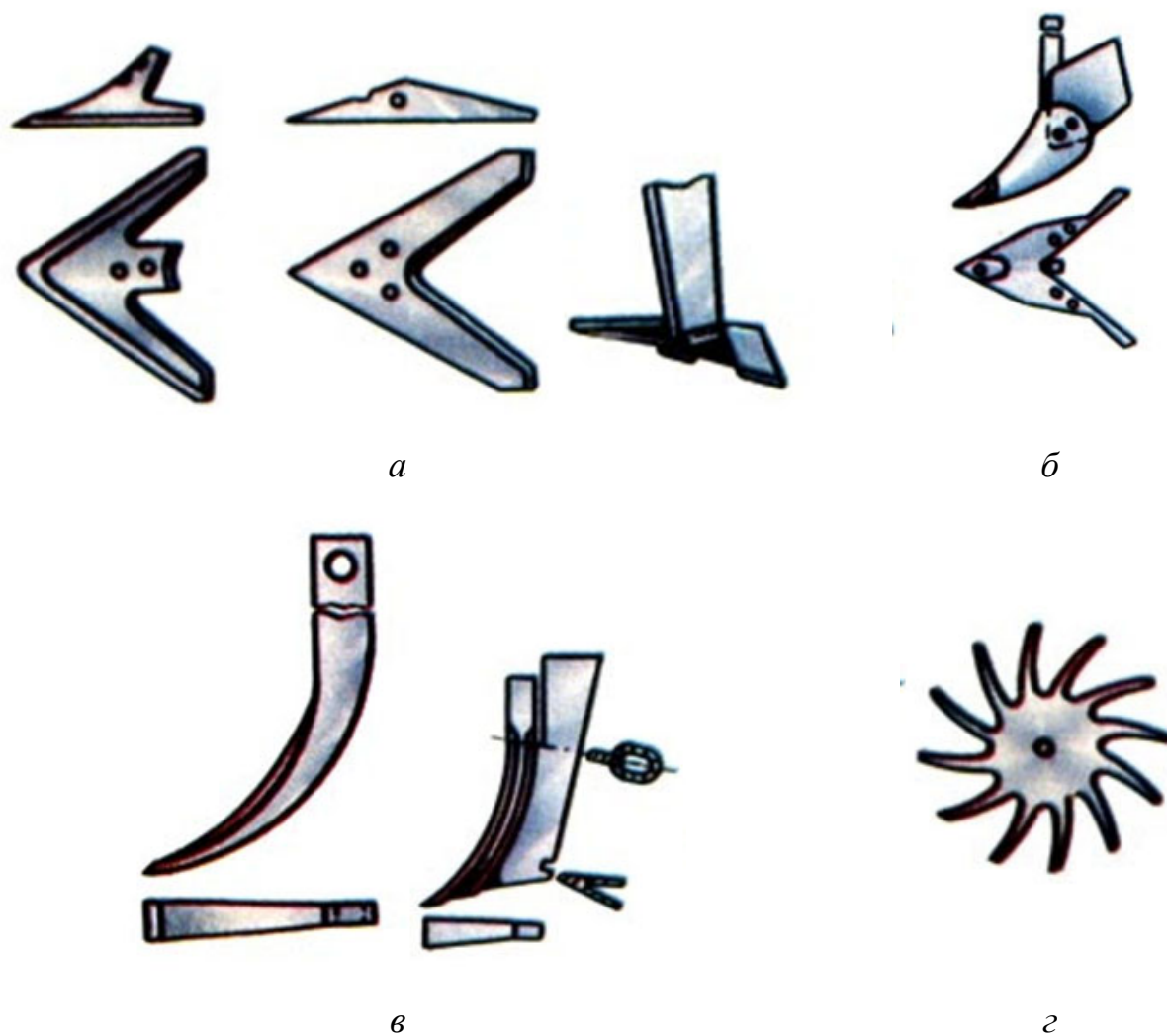


Рисунок 1.5 – Рабочие органы культиватора: *а* – лапы; *б* – окучники; *в* – подкормочные ножи; *г* – игольчатые диски

До 90 % сплошной и междурядной обработки почвы проводят культиваторами, укомплектованными такими рабочими органами, как стрельчатые лапы (рисунок 1.6) с шириной захвата 150... 430 мм [23, 73, 76]. С их помощью рыхлят почву, подрезают сорняки и осуществляются букетировку. Стрельчатыми лапами комплектуют следующие модели культиваторов и сеялок: КП-4М; КРНВ-5,6-02; КРНВ-5,6-04; КПН-4Г; КПГ-4 и КПС-4 (рисунок 1.7) [23, 73, 76].

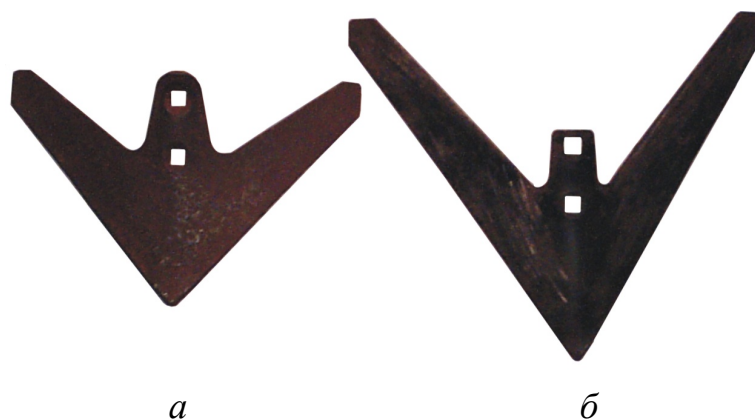


Рисунок 1.6 – Культиваторные лапы с шириной захвата: *а* – 270 мм; *б* – 330 мм



Рисунок 1.7 – Культиватор КПС-4

Стрельчатая лапа культиватора состоит из носовой части, двух крыльев и хвостовика [72–77].

Величина угла раствора обеспечивает скользящее резание при подрезании сорняков [72–77]. Величина угла крошения определяет степень рыхления почвы и тип стрельчатой лапы (плоскорезные – $12^{\circ}\dots 18^{\circ}$, универсальные – $25^{\circ}\dots 30^{\circ}$). Ширина крыла лапы, как правило, уменьшается к его концу на 35–50 % [72–77]. Толщина несущей части лапы, обеспечивающей прочность и жесткость конструк-

ции, определяется ее размерами, механическими и эксплуатационными свойствами стали, а также условиями будущей эксплуатации [75].

Заточка лезвия может быть верхней, нижней и комбинированной [72–77]. Качественное срезание сорняков происходит при величине радиуса режущей кромки лезвия после заточки не более 0,3 мм, а угол заострения должен быть меньше $12^\circ \dots 15^\circ$ [72–77]. При этом устойчивость хода лапы по глубине борозды обеспечивается величиной заднего угла резания ($\geq 10^\circ$).

Стрельчатые лапы культиваторов изготавливают в основном из марганцовистой углеродистой стали марки 65Г, обладающей высокими механическими и служебными свойствами [75–79].

В технологический процесс изготовления лап входят следующие операции [75–77]: заготовительная; фрезерная; пробой отверстий; штамповочная; заточная; закалочная (температура нагрева $810 \dots 830^\circ\text{C}$) и отпуск (температура нагрева $450 \dots 480^\circ\text{C}$).

Термическое упрочнение режущей части (ширина $25 \dots 40$ мм) монометаллических лап культиваторов проводят до твердости HRC44...HRC54, а твердость остальной части лапы не превышает HRC44 [77].

С целью повышения ресурса стрельчатых лап культиваторов был разработан способ изготовления двухслойных лезвий путем наплавки на основной металл с тыльной стороны износостойкого сплава (например, сормайта) толщиной $0,3 \dots 0,5$ мм [75–81].

Самозатачивание двухслойного лезвия происходит в процессе эксплуатации стрельчатой лапы только в том случае, когда твердость наплавленного слоя превышает твердость металла основы в $2,5 \dots 5,0$ раз, а его толщина составляет $0,3 \dots 0,5$ мм. Металл основы изнашивается интенсивнее и из-под него постепенно выступает наплавленный слой. Радиус режущей части лезвия при этом равняется половине толщины наплавленного слоя [46, 59, 64, 75, 81].

Известны исследования по созданию рабочих органов почвообрабатывающей техники из двухслойного (первый слой – сталь 65Г, второй – сталь Х6Ф1) и вол-

нистого прокатов [81, 82]. Применение таких видов проката оказалось нецелесообразным из-за сложности производства, а также из-за склонности материала к расслоению при выполнении гибочных и термических операций.

Техническое состояние и долговечность рабочих органов культиваторов зависят от их упрочнения при восстановлении и изготовлении [28, 49–51, 60, 75, 81–83].

1.2 Анализ условий работы и изнашивания лап культиваторов

Движущийся в почве рабочий орган воздействует на нее усилиями направленными нормально и тангенциально. Под их действием сначала происходит уплотнение почвы с последующим ее скалыванием, а затем образующиеся комки перемещаются по рабочей поверхности лапы [33, 74, 75]. Возникающие при этом реакции со стороны почвы вызывают давления, оказываемые на рабочий орган. Величина этих давлений зависит от геометрических параметров и скорости перемещения лапы, а также от механических свойств и состава почвы [33, 69, 70, 75]. При этом давление на оба крыла стрельчатой лапы в симметрично расположенных точках одинаково [33, 34, 69–71, 74, 75]. Давление почвы на носок лапы при обработке суглинистой и глинистой почв примерно в 3–5 раз больше, чем на среднюю часть крыла, и в 2–3 раза больше, чем на конце крыла [33, 34, 63–65, 70, 84–87]. У носка лапы происходит отделение подрезаемого пласта, а у пятки – отрыв его от основной массы почвы в вертикальной плоскости. Давление почвы, действующее на носок лапы, выше давления на середину крыла, поэтому величина его износа в 2,5 раза больше [33, 34, 49, 62, 63 75]. Потеря работоспособного состояния наблюдается после наработки 26 га [33, 34, 49].

Рабочие органы культиваторов в процессе эксплуатации перемещаются в почве по следам движителей тракторов и опорных колес культиватора, а также в первом или втором ряду вне следов. Физико-механические свойства почвы изменяются по следам прохождения движителей трактора и опорных колес почвообрабатывающей техники, выполняющей агротехнологические операции. Движители тракторов и опорные колеса почвообрабатывающей техники оставляют на суглинистой

почве следы глубиной 5...10 см, колесные движители – 8...10 см, гусеничные – 5...6 см, опорные колеса – 6...9 см. Твердость почвы на этом участке (по следам) по сравнению с соседними участками увеличивается соответственно в 5,0; 4,0 и 2,5 раза. Объясняется такое изменение повышенными механическими напряжениями, упрочняющими слой почвы по следам движителей [23, 72, 75, 88–98]. Это ведет к тому, что на почве после прохода движителей трактора К-701 плотность увеличивается на 49 %, а твердость – в 2,6 раза [75, 90–94]. При этом больше деформируются верхние горизонты (глубиной до 20 см), и не только вертикально вниз, но и в стороны. Зона деформации ограничивается наклонными плоскостями, образующими угол 45° с горизонтом. Из этих зон высокого давления в зоны меньшего давления выжимается вода, т. е. почва становится более сухой [75, 88, 95].

Наиболее вероятной причиной изнашивания рабочего органа в процессе обработки почвы является многократная деформация микрообъемов металла под действием абразивных частиц почвы (размером больше 0,001 мм). При этом образуются царапины на рабочей поверхности, а интенсивность этого процесса возрастает с увеличением количества контактов с абразивными частицами почвы в единицу времени и степени их закрепленности [27, 28, 33, 50, 61, 64–66, 68, 81]. Если же при работе режущая часть лапы встречается с каменистыми включениями, то неизбежно происходит пластическая деформация и даже разрушение микрообъемов металла из-за мгновенного возрастания механического напряжения (больше предела прочности) и температуры в зоне контакта. Это приводит к ускоренному (за 2–3 ч) наступлению предельного состояния [75].

Известно, что величина абразивного износа рабочей поверхности пропорциональна нормальному давлению на неё [27–29, 33–36, 59, 63, 70, 84–87]. Повышение плотности и твердости почвы интенсифицирует процесс абразивного изнашивания рабочих органов почвообрабатывающей техники, так как это определяет рост значения механического давления почвенной массы [33–36, 46, 50, 64, 81, 88].

Ресурс лапы определяется износостойкостью её рабочих поверхностей и условиями эксплуатации [52–55, 60–66, 69, 70, 84, 85]. Культивация сухой суглинистой почвы в 3–6 раз сокращает ресурс лапы по сравнению обработкой той же почвы, но

оптимальной (в агротехническом смысле) влажности, поскольку твердость более сухой почвы больше, соответственно степень закрепленности абразивных частиц в ней на момент их взаимодействия с поверхностью детали выше [27, 50, 75].

Твердость глинистых и суглинистых почв при влажности 4,5 % составляет 4...5 МПа. Вследствие этого на поверхности образуется достаточно прочная корка, разрушение которой требует дополнительных усилий, что интенсифицирует изнашивание по ширине лезвия [33]. При обработке таких почв ресурс лап культиваторов с эффектом самозатачивания в 3–5 раз превышает ресурс лап без этого эффекта [75].

Характер и величина износа лапы при одинаковой наработке (26 га) зависит от ее расположения на раме культиватора (рисунок 1.8) [26, 46, 64, 81].

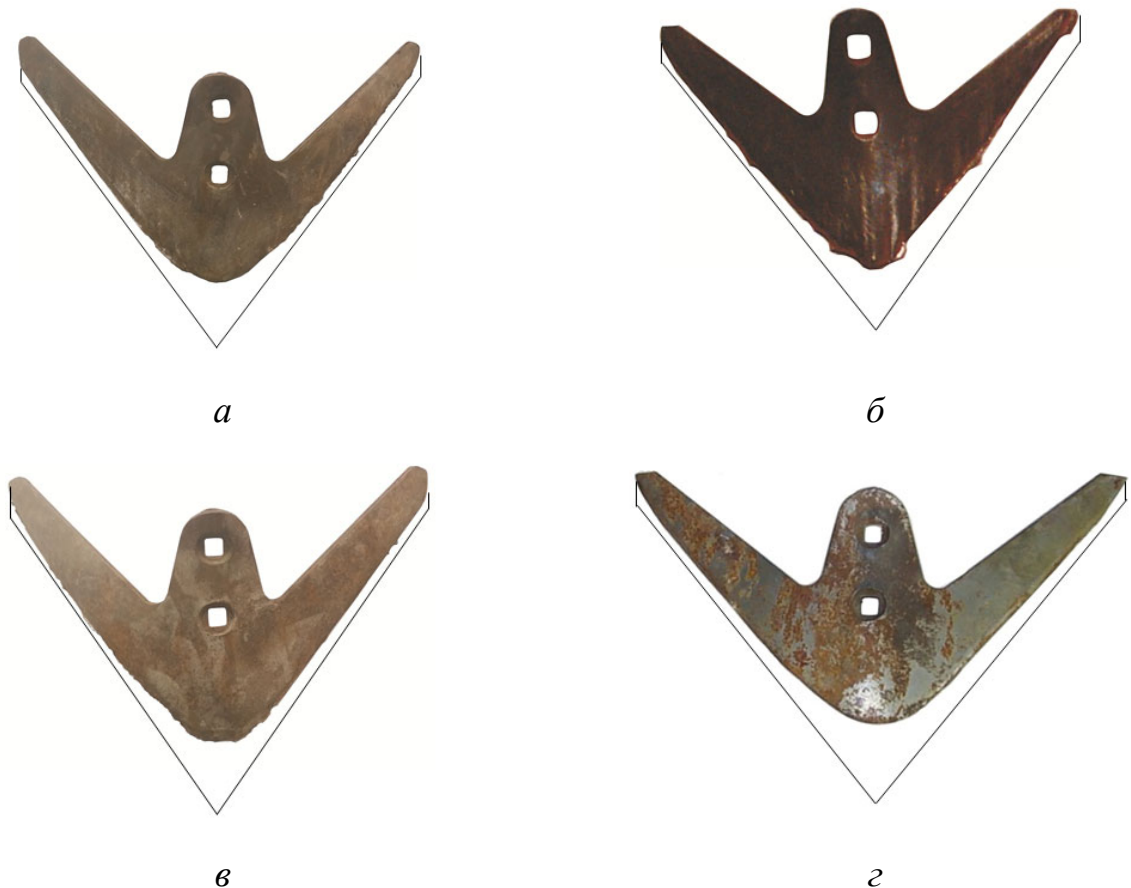


Рисунок 1.8 – Износ стрелчатых культиваторных лап после обработки 26 га суглинистой почвы: *а* – лапа была расположена в первом ряду вне следов движителя трактора; *б* – в первом ряду по следу движителя трактора; *в* – во втором ряду по следу опорного колеса культиватора; *г* – во втором ряду вне следов движителя трактора и опорного колеса культиватора

Менее интенсивно по отношению к лапам первого ряда (на 12–15 %) изнашиваются лапы, установленные во втором ряду. Это связано с уменьшением плотности и твердости почвы из-за ее частичного разрыхления лапами первого ряда [26, 66]. Так, лапы, перемещающиеся по следам, оставляемым колесами культиватора и движителя трактора, изнашиваются в 1,4–1,8 раза интенсивнее, чем соседние и затылочная фаска у них выявляется отчетливее (рисунок 1.9) [26, 46, 50, 64,81]. На площадку, образованную этой фаской, действует распределенная нагрузка (реакция почвы), стремящаяся вытолкнуть лапу на поверхность. Вертикальная составляющая этой нагрузки (выталкивающая сила) растет с увеличением ширины затылочной фаски.

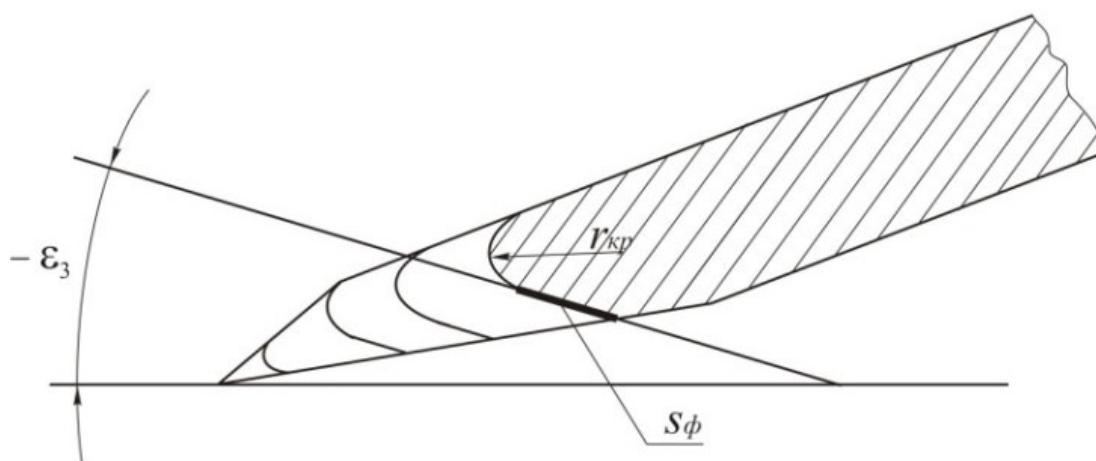


Рисунок 1.9 – Изменение формы лезвия монометаллической культиваторной лапы при эксплуатации [75]: s_{ϕ} – затылочная фаска, мм; $r_{кр}$ – радиус режущей кромки, мм; ε_3 – угол наклона затылочной фаски, град.

При изменении баланса действующих усилий в пользу выталкивающей силы глубина обработки будет уменьшаться [23, 50, 64, 88, 99, 102, 72–75, 87, 88, 104, 105]. С ростом угла наклона затылочной фаски наблюдается увеличение тягового сопротивления почвообрабатывающей техники, что может быть объяснено действием уплотненного ядра почвы на лапу [75, 87]. Также росту этого сопротивления способствует увеличение радиуса режущей кромки и твердости почвы [23, 50, 72–74, 87, 88, 99, 102–106].

Изменение формы двухслойной режущей части стрелчатой лапы в процессе эксплуатации возможно по трём вариантам (рисунок 1.10).

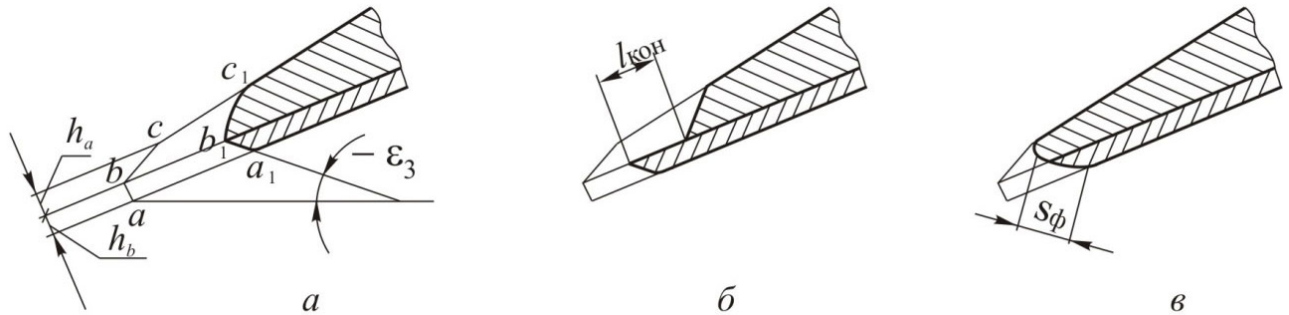


Рисунок 1.10 – Формообразование двухслойного лезвия рабочего органа почвообрабатывающей техники при эксплуатации [75]: *a* – оптимальный контур режущей кромки (нормальное самозатачивание); *б* – консольный выступ (увеличенное самозатачивание); *в* – образование затылочной фаски (отсутствие самозатачивания)

Форма профиля двухслойного лезвия $a_1b_1c_1$ (см. рисунок 1.10, *a*) свидетельствует о его нормальном самозатачивании при эксплуатации, т. е. образующийся контур оптимален в смысле выполнения заданных функций (культивации). Сформированный при этом участок лезвия шириной a_1b_1 (затылочная фаска) представляет собой сравнительно небольшую площадку. Следовательно, выталкивающее усилие со стороны почвы будет невелико и движение рабочего органа на заданной глубине стабильно [75].

Если интенсивность изнашивания верхнего слоя лезвия b_2c_2 значительно больше нижнего, то образуется консольный выступ (см. рисунок 1.10, *б*). Этот сравнительно тонкий консольный выступ (упрочняющий слой) состоит из твердого и достаточно хрупкого материала, что приведёт к его частичным сколам при эксплуатации. Это означает возрастание величины износа и образование режущей кромки пилообразной формы [75].

В том случае, когда интенсивность изнашивания нижнего слоя лезвия a_2b_2 превосходит аналогичный параметр для верхнего слоя лезвия b_2c_2 , то ширина за-

тылочной фаски заметно увеличивается (см. рисунок 1.10, в). Это негативно влияет на устойчивость хода рабочего органа по глубине и способствует возрастанию тягового сопротивления.

Интенсивное увеличение площади затылочной фаски, ведущее к выглублению рабочего органа, происходит после критического превышения величины износа режущей части лапы (т. е. ширины упрочненного слоя). Поэтому определена предельная величина износа режущей части лапы, после достижения, которой наступает отказ (приложение А).

Снижение величины перекрытия движения лап первого и второго рядов до 10...15 мм, что ведет к некачественному подрезанию сорняков, показывает наступление их предельного состояния из-за изношенности лап по ширине (приложение А). Острота режущей кромки рабочих органов определяется ее радиусом. При нормальном и увеличенном эффекте самозатачивании он зависит от толщины упрочненного слоя и равен половине его толщины [59, 64, 75, 80, 81]. В случае отсутствия эффекта самозатачивания предельным принимают радиус режущей кромки лезвия 0,5 мм [59, 80, 107].

Неработоспособное состояние культиваторной лапы наступает при выходе даже одного из ее основных конструктивных параметров за пределы величин, регламентированных техническими условиями [23, 24, 31, 32, 45, 60–66, 72–75, 81, 99, 104, 107, 108]. Доминирующим фактором (более 60 % случаев) при этом является предельный износ носка и крыльев по ширине (см. рисунок 1.8), а на все остальные возможные отказы приходится около 40 % (приложение А) [34, 49, 62, 108]. При этом форма и размеры оставшейся части стрелчатой культиваторной лапы (без режущей части), а также запас ее прочности и жесткость дают возможность их повторного использования после восстановления ее работоспособности.

Приведенный выше анализ работы и износа стрелчатых лап культиваторов показывает, что интенсивность изнашивания этих деталей, установленных в раз-

личных рядах (первый либо второй ряд, по следам движителей и опорных колес) значительно различается. Следовательно, несмотря на работоспособное состояние части рабочих органов, необходимо остановить эксплуатацию для замены рабочих органов, достигших предельного состояния. Затем нужны будут остановки для замены других лап, достигших предельного состояния. Долговечность культиватора при этом снижается, а затраты на его ремонт растут.

Для повышения долговечности работы культиватора принята следующая гипотеза о необходимости увеличения износостойкости каждого рабочего органа таким образом, чтобы соотношение их величин позволяло достигать их предельного состояния одновременно независимо от места установки на раме. Другими словами, рабочие поверхности лап должны обладать различной износостойкостью, которую обеспечат разработанные технологические процессы восстановления и упрочнения.

1.3 Анализ способов восстановления и упрочнения

Как было установлено, стрелчатые лапы изнашиваются до предельных состояний с разной интенсивностью в зависимости от их места установки на раме культиватора. Определены три таких характерных зоны в конструкции культиватора. Для получения равного ресурса их рабочих органов следует разработать три технологии, восстанавливающие их работоспособность таким образом, чтобы получающиеся в результате технологических воздействий эксплуатационные и механические свойства обеспечивали необходимые значения износостойкости.

Повышение ресурса культиватора достигается одинаковой долговечной работой всех его почвообрабатывающих органов. Для этого необходимо обеспечить их равностойкость путем повышения износостойкости их рабочих поверхностей с помощью восстанавливающих и упрочняющих технологий [8, 16, 18–21, 28, 33, 34, 37, 44–48, 59, 62–65, 72, 75, 80, 81, 109–115] (рисунок 1.11).

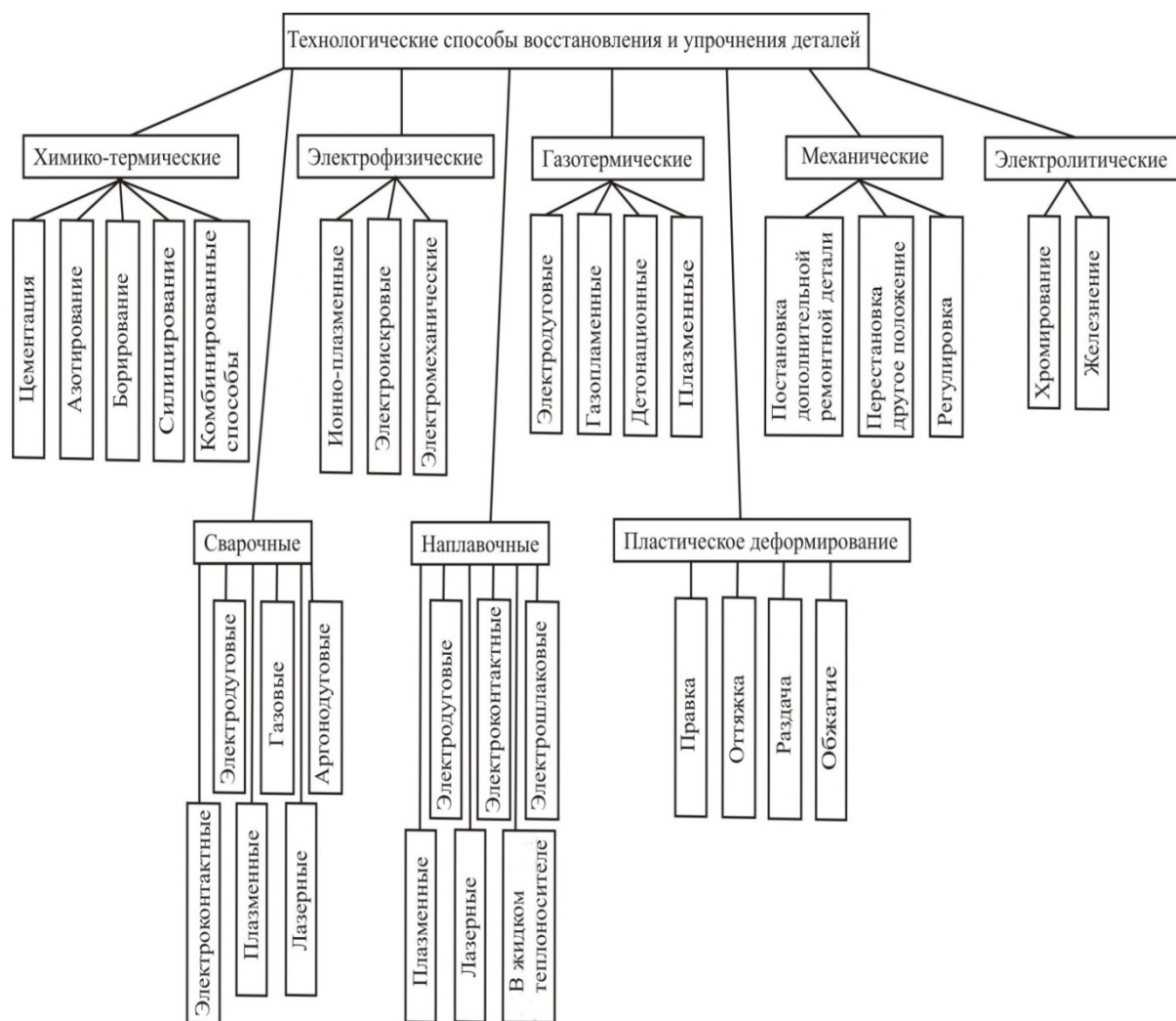


Рисунок 1.11 – Классификация способов восстановления изношенных деталей

1.3.1 Способы восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники

Большинство технологий восстановления работоспособности почвообрабатывающих деталей основаны на получении износостойких покрытий с использованием методов сварки и наплавки [8, 16, 18–21, 37, 44–48, 110, 116–118]. Поэтому анализ целесообразно начать с рассмотрения их разновидностей.

Дуговые и газотермические способы сварки и наплавки

Ручные газовые и дуговые способы сварки и наплавки широко используют для выполнения ремонтных работ, а также при изготовлении биметаллических изделий в условиях ремонтных мастерских хозяйств, индивидуального, мелкосо-

рийного и серийного производства. К характерным недостаткам этих видов сварки и наплавки относятся: тяжелые условия труда рабочих, сравнительно низкая скорость нанесения наплавленного слоя и его качественные показатели, во многом зависящие от квалификации и мастерства оператора, а также проблема защиты расплавленного металла от кислорода и азота воздуха [46, 81, 119, 120].

Полуавтоматические и автоматические процессы дуговой наплавки разными проволоками с различной защитой зоны горения дуги, а также самозащитными порошковыми проволоками широко применяют как для восстановления изношенных деталей машин, так и при их изготовлении [106, 119–124].

Восстановление рабочих органов почвообрабатывающей техники наплавкой порошковой проволокой обеспечивает повышенную твердость их рабочих поверхностей до HRC58 [115, 125]. При этом в них наводятся внутренние остаточные напряжения, способствующие возникновению деформаций и сокращению ударной вязкости. Для снижения внутренних остаточных напряжений в деталях, упрочнённых такой наплавкой, необходимо производить термическую операцию – отпуск. Однако не исключено, что из-за влияния специфических свойств материалов наплавленного слоя и детали применение данной технологической операции не обеспечит нужного эффекта [112, 113, 129]. Для недопущения изломов используют наплавку двумя слоями порошковых проволок: сначала проволокой ПП-АН125, а затем ПП-АН170. Эта технология позволит снизить степень вредного действия динамических нагрузок и обеспечить твердость поверхности, достигающую значения HRC65 [112, 113, 129]. При реализации этого способа необходимо достаточно строго соблюдать интервал времени между наплавкой слоев. Это усложняет технологический процесс восстановления детали, а также влияет на механические и служебные свойства покрытия, определяющие ее работоспособность.

Известен способ упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники с целью повышения их ресурса [60, 86, 109]. Сущность этого способа заключается в полуавтоматической электродуговой наплавке порошковой проволокой ПП-Нп-80Х20РЗТ «точек» на режущую поверхность рабочих органов почвообрабатывающей техники. Образующиеся при такой наплавке «точки» имеют конусообразную форму с вершиной в глубине основного металла. Величина твердости материала

«точки» в основании конуса в 3 раза превосходит твёрдость материала детали, но по мере приближения к вершине конуса это соотношение постепенно уменьшается до 1,5. Расположение «точек» и расстояние между ними выбирают исходя из технологических режимов наплавки (силы тока, скорости наплавки и полярности), условий дальнейшей эксплуатации рабочего органа и его конструктивных особенностей. В процессе эксплуатации интенсивность изнашивания рабочих поверхностей упрочненных таким образом деталей не равномерна. «Точка» изнашивается менее интенсивно, а соседние участки основного металла – более интенсивно из-за разности их механических и служебных свойств. В результате на рабочей поверхности образуется рельеф с чередующимися выступами и впадинами, от этого резко возрастает сопротивление перемещению почвообрабатывающей техники при выполнении технологической операции и растут затраты энергоресурсов. Наряду с этими процессами могут наблюдаться сколы упрочненных зон рабочих поверхностей, что интенсифицирует процесс изнашивания и снижает показатели долговечности.

Технологической особенностью применения вышеуказанных дуговых способов наплавки является достаточно глубокое проплавление основного металла при значительном перемешивании его с плакирующим металлом. Возможная толщина наплавленного слоя составляет 1...6 мм и зависит от следующих факторов: конструктивных особенностей, напряженно-деформированного состояния детали, химических составов основного и наплавочного материалов. Исследования [118, 121–123, 130–136] свидетельствуют о том, что термический цикл сварки и наплавки вызывает появление значительных внутренних напряжений, остаточной деформации изделия и возможного его сквозного проплавления. По этим же соображениям не имеет смысла рассматривать способ электрошлаковой наплавки [118, 131–136].

Плазменная, микроплазменная, лазерная и электроннолучевая сварка и наплавка

С разработкой и внедрением в производство надежных плазматронов получили развитие плазменная сварка и наплавка, обладающие такими технологическими преимуществами, как неглубокое проплавление основного металла и образование незначительной по величине зоны термического влияния на основной ме-

талл [137–139, 116–118, 141–144]. Перспективным в этом случае становится применение специальных проволок и порошков.

Плазменную наплавку износостойких покрытий из порошковых сплавов ПГ-ФБХ-6-2 и ПР-ФБЮ-1-4 на режущие поверхности рабочих органов почвообрабатывающей техники проводят в среде воздуха или аргона [60, 86, 145]. При наплавке в воздушной среде для раскисления компонентов покрытия и металла основы необходимо использовать порошки с содержанием алюминия 2,5–3,4 %. В результате использования данных технологий наплавки образуют покрытия, имеющие достаточно высокую прочность сцепления с металлом основы [60, 86].

Эти способы не получили широкого распространения в ремонтной практике по причине высокой стоимости оборудования и порошковых сплавов. При этом не исключено оплавление режущих кромок, возможно образование хрупких прослоек в переходной зоне при остывании. К другим причинам следует отнести относительно низкую их производительность этих способов и сложность применяемого оборудования [118].

Лазерная, электроннолучевая и микроплазменная сварки и наплавки обладают возможностью концентрированного теплового воздействия на изделие. Полезная действующая энергия фокусируется в пятне диаметром, как правило, не превышающем 1 мм [37, 146–149]. Это позволяет минимизировать размеры зоны термического влияния в материале основы. Следовательно, минимальными становятся и значения остаточных внутренних напряжений и деформаций, а служебные и механические свойства восстановленной детали определяются составом и толщиной плакирующего покрытия.

Наплавку рабочих органов почвообрабатывающей техники с использованием лазерного луча осуществляют различными порошковыми сплавами (например, ФБХ-6-2) с твердосплавными добавками [2]. Перед наплавкой порошковый материал в виде обмазки наносят на подготовленную упрочняемую поверхность и просушивают в сушильном шкафу. Применение кремнийорганического материала в виде добавки, улучшающей поглощающие свойства подготовленного к наплавке

покрытия, способствует формированию наноразмерных частиц карбида кремния в нанесенном слое покрытия [2, 146, 147].

Применение этих способов для восстановления работоспособности деталей в сочетании с различными наплавочными материалами (проволоками и порошками) даёт возможность обеспечить высокие механические и эксплуатационные свойства поверхностей, сократить в 5–10 раз по сравнению с дуговыми способами величины термического коробления и остаточной деформации наплавляемых изделий [146–148].

Сдерживающими факторами широкого применения для восстановления деталей технологий, использующих лазерные, электроннолучевые и микроплазменные установки, являются техническая сложность технологического оборудования, необходимость применения манипуляторов, перемещающих изделие во время наплавки. Высока также себестоимость восстановления, снижение которой возможно только при значительной производственной программе, что нереально в современных условиях хозяйствования.

Электроконтактная и индукционная наплавки

Электроконтактная наплавка изношенных деталей при их восстановлении позволяет использовать такие наплавочные материалы, как металлические ленты, проволоки и порошки разного химического состава [150]. Одним из недостатков данного способа являются высокие трудозатраты, что связано с изготовлением заготовок из металлических лент и технологическими особенностями их наплавки. Нагрев до сварочных температур и затем быстрое охлаждение зон прохождения импульсов сварочного тока вызывают фазовые превращения в основном металле. При этом в нем образуются локальные закалочные структуры и зоны термического влияния, что не может не привести к остаточным деформациям [121–123].

При осуществлении способа индукционной наплавки рабочих органов почвообрабатывающей техники [46, 49, 60, 64, 81–83, 85, 86, 111, 151] сначала на упрочняемую поверхность наносят шихту, содержащую флюсующие компоненты и наплавочные металлосодержащие порошки, затем включают подачу рабочего

тока высокой частоты на индуктор. Возникающее вихревое переменное электромагнитное поле с высокой скоростью нагревает деталь до необходимой температуры. Легкоплавкая часть шихты при этом полностью расплавляется, образуя плакирующее покрытие с тугоплавкими включениями на поверхности детали. Используемые наплавочные порошки, как правило, содержат следующие компоненты: высокопрочные чугуны, сплавы на основе кобальта и никеля, а также композитные материалы (карбиды хрома, вольфрама и др.). Применяемые флюсы содержат кристаллическую буру, борную кислоту, силикат кальция и другие компоненты. Порошок чугуна перед добавлением в наплавочный состав просеивают, подбирая нужный фракционный состав. Затем производят его диффузионное насыщение легирующими элементами (бором, марганцем и др.) [153, 154]. Шихта, находящаяся на поверхности детали, получает тепловую энергию не напрямую от индуктора, а от нагреваемой детали, что осложняет контроль и соблюдение температурных режимов при наплавке. Поэтому возможен перегрев материала основы, приводящий к её разупрочнению и деформации, а также к стеканию покрытия. Не исключено также оплавление режущей кромки.

Таким образом, эффективное использование индукционной наплавки ввиду сложности оборудования и технологии также невозможно в условиях ремонтных мастерских хозяйств.

Наплавка с использованием высокотемпературного синтеза

Технология наплавки рабочих органов почвообрабатывающей техники порошковыми электродами из композиционных материалов с использованием эффекта самораспространяющегося высокотемпературного синтеза исследована в работе [155]. Для осуществления наплавки используют сложный электрод, изготовленный специально для этих целей. Внутри тонкостенной стальной трубки засыпают смесь дорогостоящих порошков ПР-Н70Х7С4Р4-3, углерода и титана. Края трубки плотно зажимают для запираania порошка (что, однако, не предохраняет от значительного его перерасхода). На наружную поверхность трубки нано-

сят флюсующую обмазку. Затем электрод подвергают нагреву и выдержке в сушильном шкафу до полного удаления воды.

После электродугового зажигания возникает реакция самораспространяющегося высокотемпературного синтеза композитного покрытия на поверхности детали.

Применение данного способа способствует увеличению износостойкости рабочих поверхностей восстанавливаемых деталей в несколько раз. Однако большое количество операций, необходимых для изготовления наплавочного композита и электрода, существенно увеличивает трудоёмкость упрочнения деталей этим способом. Кроме того, тепловложения в деталь при прохождении высокотемпературного синтеза могут привести к оплавлению ее режущей кромки и деформации.

Наплавка намораживанием

Сущность технологии восстановления и упрочнения деталей наплавкой намораживанием [43, 152, 156] заключается в погружении восстанавливаемой детали, покрытой флюсом, в тигель с расплавленным материалом заданного химического состава и выдержкой там в течение 1–2 с. При этом на упрочняемой поверхности образуется слой толщиной 2,0...3,0 мм.

Для наплавки режущих элементов рабочих органов этим способом применяют расплавы высокопрочных чугунов, а также металлосодержащие порошки ПГ-ФБХ-6-2, ПР-С27, ПГ-С1, ПГ-УС25 и их смеси. Предварительную активацию наплавляемой поверхности детали осуществляют погружением ее в ванну с расплавленным флюсом, состоящим либо из буры и борного ангидрида, либо это состав АН-348А.

Практическая реализация этого очень энергоемкого способа вызывает затруднения в обеспечении равномерности покрытия. Кроме того, толщина образующегося покрытия не позволяет восстановить исходную геометрию, соответствующую техническим требованиям. Применять этот метод для упрочнения режущей части рабочих органов не имеет смысла из-за большой толщины наплавляемого слоя и сложности формирования режущей кромки. Высокие энергетические

траты и затраты на расходные материалы при в общем-то невысоком повышении износостойкости не позволяют использовать данную технологию в ремонтном производстве.

Газопламенная наплавка

Для повышения эффективности применения газопламенной обработки при восстановлении и упрочнении деталей используют способ сверхзвуковой газопорошковой наплавки режущих поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники. Этого достигают путем изменения конструкции сопла горелки, ведущего к сжиманию газопламенного потока. В результате этого сжатия скорость потока возрастает до сверхзвуковой величины, что повышает концентрацию переносимой тепловой энергии. Нагрев поверхности детали до нужной температуры и плавление порошка происходят быстрее, чем в дозвуковом режиме воздействия. Таким образом, тепловложения в металл основы более концентрированные, что уменьшает зоны термического влияния [46, 157–160].

Однако при осуществлении этого способа наплавки наблюдается неравномерное распределение в покрытии упрочняющих компонентов как по площади, так и по глубине, что отрицательно влияет на механические и служебные свойства рабочей поверхности детали. Не исключены также случаи оплавления режущей кромки.

Карбовибродуговой способ наплавки

Карбовибродуговой способ получения металлокерамических покрытий из специальных паст на режущей поверхности рабочего органа почвообрабатывающей техники осуществляется неплавящимся графитовым электродом, совершающим колебательные движения [38, 51, 2, 114, 161–164], которые способствуют снижению теплового воздействия на деталь. При этом происходит еще и диффузионное насыщение углеродом материала основы из-за эффекта сублимации. Толщина и механические свойства покрытий, получаемых при этом виде упроч-

нения, зависят как от состава пасты, так и от режимов обработки [81, 161, 162]. В состав используемых паст входят следующие компоненты: металлическая матрица, керамические составляющие и криолит. Матрица, состоящая из металлосо-держащих наплавочных порошков (ПГ-10Н-01, ПГ-УС25, ПГ-ФБХ6-2, ПГ-СР4 и ПР-Н70Х17С3Р4), является каркасом покрытия, который обеспечивает ему необходимые прочность и ударную вязкость. Керамическими компонентами служат карбиды, оксиды, нитриды и бориды таких элементов, как вольфрам, титан, хром, алюминий и кремний. Они придают покрытию повышенные служебные свойства (например, износостойкость). Криолит повышает стабильность электродугового процесса при расплавлении пасты [2, 38, 51, 114, 154, 161, 162].

Реализация этого способа возможна только на машиностроительных предприятиях. В мастерских хозяйствах его использование неосуществимо по причине сложности с зажиганием и стабильным горением дуги. Не исключены также разбрызгивание покрытия и его «пятнистость» вследствие возможной неравномерности распределения компонентов пасты. Соблюдение оптимального температурного режима тоже вызывает затруднения, а значит возможны локальный перегрев поверхности детали (оплавление режущей кромки) и стекание расплавленного покрытия.

Напыление

В техническом сервисе машин используют различные способы напыления металлов и порошков на поверхность изделия с целью их восстановления или придания рабочим поверхностям необходимых служебных свойств (износостойкости, коррозионной стойкости и др.). Наиболее распространенными и одновременно перспективными способами напыления являются следующие их виды: электродуговой, плазменный, газотермический и детонационный [109, 165–176].

Электродуговое напыление – производительный способ (до 40 кг/ч), не требующий применения сложного технологического оборудования. Необходимый химический состав покрытия обеспечивается подбором распыляемых проволок по

содержанию в них нужных элементов. Основным недостатком этого способа восстановления является окисление напыляемого материала при движении расплавленных частиц в потоке транспортирующего их воздуха. Кроме того, большое количество теплоты, выделяющейся при горении дуги, приводит к выгоранию легирующих элементов напыляемой проволоки. Применение этого метода эффективно при значительных покрываемых площадях на крупногабаритных деталях [118, 166–170, 215, 177–179].

Плазменное напыление [117, 118, 142, 171–177, 183] по сравнению с дуговым аналогом обладает рядом важных преимуществ. Например, можно регулировать температуру и скорость плазменной струи путем подбора плазматрона и технологических режимов. При этом не происходит окисление напыляемых материалов, так как применяются инертные газы или их смеси. Это способствует расширению диапазона напыляемых материалов (металлы, сплавы, керамика и металлокерамика).

Известны исследования использования высокочастотной плазмы для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники. Механические и эксплуатационные свойства покрытия, получаемого плазменным напылением, превосходят аналогичные свойства покрытий, получаемых электродуговой металлизацией [117, 118, 142, 171, 175, 177, 183]. Однако низкая производительность, эффективная только при значительных покрываемых площадях, шум, интенсивное ультрафиолетовое излучение, а также сложное и дорогостоящее технологическое оборудование являются причинами, которые сдерживают использование этого вида восстановления.

Газопламенное напыление – достаточно простой процесс, как и применяемое при этом оборудование, что делает данный способ вполне доступным для использования в техническом сервисе машин. В качестве присадочного материала применяют самофлюсующиеся порошки на никелевой и кобальтовой основе, а также смеси порошков (например, 60 % порошка ПР-НХ17 и 40 % ПР-Х4ГСП фракцией 40...60 мкм) и составы на основе медного порошкового высокотемпературного припоя (6–8 % флюса Ф100, 40–50 % твердого сплава ВК8 зернистостью 45...160 мкм). Это позволяет повышать износостойкость рабочих поверхностей деталей.

Однако обеспечение прочности сцепления покрытия с основой остаётся сложной задачей. После напыления необходимо проводить оплавление поверхности. Эффективность использования этого способа определяется размерами обрабатываемых поверхностей деталей [117, 145, 158–160, 165, 169, 172, 176–178, 184].

Ионно-плазменное напыление [117, 118, 177, 178] осуществляют в специальных вакуумных камерах с применением сложного технологического оборудования. Его используют в основном для получения покрытий из металлов и сплавов, в том числе химически активных и тугоплавких, а также из их оксидов, нитридов и карбидов. Сложность и дороговизна применяемого оборудования (вакуумные камеры, форвакуумные и диффузионные насосы, батарея электронных пушек, контрольно-регистрирующая аппаратура и система автоматики), трудность шлюзования вакуума и высокие энергетические затраты являются существенным и объективным тормозом в расширении зоны использования этого способа при восстановлении деталей машин [117, 118, 177].

Детонационное напыление требует сложного автоматизированного оборудования и манипуляторов. В специальную установку («пушку») подают напыляемый порошок и взрывчатую газовую смесь (кислород-ацетилен), которую поджигают электрической искрой. После взрыва частицы порошка движутся с высокой скоростью и разогреваются до расплавленного состояния, что обеспечивает получение плотного и прочного покрытия. Однако его можно наносить только на такие изделия, которые не будут деформироваться от действия ударной волны. Из-за высокого уровня шума (до 130 дБ) оборудование устанавливают в помещении со звукоизолированными стенами, а наблюдение осуществляют через смотровое окно [117, 118, 177, 178, 180]. Данный способ низкопроизводителен и эффективен при больших размерах покрываемых площадей. По экономическим показателям его использование не эффективно.

Общими технологическими недостатками всех процессов напыления являются необходимость тщательной подготовки поверхности с удалением следов износа и придания ей правильной геометрической формы, низкий коэффициент использования плакирующего материала, а также вредные условия работы операторов [37, 48, 118, 178].

Электролитические покрытия

В практике технического сервиса сельскохозяйственных машин и техники нашли применение железнение и хромирование [20, 47, 185–193]. В связи с тем, что значения электрохимических эквивалентов железа и хрома соответственно составляют 1,042 и 0,32 г/А · ч, выход металла по току при железнении в несколько раз больше, чем при хромировании. Поэтому как более производительный и экономичный способ железнение используют шире, особенно его «холодный» вариант с асимметричным током электролиза, при котором температура электролита составляет 20...25 °С. Применение этого способа позволяет получить толщину слоя покрытия более 1 мм [185].

При осуществлении этих способов [37, 48, 185, 193] возникают сложности, связанные с образованием дендритов, обеспечением равномерной толщины покрытия и прочности его сцепления с основным металлом по всей поверхности, с необходимостью удаления следов износа, с микротрещинами, возникающими в покрытии, которые снижают усталостную прочность детали, с вредными условиями труда для операторов, а также с обеспечением экологической безопасности. Данные обстоятельства свидетельствуют о невозможности использования этих способов в ремонтных мастерских.

Пластическая деформация

На разном уровне были исследованы технологии восстановления работоспособности деталей оттяжкой и давлением [15, 18–20, 37, 47, 48, 51, 64, 70, 85, 110, 194–198]. Осуществление этих способов возможно при наличии у восстанавливаемых деталей запаса материала для его перераспределения в рабочую зону или если такой запас можно сделать, например, электродуговой наплавкой.

Сущность пластической деформации заключается в восстановлении изношенных деталей посредством их горячей обработки давлением в штампе при помощи гидравлического пресса или кузнечной операции на пневматическом молоте. Предварительный нагрев деталей до температуры 900...1200 °С может быть

осуществлен в различных специальных промышленных печах. Затем металл, компенсирующий износ, перераспределяется механическим воздействием в нужную зону детали и ему придают заданную форму. После этого проводят термические и финишные обработки.

Применительно к восстановлению деталей следует отметить высокую сложность технологического процесса (особенно это касается обработки давлением), при этом не обеспечивающего существенного повышения износостойкости рабочих поверхностей. Кроме того, практически у всех типов рабочих органов почвообрабатывающей техники отсутствуют запас материала для его перераспределения в рабочую зону, а также возможность его создания (например, у лап культиваторов).

Применение деталей, компенсирующих износ

Известны способы восстановления и упрочнения наиболее изношенной части рабочей поверхности рабочего органа, например, носка культиваторной лапы. Его восстанавливают приваркой либо клинообразного долота, либо сегмента. Эти компенсирующие износ детали изготавливают из стали 65Г. Клинообразное долото после приварки не требует механической обработки, а сегмент необходимо обработать, т. е. произвести его верхнюю заточку под углом 10° ... 15° . После этого на его тыльную сторону наплавляют слой сормайта толщиной 0,7...1,2 мм [15, 64, 77–79]. При таком способе восстановления базирование деталей требует применения специальной оснастки. Получаемые форма и размеры режущей части отличаются от первоначальных (особенно у лап культиваторов), а локальные тепловложения при сварке могут приводить к деформации детали.

Способы восстановления работоспособности рабочих органов почвообрабатывающей техники, имеющих значительную величину износа (более 5 мм), включают в себя использование дополнительных компенсирующих деталей и их последующее упрочнение [15, 64, 69, 70, 77, 79, 85, 112, 113, 129, 67]. Например, на поверхность компенсирующей детали ручным электродуговым способом (электродами Т-590 или Т-620) наплавляют в определенные места отдельные валики

или электроискровым способом (твердосплавными электродами ВК8 или Т15К6) наносят сплошной слой.

Процесс электроискрового легирования поверхности детали базируется на таком физическом явлении, как электрическая эрозия, которая представляет собой результат многократного действия разрядов электрического тока плотностью $10^5 \dots 10^6$ А/мм² (локального взрывного характера с давлением ударной волны до 7 МПа) в газовой среде через возникающие каналы сквозной проводимости, мигрирующие по поверхностям электродов [199–212]. Образовавшаяся мелкодисперсная капля, перемещаясь к катоду, закипает и взрывается, распадаясь на ультрадисперсные капли, которые, долетев до поверхности катода, привариваются к ней. Затем движущийся с высокой скоростью (частота колебаний 50...600 Гц) анод достигает поверхности катода, пластически деформируя её микроскопические участки. Циклически повторяясь, это воздействие способствует увеличению глубины диффузии легирующих компонентов, а также плотности покрытия и его толщины. Перенос разогретого материала с анода на катод осуществляется в твердой фазе микроскопическими частицами в режиме образования мостиков связи и их оплавления при отскоке анода. Так как скорость охлаждения этих частиц на катоде значительно выше, то они привариваются к его поверхности. Влияние на скорость процесса электроискрового легирования оказывают различное сочетание и интенсивность электромагнитных, электродинамических, термических и механических воздействий, а также физико-механические свойства материалов электродов [199–212]. Технологических сложностей при реализации этого способа в условиях предприятий технического сервиса возникать не должно, но значительного увеличения ресурса упрочненных рабочих органов почвообрабатывающей техники добиться сложно из-за отсутствия эффекта самозатачивания.

Применяют еще способ упрочнения рабочих поверхностей с использованием электроискровой обработки верхней части лезвия и индукционной закалки его нижней части. При этом электроискровым методом по шаблону наносят твердый сплав ВК6 с чередованием упрочненных и не упрочненных участков шириной по 5...6 мм. Затем на обратной стороне закалывают только те участки, которые не

упрочнены сверху. Во время эксплуатации режущая часть рабочего органа приобретает пилообразную форму [112, 113]. Осуществление этой технологии является технически весьма сложной и трудоемкой задачей.

Использование порошковых материалов при электроискровом легировании позволяет повысить толщину покрытий и автоматизировать этот процесс, например, применив магнитоэлектрический способ упрочнения [28]. К недостаткам этого способа относятся сложности в обеспечении плотности слоя и его прочности сцепления с основой, а также то, что таким образом восстанавливают и упрочняют только горизонтально расположенные цилиндрические поверхности деталей (при их вращении).

Известен способ получения самозатачивающегося лезвия рабочего органа почвообрабатывающей техники, когда на тыльную сторону приваренной компенсирующей пластины из стали марки 65Г наплавляют слой сормайта либо ручным газопламенным, либо индукционным способом [67]. Однако недостатки, присущие этим методам наплавки, приведённые ранее, снижают эффективность применения таких технологий.

Применяют способ получения биметаллических деталей при их производстве, упрочнении и восстановлении в жидких теплоносителях [213, 214]. Сущность этого способа наплавки состоит в том, что энергия, необходимая для получения неразъемного соединения, передается детали и присадочному материалу при непосредственном их контакте с теплоносителем в печи-ванне. При этом теплоноситель или наплавляемый материал (либо оба сразу) должны обладать флюсующими свойствами. При остывании образуется неразъемное соединение покрытия с основой. Этот способ перспективен при условии обоснования и определенной его модернизации под конкретные детали.

Рассмотренные способы восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей машин решают технологические задачи обеспечения работоспособности за счет нанесения плакирующего слоя, обладающего нужными свойствами. Однако существуют технические задачи повышения механических и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин при восстановлении без увеличения их

размеров. Такой задачей (использования дополнительной компенсирующей детали) становится восстановление работоспособности лап культиваторов. Необходимыми возможностями в этой технической области обладают методы химико-термического упрочнения поверхности изделия за счёт создания диффузионных слоев из соединений с железом, таких, например, элементов, как азот, углерод и бор. При этом происходит изменение химического состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали (например, повышаются износостойкость, прочность, твердость, коррозионная стойкость и жаростойкость). Так как разные способы химико-термической обработки деталей придают им эти свойства в различных соотношениях, то необходимо провести их анализ на предмет применимости для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Химико-термическое упрочнение

Применение в техническом сервисе машин и машиностроительной промышленности химико-термического упрочнения позволяет, с одной стороны, увеличить ресурс деталей машин, а с другой значительно уменьшить расход дорогостоящих легированных сталей, из которых изготавливают новые детали и запасные части, а также порошков и наплавочной проволоки.

Первым химико-термическим способом упрочнения стальных деталей машин, примененным в промышленности еще в XIX в., стала цементация. Это процесс насыщения поверхности деталей углеродом. Его можно проводить в следующих средах: порошковом карбюризаторе, пасте, расплавленных солях и газовой атмосфере [177, 216–218]. Такому воздействию подвергают детали машин из низкоуглеродистых, среднеуглеродистых и легированных сталей для повышения твердости, износостойкости и жаростойкости. Эти повышенные свойства достигаются путем проведения последующей закалки и отпуска. Рабочая температура составляет 850...950 °С. Точное ее значение зависит от того, в какой среде происходит обработка. Время прохождения процесса цементации зависит от планируемой глубины диффузии, рабочей температуры и насыщающей среды и составляет 4...14 ч. Получаемые при

этом диффузионные слои обладают достаточно низкими значениями ударной вязкости и контактной прочности. При остывании после цементации происходит обезуглероживание поверхностного слоя, что сказывается на его служебных свойствах.

Известен способ науглероживания графитовым электродом режущих поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники с использованием электродугового нагрева. При этом углерод с электрода перемещается в поверхностный слой материала детали с образованием карбидов железа, твердость которых значительно выше твердости основного материала [154,161, 162, 216, 218]. Горение электрической дуги сопровождается выделением большого количества тепловой энергии, интенсивно нагревающей деталь, поэтому возможно оплавление режущей кромки. Если в процессе упрочнения обрабатывают обе стороны режущей части рабочего органа, то эффект самозатачивания отсутствует. При обработке только нижней поверхности режущей части проявляется эффект самозатачивания, но из-за хрупкости карбидного слоя происходит достаточно интенсивное изнашивание.

Процесс диффузионного насыщения поверхности стальных деталей азотом (азотирование) начали применять в промышленности с 20-х годов прошлого века. Этому виду обработки подвергают детали машин из легированных сталей, что повышает твердость их поверхности и её износостойкость. Такой техпроцесс осуществляют в специальных герметичных печах, оборудованных системами подвода и отвода газов (например, аммиака) при строгом соблюдении технологических режимов и качественной подготовке поверхности (очистка от загрязнений и коррозии, обезжиривание и, при необходимости, фосфатирование) [154, 162, 177, 216, 217]. Перед азотированием деталь подвергают обязательной термической обработке (закалке и отпуску). Рабочая температура процесса азотирования 500...570 °С, а длительность выдержки в печи принимают из расчета 15 ч на 0,1 мм получаемого слоя. Применение этого способа не приемлемо, потому что хорошие результаты можно получить только у деталей из легированных сталей. Кроме того, получаемая толщина диффузионного слоя 0,1 мм не достаточна для упрочнения.

Такие методы химико-термического упрочнения, как нитроцементация, карбонитрирование, цианирование и борохромирование, применяют для обработки

оснастки и инструмента из быстрорежущей стали [177, 216, 217]. Использование этих методов для упрочнения поверхности деталей из углеродистых и конструкционных сталей нецелесообразно по следующим причинам: насыщающие среды содержат ядовитые вещества (цианистые соединения и хромовый ангидрид), опасные и для работников и для окружающей среды, достаточно низкая производительность и, следовательно, высокая себестоимость.

Особый научно-практический интерес вызывают процессы химико-термической обработки, не нашедшие широкого применения в ремонтном производстве.

Процесс химико-термической обработки, заключающийся в диффузионном насыщении поверхностных слоев стальных изделий бором (рисунок 1.12), применяют с целью повышения их контактной прочности, твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, жаростойкости, хладостойкости и усталостной прочности деталей машин [177, 216, 217].

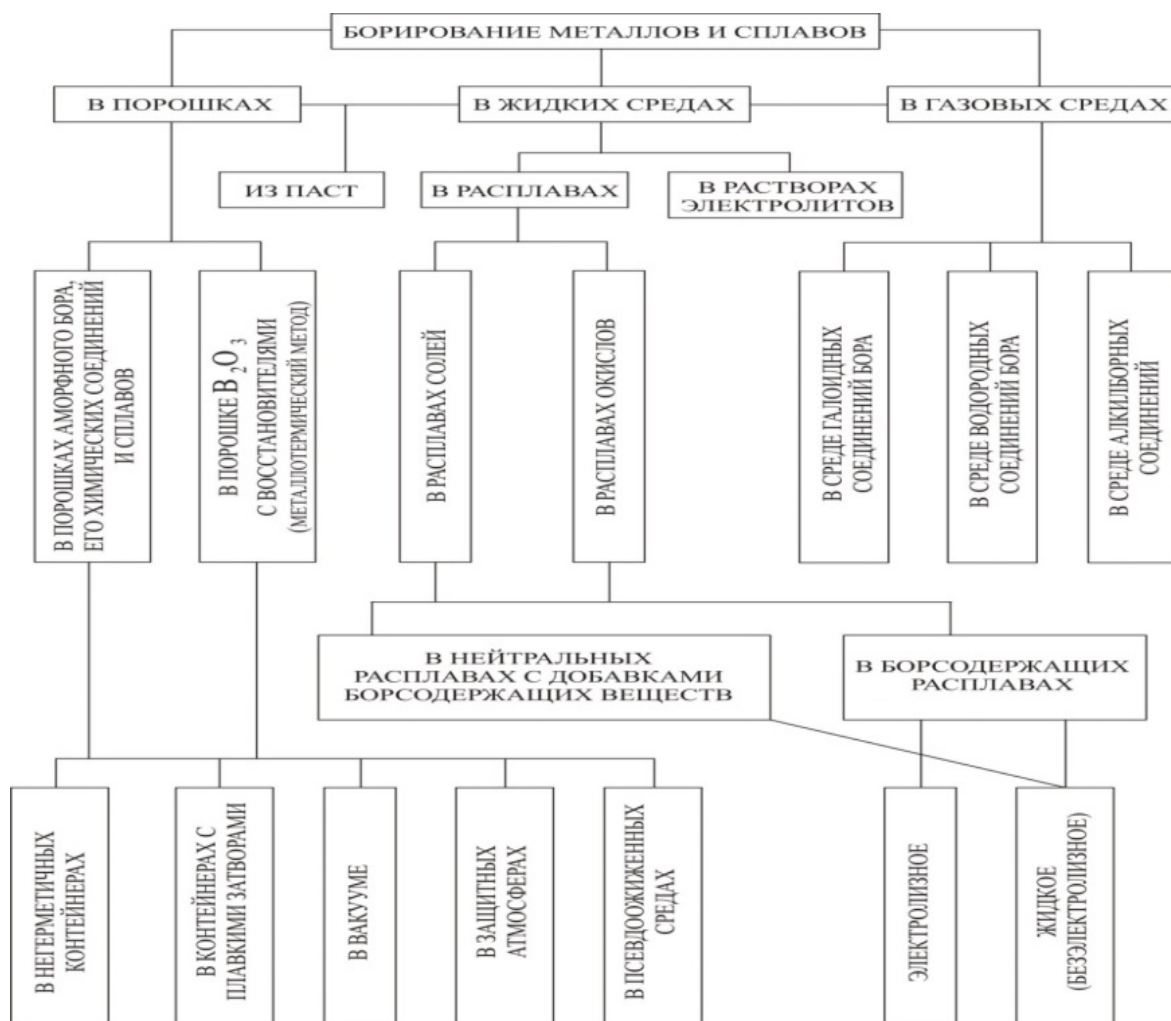


Рисунок 1.12 – Классификация способов борирования

Борированные стальные детали можно эксплуатировать в особо жестких условиях: трение без смазки и в абразивной среде, при низких и высоких температурах, в коррозионно-агрессивных средах, при ударных и знакопеременных нагрузках. При этом следует учитывать, что максимальную износостойкость (в 1,4–1,5 раза выше износостойкости однофазных слоев, состоящих из борида дижелеза) имеют борированные поверхности, представляющие собой матрицу из борида дижелеза, содержащего 10–30 % включений моноборида [219–221]. Борировать можно стали любого химического состава. Средой для проведения этого процесса являются порошки, пасты, газы, расплавы солей и электролитов.

Известны способы борирования, разработанные для придания деталям повышенных механических и эксплуатационных свойств [177, 216, 217, 219, 220 222–243]. В своем большинстве они обладают множеством достоинств, требующих научно-практического изучения для расширения их области использования в ремонтном производстве. Исходя из этого, необходимо провести анализ способов борирования.

Упрочнение режущих поверхностей восстанавливаемых деталей борированием из борсодержащих паст осуществляют с помощью индукционного нагрева [52, 233]. На очищенную и обезжиренную режущую поверхность рабочих органов почвообрабатывающей техники наносят шпателем специальную пасту и просушивают. В состав пасты входят следующие компоненты: 84–90 % карбида бора и 10–16 % плавленного флюса. Для предварительной фиксации используют любой из следующих клеевых составов: эпоксидный компаунд, жидкое натриевое стекло, казеиновый клей. Обработку подготовленной детали производят следующим образом: включают подачу рабочего тока высокой частоты на индуктор, и вихревое электромагнитное поле осуществляет ее нагрев в течение 40–60 с до температуры 1300...1350 °С; выдерживают при этой температуре в течение 1–2 мин с последующей объемной закалкой. В результате износостойкость упрочненных таким образом режущих поверхностей рабочих органов почвообрабатывающей техники возрастает до четырех раз. Используемое при реализации этого способа оборудование достаточно сложное и энергоемкое, поэтому эффективное его применение

возможно только в целях упрочнения режущих неизношенных поверхностей на машиностроительных предприятиях.

Предложен способ борирования режущих поверхностей из борсодержащих паст с использованием электродугового нагрева [237]. Диффузионное насыщение стальной поверхности бором осуществляют способом, идентичным предыдущему, только поверхность детали нагревается в этом случае за счет тепла, выделяющегося при горении электрической дуги между графитовыми электродами. При этом происходят термическая диссоциация компонентов пасты и диффузия бора в поверхностные слои детали. Реализация этого способа возможна как на машиностроительных предприятиях, так и в сельскохозяйственных мастерских. Однако могут возникать сложности с зажиганием и стабильным горением дуги между электродом и деталью, а также не исключены разбрызгивание покрытия и его «пятнистость» вследствие неравномерности распределения компонентов пасты. Соблюдение оптимального температурного режима тоже вызывает затруднения, а значит, возможны локальный перегрев поверхности детали и стекание или осыпание пасты.

Процесс борирования в порошках борсодержащих веществ [177, 217, 219, 227, 228, 232, 234, 240, 241] осуществляют в специальном герметичном контейнере, изготовленном из коррозионностойкого жароупорного сплава. В него послойно укладывают упрочняемые детали и пересыпают борсодержащей порошковой смесью с полным их покрытием. После этого контейнер герметично закрывают и помещают в рабочее пространство промышленной электрической печи сопротивления с температурой 900...1000 °С и выдерживают там в течение 3...8 ч. Затем извлеченные и очищенные детали подвергают закалке и отпуску. После 2...3 циклов обработки насыщающую смесь обновляют на 10–15 % [177, 219, 227–229, 232, 234, 241].

Этот метод борирования пригоден для обработки деталей, как простой, так и сложной формы.

Для интенсификации процесса борирования применяют токопроводящие порошковые смеси, но их использование требует достаточно сложного специального оборудования и оснастки. К недостаткам порошкового борирования относятся: трудоемкая работа с контейнерами при их низкой термостойкости; порошки гиг-

роскопичны и обладают низкой теплопроводностью; необходимость их регенерации; высокая стоимость борсодержащих порошков, а также проведение последующего нагрева деталей для закалки [177, 219, 227–229, 232, 234, 241].

Диффузионное борирование в газовой среде базируется на особенности таких газов, как диборан, хлористый бор, бромистый бор и триметилбор разлагаться при температуре выше 500 °С с выделением бора. Детали устанавливают на приспособление и загружают в реакционную камеру. Затем эта камера продувается инертным газом. После герметизации в ней создается избыточное давление ($23,4 \cdot 10^3 \dots 28,6 \cdot 10^3$ Па) борсодержащий газовой смеси. Для того чтобы на стенках камеры и поверхностях деталей не оседал атомарный бор, в смесь добавляют один из газов: водород, аргон, азот или аммиак. Реакционную камеру прогревают до 800...950 °С. Продолжительность выдержки при этой температуре составляет 4–5 ч [239].

Борсодержащие газовые смеси создают весьма активную насыщающую среду для проведения процесса диффузионного борирования. Но из-за их токсичности, взрывоопасности и химической активности (особенно хлора) возникают серьёзные технические и технологические трудности применения этого способа. Последующая закалочная операция требует обязательного нагрева детали до закалочной температуры [177, 217, 219, 227, 228, 232, 234, 239, 241].

Процесс борирования в расплавах солей осуществляют в тигельных печах-ваннах при температуре 900...1050 °С. Детали укладывают на приспособление и помещают в рабочее пространство печи-ванны на 5...10 ч. Длительность выдержки определяется толщиной диффузионного слоя боридов. Расплав, используемый для осуществления этого процесса, может иметь один из следующих составов: нейтральная соль металла с добавлением активного вещества (бората) и химического восстановителя (карбида бора или ферробора); борат с добавлением металла (кальция, бериллия, магния или лития); борат с добавлением металлургического раскислителя (ферромарганца, ферросилиция, силикокальция или силикомарганца); борат с добавлением специальной лигатуры (например, магниикальциевой); техническая бура с добавлением химического восстановителя (карбида бора или карбида кремния) [177, 217, 219, 220, 223–225, 227–229, 232, 234, 241].

Борирование в расплавах солей не требует использования сложного технологического оборудования, но применяется в промышленности реже, чем электролизный и порошковый методы. Техническое и технологическое осуществление этого процесса не вызывает больших сложностей [177, 217, 219, 220, 223–225, 227–229, 232, 234, 241], но необходимо отметить следующие присущие ему недостатки: интенсивное разъедание стенок тигля (особенно на границе раздела «воздух – расплав»); низкая скорость нагрева ввиду слабого конвективного перемешивания; обеднение слоя расплава у поверхности детали, поэтому относительно высокая длительность обработки при получении слоя необходимой толщины; вынос расплава солей при перезагрузке изделий и сложность его удаления с их остывших поверхностей.

Электролизное борирование в расплавах солей

Жидкостное электролизное борирование в расплавах солей осуществляют в тигельных печах-ваннах при температуре 900...950 °С. Длительность выдержки деталей в рабочем пространстве печи-ванны (при температуре 920...980 °С, напряжении 10...14 В и плотности тока 0,15...0,30 А/см²) зависит от требуемой толщины диффузионного слоя боридов и может составлять от 2,5 до 6 ч [177, 217, 222, 226–232, 234–236, 241, 243]. Расплавленная среда состоит в основном из буры с добавлением борного ангидрида и некоторых солей металлов, улучшающих технологические свойства расплава. При электролизе расплава бор выделяется и на самом катоде и в прикатодном пространстве из-за восстановительных реакций [243]. Расплав электролита при высокой температуре активно взаимодействует со стенками тигля, разрушая их [228]. Защиту стенок тигля производят предварительным борированием внутренней области и катодной защитой (электрическим током плотностью 0,01 А/см²).

По сравнению с борированием в порошках его электролизный аналог не требует специальных подготовительных работ, а также приготовления порошковых смесей. Длительность процесса упрочнения, обеспечивающего получение слоя с сопоставимыми свойствами и толщиной, в 2–3 раза меньше. При этом повышает-

ся стойкость термического оборудования. В отличие от газового способа, электролизное борирование не сопряжено с применением токсичных и взрывоопасных веществ. По сравнению с борированием в расплавах солей этот метод является более стабильным, не требующим частой корректировки состава насыщающей среды, и при этом он производительнее.

К недостаткам технологии электролизного борирования в расплавах солей следует отнести трудность обработки изделий сложной конфигурации и недостаточную стойкость тиглей, даже подвергшихся предварительному борированию и находящихся под катодной защитой. В процессе электролизного борирования в расплаве накапливается нерастворимый осадок. В его состав входят железо, углерод, бор, хром и никель, который оседает на дно и стенки тигля и частично остается во взвешенном состоянии [177, 219, 227, 229, 234].

Железо, хром и никель оказываются в расплаве в результате частичного разрушения тигля и устройства крепления графитовых анодов. Углерод попадает в насыщающую среду при взаимодействии графитовых анодов с расплавом. Аморфный бор образовывается на поверхности катодов и затем смывается в расплав [177, 219, 227, 229, 234].

Интенсивность образования боридного слоя снижается с увеличением содержания железа в насыщающей среде, а превышение его концентрации более 1 % приводит к прекращению борирования и образованию осадка губчатого железа на поверхности детали [177, 219, 227, 229, 234].

Анализ технологических способов восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники на примере стрелчатых лап культиваторов показывает, что по основным критериям большинство из них по объективным причинам не могут быть рекомендованы для решения проблемы обеспечения требуемой долговечности и экономической целесообразности.

По технологическому критерию все наплавочные способы, в основе которых лежат процессы плавления основного и присадочного материалов, не обеспечивают толщины наплавляемого слоя, необходимой для восстановления формы и

размеров, детали, а выделяющееся при этом значительное количество теплоты оплавляет режущую часть рабочего органа почвообрабатывающей техники.

По критерию долговечности рассмотренные способы дугового и газопламенного напыления, гальванического железнения и пластической деформации технологически и технически сложны и обеспечивают невысокую износостойкость режущих поверхностей.

По технико-экономическому критерию способы электронно-лучевого и ионно-плазменного напыления в вакууме, детонационного напыления, а также восстановление деталей пластической деформацией и с помощью гальванических процессов дорогостоящи и не позволят добиться приемлемой цены восстановленных деталей.

Таким образом, перспективным способом восстановления почвообрабатывающих деталей установлен комбинированный, основанный на приварке (или прикручивании винтами) компенсирующей детали, подвергнутой упрочнению наплавкой в жидких теплоносителях, что обеспечит получение покрытия с высокими механическими и, соответственно, эксплуатационными свойствами.

Проанализировав химико-термические методы упрочнения, следует отметить, что для восстановления изношенных поверхностей почвообрабатывающих рабочих органов наиболее подходящим является процесс насыщения бором. При этом электролизное борирование предпочтительнее для обработки компенсирующей детали, чем другие способы борирования. Для обоснованного назначения технологических режимов электролизного борирования необходимо построить теоретическую модель этого процесса.

Для проведения процессов электролизного борирования деталей и наплавки металлических порошков в жидком теплоносителе необходимо технологическое оборудование. Осуществление технологических операций требует также обоснованного использования (разработки) теплоносителя (насыщающей среды) и присадочных (наплавочных) материалов. Поэтому необходим анализ существующих печей-ванн для выбора нужной конструкции для ее модернизации, а также теплоносителей и наплавочных материалов. В этой связи принято решение о проведении анализа оборудования, предназначенного для электролизного борирования и наплавки в жидких теплоносителях.

1.4 Анализ применяемого оборудования

Специфика процесса электролизного борирования, осуществляемого при температуре 850...1000 °С в расплаве электролита, состоит в использовании специальной электротермической установки, представляющей собой печь-ванну с расплавом теплоносителя и нагревательными электродами. Наплавка в жидких теплоносителях подразумевает также применение идентичной печи-ванны [213, 214, 245–248]. Рабочей средой при этом служит электропроводный расплав теплоносителя, обеспечивающий нагрев садки до температуры выше 900 °С без доступа элементов окружающей среды. Процесс безокислительный, его обязательным условием является обеспечение интенсивного нагрева деталей до необходимой температуры. Последующую выдержку для качественного осуществления процессов борирования и наплавки осуществляют с соблюдением следующих термодинамических условий: достаточная температура в рабочей зоне печи-ванны и интенсивное перемешивание теплоносителя [213, 214, 246–248].

Использование печей-ванн, где рабочее пространство футеровано огнеупорным кирпичом, невозможно, поскольку в состав расплавленной среды должен входить такой агрессивный компонент, как бура, которая активно взаимодействует с огнеупорами, содержащими кремнезем, магнезит и глинозем [213, 214, 245–248].

Достаточно просты в эксплуатации тигельные печи-ванны, оборудованные наружным газовым (рисунок 1.13, *а*) или электрическим нагревом (рисунок 1.13, *б*). Они состоят из цилиндрического тигля 1 и нескольких горелок или электронагревателей 3. Горелки тангенциально расположены между наружной стенкой тигля и внутренней стороной футеровки 4, а электронагреватели 3 размещены по периметру футеровки. Отработанные газы выходят через дымовой канал 6 [213, 214, 245, 248].

Тигли таких печей-ванн производят из легированных сталей X25 или X24H12C. Зарубежные конструкторы для изготовления аналогичных тиглей применяют жаростойкий сплав на основе никеля (инконель) [213, 214, 245, 246, 248].

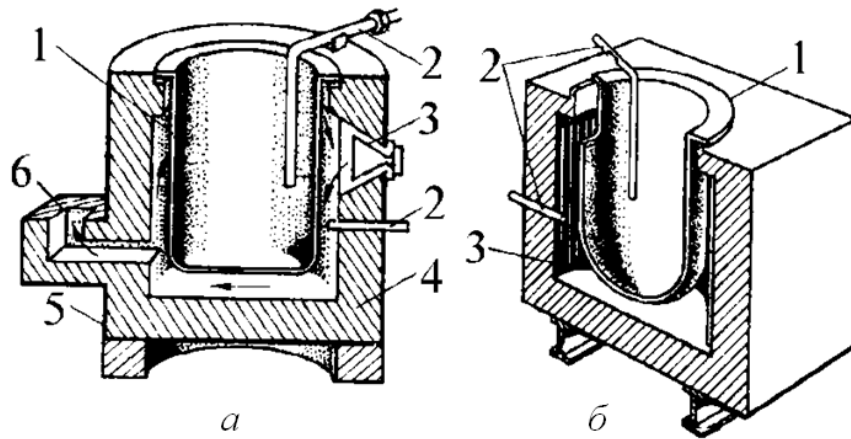


Рисунок 1.13 – Тигельные печи-ванны с наружным газовым (а) и электрическим (б) нагревом:
 1 – тигель; 2 – термопары; 3 – газовые горелки или электрические нагреватели;
 4 – футеровка; 5 – стальной корпус; 6 – канал удаления отработанных газов

Преимуществом тигельных печей-ванн является простота конструкции. К их функциональным недостаткам относятся: низкая стойкость тигля из-за незащищенности от разъедания стенки по границе раздела «воздух – расплав рабочей среды», слабая конвенция (интенсивность перемешивания) расплава и, как следствие, низкая скорость нагрева изделий. Кроме того, применяемая схема наружного газового обогрева взрывоопасна. Следовательно, использование печей-ванн такой конструкции нецелесообразно для наплавки и борирования.

Интерес представляет печь-ванна (рисунок 1.14) с внутренним боковым расположением электродов 5 и вставным стальным тиглем 3, обложенным футеровкой 1 [213, 214, 245, 246, 248]. При прохождении электрического тока (напряжением 25...29 В) в расплаве рабочей среды, обладающей большим омическим сопротивлением, между электродами (25...40 мм) выделяется тепло, нагревающее эту среду.

Техническими достоинствами таких печей являются: наличие возможности за счет термопары и следящего прибора контроля и поддержания в определенных пределах температуры расплава; применение тиглей из низкоуглеродистой стали, а электродов – из легированной жаропрочной стали. К недостаткам этой установки следует отнести большую инерционность процесса нагрева, возможное выгорание, коробление тиглей и окисление их наружных поверхностей, сложность демонтажа тигля и низкий срок службы футеровки. Имеет место также разъедание тигля и электродов по границе раздела «воздух – расплав рабочей среды».

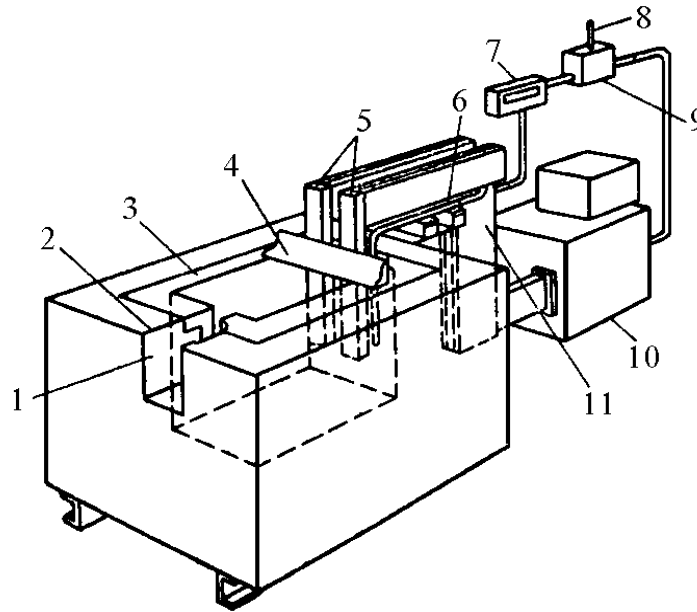


Рисунок 1.14 – Схема электродной печи-ванны со вставным тиглем: 1 – футеровка; 2 – корпус; 3 – металлический тигель; 4 – поддерживающий уголок; 5 – электроды; 6 – термопара; 7 – блок регулирования температуры; 8 – электрический кабель; 9 – контактор; 10 – трансформатор; 11 – электрические шины

Для предотвращения разъедания стальных стенок тигля было предложено использовать тигель из карбонитрида бора, так как этот материал практически не взаимодействует с борсодержащими расплавами. Срок службы такого тигля составляет более 10000 ч [213, 214, 245, 246, 248]. Однако технологическая сложность изготовления крупногабаритных тиглей (и поэтому высокая их стоимость), а также хрупкость этого материала ограничивают практическое применение таких печей.

Для предотвращения разъедания стальных стенок тигля была предложена конструкция печи, в которой тигель 3 с расплавом находится в стальном корпусе 1 с проточной водой (рисунок 1.15) [213, 214, 245, 246, 248]. В результате во время работы печи на стенках тигля с внутренней стороны образуется слой застывшей рабочей среды, который предотвращает разъедание стенок тигля. При таком способе охлаждения тигля скорость течения воды и, соответственно, интенсивность охлаждения тигля около его стенок будут снижаться, а в местах со сложной конфигурацией могут образовываться зоны застоя. Таким образом, защита тигля неодинакова по всему его периметру. Также следует отметить, что при верхнем расположении электроды будут подвержены активному разъеданию по границе раздела «воздух – расплав рабочей среды».

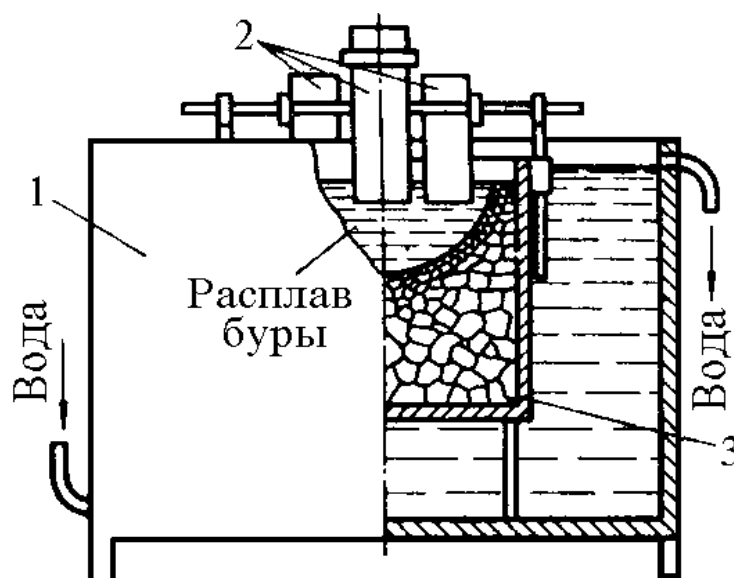


Рисунок 1.15 – Схема печи-ванны с защитой тигля от разъедания: 1 – корпус; 2 – электроды; 3 – тигель

Печь-ванна (рисунок 1.16), разработанная для нагрева и наплавки деталей (приложение Б) в жидком теплоносителе [213, 214, 245, 246, 248], исключает разъедание тигля по границе раздела «воздух – расплав рабочей среды». Водоохлаждаемый корпус 4 и тигель 6 изготовлены из низкоуглеродистого стального листа. Между корпусом 4 и тиглем 6 предусмотрено свободное пространство, которое на стадии монтажа печи-ванны заполняют порошком, состоящим из материала рабочей среды. В этом случае при постепенном выходе установки на рабочий режим внутренние стенки корпуса 4 покрываются теплозащитным и коррозионно-защитным слоем застывшего теплоносителя 3. Объем рабочего пространства определяется мощностью силового трансформатора. Для компенсации увеличения высоты тигля 6 при нагреве предусмотрен зазор 2 между ним и водоохлаждаемым поясом 1. Конструкция печи-ванны предусматривает возможность удаления отработанного шлака через летку в боковых стенках тигля и корпуса. В придонной зоне установлены на стойках электроды 7, изготовленные из коррозионностойкой стали. Так как стойки водоохлаждаемые, то они тоже защищены от разъедания слоем застывшего теплоносителя. Такое расположение электродов способствует конвекции расплава теплоносителя со скоростью $\approx 0,065$ м/с. Нагрев рабочей среды осуществляется так же, как и у описанной ранее электродной печи-ванны (см. рисунок 1.14).

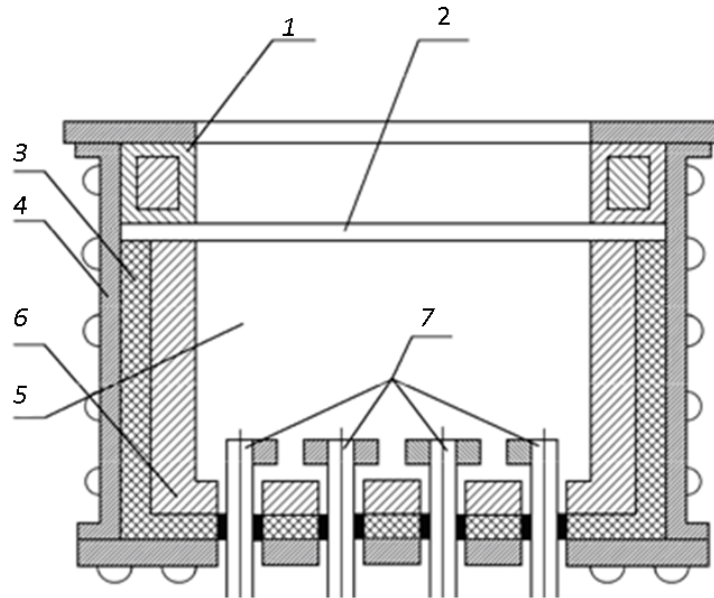


Рисунок 1.16 – Печь-ванна для нагрева и наплавки в жидком теплоносителе:
 1 – водоохлаждаемый пояс; 2 – зазор; 3 – слой застывшего теплоносителя;
 4 – водоохлаждаемый корпус; 5 – рабочее пространство; 6 – тигель;
 7 – водоохлаждаемые электроды

Источником энергии служит силовой трансформатор с соответствующей технической характеристикой (приложение Б).

Однако и эта конструкция печи-ванны обладает недостаточной для нашего случая интенсивностью перемешивания рабочей среды, которая снижает эффективность технологического процесса электролизного борирования и скорость нагрева детали, а постепенно растворяющиеся тигель 6 и электроды 7 (см. рисунок 1.16) повышают содержание железа в расплаве теплоносителя.

Для достижения поставленной цели необходимо обеспечить постоянное движение расплава теплоносителя в рабочем пространстве печи-ванны. Это движение может происходить под действием конвекции, механического перемешивания, действия электромагнитных сил, а также от их возможных комбинаций. В этой связи целесообразной и перспективной представляется теоретически обоснованная разработка новой конструкции печи-ванны на основе конструктивной схемы установки с придонным расположением электродов и водоохлаждаемым поясом. Она позволит повысить скорость нагрева садки вследствие увеличения интенсивности перемешивания рабочей среды за счет изменения расположения

нагревательных электродов. Наряду с этим уменьшится количество железа, попадающего рабочую среду от конструктивных элементов печи.

1.5 Анализ применяемых материалов

Нагрев изделия при наплавке и борировании осуществляют в расплаве различных теплоносителей, в качестве которых могут быть использованы галоидные соли, их смеси, щелочи, кремниевые стекла, составы на основе буры и борного ангидрида [213].

Жидкие теплоносители, включающие в себя расплав галоидных солей щелочных и щелочноземельных металлов, применяют для нагрева деталей при их закалке. Борирование в этой среде может происходить только в том случае, если в расплав добавить определенное количество карбида бора, буры, ферробора или их смесь. Расплав галоидных солей щелочных и щелочноземельных металлов агрессивно взаимодействует с поверхностью детали, разъедая и растворяя ее, что снижает качественные показатели борирования и наплавки. При их нагреве происходит термическая диссоциация этих солей с образованием, в том числе экологически вредного газа хлора и оксидов, загрязняющих расплав теплоносителя [248].

Образовавшиеся оксиды находятся в расплаве во взвешенном состоянии, что значительно уменьшает нагревательную способность теплоносителя и снижает производительность процесса борирования и качественные показатели наплавки. При взаимодействии поверхности стали с расплавом происходит ее обезуглероживание, что существенно ухудшает механические свойства детали [248]. Обезуглероженный поверхностный слой снижает также эксплуатационные свойства изделия, что отрицательно сказывается на износостойкости не упрочненных поверхностей в абразивной среде [216]. Для уменьшения интенсивности процессов разупрочнения на практике применяют добавки в соляные ванны: графит, буру, ферросилиций, березовый активированный уголь, кремний, бор, цианистый натрий, фтористый магний и др. [252, 248, 214]. Однако и эти меры защиты малоэффективны, окисление все же имеет место, хотя и в меньшей степени. Расплав-

ленные соли плохо смачивают сталь, поэтому при извлечении детали из ванны происходит взаимодействие ее разогретой поверхности с атмосферными газами, что снижает качество обработки. В связи с этим проанализированы возможности различных боратных расплавов.

Для электролизного борирования широко используют расплав буры, поставляемой в виде кристаллогидрата [177, 219, 227, 229, 234, 252, 248]. При прокаливании (при температуре 450...550 °С) или плавлении из кристаллогидрата испаряется вода и остается собственно бора. Расплав буры в чистом виде очень агрессивен и химически взаимодействует с восстанавливаемой поверхностью, разъедая ее. При извлечении детали из расплава теплоносителя бора остается на ее поверхности в виде достаточно толстого слоя застывшей и трудноотделимой корки.

Известен синтетический шлак для термической обработки деталей из металлов и сплавов [177, 213, 214, 248, 252], содержащий силикокальций (8–20 %), буру (16–28 %) и борную кислоту. Однако ввиду наличия в данном шлаке повышенного содержания силикокальция резко увеличивается вязкость и уменьшается конвекция расплава, что ведет к значительному снижению скорости нагрева детали.

На практике используют синтетический шлак [177, 213, 214, 248, 252], содержащий фторцирконат калия (1–5 %); борный ангидрид (18–30 %) и буру. При температуре около 1000 °С газопроницаемость этого расплава увеличивается и, как следствие, снижается защита от окисления восстанавливаемой детали после ее удаления из печи-ванны.

Шлак АН-ШТ1 [177, 213, 214, 248, 252], содержащий борный ангидрид (50–70 %); оксид натрия (23,5–27,5 %); оксид железа (до 0,5 %); оксид хрома (до 0,5 %); оксид калия (1,0–2,8 %); оксид циркония (1,2–2,8 %); оксид лития (до 0,12 %); фтор (0,8–2,8 %), в принципе по своим характеристикам может быть применен для наплавки и борирования стальных деталей. Однако присутствующие в его составе оксиды железа и хрома снижают адгезию наплавляемого покрытия, способствуют увеличению вязкости расплава теплоносителя, ухудшают отделимость застывшей корки теплоносителя от поверхности детали и делают этот процесс неэффективным.

Теплоноситель для нагрева деталей из металлов и сплавов [177, 213, 214, 248, 252], содержащий углекислый литий (7–9 %); углекислый калий (15–17 %); фторцирконат калия (4–5 %); борный ангидрид (14–18 %) и буру, пригоден для работы в интервале температур от 780 до 880 °С, что делает невозможным его использование для наплавки деталей металлическими порошками, так как их температура плавления значительно выше. Электролизное борирование проводить в этом теплоносителе также не целесообразно из-за его значительной вязкости при высоких температурах и, следовательно, слабой конвекции расплава.

Анализ свойств и технологических возможностей жидких теплоносителей, применяемых в промышленности, показал, что, несмотря на их перспективность, присущие им недостатки не позволяют их использовать для наплавки и электролизного борирования. В этой связи возникает задача необходимости разработки и теоретического обоснования такого состава теплоносителя, который бы удовлетворял всем достаточно сложным технологическим требованиям наплавки и электролизного борирования и был при этом экологически безопасным.

Технология упрочняющей наплавки компенсирующей детали должна обеспечить наплавляемый слой толщиной ~0,3 мм без припусков на последующую механическую обработку. На горизонтальной поверхности восстанавливаемой детали необходимо предварительно закрепить присадочный материал, который после расплавления и последующего остывания будет представлять собой упрочненный слой рабочей поверхности почвообрабатывающей детали.

Анализ литературы [37, 48, 147, 184, 204] и производственный опыт свидетельствуют о том, что при традиционных способах дуговой, контактной, плазменной и лазерной наплавки, а также плазменного и газотермического напыления необходимые свойства поверхности деталей обеспечиваются с помощью различных легированных присадочных материалов (например, проволоки или ленты сплошного сечения, порошковой проволоки или ленты, а также металлопорошковых материалов). Применение проволок или лент при наплавке в жидком теплоносителе невозможно, так как температура их плавления превышает 1500 °С, а зона наплавки не обозрима. Поэтому особый интерес при упрочняющей наплавке де-

талей в жидких теплоносителях представляет использование металлопорошков. Особую сложность при их назначении вызывает необходимость обеспечения высокой твердости и износостойкости наплавленного слоя. При этом температура плавления металлопорошка должна составлять 1000...1070 °С. Кроме того, он должен обладать флюсующими свойствами для обеспечения прочного сцепления с наплаваемой деталью.

Известны порошки для получения износостойких покрытий на основе железа, кобальта и никеля. Порошки на основе железа и кобальта имеют температуру плавления выше 1500 °С, что неприемлемо при наплавке в жидком теплоносителе. Требованиям по температуре плавления отвечают самофлюсующиеся составы на никелевой основе, после наплавки которых образуются слои, обладающие высокой твердостью и износостойкостью [37, 48, 118, 284]. Данное направление представляет собой инновационную задачу, требующую глубокой теоретической и экспериментальной проработки.

1.6 Постановка проблемы

Увеличение нагрузки на имеющийся в хозяйствах агропромышленного комплекса парк техники и тяжелые условия эксплуатации почвообрабатывающей техники ведут к повышению интенсивности изнашивания их ресурсопределяющих деталей – рабочих органов, что обуславливает снижение количественных показателей долговечности и производительности машин.

На этом основании в диссертационной работе была поставлена и решена научная проблема, заключающаяся в следующем.

Существующие технологии восстановления работоспособности рабочих органов сельскохозяйственной почвообрабатывающей техники не обеспечивают необходимой ее долговечности. Кроме того, отсутствует расчетно-теоретическое вариативное прогнозирование ресурса восстановленных и упрочненных рабочих органов отремонтированной техники.

1.7 Выводы по главе

1. Установлено, что работоспособное состояние культиватора лимитируется техническим состоянием его почвообрабатывающего рабочего органа. Ресурс этой детали ограничен износостойкостью ее рабочих поверхностей и условиями эксплуатации.

2. Анализ износного состояния рабочих органов культиваторов показал, что более 60 % стрелчатых лап культиваторов выходят из строя по причине линейного износа носка (до 30 мм) и крыльев по ширине (до 15 мм). При этом определено, что интенсивность изнашивания лап, установленных в различных местах рамы (первый либо второй ряд, по следам движителей и опорных колёс), значительно различается. Менее интенсивно по отношению к лапам первого ряда (на 12–15 %) 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. Следовательно, несмотря на работоспособное состояние части рабочих органов, необходимо остановить эксплуатацию для замены достигших предельного состояния деталей, а возможно и всех рабочих органов, в том числе имеющих остаточный ресурс.

3. Определено, что при достижении стрелчатой культиваторной лапой предельного состояния вследствие абразивного изнашивания форма и размеры оставшейся ее части, а также запас прочности и жесткость позволяют разрабатывать способы восстановления ее работоспособности.

4. Анализ существующих способов восстановления и упрочнения почвообрабатывающих рабочих органов культиваторов показывает, что большинство из них не может быть рекомендовано по следующим критериям: технологическому, долговечности, технико-экономическому и экологическому.

5. В результате анализа установлен перспективный способ восстановления стрелчатых почвообрабатывающих рабочих органов культиваторов за счет использования дополнительной компенсирующей детали, которая должна быть подвергнута упрочнению предлагаемыми теоретически обоснованными методами

наплавки в жидких теплоносителях и электролизного борирования, так как они обеспечивают получение упрочняющего покрытия с высокими механическими и эксплуатационными свойствами.

6. При анализе существующих конструкций печей-ванн были выявлены их существенные недостатки, которые не позволяют использовать эти установки. Поэтому необходимо разработать новую теоретически обоснованную конструкцию печи-ванны для проведения электролизного борирования и наплавки деталей машин в жидком теплоносителе.

7. Анализ жидких теплоносителей, применяемых в промышленности, показал, что присущие им недостатки не позволяют их использовать напрямую для наплавки и электролизного борирования, т. е. выявлена необходимость разработать новый состав теплоносителя и дать его теоретическую оценку.

8. Анализ существующих наплавочных материалов для наплавки в жидких теплоносителях дополнительной компенсирующей детали, восстанавливающей работоспособность стрелчатой лапы культиватора, позволил установить применимость металлопорошков самофлюсующихся сплавов на никелевой основе, которые обеспечивают высокие твердость и износостойкость упрочненного слоя.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ

Разработка и совершенствование технологических процессов восстановления и упрочнения деталей машин, позволяющих увеличивать их ресурс, основаны на анализе множества факторов, оптимизация которых возможна только посредством глубокой математической проработки.

Разработка, а затем принятие инновационных технологических и технических решений при восстановлении и упрочнении изношенных деталей наплавкой в жидком теплоносителе и электролизным борированием требуют их научного обоснования и оптимизации путем проведения теоретических исследований процессов и явлений, протекающих при этом в печи-ванне.

Такие теоретические исследования необходимы для получения прогнозируемых высококачественных результирующих показателей восстановленной почвообрабатывающей техники путем обоснованного назначения технологических, технических и конструктивных параметров. Исходя из этого, особую значимость придавали решению следующих задач:

- исследование температурных факторов, воздействующих на образование среды электролизного борирования;
- исследование диффузионных факторов, участвующих в создании условий электролизного борирования;
- исследование металлургических факторов, участвующих в получении наплавочной среды.

В соответствии с поставленными задачами проанализировать кинетику процессов наплавки и электролизного борирования возможно путем теоретического исследования и итогового обоснования следующих процессов:

- химико-физической кинетики процесса электролизного борирования;
- диффузионных процессов насыщения поверхности восстанавливаемых деталей в расплаве рабочей среды;
- тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне;

- процесса электролизного борирования при упрочнении восстанавливаемых деталей;
- процесса нагрева и нанесения металлопорошка на поверхности деталей при наплавке в жидком теплоносителе.

2.1 Теоретическая оценка вариативного прогнозирования ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники

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. К основным факторам, определяющим их ресурс, относятся [24, 33, 34, 46, 50, 51, 59, 62–64, 69, 70, 72, 74, 75, 81, 84, 85, 87–92, 94–96, 102, 108, 250, 266]:

- гранулометрический состав, структура, влажность и твердость почвы;
- технологические режимы обработки почвы;
- геометрическая форма рабочих органов;
- механические и эксплуатационные свойства материалов, из которых изготовлены рабочие органы.

Решение такой задачи представляет определенные трудности даже для детерминированной ее постановки, поэтому оно может быть осуществлено либо аналитически, либо имитационным моделированием [27–29, 33, 69, 70, 75, 85, 249, 250]. При этом должен быть соблюден достоверный критерий перехода детали по параметрам формы и размеров в неработоспособное состояние. Для почвообрабатывающих рабочих органов таким критерием является предельная величина износа их режущей части, при которой становится невозможным качественное выполнение агротехнических операций. Исходя из этого, рассматривали условия их работы и интенсивность изнашивания.

Процесс режущей обработки почвы при культивации используемыми для этих целей рабочими органами сводится к перемещению в ней клина с плоской

поверхностью. При этом происходят крошение и скалывание, а затем перемещение почвы по его рабочей поверхности [33, 49, 72, 74, 75, 87].

В почве всегда содержится некоторое количество кислот, щелочей и солей, которые, растворяясь в воде, адсорбируются в поверхностный слой рабочего органа и интенсифицируют процесс изнашивания детали [24, 33, 50, 88, 90, 96, 102, 108].

Чем выше твердость поверхности детали и ниже пластичность основы, тем большей износостойкостью она обладает. Например, наличие в структуре детали карбидных, нитридных и боридных фаз в 3–5 раз более эффективно, чем закалка повышают ее износостойкость [2, 27–29, 33–36, 46, 51, 61–65, 68–70, 81, 82, 84, 85, 105, 173, 221, 229].

Разрушающее воздействие абразивных частиц на поверхность детали зависит от их формы, степени закрепленности в почве, механических свойств и нагрузки. Примерно 10 % абразивного изнашивания приходится на микрорезание поверхности детали минеральными составляющими почвы [27–29, 33–36, 46, 59, 62–64, 81, 84, 105].

При столкновении абразивной частицы с поверхностью детали в области, прилегающей к пятну контакта, образуются зоны действия сжимающих и растягивающих напряжений. Поэтому напряженно-деформированное состояние микрообъемов в этих зонах многократно изменяется. Также там могут протекать процессы, свойственные адсорбционным, окислительным, деструкционным, структурно-фазовым переходам и рекристаллизационным превращениям. На основании того, что эти воздействия на микроскопические объемы монотонно повторяются, в той же последовательности растут внутренние микронапряжения. Это продолжается до наступления некоторой их стабилизации, после которой происходит катастрофический рост этих напряжений вплоть до разрушения и отделения микрообъемов. Таким образом, возникает знакопеременная цикличность нагружения микроскопических объемов поверхностных участков материала детали. При этом в результате действия внутренних напряжений в деформируемых микрообъемах материала детали образуется и запасается потенциальная разрушительная энергия. Ее перенасыщение ведет к возникновению и в дальнейшем к линейному суммированию различных дефектов, постепенно переходящих в повреждения в виде

микротрещин в микроскопических зонах поверхности детали. Этому также способствует действие растягивающих напряжений на границе раздела зон упругой и пластической деформации, разупрочненных тепловыделением. Все это является результатом фрикционно-контактной усталости материала детали, если напряжения или деформации, возникающие при однократном взаимодействии абразивных частиц с поверхностью, не достигают предельных значений (микрорезание отсутствует) [27–29, 33, 35, 36, 250].

Поскольку математически учесть и описать все эти особенности происходящих процессов не представляется возможным, то расчетная модель должна базироваться на определенных допущениях. Для корректного упрощения моделирования процесса взаимодействия почвы и рабочего органа принимаем, что непрерывный поток почвы воздействует при ее обработке на неподвижный рабочий орган (рисунок 2.1).

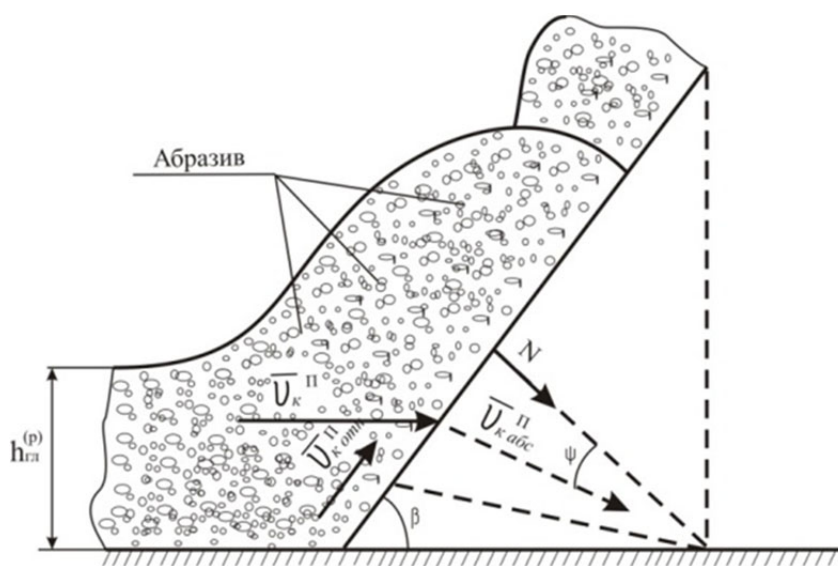


Рисунок 2.1 – Расчетная схема процесса трибовзаимодействия рабочей поверхности и почвы: ψ – угол скалывания, град.; $v_{конт}^{п}$ и $v_{к.абс}^{п}$ – относительная и абсолютная поступательные скорости потока почвы

Принимаем, что этот поток содержит абразивные частицы сферической формы одинакового размера, плотности и прочности. Встреча почвы, движущейся сплошным потоком, с поверхностью детали происходит под углом крошения β рабочего органа, скорость которого идентична по величине и направлению скорости движения почвообрабатывающей техники [27–29, 33, 35, 36, 250].

Исходя из этого можно предположить, что повторные контакты одних и тех же абразивных частиц с поверхностью детали невозможны. Их размер несоизмеримо меньше среднего расстояния между ближайшими соседними движущимися частицами и размещаются они в объеме обрабатываемой почвы в случайном порядке с постоянной плотностью распределения по нормальному закону Гаусса.

Контактами абразивных частиц между собой в потоке пренебрегаем, поскольку их результат в данном случае ничтожен. Таким образом, учитываем фактор того, что абразивная частица взаимодействует только с изнашиваемой поверхностью, и этот процесс является случайным и стационарным.

Предположим, что при контакте с поверхностью абразивная частица деформирует ее, образуя субмикрорунку и зону наклепа материала детали под ней. Затем частица выскальзывает из микрорунки и перемещается вдоль поверхности (в расчетах принимаем как полупространство) на некоторое расстояние без перекатывания.

Кинетическая энергия движения абразивной частицы расходуется на пластичное деформирование поверхности материала детали, преодоление адгезии и диссипацию. Одной из характеристик кинетической энергии является коэффициент трения скольжения абразивной частицы по поверхности детали. При этом на нее действуют две силы: касательная сила трения, которая тормозит движение с образованием теплоты (энергии), и нормальная реакция, стремящаяся ее вытолкнуть.

Комплексный характер рассмотрения процессов абразивного изнашивания приводит к необходимости постановки корректной математической задачи определения ресурса с применением методов теории подобия и моделирования.

Для решения поставленной теоретической задачи в исходные данные были включены механические, фрикционно-усталостные, микрогеометрические, а также нагрузочные характеристики почвообрабатывающих рабочих органов. Учитывая, что на поверхности детали действует неравномерно распределенное давление, создаваемое почвенным пластом, аналитическое выражение для определения ресурса рабочего органа почвообрабатывающей техники представляет собой интегральную сумму изнашиваний микроскопических участков поверхности [27–29, 35, 36, 250, 251].

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 [27–29, 35, 36, 250, 251].

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 [27–29, 35, 36, 250, 251]. Временным фактором в этом случае является частота контактов абразивных частиц с одной и той же микроскопической зоной поверхности детали до наступления момента отделения субмикрочастицы металла с поверхности детали. Пространственным фактором будет взаимодействие соседних микроскопических зон упругопластических деформаций поверхностного слоя детали от воздействия абразивных частиц в произвольный момент времени.

Количественная оценка процесса разрушения поверхностных слоев с учетом концепции аккумуляции фрикционных повреждений, полученная на основе теоретического и практического изучения процесса абразивного изнашивания деталей, позволяет прогнозировать ресурс почвообрабатывающих рабочих органов при эксплуатации после изготовления или восстановления (упрочнения), используя формулу:

$$S^{(T)} = \frac{k^{(\Sigma)} HV^{2,5} V_{из}^{(T)} \sigma_B n^{(\sigma)}}{h_{гп}^{(p)} R_{аб}^3 (\sigma_{сж}^{аб})^{2,5} v_k^n H_{тв}^{(p)}}, \quad 2.1$$

где $S^{(T)}$ – ресурс рабочих органов в эксплуатации, га;

$k^{(\Sigma)}$ – интегральный коэффициент, га м/с;

HV – твердость режущей части, МПа;

$V_{из}^{(T)}$ – величина предельного износа рабочего органа, m^3 , $V_{из}^{(T)} = 1,53 \cdot 10^{-5} m^3$;

σ_b – предел прочности стали, МПа [74, 75, 77–79];

$n^{(\sigma)}$ – число циклов нагружения, $n^{(\sigma)} = 140...160$ [29];

$h_{тл}^{(p)}$ – глубина обработки почвы, м, $h_{тл}^{(p)} = 0,08...0,15$ м;

$R_{аб}$ – средний радиус абразивных частиц, м, $R_{аб} = (1,5...3,5) \cdot 10^{-4}$ м [24, 33, 50, 88, 90, 96, 102, 108];

$\sigma_{сж}^{аб}$ – предел прочности абразива на сжатие, МПа, $\sigma_{сж}^{аб} = 80...145$ МПа [27, 29, 33, 85];

v_k^n – поступательная скорость потока почвы, м/с, $v_k^n = 1,7...3,3$ м/с;

$H_{тв}^{(p)}$ – твердость почвы, МПа, $H_{тв}^{(p)} = 1,0...2,0$ МПа [50, 88–92, 94, 102, 108].

Расчеты проводили для деталей, изготовленных из сталей 30 и 65Г, обработанных по различным технологиям и работающих в одинаковых условиях (рисунок 2.2).

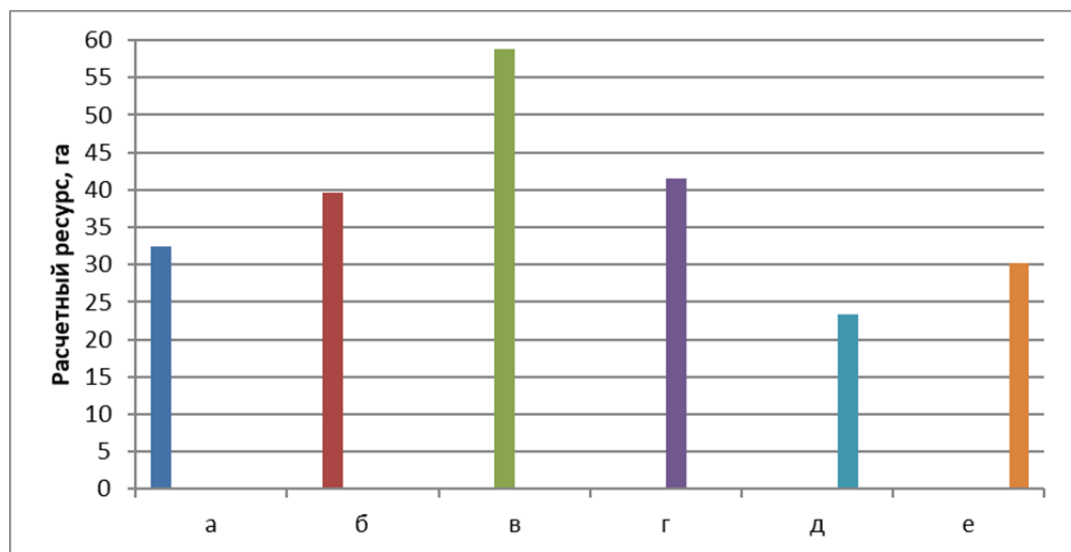


Рисунок 2.2 – Результаты прогнозирования величины ресурса рабочих органов почвообрабатывающей техники, восстанавливаемых и упрочняемых по следующим технологиям: а – цементация стали 30; б – электроискровое легирование стали 30; в – борирование стали 30; г – наплавка в жидком теплоносителе стали 30; д – закалка стали 65Г; е – газотермическая наплавка стали 30

Установлено, что теоретически увеличению ресурса почвообрабатывающих рабочих органов способствует обоснованный рост следующих параметров рабочих органов: твердости режущей части, предела прочности основы и усталостной прочности при контактном точечном взаимодействии. К снижению ресурса поч-

вообрабатывающих рабочих органов ведет рост глубины обработки почвы, радиуса абразивных частиц, предела прочности абразива на сжатие, поступательной скорости потока почвы и ее твердости. Расчеты показывают, что борирование и наплавка в жидком теплоносителе должны обеспечивать более высокий ресурс рабочих органов почвообрабатывающей техники.

2.2 Исследование диффузионных процессов насыщения поверхности восстанавливаемых деталей в расплаве электролита

Движение ионов в расплаве рабочей среды исследуют на основе изучения процессов миграции, диффузии и конвекции. При этом значимыми технологическими параметрами, определяющими интенсивность электролизного процесса, являются величины потока катионов бора и их концентрация, предельная катодная плотность тока, концентрационное перенапряжение и потенциал выделения бора [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265]. Поэтому необходимо установить значения этих параметров для оценки возможности использования теплоносителей и выбора оптимального из них.

Анализом установлены составы рабочей среды, позволяющие проводить электролизное борирование и наплавку (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Составы теплоносителей для электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе

| Обозначение состава теплоносителя | Химический состав, % | Источник информации |
|-----------------------------------|---|---------------------|
| А (существующий) | тетраборат натрия – 80 фтористый натрий – 20 | [177, 227] |
| Б (существующий) | тетраборат натрия – 100 | [177, 227, 229] |
| В (предлагаемый) | тетраборат натрия – 52–58 борный ангидрид – 14–18 поташ – 15–17 метасиликат натрия – 5–7 фторцирконат калия – 4–5 | [255] |

Необходимо сделать обоснованный выбор теплоносителя, максимально удо-

влетворяющего требованиям технологических процессов для нашего случая.

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 [186], 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 следующей системой [186, 245]:

$$J_i = C_i \bar{V} - D_i \text{grad} C_i + C_i D_i Z_i^z F E_{\text{эл}} / R_y T, \quad (2.2)$$

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, м²/с;

Z_i^z – заряд i -го иона;

F – постоянная Фарадея, Кл/моль;

$E_{\text{эл}}$ – напряженность электрического поля в расплаве, В;

R_y – универсальная газовая постоянная;

T – температура среды, °С.

На основании закона сохранения вещества, с учетом условий несжимаемости жидкости и постоянства ее температуры, а также неизменности коэффициента диффузии D_i система уравнений (2.2), описывающая направленное движение ионов в расплавленной среде [186, 245, 260, 262], примет вид:

$$\partial C_i / \partial t + (\bar{V} \text{grad}) C_i = D_i \Delta C_i + (D_i Z_i^z F / R_y T) \text{div}(C_i E_{\text{эл}}), \quad (2.3)$$

где t – время прохождения процесса, с.

Напряженность электрического поля в расплаве зависит от изменения в нем концентраций ионов, следовательно, для корректного решения системы (2.3) учитываем, что плотность заряда в объеме расплава рабочей среды пренебрежимо мала. В таком случае для последующих расчетов принимаем, что на катоде разряжаются только катионы бора, а на аноде – анионы кислорода, т. е. расплав ра-

бочей среды – бинарный. Тогда математическая модель протекающих процессов может быть построена следующим образом [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265]:

$$\partial C_2 / \partial t + (\bar{V} \text{grad}) C_2 = D_2 \Delta C_2 + (D_2 Z_2^z F / R_y T) \text{div}(C_2 E_{\text{эп}}); \quad (2.4)$$

$$\partial C_3 / \partial t + (\bar{V} \text{grad}) C_3 = D_3 \Delta C_3 - (D_3 Z_3^z F / R_y T) \text{div}(C_3 E_{\text{эп}}), \quad (2.5)$$

где C_3 – концентрация аниона кислорода в рабочей среде, моль/л;

D_3 – коэффициент диффузии аниона кислорода в рабочей среде, м²/с;

Z_3^z – заряд аниона кислорода.

Учитывая условие электронейтральности, заменим отдельные концентрации катионов и анионов обобщенной мольной концентрацией ионов:

$$C_M^0 = C_2 / Z_2^z = C_3 / Z_3^z. \quad (2.6)$$

На этом основании выражения (2.4) и (2.5) принимают вид:

$$\partial C_M^0 / \partial t + (\bar{V} \text{grad}) C_M^0 = D_2 \Delta C_M^0 + (D_2 Z_2^z F / R_y T) \text{div}(C_M^0 E_{\text{эп}}); \quad (2.7)$$

$$\partial C_M^0 / \partial t + (\bar{V} \text{grad}) C_M^0 = D_3 \Delta C_M^0 + (D_3 Z_3^z F / R_y T) \text{div}(C_M^0 E_{\text{эп}}). \quad (2.8)$$

После вычитания выражения (2.7) из выражения (2.8), получим:

$$(D_3 - D_2) R_y T \Delta C_M^0 = (Z_2^z D_2 + Z_3^z D_3) F \text{div}(C_M^0 E_{\text{эп}}). \quad (2.9)$$

Известно, что стоки ионов на граничной поверхности не влияют на уравнение диффузии, так как оно описывает баланс количества ионов в объеме расплава [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265]. Поэтому процесс конвективной диффузии при электролизе является стационарным.

После преобразований, учитывающих стационарность процесса, получим систему дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих перенос ионов в расплаве рабочей среды конвекцией и диффузией:

$$(\bar{V} \text{grad}) C_M^0 = D_3 \Delta C_M^0. \quad (2.10)$$

где D_3 – эффективный коэффициент диффузии для бинарного расплава рабочей среды, м²/с:

$$D_3 = D_2 D_3 (Z_2^z + Z_3^z) / (D_2 Z_2^z + D_3 Z_3^z). \quad (2.11)$$

Для количественной оценки диффузионного переноса катионов бора в расплаве электролита определяют число Прандтля σ , позволяющее установить преобладание либо диффузионной, либо конвективной составляющей процесса электролизного борирования [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265] по формуле:

$$\sigma = \nu^p / D_2 = \nu^p / k^p, \quad (2.12)$$

где ν^p – кинематическая вязкость расплавленной сплошной среды, $\text{м}^2/\text{с}$;

k^p – температуропроводность расплавленной сплошной среды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Кинематическая вязкость расплавленной сплошной среды:

$$\nu^p = \eta_{\text{дв}}^p / \rho_{\text{стм}}, \quad (2.13)$$

где $\eta_{\text{дв}}^p$ – динамическая вязкость расплавленной сплошной среды, $\text{Н} \cdot \text{с}/\text{м}^2$;

$\rho_{\text{стм}}$ – плотность расплавленной сплошной среды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Коэффициенты диффузии катионов бора D_2 и ионов кислорода D_3 в объеме расплава рабочей среды определяют из уравнения Стокса – Эйнштейна [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265] с учетом величин радиусов катиона бора $r_{\text{б}}^{\text{и}}$ и иона кислорода $r_{\text{к}}^{\text{и}}$.

Полученное диффузионное число Прандтля для расплава рабочей среды превышает величину 10^6 , а коэффициент диффузии в расплаве настолько мал, что даже при низкой интенсивности конвекции транспортирование ионов в объеме ванны происходит в большей степени конвективными потоками, т. е. диффузионной составляющей можно пренебречь [186, 245]. Исходя из этого, получим систему дифференциальных уравнений, описывающих конвективный перенос ионов в расплаве:

$$(\bar{V} \text{grad}) C_i = 0. \quad (2.14)$$

Решения системы (2.14) справедливы только до пограничного слоя Прандтля. В поверхности этого слоя до начала его диффузионной части имеет место и конвективный, и диффузионный перенос ионов, происходящий как по нормали к этому слою, так и параллельно ему [186, 245]. Толщина этого пограничного слоя

меняется по длине обтекаемой поверхности катода из-за влияния тангенциальной составляющей конвекции расплава:

$$\delta_{\text{Пр}} = 5,2w^{-0,5} (\nu^{\text{п}} z)^{0,5}, \quad (2.15)$$

где $\delta_{\text{Пр}}$ – величина пограничного слоя Прандтля, м;

w – скорость движения расплава вдоль поверхности катода, м/с;

z – координата по оси, направленной вдоль обтекаемой поверхности катода, м.

Толщина диффузионной части пограничного слоя Прандтля составляет 10 % общей его толщины и располагается она непосредственно на поверхности катода [186, 245]. В этой части конвективная составляющая переноса ионов уменьшается до нуля, а преобладающей становится диффузионная составляющая $\delta_{\text{д}}$:

$$\delta_{\text{д}} = 5,2(\nu^{\text{п}})^{0,17} z^{0,5} w^{-0,5} D_2^{0,33}. \quad (2.16)$$

Поверхность катода, на которой происходит электрохимическая реакция, считается полубесконечной и равнодоступной для процесса электролиза ионов, так как радиус кривизны этой поверхности и ее линейные размеры многократно превышают толщину пограничного слоя Прандтля [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265].

Математическая модель диффузионного потока катионов бора на катод в пограничном слое строится с учетом следующих условий: $\partial^2 C_2 / \partial y^2 \gg \partial^2 C_2 / \partial z^2$, $w \gg u$, а $\partial C_2 / \partial y \gg \partial C_2 / \partial z$. Она принимает следующий вид:

$$J_2^{\text{д}} = D_2 (\partial C_2 / \partial y)_{y=0} = 0,34 C_2^0 w^{0,5} (\nu^{\text{п}} z)^{-0,5} (D_2^2 \nu^{\text{п}})^{0,33}. \quad (2.17)$$

Для проведения расчетов необходимо определить концентрацию катионов бора в объеме расплавленной сплошной среды по формуле:

$$C_2^0 = 0,01 \varphi_2 \rho_{\text{стм}}, \quad (2.18)$$

где φ_2 – молярная доля катионов бора;

$\rho_{\text{стм}}$ – плотность расплавленной сплошной среды, кг/м³.

Результаты расчетов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – 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 |

Суммарный поток катионов в пограничном слое Прандтля, обеспечивающий прохождение процесса электролиза и позволяющий оценить его интенсивность, определили по формуле:

$$J_2^{D,K} = D_2 (\partial C_2 / \partial y)_{y=0} = 0,68 C_2^0 b_k (w l_k)^{0,5} (\nu^p z)^{-0,5} (D_2^2 \nu^p)^{0,33}, \quad (2.19)$$

где b_k и l_k – ширина и длина поверхности катода, м.

Результаты расчетов сведены в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Результаты расчетов диффузионного потока катионов бора

| Скорость конвекции расплава, м/с | Диффузионный поток катионов бора в расплавах теплоносителя, $\times 10^{-5}$ моль/(м ² ·с) | | |
|--|--|-------|------|
| | А | Б | В |
| 0,01 | 2,54 | 3,55 | 3,95 |
| 0,05 | 5,68 | 7,94 | 8,83 |
| 0,10 | 8,03 | 11,23 | 12,5 |
| 0,15 | 9,84 | 13,75 | 15,3 |
| 0,20 | 11,36 | 15,88 | 17,7 |
| 0,26 | 12,95 | 18,1 | 20,1 |

Катионы достигают поверхности катода посредством диффузии и миграции. Затем они практически моментально разряжаются, поэтому их концентрация в тонком прикатодном слое расплава уменьшается до весьма малой величины. Это свидетельствует о достижении максимально возможной разности концентраций

ионов между расплавом и прикатодным слоем, что значительно увеличивает их диффузионный поток. Поскольку миграция даже при повышении плотности катодного тока и потенциала катода не может компенсировать падения концентрации катионов бора, то доставка необходимого их количества обеспечивается диффузией. Таким образом, кинетика этого процесса определяется интенсивностью диффузии катионов бора [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265].

При этом молярная концентрация не зависит от действия электрического поля, присутствующего в расплаве рабочей среды. Распределение его напряженности с учетом того, что ток в расплаве бинарного электролита уравнивается разнонаправленным движением катионов и анионов, описывается системой:

$$E_{\text{эл}} = (R_y T (D_2 - D_3) / F (Z_2^z D_2 + Z_3^z D_3)) \text{grad} C_M^0 / C_M^0. \quad (2.20)$$

Применив уравнение Нернста для стационарного режима электролиза, когда количество ионов, перемещающихся к поверхности электрода, равняется количеству ионов, реагирующих в единицу времени на этой поверхности, получим выражение для определения диффузионного потенциала бинарного расплава рабочей среды φ_D :

$$\varphi_D = \varphi_D^0 + R_y T (D_2 - D_3) \ln C_M^0 / F (Z_2^z D_2 + Z_3^z D_3), \quad (2.21)$$

где φ_D^0 – потенциал электрода без концентрационной поляризации, В.

Плотность катодного тока i_k :

$$i_k = (C_2^o - C_2^k) Z_2^z F D_2 / (1 - n_{\text{кб}}) \delta_o, \quad (2.22)$$

где C_2^k – концентрация катионов бора у поверхности катода, моль/м³;

$n_{\text{кб}}$ — число переноса катионов бора.

При снижении концентрации катионов бора в прикатодном слое до бесконечно малой величины катодная плотность тока $i_{\text{кп}}$ принимает максимальное значение:

$$i_{\text{кп}} = C_2^o Z_2^z F D_2 / (1 - n_{\text{кб}}) \delta_o. \quad (2.23)$$

Результаты расчетов по формуле (2.23) сведены в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – **Предельная катодная плотность тока**

| Скорость конвективного движения расплава, м/с | Состав расплава теплоносителя и параметры 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 |

Прохождение катионов через пограничный слой Прандтля замедляет течение всей электрохимической реакции. На величину этого замедления оказывают влияние движение катионов через диффузионный слой и их переход сквозь двойной электрический слой. Переход ионов через двойной электрический слой происходит под действием потенциала разряда, увеличивающегося при образовании атомов. При этом считаем, что градиент является значительной величиной, так как толщина этого слоя равна всего лишь нескольким атомам. В данном случае концентрация катионов бора по мере приближения к поверхности катода снижается, что сопровождается образованием электродвижущей силы концентрационного перенапряжения, действующей в направлении увеличения концентрации катионов бора [249, 256, 257, 260, 261, 263, 265]. Концентрация катионов бора у поверхности катода C_2^k :

$$C_2^k = C_2^o (i_{\text{кп}} - i_{\text{к}})(i_{\text{кп}})^{-1}. \quad (2.24)$$

Результаты расчетов по формуле (2.24) сведены таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Концентрация катионов бора в прикатодном слое

| Состав расплава теплоносителя и параметры электролизного борирования | | | | | | | | |
|--|---|--|--|---|--|--|---|--|
| А | | | Б | | | В | | |
| предельная катодная плотность тока, А/м ² | катодная плотность тока, А/м ² | концентрация катионов бора в прикатодном слое, моль/м ³ | предельная катодная плотность тока, А/м ² | катодная плотность тока, А/м ² | концентрация катионов бора в прикатодном слое, моль/м ³ | предельная катодная плотность тока, А/м ² | катодная плотность тока, А/м ² | концентрация катионов бора в прикатодном слое, моль/м ³ |
| 377 | 2000 | – | 575 | 2000 | – | 634 | 2000 | – |
| 850 | 2000 | – | 1293 | 2000 | – | 1424 | 2000 | – |
| 1191 | 2000 | – | 1847 | 2000 | – | 2021 | 2000 | 154 |
| 1448 | 2000 | – | 2217 | 2000 | 1300 | 2483 | 2000 | 2880 |
| 1675 | 2000 | – | 2586 | 2000 | 3014 | 2803 | 2000 | 4240 |
| 1928 | 2000 | – | 2928 | 2000 | 4215 | 3230 | 2000 | 5636 |

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 величина предельной катодной плотности 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. Анализ этих теоретических моделей показывает, что для уменьшения концентрационного перенапряжения необходимо снизить градиент концентрации катионов бора в прикатодном слое. Увеличение скорости их движения в расплаве электролита снижает величину этого градиента концентрации. Добиться этого можно за счет интенсификации процесса перемешивания электролита. Механическое перемешивание расплава электролита в ванне технически не возможно, поэтому предлагается осуществить интенсификацию конвективного движения путем создания в расплаве градиентов температур.

Для обоснованного назначения режимов электролизного борирования необходимо определить электрический потенциал выделения бора при электролизе из расплава электролита. Для этого следует провести теоретическое химико-физическое исследование кинетики данного процесса.

*Химико-физическое исследование кинетики процесса
электролизного борирования*

Анализом вопроса электролизного борирования установлено, что поставщиками катионов бора в предложенном составе электролита являются тетраборат натрия и борный ангидрид [214, 252, 253, 254, 255, 256]. На этом основании термодинамически эту систему следует рассматривать как расплав рабочей среды, состоящий из катионов бора, натрия и анионов кислорода [177, 216, 217, 227–229, 233–235, 238–243]. Следовательно, при приложении к расплаву определенной разности потенциалов ионы бора и натрия будут разряжаться на катоде, а ионы кислорода – на аноде. Химико-физическое исследование кинетики процесса электролиза боратно-натриевых расплавов производили путем сравнения напряжений разложения следующих электролитических ячеек:



Процессы, происходящие в первой и второй электролитических ячейках, представляют собой реакции разложения оксида натрия и борного ангидрида:



В соответствии с теорией Гиббса изменение изобарного потенциала реакции разложения оксида натрия (2.27) в нашем случае устанавливается для термодинамической температуры, при которой ведется борирование, с учетом изменения этого потенциала в стандартных условиях и химических потенциалов реагентов [227–229, 252–258, 263–266]. Так как при этой температуре возникают фазовые

переходы, то изменение условий электролиза согласно теории Вант-Гоффа описывается уравнением:

$$\Delta G_{1,T} = \Delta G_{1,T_{cr}}^0 + R_y T \ln \left((p_{O_2})^{0,5} (\alpha_1)^{-1} \right), \quad (2.29)$$

где $\Delta G_{1,T_{cr}}^0$ – изменение энергии Гиббса разложения оксида натрия в стандартных условиях, Дж/моль;

T – температура процесса, °С;

R_y – универсальная газовая постоянная, Дж/К·моль;

p_{O_2} – парциальное давление кислорода, Па;

α_1 – активность оксида натрия при рабочей температуре.

Изменение энергии Гиббса в стандартных условиях с учетом энтальпии и энтропии реакции разложения оксида натрия определяется по следующему выражению:

$$\Delta G_{1,T_{cr}}^0 = \Delta H_{1,T}^0 - T \Delta S_{1,T}^0, \quad (2.30)$$

где $\Delta H_{1,T}^0$ – энтальпия разложения оксида натрия (2.27) при температуре борирования T (приложение В), Дж/моль;

$\Delta S_{1,T}^0$ – изменение энтропии разложения оксида (2.27) при температуре борирования, Дж/(°С·моль).

Энтальпия разложения оксида натрия при температуре борирования T :

$$\Delta H_{1,T}^0 = \Delta H_{1,T_{cr}}^0 + \int_{T_{cr}^0}^T \Delta C^p dT \pm \Delta H_{ф.пл.}, \quad (2.31)$$

где ΔC^p – суммарное изменение теплоемкостей, Дж/(°С моль);

$\Delta H_{ф.пл.}$ – энтальпия фазовых переходов оксида натрия при температуре фазовых переходов $T_{ф.пл.}$, Дж/моль.

Из выражения (2.31) суммарное изменение теплоемкостей из состава расплава в зависимости от температуры:

$$\Delta C^p = \Delta a + \Delta b T + \Delta c' / T^2, \quad (2.32)$$

где Δa , Δb , $\Delta c'$ – коэффициенты теплоемкостного ряда (приложение B).

Тогда изменение энтропии реакции разложения оксида натрия при рабочей температуре имеет вид:

$$\Delta S_{1,T}^0 = \Delta S_{1,T_{cr}^0}^0 + \int_{T_{cr}^0}^T \frac{\Delta C^P}{T} dT \pm \frac{\Delta H_{\phi.п.1}}{T_{\phi.п.1}}, \quad (2.33)$$

где $\Delta S_{1,T_{cr}^0}^0$ – изменение энтропии разложения оксида натрия (2.27) при стандартной температуре (приложение B), Дж/(°С·моль).

Напряжение разложения E_1 в этом случае с учетом выражений Нернста и изменения изобарного потенциала [227–229, 252–258, 263–266]:

$$E_1 = \Delta G_{1,T} / 2F = \left(\Delta G_{1,T_{cr}^0}^0 + R_y T \ln \left((p_{O_2})^{0,5} (\alpha_1)^{-1} \right) \right) / 2F, \quad (2.34)$$

где F – постоянная Фарадея, Кл/моль.

Следовательно, исходя из выражения (2.28), изменение энергии Гиббса реакции разложения борного ангидрида необходимо определять для температуры, при которой ведется электролизное борирование, учитывая это изменение в стандартных условиях с учетом химических потенциалов реагирующих веществ. На этом основании принято решение, что изменение энергии Гиббса можно рассчитать с учетом уравнения Вант-Гоффа [227–229, 252–258, 263–266]:

$$\Delta G_{2,T} = \Delta G_{2,T_{cr}^0}^0 + R_y T \ln \left((p_{O_2})^{1,5} (\alpha_2)^{-1} \right), \quad (2.35)$$

где $\Delta G_{2,T_{cr}^0}^0$ – изменение изобарного потенциала разложения борного ангидрида в стандартных условиях, Дж/моль;

α_2 – активность борного ангидрида при рабочей температуре.

Изменение энергии Гиббса в стандартных условиях с учетом энтальпии и энтропии реакции разложения борного ангидрида [227–229, 252–258, 263–266] можно определить по формуле:

$$\Delta G_{2,T_{cr}^0}^0 = \Delta H_{2,T}^0 - T \Delta S_{2,T}^0, \quad (2.36)$$

где $\Delta H_{2,T}^0$ – энтальпия разложения борного ангидрида при рабочей температуре, Дж/моль;

$\Delta S_{2,T}^0$ – изменение энтропии разложения борного ангидрида при рабочей температуре, Дж/(°С·моль).

Энтальпия реакции разложения борного ангидрида при температуре борирования T :

$$\Delta H_{2,T}^0 = \Delta H_{2,T_{\text{ст}}}^0 + \int_{T_{\text{ст}}}^T \Delta C^{\text{P}} dT \pm \Delta H_{\text{ф.п.2}}, \quad (2.37)$$

где $\Delta H_{2,T_{\text{ст}}}^0$ – энтальпия разложения борного ангидрида при стандартной температуре (приложение В), Дж/моль;

$\Delta H_{\text{ф.п.2}}$ – энтальпия фазовых переходов борного ангидрида (приложение В) при соответствующих температурах ($T_{\text{ф.п.2}}$), Дж/моль.

Энтропия реакции разложения борного ангидрида при рабочей температуре определяется аналогично выражению (2.33):

$$\Delta S_{2,T}^0 = \Delta S_{2,T_{\text{ст}}}^0 + \int_{T_{\text{ст}}}^T \frac{\Delta C^{\text{P}}}{T} dT \pm \frac{\Delta H_{\text{ф.п.2}}}{T_{\text{ф.п.2}}}. \quad (2.38)$$

где $\Delta S_{2,T_{\text{ст}}}^0$ – изменение энтропии разложения оксида бора (2.28) при стандартной температуре (приложение В), Дж/(°С · моль).

Тогда напряжение разложения борного ангидрида в этом случае определяется аналогично выражению (2.34):

$$E_2 = \Delta G_{2,T} / 6F = \Delta G_{2,T_{\text{ст}}}^0 / 6F + R_y T \ln \left((p_{\text{O}_2})^{0,5} (\alpha_2)^{-0,33} \right) / 2F. \quad (2.39)$$

Важной расчетной составляющей является установление приоритетности выделения натрия или бора на катоде, осуществляемое сравнением напряжений разложения оксида натрия и борного ангидрида путем вычитания одного уравнения из другого. В результате получаем следующее выражение:

$$E_1 - E_2 = (3\Delta G_{1,T_{cr}}^0 - \Delta G_{2,T_{cr}}^0) / 6F + R_y T \ln \left((\alpha_2)^{0,33} (\alpha_1)^{-1} \right) / 2F. \quad (2.40)$$

В итоговое выражение (2.40) входят активности натрия и бора в реакциях разложения (2.27) и (2.28) при рабочей температуре. Поэтому для его решения необходимо установить их значения для нашего случая. Аналитические выражения для их определения исходят из анионного и катионного соотношения в расплаве солей, а также модели их строения и энергии химических связей между ними. Математическая модель базируется на определении свободной энергии Гиббса [252] с применением теории регулярных растворов, когда учитывают следующие факторы: взаимодействие катионов натрия и бора с общим анионом кислорода, находящимся в расплаве, а также энергия ионов и изменение энтропии при смешении.

В соответствии с правилом смешения средняя энергия u_1 связей иона натрия с ближайшими ионами кислорода в расплаве электролита описывается выражением:

$$u_1 = (z^k \Phi_1 u_{11} + z^k \Phi_2 u_{12}) / z^k = \Phi_1 u_{11} + \Phi_2 u_{12}, \quad (2.41)$$

где u_{11}, u_{12} – энергии разрыва связей катионов натрия с анионами кислорода, соответственно окруженными катионами натрия и бора, Дж;

z^k – координационное число «катионной решетки» расплава электролита;

Φ_1 и Φ_2 – мольные доли ионов натрия и бора соответственно:

$$\Phi_1 = n_1 (n_1 + n_2)^{-1}; \quad \Phi_2 = n_2 (n_1 + n_2)^{-1}, \quad (2.42)$$

где n_1 и n_2 – количество молей оксида натрия и борного ангидрида в составе электролита соответственно.

Исходя из выражений (2.42) следует, что в катионном слое, окружающем произвольно выбранный катион натрия, в среднем $z^k \Phi_1$ катионов окажутся также катионами натрия, а $z^k \Phi_2$ – катионами бора.

По аналогии определяли среднюю энергию u_2 связей катиона бора с ближайшими ионами кислорода в расплаве электролита:

$$u_2 = (z^k \varphi_1 u_{21} + z^k \varphi_2 u_{22}) / z^k = \varphi_1 u_{21} + \varphi_2 u_{22}, \quad (2.43)$$

где u_{21}, u_{22} – энергии разрыва связей катионов бора с анионами кислорода, соответственно окруженными катионами натрия и бора, Дж.

Энергия химических связей U^{xc} между всеми ионами одного моля расплава:

$$U^{xc} = N_A (\varphi_1 u_1 + \varphi_2 u_2), \quad (2.44)$$

где N_A – число Авогадро, моль⁻¹.

При этом следует отметить, что энергия химических связей анионов и катионов в расплаве электролита зависит от их взаиморасположения и представляет собой сумму энергий всех ионов бора и натрия с энергией анионов кислорода [227–229, 252–258, 263–266]. После подстановки и ряда преобразований уравнение (2.44) примет следующий вид:

$$U^{xc} = \varphi_1 U_1^{xc} + \varphi_2 U_2^{xc} + \varphi_1 \varphi_2 Q_{cm}, \quad (2.45)$$

где U_1^{xc} и U_2^{xc} – энергии оксида натрия и борного ангидрида соответственно, Дж; Q_{cm} – энергия смешения, Дж.

Энтропия такой системы с учетом уравнения Больцмана:

$$S^s = \varphi_1 S_{1,T}^0 + \varphi_2 S_{2,T}^0 + k_b \ln W, \quad (2.46)$$

где W – термодинамическая вероятность размещений катионов натрия и бора среди анионов кислорода;

k_b – постоянная Больцмана, Дж/К.

На основании закона Стирлинга [249] и проведенных преобразований термодинамическая вероятность W :

$$W = \exp(-N_A (\varphi_1 \ln \varphi_1 + \varphi_2 \ln \varphi_2)). \quad (2.47)$$

Тогда после подстановок и преобразований выражение (2.47) примет следующий вид:

$$S^s = \varphi_1 S_{1,T}^0 + \varphi_2 S_{2,T}^0 - R_y (\varphi_1 \ln \varphi_1 + \varphi_2 \ln \varphi_2). \quad (2.48)$$

Свободная энергия Гиббса одного моля расплава G_p^1 :

$$G_p^1 = U^{xc} - TS^s. \quad (2.49)$$

Выражение (2.49) после подстановок и преобразований:

$$G_p^1 = \varphi_1 G_1^{1/2M} + \varphi_2 G_2^{1/2M} + R_y T (\varphi_1 \ln \varphi_1 + \varphi_2 \ln \varphi_2) + \varphi_1 \varphi_2 Q_{cm}, \quad (2.50)$$

где $G_1^{1/2M}, G_2^{1/2M}$ – свободная энергия 0,5 моль соответственно оксида натрия и борного ангидрида, Дж.

Тогда свободная энергия G_p^n расплава, состоящего из произвольного количества молей оксида натрия и борного ангидрида, описывается выражением:

$$G_p^n = 2(n_1 + n_2)G_p^1. \quad (2.51)$$

После подстановок (2.50) в выражение (2.51) и преобразований получим общую формулу для определения значения свободной энергии расплава, состоящего из произвольного количества молей оксида натрия и борного ангидрида:

$$G_p^n = 2 \left(n_1 G_1^{1/2M} + n_2 G_2^{1/2M} + R_y T (n_1 \ln \varphi_1 + n_2 \ln \varphi_2) + n_1 n_2 (n_1 + n_2)^{-1} Q_{cm} \right). \quad (2.52)$$

Продифференцировав выражение (2.52) по количеству молей сначала оксида натрия, а затем борного ангидрида, получим формулы для определения их химических потенциалов, которые фактически являются свободными энергиями одного моля каждого вещества и учитывают их вклад в изменение свободной энергии расплава при постоянстве его состава:

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_1 &= dG_p^n / dn_1 = \mathcal{A}_1^0 + 2R_y T \ln \varphi_1 + 2(\varphi_2)^2 Q_{cm}; \\ \mathcal{A}_2 &= dG_p^n / dn_2 = \mathcal{A}_2^0 + 2R_y T \ln \varphi_2 + 2(\varphi_1)^2 Q_{cm}, \end{aligned} \quad (2.53)$$

где $\mathcal{A}_1^0, \mathcal{A}_2^0$ – стандартные химические потенциалы оксида натрия и борного ангидрида соответственно, Дж/моль;

$\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ – химические потенциалы оксида натрия и борного ангидрида соответственно, Дж/моль.

Для обеспечения постоянного поддержания электролизного процесса иссле-

довали аналитическое выражение активности компонентов с учетом химического потенциала идеальных растворов [227–229, 252–258, 263–266]:

$$g_i = g_i^0 + R_y T \ln \alpha_i. \quad (2.54)$$

Из уравнений (2.53) и (2.54) после подстановки и преобразований получены выражения для определения активности оксида натрия и борного ангидрида при их произвольной концентрации в расплаве электролита, необходимые для расчета напряжений разложения оксидов натрия и бора:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= (\varphi_1)^2 \exp\left(2(\varphi_2)^2 Q_{\text{см}} (R_y T)^{-1}\right); \\ \alpha_2 &= (\varphi_2)^2 \exp\left(2(\varphi_1)^2 Q_{\text{см}} (R_y T)^{-1}\right). \end{aligned} \quad (2.55)$$

Для решения уравнений (2.34), (2.39) и (2.40) необходимо определить энергию смещения ионов. В основу данного метода в нашем случае положена оценка энтальпии образования тетрабората натрия из оксида натрия и борного ангидрида. Энтальпию этой реакции рассчитывают для температуры борирования [227–229, 252–258, 263–266]. В этом случае учитывали энтальпии фазовых переходов от кристаллического до расплавленного состояния оксидов и самого тетрабората натрия в реакции его образования (приложение В):

$$\Delta H^s = \Delta H_{1,T}^0 + \Delta H_{2,T}^0 - \Delta H_{\Omega,T}, \quad (2.56)$$

где $\Delta H_{\Omega,T}$ – энтальпия реакции тетрабората натрия (2.56) при температуре борирования, Дж/моль:

$$\Delta H_{\Omega,T} = \Delta H_{\Omega,T_{\text{cr}}}^0 + \int_{T_{\text{cr}}}^T \Delta C^p dT \pm \Delta H_{\text{ф.п.}}, \quad (2.57)$$

где $\Delta H_{\Omega,T_{\text{cr}}}^0$ – энтальпия реакции тетрабората натрия при стандартной температуре, Дж/моль.

Энтальпия этой реакции с учетом $|P\Delta V^o| \ll |\Delta U^{\text{xc}}|$ и в соответствии с формулой свободной энергии Гиббса:

$$\Delta H^s = \Delta U^{\text{xc}} + P\Delta V^o \approx \Delta U^{\text{xc}}, \quad (2.58)$$

где ΔU^{xc} – изменение энергии химических связей, Дж;

P – давление в расплавленной сплошной среде, Па;

ΔV° – изменение объема, м³.

Изменение энергии химических связей ΔU^{xc} :

$$\Delta U^{xc} = 2Q_{cm}n_1n_2(n_1 + n_2)^{-1}. \quad (2.59)$$

Исходя из выражений (2.58) и (2.59), энергия смешения Q_{cm} :

$$Q_{cm} = 0,5\Delta H^s(n_1 + n_2)(n_1n_2)^{-1}. \quad (2.60)$$

В свою очередь, энергия смешения при образовании тетрабората натрия:

$$Q_{cm} = 0,75\Delta H^s. \quad (2.61)$$

Тогда формула для подсчета разности потенциалов выделения натрия и бора соответствующих электролитических ячеек примет вид:

$$E_1 - E_2 = (3\Delta G_{1,cr}^0 - \Delta G_{2,cr}^0) / 6F + R_y T \ln \left((\varphi_2)^{0,33} (\varphi_1)^{-1} \right) / F + \left(0,33(\varphi_1)^2 - (\varphi_2)^2 \right) Q_{cm} / 2F. \quad (2.62)$$

Исходя из химико-физического исследования кинетики процесса электролиза боратно-натриевых расплавов, путем сравнения напряжений разложения следующих электролитических ячеек установлено, что оксид натрия устойчивее борного ангидрида ($E_1 - E_2 > 0$) (таблица 2.6).

Таблица 2.6 – ЭДС поляризации при электролизе

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

В случае электролиза таких расплавов при наложении на ячейку напряжения, которое больше напряжения разложения борного ангидрида, но меньше напряжения разложения оксида натрия, активные атомы бора восстанавливаются из катионов на поверхности катода. Следовательно, физико-химическое обоснование

применения предлагаемого состава для электролизного борирования стальных деталей подтвердило возможность его использования.

Для обоснованного выбора и назначения технологических режимов проведения электролизного борирования необходимо разработать математическую модель диффузионно-кинетических процессов в расплаве рабочей среды.

2.3 Исследование процесса электролизного борирования при упрочнении восстанавливаемых деталей

Получение борированного слоя, имеющего нужное соотношение фаз моноборида железа и борида дижелеза, зависит от диффузионных процессов, протекающих в системе «насыщающая среда – поверхность детали – металл основы детали» [219–231].

Известно, что на глубину проникновения бора в стальную деталь и на формирование нужного соотношения фаз оказывает влияние углерод, содержащийся в детали [216–243].

Следовательно, для определения режима диффузионного насыщения, позволяющего получить упрочненный слой с требуемыми механическими и эксплуатационными характеристиками, необходимо с помощью математического моделирования диффузионно-кинетических процессов в этой системе установить оптимальные интервалы концентрации боридных фаз и их расположение в упрочненном слое.

Ранее было установлено, что увеличение скорости конвекции интенсифицирует доставку катионов бора к пограничному слою Прандтля, поддерживая здесь постоянную их концентрацию, чем обеспечивается постоянный градиент концентрации. Таким образом, на поверхности катода создается равновесная концентрация атомов бора (граничное условие 1-го рода). Это создает постоянный поток атомов бора через границу раздела «диффузионный слой – металл» (граничное условие 2-го рода) – $J_i^D = D_i (\partial C_i / \partial y)_{y=0} = \text{const}$.

При диффузионном насыщении поверхностного слоя стальных деталей ато-

мами бора из расплава электролита сначала идет процесс формирования твердых растворов внедрения и замещения, а затем происходит образование химических соединений [256, 257, 261–266].

Перемещение примесных атомов от поверхности детали вглубь зависит от вида, концентрации и размеров дефектов кристаллической решетки и межкусталлитных пространств.

В кристаллической решетке часть атомов при постоянной температуре обладают большей энергией, чем другие атомы этого же кристалла. При этом все атомы совершают колебательные движения, а атомы, обладающие большей энергией, колеблются с амплитудами, превышающими амплитуды колебаний соседних атомов. В некоторые моменты времени эти атомы «выскакивают» из узловых положений кристаллической решетки и оказываются либо на поверхности, либо внутри кристалла, образуя вакансии. Вероятность возникновения таких вакансий зависит от температуры нагрева детали. Так как с ее повышением растет энергия всех атомов кристаллической решетки, то и большее количество атомов начинает перемещаться от поверхности вглубь детали. Таким образом интенсифицируется процесс образования новых вакансий, концентрация которых растет и при температуре $\sim 927^\circ\text{C}$ составляет $\sim 10^{17}$ [272].

Вакансии, образуемые за время $\sim 0,0004$ с, создают условия для перемещения примесных атомов в кристаллах и их конгломератах на расстояния, превышающие межатомные. В этом случае примесный атом попадает сначала в вакансию, а затем из нее начинает двигаться по междоузлиям и вакансиям. Вакансии могут объединяться, образуя устойчивые наноразмерные поры до 10 нм. При высокой температуре такое явление достаточно распространено в кристаллических решетках, что облегчает перемещение примесного атома вглубь детали [261, 272].

Дислокации способствуют проникновению атомов внешней среды и их перемещению внутри кристаллической структуры стальной детали, что особенно заметно при нагреве детали из-за повышения плотности дислокаций до $10^7 \dots 10^{12} \text{ м}^{-2}$, так как скорость движения дислокаций достигает значений скорости распространения упругой деформации в стали ($5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$). При этом они группируются и образуют нанотрещины шириной до 10 нм, которые выходят либо на поверхность, либо на

границу зерна, что способствует перемещению примесных атомов [261, 272].

Поликристаллическое строение железоуглеродистых сплавов характеризуется наличием пространственных дефектов по границам раздела кристаллов шириной, равной 2...3 периодам их кристаллической решетки, что способствует перемещению примесных атомов [216, 259, 261, 272].

Все приведенные выше условия диффузионного перемещения примесного атома внутри детали из железоуглеродистого сплава допустимы для атома бора, так как его размер меньше размеров дефектов внутреннего строения сплава. При этом скорости перемещения примесных атомов по этим дефектам различны, но ввиду возможности их перехода из одного дефекта в другой результирующая скорость движения атомов усредняется и выражается коэффициентом диффузии [216, 259, 261, 272].

Таким образом, процесс диффузии в кристаллическом твердом теле представляет собой «перескоки» атомов из одного положения в другое – «случайное блуждание». Определить один «перескок» атома невозможно, поэтому устанавливают формализованную связь между большим количеством этих отдельных событий. Задача в данном случае заключается в том, чтобы установить, как глубоко в толщу детали перемещаются примесные атомы с ее поверхности в результате такого их движения. Задача определения диффузии примесного атома вдоль заданного направления в твердых растворах металлических сплавов описывается законом Фика:

$$\partial C^B / \partial t = D_i (\partial^2 C^B / \partial y^2).$$

Поскольку процесс диффузии носит вероятностный характер [154], то решение представляет собой следующее выражение:

$$C^B(y; t) = C_0^B \left(1 - 2(\pi)^{-0,5} \int_0^{0,5y(D^B t)^{-0,5}} e^{-\xi^2} d\xi \right),$$

где $C^B(y; t)$ – концентрация диффундирующего элемента на глубине y , %;

C_0^B – концентрация бора на поверхности, %;

D^B – коэффициент диффузии бора, $\text{м}^2/\text{с}$;

y – расстояние от поверхности образца, м ;

t – время процесса, с ;

ξ – переменная интегрирования.

Износостойкость борированных поверхностей деталей определяется структурой и составом поверхностного слоя. Например, скорость изнашивания в абразивной среде поверхности стальной детали, представляющей собой матрицу из борида дижелеза с 10–30%-м включением моноборида (толщиной 0,12...0,3 мм), в 1,5 раза меньше скорости изнашивания поверхности, состоящей из борида дижелеза такой же толщины [219–221].

Учитывая физические и технические особенности процесса электролизного борирования, закон Фика не в полной мере описывает процесс диффузионного борирования [217]. Особенности этого процесса заключаются в том, что он осуществляется при температурах выше 900 °С, когда объемно-центрированная решетка альфа-железа переходит в ее гранецентрированное состояние гамма-железа. Процесс насыщения стальной детали бором начинается с проникновения его активных атомов с поверхности раздела жидкой и твердой сред в дефекты кристаллического строения, вышедшие на ее поверхность. Внедрившись в эти дефекты кристаллической решетки гамма-железа, атомы бора продолжают движение по ним вглубь детали. При этом из расплава электролита постоянно добавляются в поверхностный слой детали атомы бора, повышающие его концентрацию, создающие и поддерживающие на достаточном уровне градиент концентрации атомов бора. Граница насыщения гамма-железа бором с течением времени постепенно удаляется от поверхности вглубь детали. В процессе диффузии одна часть атомов бора продолжает движение, а другая вступает в химическое взаимодействие с образованием боридов. Это взаимодействие начинается с появления низкобористой фазы борида дижелеза. Бор, постоянно диффундирующий с поверхности, создает условия для образования высокобористой фазы моноборида железа. В результате возникают движущиеся границы распространения этих фаз. Из появляющейся сплошной зоны, состоящей из боридов железа, вытесняется углерод в переходную зону, состо-

ящую из твердого раствора бора в гамма-железе, так как он не образует твердых растворов с боридными фазами [216, 227–229, 234, 259, 261, 272].

Каждая фаза обладает присущими ей физико-механическими свойствами, в том числе и коэффициентом диффузии. Таким образом, получение качественного борированного слоя с необходимыми эксплуатационными и механическими характеристиками определяется величиной проникновения упрочняющих фаз.

Для решения такой задачи по условиям Стефана необходимо представить борированную деталь полубесконечной пластиной, на поверхности которой обеспечивается постоянная концентрация атомов бора (C_0^B). В начальный момент времени атомов бора в детали нет, а далее на границах раздела фаз происходят скачкообразные изменения значений концентрации бора и коэффициентов диффузии. При этом рост борированных фаз определяется величинами этих параметров. Следует отметить, что такая задача имеет аналитическое решение в том случае, когда коэффициенты диффузии неизменны в пределах каждой из фаз [216, 227–229, 234, 259, 261, 272].

Исходя из этих соображений принято, что границы раздела фаз перемещаются в соответствии с соотношением Эйнштейна – Смолуховского по параболическим зависимостям [199] при условии, что коэффициенты диффузии бора D_1^B , D_2^B и D_3^B соответственно в фазах моноборида железа, бориде дижелеза и твердого раствора бора в гамма-железе 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, бориде 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.

Определение неизвестных значений верхних пределов интегрирования в функциях ошибок Лапласа производили путем решения построенной системы трансцендентных уравнений. Построение такой системы уравнений начинается с определения концентрации бора в детали с учетом начальных условий [216, 217, 222, 227–229, 234, 259, 261, 263–266, 272] по формулам:

$$\begin{aligned} C^1(y, t) &= C_1^B - (C_1^B - C_1^*) \Phi_{c_0}^0(y) / \Phi_1^1(Y_1^\Gamma); \\ C^2(y, t) &= C_2^B - (C_2^B - C_2^*) (\Phi_{c_0}^0(y) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)) / (\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)); \\ C^3(y, t) &= C_3^B \Phi_c^0(y) / \Phi_3^2(Y_2^\Gamma), \end{aligned} \quad (2.63)$$

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, м²/с;

$\Phi_1^1(Y_1^\Gamma)$, $\Phi_2^1(Y_1^\Gamma)$, $\Phi_2^2(Y_2^\Gamma)$, $\Phi_3^2(Y_2^\Gamma)$, $\Phi_c^0(y)$, $\Phi_{c_0}^0(y)$ – вероятностные функции ошибок

Лапласа на соответствующих границах:

$$\begin{aligned} \Phi_1^1(Y_1^\Gamma) &= \operatorname{erf}\left(Y_1^\Gamma / 2(D_1^B t)^{0.5}\right); & \Phi_2^1(Y_1^\Gamma) &= \operatorname{erf}\left(Y_1^\Gamma / 2(D_2^B t)^{0.5}\right); \\ \Phi_2^2(Y_2^\Gamma) &= \operatorname{erf}\left(Y_2^\Gamma / 2(D_2^B t)^{0.5}\right); & \Phi_3^2(Y_2^\Gamma) &= \operatorname{erfc}\left(Y_2^\Gamma / 2(D_3^B t)^{0.5}\right); \\ \Phi_c^0(y) &= \operatorname{erfc}\left(y / 2(D^C t)^{0.5}\right); & \Phi_{c_0}^0(y) &= \operatorname{erf}\left(y / 2(D^C t)^{0.5}\right). \end{aligned}$$

Исходя из того, что углерод не образует твердых растворов с боридами железа, а также возникают деформация кристаллической решетки γ -железа и его термодинамическая активность, коэффициент диффузии углерода с учетом концентрации определяется по уравнению [234, 272]:

$$D^C = (0,04 + 0,08C_0^C) \exp(-31500/R_y T),$$

где C_0^C – исходная концентрация углерода в стали, %.

Известно, что на проникновение бора вглубь детали и на формирование нужного соотношения фаз оказывает влияние углерод, содержащийся в стальной детали. При увеличении его содержания в стали уменьшается скорость создания боридного слоя [216, 219, 226, 261].

Углерод вытесняется диффундирующим бором вглубь детали, где образуется зона с повышенной концентрацией углерода, а граница, отделяющая обезуглероженный слой от этой зоны, совпадает границей борида дижелеза [230, 261]. Таким образом, происходит увеличение сопротивления диффузии бора вглубь детали. Для оценки влияния углерода на процесс диффузии бора необходимо определить распределение диффундирующего углерода по толщине упрочненного слоя детали. В нашем случае его распределение в зоне, состоящей из твердого раствора бора в γ -железе, с учетом влияния диффундирующих потоков бора и углерода, определяется следующим выражением [261]:

$$C^C(y,t) = Y_2^\Gamma C_0^C \Phi_c^0(y) \left(\pi \Phi_c^2(Y_2^\Gamma) \right)^{0,5} / \Phi_c^2(Y_2^\Gamma) \left(2E_c^2(Y_2^\Gamma) (D^C t)^{0,5} - Y_2^\Gamma \left(\pi \Phi_c^2(Y_2^\Gamma) \right)^{0,5} \right), \quad (2.64)$$

где $\Phi_c^2(Y_2^\Gamma)$ – вероятностная функция ошибок Лапласа по распределению углерода на соответствующей границе;

$E_c^2(Y_2^\Gamma)$ – обозначение экспоненциальной зависимости квадрата верхнего предела интегрирования при определении границы расположения углерода;

$$\Phi_c^2(Y_2^\Gamma) = \operatorname{erfc}\left(Y_2^\Gamma / 2(D^C t)^{0,5}\right); \quad E_c^2(Y_2^\Gamma) = \exp\left(-\left(Y_2^\Gamma\right)^2 / 4D^C t\right).$$

На подвижных межфазных границах должны выполняться условия баланса массы по закону сохранения массы вещества:

$$\begin{aligned} -D_1^B \frac{\partial C_1^B}{\partial y} \Big|_{y=Y_1^\Gamma} &= -D_2^B \frac{\partial C_2^B}{\partial y} \Big|_{y=Y_1^\Gamma} + (C_1^* - C_2^B) \frac{\partial Y_1^\Gamma}{\partial t}, \\ -D_2^B \frac{\partial C_2^B}{\partial y} \Big|_{y=Y_2^\Gamma} &= -D_3^B \frac{\partial C_3^B}{\partial y} \Big|_{y=Y_2^\Gamma} + (C_2^* - C_3^B) \frac{\partial Y_2^\Gamma}{\partial t}. \end{aligned} \quad (2.65)$$

На значительном удалении от поверхности детали выполняется условие $C_3^B(\infty; t) = 0$, а на границах фаз соблюдается следующий ряд граничных условий:

$$C^1(Y_1^\Gamma, t) = C_1^*; \quad C^2(Y_1^\Gamma, t) = C_2^B;$$

$$C^2(Y_2^\Gamma, t) = C_2^*; \quad C^3(Y_2^\Gamma, t) = C_3^B.$$

Уравнения (2.63), (2.64) и (2.65) корректно моделируют процессы распределения бора и углерода в фазах и движение межфазных границ.

Для теоретического моделирования диффузионных процессов в динамике необходимо из соотношений (2.63), (2.64) и уравнения баланса масс (2.65) выразить интегральные диффузионные потоки через фронтальную и тыльную границы образующихся фаз [217, 272]:

$$\Pi_1^* = 2(D_1^B t)^{0,5} (C_1^B - C_1^*) E_1^1(Y_1^\Gamma) / \Phi_1^1(Y_1^\Gamma) \pi^{0,5}; \quad (2.66)$$

$$\Pi_2^B = 2(D^C t)^{0,5} (C_2^B - C_2^*) E_2^1(Y_1^\Gamma) / \pi^{0,5} (\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)); \quad (2.67)$$

$$\Pi_2^* = 2(D_2^B t)^{0,5} (C_2^B - C_2^*) E_2^2(Y_2^\Gamma) / \pi^{0,5} (\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)); \quad (2.68)$$

$$\Pi_3^B = 2C_3^B E_3^2(Y_2^\Gamma) (D^C t)^{0,5} / \Phi_3^2(Y_2^\Gamma) \pi^{0,5}, \quad (2.69)$$

где Π_1^* – интегральный диффузионный поток через тыльную границу фазы моноборида железа;

Π_2^B, Π_2^* – интегральный диффузионный поток через фронтальную и тыльную границы фазы боридов дижелеза;

Π_3^B – интегральный диффузионный поток через фронтальную границу фазы твердого раствора бора в гамма-железе;

$E_1^1(Y_1^\Gamma), E_2^1(Y_1^\Gamma), E_2^2(Y_2^\Gamma), E_3^2(Y_2^\Gamma)$ – пределы интегрирования при определении границ боридов в стальной детали.

Для определения интегральных диффузионных потоков атомов бора и углерода установили экспоненциальные зависимости по следующим формулам:

$$E_1^1(Y_1^\Gamma) = \exp\left(-\left(Y_1^\Gamma\right)^2 / 4D_1^B t\right); \quad E_2^1(Y_1^\Gamma) = \exp\left(-\left(Y_1^\Gamma\right)^2 / 4D_2^B t\right);$$

$$E_2^2(Y_2^\Gamma) = \exp\left(-\left(Y_2^\Gamma\right)^2 / 4D_2^B t\right); \quad E_3^2(Y_2^\Gamma) = \exp\left(-\left(Y_2^\Gamma\right)^2 / 4D_3^B t\right).$$

На каждой границе раздела Y_1^Γ и Y_2^Γ выполняются соотношения:

$$\Pi_1^* - \Pi_2^B = (C_1^* - C_2^B)Y_1^\Gamma, \quad (2.70)$$

$$\Pi_2^* - \Pi_3^B = (C_2^* - C_3^B)Y_2^\Gamma \quad (2.71)$$

После подстановки и преобразований получим систему трансцендентных уравнений, выражающую непрерывность потока на границах, для нахождения границ боридов (толщины слоев боридов) Y_1^Γ и Y_2^Γ :

$$\frac{(C_1^B - C_1^*)(D_1^B t)^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)\right) E_1^1(Y_1^\Gamma) - (C_2^B - C_2^*)(D^C t)^{0,5} \Phi_1^1(Y_1^\Gamma) E_2^1(Y_1^\Gamma)}{Y_1^\Gamma (C_1^* - C_2^B) \pi^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)\right) \Phi_1^1(Y_1^\Gamma)} = \frac{1}{2}, \quad (2.72)$$

$$\frac{(C_2^B - C_2^*)(D_2^B t)^{0,5} \Phi_3^2(Y_2^\Gamma) E_2^2(Y_2^\Gamma) - C_3^B (D^C t)^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)\right) E_3^2(Y_2^\Gamma)}{Y_2^\Gamma (C_2^B - C_3^B) \pi^{0,5} \left(\Phi_2^2(Y_2^\Gamma) - \Phi_2^1(Y_1^\Gamma)\right) \Phi_3^2(Y_2^\Gamma)} = \frac{1}{2}. \quad (2.73)$$

Величина C_1^B – это концентрация бора на внешнем периметре образца, которая обусловлена взаимодействием катода с расплавом теплоносителя и рассчитывается по формуле (2.24). На границах фаз величины концентраций устанавливаются диаграммой состояний «железо – бор», они составляют $C_1^* = 16,25$ %; $C_2^B = 8,84$ %; $C_2^* = 8,0$ %; $C_3^B = 0,003$ %. С учетом режимов насыщения их определяли для сталей марок Ст3, 20, 30, 45 с концентрацией углерода соответственно 0,18 %; 0,21; 0,31 и 0,46 %. Режимные параметры – температуру и длительность процесса насыщения – выбирали соответственно из диапазона 850...950 °С и 1,5...2,5 ч. С помощью уравнений (2.72) и (2.73) рассчитали Y_1^Γ и Y_2^Γ , что позволило определить величины концентраций бора в зонах фаз $C^1(y; t)$, $C^2(y; t)$ и $C^3(y; t)$ (приложение Г). Толщина моноборида железа – Y_1^Γ , а толщина борида дижелеза – $(Y_2^\Gamma - Y_1^\Gamma)$.

Таким образом, сформированы системы дифференциальных уравнений, которые позволили решить задачи определения изменения концентрации, расположения и содержания фаз, образующихся при электролизном борировании деталей, с учетом начальных и граничных условий.

2.4 Исследование процесса нагрева восстанавливаемых деталей при наплавке металлопорошка в жидком теплоносителе

Для назначения оптимальных режимов наплавки важным условием является установление закономерностей изменения температуры изделия [118, 171, 186, 214, 245–249, 252, 260, 262, 267, 271, 273, 284–290].

Имеется пластина толщиной $H^{\text{П}}$ (рисунок 2.3) 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: $Z_0^* \leq z \leq (Z_0^* + H^{\text{П}})$ и $t \geq 0$.

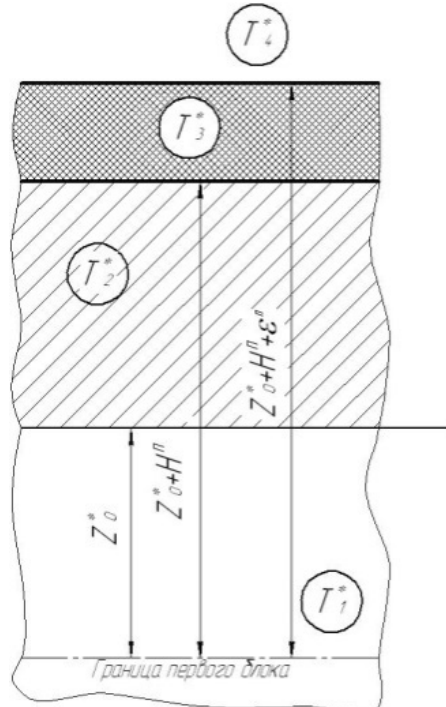


Рисунок 2.3 – Схема наплавляемого образца

На поверхность пластины с верхней стороны нанесен слой суспензии толщиной $\varepsilon^{\text{П}}$. Можно с достаточной достоверностью [118, 171, 186, 214, 245–249, 252,

260, 262, 267, 271, 273, 284–290] предположить, что 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 – $T_1^*(z, t)$, а 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 [118, 171, 186, 214, 245–249, 252]. Теплообмен происходит по закону Ньютона – Рихмана [260, 262, 267, 271, 273, 284–290], т. е. плотность теплового потока постоянна. Этот теплообмен описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных [285–289]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T_1^*}{\partial t} = k_1^{\text{p}} \frac{\partial^2 T_1^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_2^*}{\partial t} = k_2^{\text{p}} \frac{\partial^2 T_2^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_3^*}{\partial t} = k_3^{\text{p}} \frac{\partial^2 T_3^*}{\partial z^2}; \\ \frac{\partial T_4^*}{\partial t} = k_4^{\text{p}} \frac{\partial^2 T_4^*}{\partial z^2}, \end{array} \right. \quad (2.74)$$

где $k_1^{\text{p}}, k_2^{\text{p}}, k_3^{\text{p}}, k_4^{\text{p}}$ – коэффициенты температуропроводности, $\text{м}^2/\text{с}$, $k_1^{\text{p}} = k_4^{\text{p}} = k^{\text{p}}$ и $k_2^{\text{p}} = k_3^{\text{p}}$.

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

$$\left\{ \begin{array}{l} (-\lambda_1^*) \frac{\partial T_1^*(Z_0^*; t)}{\partial z} + q_1^* = 0; \\ (-\lambda_2^*) \frac{\partial T_2^*(Z_0^*; t)}{\partial z} + q_2^* = 0; \\ (-\lambda_3^*) \frac{\partial T_2^*(Z_0^* + H^\Pi; t)}{\partial z} + q_3^* = 0; \\ (-\lambda_4^*) \frac{\partial T_3^*(Z_0^* + H^\Pi; t)}{\partial z} + q_4^* = 0; \\ (-\lambda_5^*) \frac{\partial T_3^*((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi; t)}{\partial z} + q_5^* = 0; \\ (-\lambda_6^*) \frac{\partial T_4^*((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi; t)}{\partial z} + q_6^* = 0. \end{array} \right. \quad (2.75)$$

Поскольку теплообмен происходит между разнородными средами, то выбираем следующие граничные условия:

$$q_1^* = q_2^* = \alpha(T_2^* - T_1^*);$$

$$q_3^* = q_4^*;$$

$$q_5^* = q_6^* = \alpha(T_3^* - T_4^*);$$

$$\lambda_1^* = \lambda_2^* = \lambda_5^* = \lambda_6^* = \lambda_{\text{stm}}, \quad \lambda_3^* = \lambda_m, \quad \lambda_4^* = \lambda_5^* = \lambda_{\text{st}},$$

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).

При этом сечение делится сеткой на 5 блоков (рисунок 2.2), которые имеют соответственно 8, 9, 3, 5 и 5 узлов. На границах блоков I и II, а также III и IV, где осуществляется мгновенный перепад температур, начальные условия при этом:

$$T_1^*(Z_0^*, 0) = T_4^*(Z_0^*, 0) = 0,5 \left(T_3^*(Z_0^*, 0) + T_4^*(Z_0^*, 0) \right),$$

$$T_3^* \left((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi, 0 \right) = T_4^* \left((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi, 0 \right) = 0,5 \left(T_3^* \left((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi, 0 \right) + T_4^* \left((Z_0^* + H^\Pi) + \varepsilon^\Pi, 0 \right) \right).$$

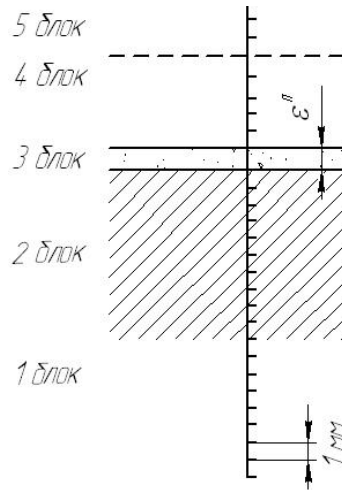


Рисунок 2.4 – Расчетная схема наплавки пластины

Задача решается методом конечных элементов с использованием расчетной схемы (см. рисунок 2.4) [249, 274].

Расчет толщины наплавленного слоя

Технологически важным параметром является получение равномерного слоя покрытия заданной толщины. Для этого необходимо определить, каким образом изменится толщина слоя после нагрева под наплавку. Расчетную схему строят исходя из равенства массы покрытия до и после нагрева:

$$m^{(H)} = V_0^{(H)} \gamma_0^{(H)} = V_1^{(H)} \gamma_1^{(H)}, \quad (2.76)$$

где $m^{(H)}$ – масса наплавленного покрытия, кг;

$V_0^{(H)}, V_1^{(H)}$ – объемы покрытия до и после нагрева под наплавку, м³;

$\gamma_0^{(H)}, \gamma_1^{(H)}$ – плотности покрытия до и после нагрева под наплавку, кг/м³.

Толщина наплавленного слоя $\Delta_{\Pi}^{(H)}$:

$$\Delta_{\Pi}^{(H)} = h_1^{(H)} - H^{\Pi}, \quad (2.77)$$

где $h_1^{(H)}$ – окончательная толщина детали, м.

Толщина начального слоя ε^{Π} :

$$\varepsilon^{\Pi} = \Delta_{\Pi}^{(H)} \gamma_1^{(H)} / \gamma_0^{(H)}. \quad (2.78)$$

Таким образом, для получения наплавленного изделия, представляющего собой неразъемное соединение, предложена математическая модель. Она состоит из систем дифференциальных уравнений, учитывающих начальные и граничные условия. Эти уравнения позволяют решать задачи по определению технологических параметров этого процесса – температуры и времени нагрева деталей при их наплавке в жидком теплоносителе. Предложена также расчетно-аналитическая зависимость для расчета толщины слоя, наносимого перед наплавкой, функционально связанная с изменением его плотности.

2.5 Исследование тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне

Для определения кинетических характеристик расплавленной сплошной среды теплоносителя и конструкционных параметров электродной печи-ванны необходимо построить и исследовать аналитическими и численными методами математическую модель тепломассообменных процессов, протекающих в ее рабочем пространстве [246–248, 264–273, 301, 305, 306].

Моделирование таких процессов основывается на положениях и уравнениях Навье – Стокса, Лоренца и Рэлея – Бенара неизотермического течения вязкой сплошной среды в поле сил тяжести с использованием приближения Овербека – Буссинеска [262, 267–271].

В нагреваемой вязкой сплошной среде с достаточно большим коэффициентом теплового расширения возникающая разность температур порождает разность плотностей [262, 267–271], поскольку сплошная среда находится в гравитационном поле, которое создает движущие силы, что ведет к тепловой конвекции.

Были проанализированы две схемы возникновения тепловой конвекции в расплавленной сплошной среде (рисунок 2.5).

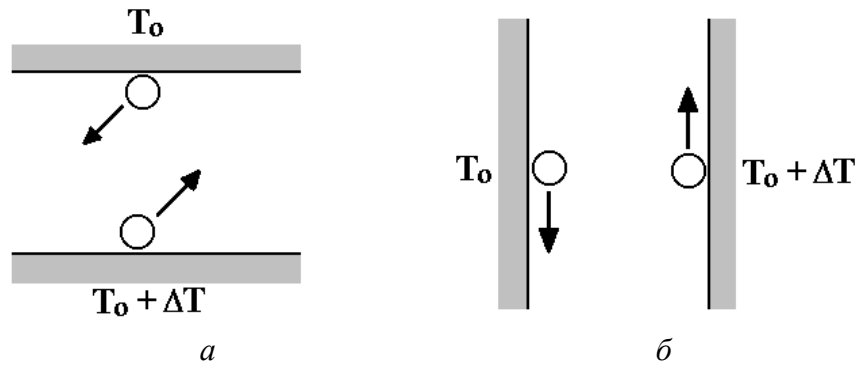


Рисунок 2.5 – Возникновение тепловой конвекции между горизонтальными (*a*) и вертикальными (*б*) поверхностями: T_0 – температура нагрева верхней горизонтальной и левой вертикальной поверхностей, °С; ΔT – разность температур поверхностей, °С

При анализе первой схемы (см. рисунок 2.5, *a*) считаем, что эта среда находится между двумя горизонтальными поверхностями, нагретыми до различной температуры. При этом нижняя поверхность теплее, чем верхняя. В этом случае, по физическим законам, холодные более плотные верхние слои стремятся опуститься, а теплые менее плотные нижние слои – подняться.

Пока разность температур поверхностей мала, конвективное движение не возникает из-за стабилизирующих эффектов вязкого трения слоев. При увеличении градиента температур и определенных теплофизических свойствах сплошной среды возникает ее тепловая конвекция.

Несколько иначе обстоит дело, если градиент температуры не вертикален, а горизонтален (см. рисунок 2.5, *б*). В этом случае сплошная среда стремится подняться вдоль более теплой поверхности и опуститься вдоль более холодной. При этом конвекция будет иметь место при любом малом градиенте температур.

В печи-ванне с электродным нагревом расплава (рисунок 2.6) около источников тепла образуются зоны максимальных температур, по мере удаления от них температура расплава будет снижаться. Таким образом, в расплавленной сплошной среде печи-ванны образуются вертикальные и горизонтальные температурные градиенты, вызывающие перемещение слоев этой среды.

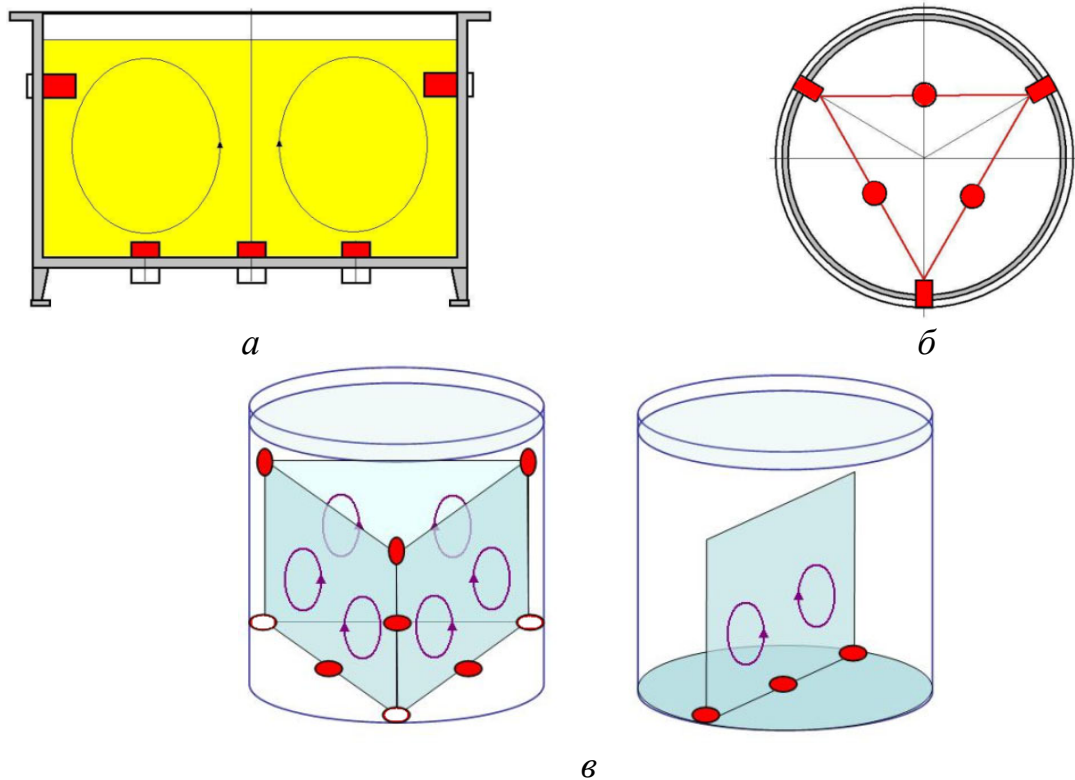


Рисунок 2.6 – Модель электродной печи и движение потоков сплошной среды:
a – вид сбоку; *б* – вид сверху; *в* – возможные схемы расположения
 источников тепла и конвективных потоков

Необходимо установить в этих условиях возникновение конвективного движения расплавленной сплошной среды и значения поля скоростей перемещения и температур как функцию теплофизических характеристик нагреваемой среды, возмущающих тепловых воздействий от имеющихся источников тепловыделения и геометрических параметров.

Решение этих задач базируется на математических моделях:

- неизотермического движения вязкой сплошной среды в приближении Овербека – Буссинеска:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \nabla) \bar{V} = \overline{\text{grad} P} / \rho_{\text{stm}} + \bar{g} \beta_T T + \nu^p \nabla^2 \bar{V}; \quad (2.79)$$

- тепломассопереноса:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \overline{\text{grad} T} = k^p \nabla^2 T; \quad (2.80)$$

- неразрывности среды:

$$\text{div} \bar{V} = 0, \quad (2.81)$$

где \bar{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с²;

β_T – коэффициент теплового расширения расплавленной сплошной среды, 1/°C.

Температуропроводность расплавленной среды k^p :

$$k^p = \lambda_{stm} \left(c_{stm}^y \rho_{stm} \right)^{-1}, \quad (2.82)$$

где λ_{stm} – коэффициент теплопроводности расплавленной сплошной среды, Вт/(°C·м);

c_{stm}^y – удельная теплоемкость расплавленной сплошной среды, Дж/(°C·кг).

Рассматриваемое пространство печи-ванны описывается системой дифференциальных уравнений элементарных балансов для твердотельных элементарных объемов, на которые оно разбивается:

$$c_i \frac{dT_i}{dt} + \sum_{j=1}^M q_{ij} (T_i - T_j) + q_{ic} (T_i - T_{ci}) = Q_i, \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.83)$$

где c_i – теплоемкость элементарного объема, Дж/°C;

q_{ij}, q_{ic} – теплопроводимости, Вт/°C;

$T_i(t)$ – средняя температура i -го элементарного объема, °C;

T_{ci} – температура окружающей среды, °C;

Q_i – мощность внутренних источников тепла, Вт.

В системах уравнений (2.79) и (2.80) имеются два нелинейных члена: $(\bar{V}\nabla)\bar{V}$ и $\bar{V} \overline{\text{grad} T}$. Принимаем, что их относительная значимость зависит от числа Прандтля. Если это число мало ($\sigma < 1$), то доминирует член $(\bar{V}\nabla)\bar{V}$ и возможно, что вторичные неустойчивости, им обусловленные и развивающиеся в сплошной среде в режиме конвекции, имеют гидродинамическое происхождение [268]. С другой стороны, в расплавленной сплошной среде с большим числом Прандтля ($\sigma > 100$) $\bar{V} \overline{\text{grad} T}$ становится доминирующим нелинейным членом, и вторичные неустойчивости имеют тепловое происхождение. Этот случай особенно важен для вязких сред, к которым в первом приближении можно отнести сплошную среду в электродной печи.

Для решения сформулированной задачи ее необходимо разделить на две взаимосвязанных подзадачи, которые учитывали бы вертикальные и горизонтальные температурные градиенты.

Предположим, что в ванне расплава печи имеют место вертикальные составляющие температурных градиентов, обусловленные наличием источников тепловыделения (см. рисунок 2.6). Это позволяет приступить к решению плоской задачи, описываемой системой уравнений (2.79)–(2.81) с учетом нелинейных членов.

Предположим, что система обладает трансляционной инвариантностью по оси y . Тогда переменные в уравнениях (2.79)–(2.81) зависят от двух пространственных координат [268, 269]: высоты z и горизонтальной координаты y , перпендикулярной оси конвективных валов (рисунок 2.7).

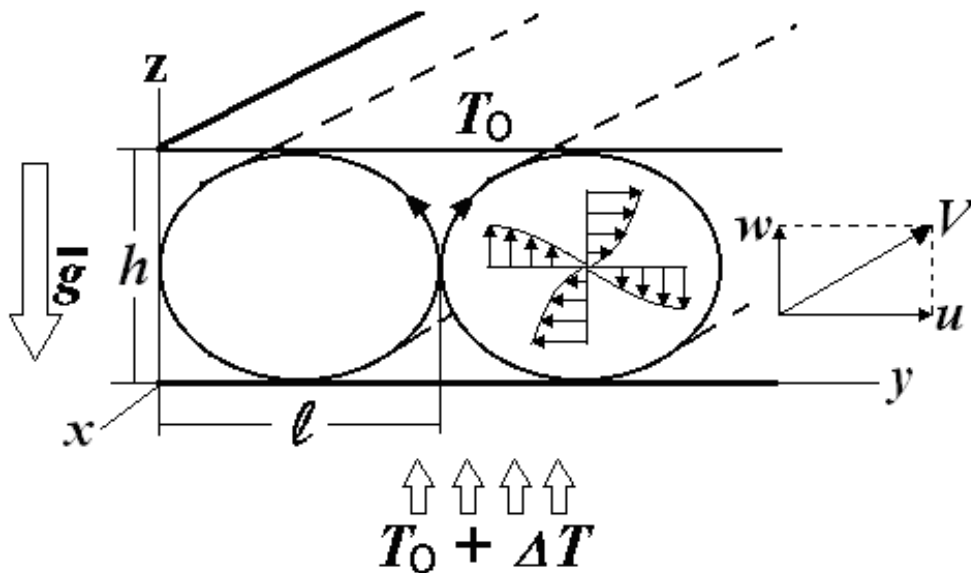


Рисунок 2.7 – Конвективные валы при вертикальных температурных градиентах: $u(y, z, t)$, $w(y, z, t)$ – компоненты поля скоростей по осям y и z , м/с; h – средняя высота слоя расплавленной сплошной среды (характерный размер конвективного вала в вертикальном направлении z), м; l – характерный размер конвективного вала в горизонтальном направлении y

Для данного случая справедливы следующие формализованные представления:

$$\bar{V} = \bar{V}(u(y, z, t), w(y, z, t)); \quad (2.84)$$

$$T(y, z, t) = T_0 + \Delta T - \Delta Tz/h + \theta(y, z, t), \quad (2.85)$$

где $\theta(y, z, t)$ – отклонение от линейного профиля поля температур по оси z , °С.

Введем функцию тока $\psi(y, z, t)$, такую, чтобы выполнялись соотношения $u = -\partial\psi/\partial z = -\psi_z$ и $w = \partial\psi/\partial y = \psi_y$, а также условие неразрывности среды (2.64): $\partial u/\partial y + \partial w/\partial z = 0$.

Применяя оператор ротора к уравнению (2.79) для исключения давления и учитывая уравнения элементарных балансов (2.83) для поля температур, получим из (2.79) и (2.80) следующие уравнения, записанные через функцию тока и отклонение профиля поля температур от линейного по оси z [262]:

$$\partial/\partial t (\nabla^2 \psi) = -\partial\psi/\partial y \partial/\partial z (\nabla^2 \psi) + \partial\psi/\partial z \partial/\partial y (\nabla^2 \psi) + \nu^p \nabla^2 \psi + g\beta_T \partial\theta/\partial y; \quad (2.86)$$

$$\partial\theta/\partial t = -\partial\psi/\partial y \partial\theta/\partial z + \partial\psi/\partial z \partial\theta/\partial y + \Delta T/h \partial\psi/\partial z + k^p \nabla^2 \theta. \quad (2.87)$$

Применив метод Галеркина [268, 269] перехода от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям, получим искомые функции в разделенном по переменным виде, удовлетворяющим граничным условиям и исходным уравнениям. Для корректного решения этих уравнений введем представления по Лоренцу (2.88) функций $\psi(y, z, t)$ и $\theta(y, z, t)$:

$$\begin{cases} \psi(y, z, t) = \psi_1(t) \sin \frac{\pi y}{l} \sin \frac{\pi z}{h}; \\ \theta(y, z, t) = \theta_1(t) \cos \frac{\pi y}{l} \sin \frac{\pi z}{h} - \theta_2(t) \sin \frac{2\pi z}{h}; \\ u = -\psi_z = -\frac{\pi}{h} \psi_1(t) \sin \frac{\pi y}{l} \cos \frac{\pi z}{h}; \\ w = \psi_y = \frac{\pi}{l} \psi_1(t) \cos \frac{\pi y}{l} \sin \frac{\pi z}{h}. \end{cases} \quad (2.88)$$

В соответствии с методом Галеркина уравнения (2.88) удовлетворяют граничным условиям:

$$w|_{z=0,h} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=0,h} = 0; \quad \theta|_{z=0,h} = 0; \quad \psi|_{z=0,h} = 0. \quad (2.89)$$

При этом учитываются непроницаемость стенок ванны и наличие свободной поверхности у расплавленной сплошной среды (отсутствуют касательные напряжения при $z = h$). В соответствии с методом Галеркина, подставляя (2.88) в (2.86), (2.87) и пренебрегая после преобразований гармониками 3-го и выше порядков, по-

лучили систему нелинейных дифференциальных уравнений, которая представляет собой математическую модель первого приближения для решения поставленной задачи установления условий возникновения конвективного движения расплавленной сплошной среды и определения значения поля скоростей перемещения и температур как функций теплофизических характеристик нагреваемой среды:

$$\dot{\Psi}_1 = -\frac{\nu\pi^2(l^2+h^2)}{l^2h^2}\Psi_1 + \frac{g\beta_r lh^2}{\pi(l^2+h^2)}\theta_1; \quad (2.90)$$

$$\dot{\theta}_1 = -\frac{\pi^2}{lh}\Psi_1\theta_2 + \Delta T \frac{\pi}{lh}\Psi_1 - \frac{k^p\pi^2(l^2+h^2)}{l^2h^2}\theta_1; \quad (2.91)$$

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\pi^2}{2lh}\Psi_1\theta_1 - k^p \frac{4\pi^2}{h^2}\theta_2. \quad (2.92)$$

Эта модель непротиворечива, так как отбрасывание членов высшего порядка не искажает существа рассматриваемых физических процессов и учитывает основные особенности исходных уравнений для корректного решения указанной задачи.

Для дальнейшего совершенствования этой модели проведем анализ ее устойчивости в соответствии с общей теорией [267–273]. Для этого представим модель в безразмерном виде, сделав замены переменных. В результате получим систему безразмерных дифференциальных уравнений:

$$\dot{X}_v^p = \sigma Y_{\tau\varepsilon}^\Delta - \sigma X_v^p; \quad (2.93)$$

$$\dot{Y}_{\tau\varepsilon}^\Delta = -X_v^p Z_{\tau\varepsilon}^\delta + r^\varepsilon X_v^p - Y_{\tau\varepsilon}^\Delta; \quad (2.94)$$

$$\dot{Z}_{\tau\varepsilon}^\delta = X_v^p Y_{\tau\varepsilon}^\Delta - b Z_{\tau\varepsilon}^\delta. \quad (2.95)$$

где X_v^p – безразмерная переменная, соответствующая скорости циркулирующей расплавленной сплошной среды;

$Y_{\tau\varepsilon}^\Delta$ – безразмерная переменная, соответствующая разности температур между восходящими и нисходящими потоками расплавленной сплошной среды;

$Z_{\tau\varepsilon}^\delta$ – безразмерная переменная, соответствующая отклонению вертикального профиля температуры, расплавленной сплошной среды, от равновесного значения;

r^ε – управляющий параметр;

b – параметр, учитывающий геометрическую форму и размеры.

При этом:

$$b = 4(1+a^2)^{-1}; \quad r^\varepsilon = h^3 g \beta_T a^2 \Delta T / \pi^4 k^p \nu^p (1+a^2)^3, \quad a = h(l)^{-1}.$$

Приравняв правые части (2.92)–(2.94) нулю, определили стационарные неподвижные точки системы:

$$A_1(0, 0, 0); \quad A_{2,3} \left(\pm b (r^\varepsilon - 1)^{0,5}; \pm b (r^\varepsilon - 1)^{0,5}; r^\varepsilon - 1 \right).$$

Первая неподвижная точка $A_1(0,0,0)$ соответствует состоянию теплопроводности без движения среды, и матрица устойчивости для линеаризованной в окрестности A_1 системы (2.93)–(2.95) имеет вид:

$$\begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ r^\varepsilon & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -b \end{pmatrix}.$$

Характеристическое уравнение, соответствующее этой матрице, запишем следующим образом:

$$\begin{vmatrix} -\sigma - \lambda & \sigma & 0 \\ r^\varepsilon & -1 - \lambda & 0 \\ 0 & 0 & -b - \lambda \end{vmatrix} = (b + \lambda)[\lambda^2 + (1 + \sigma)\lambda + \sigma(1 - r^\varepsilon)] = 0. \quad (2.96)$$

Корни характеристического уравнения (2.96) определяются по соотношениям:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{\sigma+1}{2} \pm \frac{1}{2} \left((\sigma+1)^2 + 4(r^\varepsilon - 1)\sigma \right)^{0,5}; \quad \lambda_3 = -b. \quad (2.97)$$

Таким образом, решение в точке $A_1(X=Y=Z=0)$ устойчиво, т. е. все $\lambda < 0$ при условии, что управляющий параметр находится в следующих пределах: $0 < r^\varepsilon < 1$.

При условии $r^\varepsilon = 1$ начинается конвекция, так как $\lambda_1 = 0$. Именно в этот момент начинают движение вторая и третья неподвижные точки $A_{2,3}$, соответствующие конвективным валам (см. рисунок 2.4).

Матрица устойчивости для линеаризованной вблизи $A_{2,3}$ системы (2.93)–(2.95) определена следующим образом:

$$\begin{pmatrix} -\sigma & \sigma & 0 \\ 1 & -1 & \mp (b(r^\varepsilon - 1))^{0,5} \\ \pm (b(r^\varepsilon - 1))^{0,5} & \pm (b(r^\varepsilon - 1))^{0,5} & -b \end{pmatrix}.$$

Характеристическое уравнение, соответствующее этой матрице:

$$\lambda^3 + (b + \sigma + 1)\lambda^2 + b(\sigma + r^\varepsilon)\lambda + 2b(r^\varepsilon - 1)\sigma = 0. \quad (2.98)$$

Условия устойчивости (по Гурвицу) уравнения (2.98):

$$r^\varepsilon - 1 > 0, \quad (b + \sigma + 1)(\sigma + r^\varepsilon) - 2\sigma(r^\varepsilon - 1) > 0.$$

После преобразований условий устойчивости:

$$1 < r^\varepsilon < r_k^\varepsilon = \sigma \frac{\sigma + b + 3}{\sigma - b - 1}. \quad (2.99)$$

Из выражения (2.99) видно, что при нахождении в указанных пределах управляющего параметра линеаризованная система устойчива. При этом два корня становятся комплексными, т. е. появляются два предельных цикла конвективных валов.

Запишем необходимое условие возникновения конвекции (2.99) в размерном виде:

$$1 < \frac{Ra}{\pi^4} \frac{a^2}{(1+a^2)^3} < \sigma, \quad (2.100)$$

где Ra – число Рэлея, $Ra = \Delta \operatorname{tg} \beta_\tau h^3 / \nu^p k^p$.

Для корректного установления скоростей движения и распределения температурных полей расплавленной сплошной среды необходимо учесть горизонтальные температурные градиенты. Аналитическое определение максимальных составляющих скоростей течения сплошной среды, вызываемого горизонтальными температурными градиентами в поле сил тяжести, основывается на теории неизотермического течения вязкой среды в кольцевом канале [262, 270]. В этом случае конфигурация температурного поля с горизонтальной составляющей имеет вид, представ-

ленный на рисунке 2.8. Эта задача моделируется системами уравнений, являющимися частным случаем системы (2.79)–(2.81) без учета нелинейных членов.

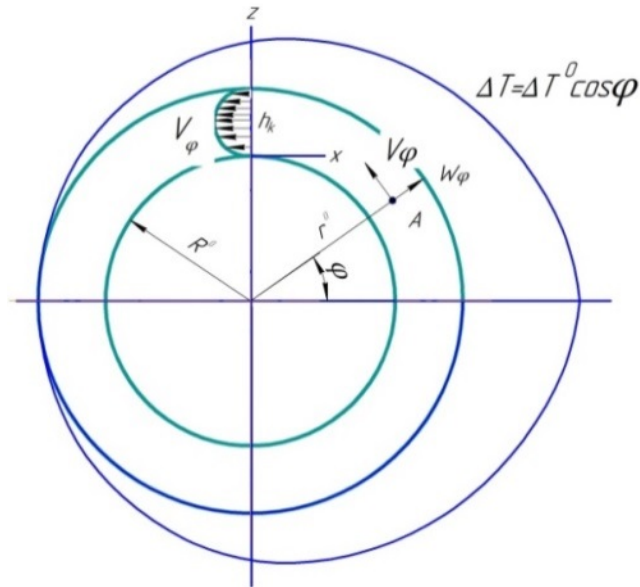


Рисунок 2.8 – Расчетная схема неизотермического движения вязкой сплошной среды при горизонтальных температурных градиентах: V_φ – проекция (тангенциальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с; W_φ – проекция (нормальная) составляющей вектора скорости движения сплошной среды, м/с; h_k – величина канала, м; R^0 – характерный размер цилиндрической поверхности, м; ΔT^0 – максимальный температурный перепад по горизонтали, °С; r^0 – полярный радиус, м; Φ – полярный угол, град.; z^0 – координата ($z^0 = r^0 - R^0$)

При ранее введенных предположениях разрешающая система включает в себя следующие уравнения, формулы и соотношения:

- уравнение неизотермического движения вязкой среды в полярной системе координат:

$$\partial^2 V_\varphi(z^0, \varphi) / \partial z^{02} = (\mu^p R^0)^{-1} \partial P / \partial \varphi - F_\varphi(\varphi) / \nu^p; \quad (2.101)$$

- формулу условия проекции массовых сил:

$$F_\varphi = -g [1 - \beta_T \Delta T] \cos \varphi; \quad (2.102)$$

- формулу конфигурации температурного поля:

$$\Delta T = \Delta T^0 \cos \varphi; \quad (2.103)$$

- граничные условия:

$$V_{\varphi}(0; \varphi) = V_{\varphi}(h_{\kappa}; \varphi) = 0. \quad (2.104)$$

где μ^p – динамическая вязкость расплавленной сплошной среды, Па·с.

Интегрируя уравнение (2.101) по z^o с учетом (2.102), (2.103) и граничных условий (2.104), получим выражение для составляющей скорости :

$$V_{\varphi}(z^o, \varphi) = \left((\mu^p R^o)^{-1} dP/d\varphi - F_{\varphi}/\nu^p \right) z^o (z^o - h_{\kappa}) / 2. \quad (2.105)$$

Усредняя (2.105) по φ от 0 до 2π и по z^o от 0 до h_{κ} и учитывая, что $P(2\pi) - P(0) = 0$, получим:

$$\langle V_{\varphi} \rangle = \frac{g\beta_{\tau}\Delta T^0}{\nu^p} \frac{h_{\kappa}^2}{12}. \quad (2.106)$$

Полученная составляющая скорости движения расплава электролита обусловлена, как предполагалось ранее, горизонтальными градиентами температуры. Она прямо пропорциональна коэффициенту теплового расширения и температурному градиенту в этом расплаве и обратно пропорциональна кинематической вязкости.

Применение соотношения (2.106) к оценке конвекции расплава в электродной печи-ванне возможно при введении весового коэффициента, определяемого соотношением $p^{\varepsilon} \sim h_{\kappa} / 12$.

Таким образом, для оценки максимальных составляющих скоростей конвективного течения расплавленной сплошной среды, вызванных горизонтальными температурными градиентами в поле сил тяжести с учетом непрерывности потока, можно применять следующие соотношения:

$$\langle V_{\varphi} \rangle = \frac{g\beta_{\tau}\Delta T^0}{\nu^p} p^{\varepsilon}; \quad \langle W_{\varphi} \rangle = \frac{g\beta_{\tau}\Delta T^0 h}{\nu^p l} p^{\varepsilon}. \quad (2.107)$$

Значения скоростей, определяемые по формулам (2.107), входят как дополнительные слагаемые в представления поля скоростей (2.88). Получены формулы, которые являются базовыми для уточнения качественного и количественного анализа динамических тепловых процессов в электродной печи-ванне:

$$u = (-\pi\psi_1(t)/h \mp \langle V_\varphi \rangle) \sin(\pi y/l) \sin(\pi z/h);$$

$$w = (\pi\psi_1(t)/l \pm \langle W_\varphi \rangle) \cos(\pi y/l) \sin(\pi z/h).$$
(2.108)

На основе метода элементарных балансов и уравнений неизотермического течения расплавленной вязкой сплошной среды в гравитационном поле получена тепловая модель электродной печи-ванны (рисунок 2.9).

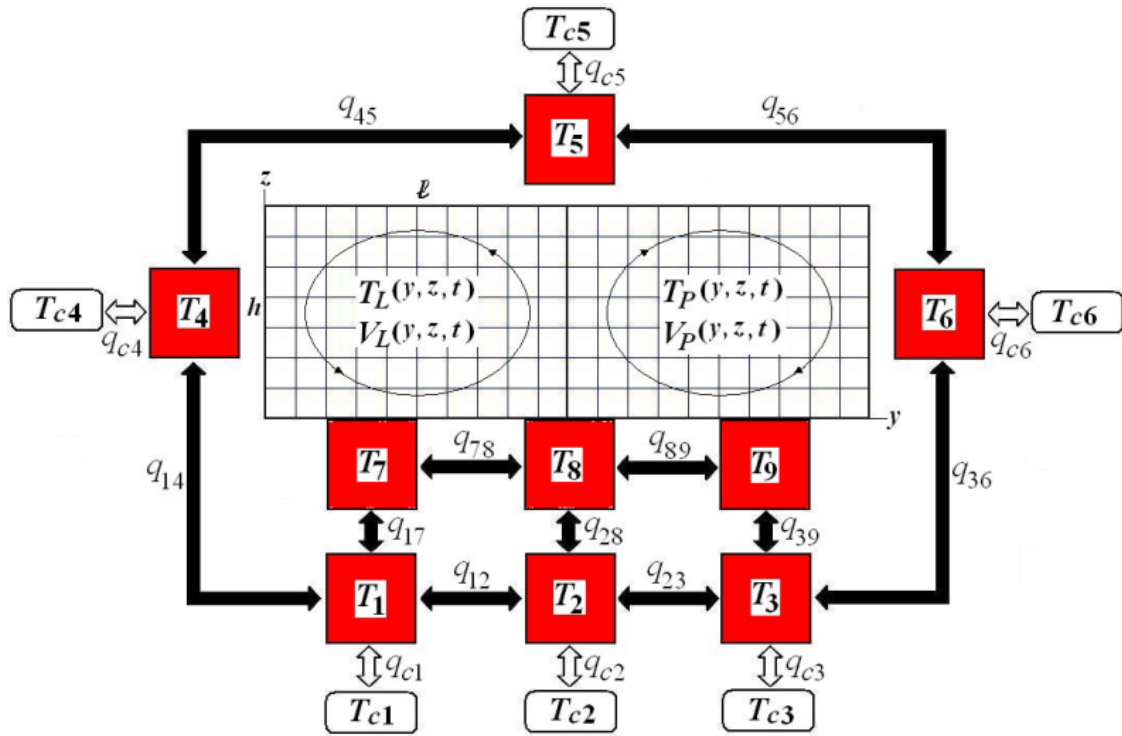


Рисунок 2.9 – Схема тепловой модели электродной печи-ванны: \longleftrightarrow – тепловые связи между объемами; \leftrightarrow – тепловые связи с окружающей средой; $T_1(t)$, $T_2(t)$, $T_3(t)$ – температуры дна, °C; $T_4(t)$, $T_6(t)$ – температуры боковых стенок, °C; $T_5(t)$ – температура крышки, °C; $T_7(t)$, $T_8(t)$, $T_9(t)$ – температуры расплавленной сплошной среды в придонном слое, °C; T_{c1} , T_{c2} , T_{c3} , T_{c4} , T_{c5} , T_{c6} – температуры среды, окружающей печь-ванну, °C; q_{ij} – теплопроводимость между элементарными объемами, Вт/°C; q_{ci} – теплопроводимость от элементарных объемов в окружающую среду, Вт/°C; $T_L(y, z, t)$, $T_P(y, z, t)$ – поля температур сплошной среды в «левой» и «правой» зонах ванны, °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 полного анализа динамических тепловых процессов в печи-ванне, описывается системой дифференциальных уравнений и аналитических соотношений, позволяющих определять тепломассоперенос за счет теплопроводности, свободной и вынужденной конвекции и излучения [267–270]. Также в этих уравнениях учтены источники тепловыделения, теплообмен с окружающей средой, теплофизические и геометрические характеристики конструктивных эле-

ментов печи, разогреваемой сплошной среды (плотность, теплоемкость, теплопроводность, вязкость и степень черноты поверхностей).

Полная система дифференциальных уравнений, соответствующая построенной математической модели тепломассообменных процессов для расчета конструктивных элементов электродной печи-ванны, включает в себя следующие подсистемы:

- для определения размеров дна печи-ванны с источниками тепла:

$$\begin{cases} c_1 \dot{T}_1 + q_{1,7}(T_1 - T_7) + q_{1,2}(T_1 - T_2) + q_{1,4}(T_1 - T_4) + q_{c1}(T_1 - T_{c1}) = Q_1; \\ c_2 \dot{T}_2 + q_{1,2}(T_2 - T_1) + q_{2,8}(T_2 - T_8) + q_{2,3}(T_2 - T_3) + q_{c2}(T_2 - T_{c2}) = Q_2; \\ c_3 \dot{T}_3 + q_{2,3}(T_3 - T_2) + q_{3,9}(T_3 - T_9) + q_{3,6}(T_3 - T_6) + q_{c3}(T_3 - T_{c3}) = Q_3. \end{cases} \quad (2.109)$$

- для определения размеров боковых стенок и крышки печи-ванны:

$$\begin{cases} c_4 \dot{T}_4 + q_{1,4}(T_4 - T_1) + q_{4,5}(T_4 - T_5) + q_{c4}(T_4 - T_{c4}) = Q_4; \\ c_5 \dot{T}_5 + q_{4,5}(T_5 - T_4) + q_{5,6}(T_5 - T_6) + q_{c5}(T_5 - T_{c5}) = Q_5; \\ c_6 \dot{T}_6 + q_{5,6}(T_6 - T_5) + q_{3,6}(T_6 - T_3) + q_{c6}(T_6 - T_{c6}) = Q_6. \end{cases} \quad (2.110)$$

- для определения объемов расплавленной сплошной среды в придонном слое печи-ванны:

$$\begin{cases} c_7 \dot{T}_7 + q_{7,8}(T_7 - T_8) + q_{1,7}(T_7 - T_1) = Q_7; \\ c_8 \dot{T}_8 + q_{7,8}(T_8 - T_7) + q_{8,9}(T_8 - T_9) + q_{2,8}(T_8 - T_2) = Q_8; \\ c_9 \dot{T}_9 + q_{8,9}(T_9 - T_8) + q_{3,9}(T_9 - T_3) = Q_9. \end{cases} \quad (2.111)$$

- для определения конвекции нагреваемой расплавленной сплошной среды по уравнениям Лоренца в «левой» зоне печи-ванны:

$$\begin{cases} \dot{\Psi}_{1L} = -\frac{\nu_L \pi^2 (l_L^2 + h_L^2)}{l_L^2 h_L^2} \Psi_{1L} + \frac{g \beta_T l_L h_L^2}{\pi (l_L^2 + h_L^2)} \theta_{1L}; \\ \dot{\theta}_{1L} = -\frac{\pi^2}{l_L h_L} \Psi_{1L} \theta_{2L} + \frac{(T_8 - T_7) \pi}{l_L h_L} \Psi_{1L} - \frac{k_L^p \pi^2 (l_L^2 + h_L^2)}{l_L^2 h_L^2} \theta_{1L}; \\ \dot{\theta}_{2L} = \frac{\pi^2}{2 l_L h_L} \Psi_{1L} \theta_{1L} - k_L^p \frac{4 \pi^2}{h_L^2} \theta_{2L}. \end{cases} \quad (2.112)$$

• для определения полей температур и скоростей движения расплавленной сплошной среды в «левой» зоне печи-ванны:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_L(y, z, t) = \frac{T_7 + T_8}{2} + \theta_L(y, z, t); \\ \psi_L(y, z, t) = \psi_{1L}(t) \sin \frac{\pi y}{l_L} \sin \frac{\pi z}{h_L}; \\ \theta_L(y, z, t) = \theta_{1L}(t) \cos \frac{\pi y}{l_L} \sin \frac{\pi z}{h_L} - \theta_{2L}(t) \sin \frac{2\pi z}{h_L}; \\ u_L = -\frac{\pi}{h_L} \psi_{1L}(t) \sin \frac{\pi y}{l_L} \cos \frac{\pi z}{h_L} - p \frac{g\beta_\tau}{\nu_L^p} (T_8 - T_7) \sin \frac{\pi y}{l_L} \cos \frac{\pi z}{h_L}; \\ w_L = \frac{\pi}{l_L} \psi_{1L}(t) \cos \frac{\pi y}{l_L} \sin \frac{\pi z}{h_L} + p \frac{h_L}{l_L} \frac{g\beta_\tau}{\nu_L^p} (T_8 - T_7) \cos \frac{\pi y}{l_L} \sin \frac{\pi z}{h_L}. \end{array} \right. \quad (2.113)$$

• для определения конвекции нагреваемой расплавленной сплошной среды по уравнениям Лоренца в «правой» зоне печи-ванны при одинаковой температуропроводности этой среды в «левой» и «правой» зонах ($k^p = k_p^p = k_L^p$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\psi}_{1P} = -\frac{\nu_p^p \pi^2 (l_p^2 + h_p^2)}{l_p^2 h_p^2} \psi_{1P} + \frac{g\beta_\tau l_p h_p^2}{\pi (l_p^2 + h_p^2)} \theta_{1P}; \\ \dot{\theta}_{1P} = -\frac{\pi^2}{l_p h_p} \psi_{1P} \theta_{2P} + \frac{(T_8 - T_9) \pi}{l_p h_p} \psi_{1P} - \frac{k_p^p \pi^2 (l_p^2 + h_p^2)}{l_p^2 h_p^2} \theta_{1P}; \\ \dot{\theta}_{2P} = \frac{\pi^2}{2l_p h_p} \psi_{1P} \theta_{1P} - k_p^p \frac{4\pi^2}{h_p^2} \theta_{2P}. \end{array} \right. \quad (2.114)$$

• для определения полей температур и скоростей расплавленной сплошной среды в «правой» зоне печи-ванны при одинаковой кинематической вязкости этой среды в «левой» и «правой» зонах ($\nu^p = \nu_L^p = \nu_p^p$):

$$\left\{ \begin{array}{l} T_P(y, z, t) = \frac{T_8 + T_9}{2} + \theta_P(y, z, t); \\ \psi_P(y, z, t) = \psi_{1P}(t) \sin \frac{\pi y}{l_P} \sin \frac{\pi z}{h_P}; \\ \theta_P(y, z, t) = \theta_{1P}(t) \cos \frac{\pi y}{l_P} \sin \frac{\pi z}{h_P} - \theta_{2P}(t) \sin \frac{2\pi z}{h_P}; \\ u_P = -\frac{\pi}{h_P} \psi_{1P}(t) \sin \frac{\pi y}{l_P} \cos \frac{\pi z}{h_P} - p^\varepsilon \frac{g\beta_T}{\nu_P^p} (T_8 - T_9) \sin \frac{\pi y}{l_P} \cos \frac{\pi z}{h_P}; \\ w_P = \frac{\pi}{l_P} \psi_{1P}(t) \cos \frac{\pi y}{l_P} \sin \frac{\pi z}{h_P} + p^\varepsilon \frac{h_P}{l_P} \frac{g\beta_T}{\nu_P^p} (T_8 - T_9) \cos \frac{\pi y}{l_P} \sin \frac{\pi z}{h_P}. \end{array} \right. \quad (2.115)$$

Системы дифференциальных уравнений решали с учетом влияния различных видов теплообмена, геометрических характеристик, а также начальных и граничных условий [267–270].

Теплоемкости элементарных объемов рассчитали по аддитивным соотношениям:

$$c_i = \sum_{j=1}^M c_j^y m_j = \sum_{j=1}^M c_j^y \rho_j V_j^o,$$

где c_j^y – удельная теплоемкость материалов деталей, входящих в j -й элементарный объем, Дж/(°С·кг);

m_j – масса материалов деталей, входящих в j -й элементарный объем, кг;

ρ_j – плотность материалов деталей, входящих в j -й элементарный объем, кг/м³;

V_j^o – объем материалов деталей, входящих в j -й элементарный объем, м³.

Теплоемкости объемов зоны дна печи-ванны $c_{1,2,3}$ и масса дна $m_{1,2,3}$:

$$c_{1,2,3} = \pi R^2 (c_{st}^y \rho_{st} h_{st} + c_m^y \rho_m h_m) / 3; \quad m_{1,2,3} = \pi R^2 (\rho_{st} h_{st} + \rho_m h_m),$$

где c_{st}^y – удельная теплоемкость застывшей среды на дне печи-ванны, Дж/(°С·кг);

ρ_{st} – плотность застывшей среды на дне печи-ванны, кг/м³;

h_{st} – толщина застывшей среды на дне и боковой стенке печи-ванны, м;

c_m^y – удельная теплоемкость металла дна печи-ванны, Дж/(°С·кг);

h_m – толщина металла дна и боковой стенки печи-ванны, м;

R – внешний радиус печи-ванны, м;

ρ_m – плотность металла дна печи-ванны, кг/м³.

Теплоемкости и масса объемов зоны боковой стенки печи-ванны:

$$c_{4,6} = (c_{st}^y \rho_{st} \pi H ((R - h_m)^2 - (R - h_m - h_{st})^2) + c_m^y \rho_m \pi H (R^2 - (R - h_m)^2)) / 2;$$

$$m_{4,6} = \rho_{st} \pi H ((R - h_m)^2 - (R - h_m - h_{st})^2) + \rho_m \pi H (R^2 - (R - h_m)^2),$$

где H – высота печи, м.

Теплоемкость и масса крышки печи-ванны:

$$c_5 = \pi R^2 c_{kr}^y \rho_{kr} h_{kr}; \quad m_5 = \pi R^2 \rho_{kr} h_{kr}$$

где c_{kr}^y – удельная теплоемкость материала крышки, Дж/(°С·кг);

h_{kr} – толщина металла крышка печи-ванны, м;

ρ_{kr} – плотность материала крышки печи-ванны, кг/м³.

Теплоемкости и масса слоя сплошной среды, заполняющей печь-ванну:

$$c_{7,8,9} = c_{stm}^y \rho_{stm} \pi R^2 (0,1H_1) / 3; \quad m_{7,8,9} = \rho_{stm} \pi R^2 H_1,$$

где H_1 – высота расплавленной сплошной среды в печи-ванне, м.

Тепловой поток, направленный перпендикулярно последовательно расположенным многослойным структурам, рассчитывали по соотношению между результирующим тепловым потоком и его составляющими тепловыми потоками (термопроводимостями):

$$q_{\perp} = \left(\sum_{i^o=1}^{n^o} (q_{i^o})^{-1} \right)^{-1}.$$

Тепловой поток, направленный параллельно многослойным структурам, разделенным адиабатическими прослойками, представляет собой сумму тепловых потоков, проходящих через каждый слой:

$$q_{//} = \sum_{i^o=1}^{n^o} q_{i^o}.$$

Тепловой поток для плоской многослойной стенки:

$$q_{\text{ТП}} = S \left(\sum_{i^o=1}^{n^o} \frac{l_{i^o}}{\lambda_{i^o}} \right)^{-1},$$

где S – площадь поверхности нормальная к тепловому потоку, м^2 ;

l_{i^o} – толщина i^o -го слоя, м;

λ_{i^o} – коэффициент теплопроводности i^o -го слоя, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$.

В частном случае для однородной структуры термопроводимость определяется по формуле:

$$q_o = \lambda_o S / l_o.$$

Термопроводимости, отражающие тепловые связи элементарных объемов тепловой модели электродной печи-ванны (см. рисунок 2.5), определяются по следующим формулам:

- вдоль многослойного дна печи-ванны:

$$q_{12,23} = \lambda_{\text{st}} Rh_{\text{st}} / l_L + \lambda_{\text{m}} Rh_{\text{m}} / l_P,$$

где $\lambda_{\text{st}}, \lambda_{\text{m}}$ – коэффициенты теплопроводности застывшей среды и металла дна ванны печи, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{м})$;

l_P и l_L – характерные размеры конвективных валов в горизонтальном направлении в «правой» и «левой» зонах пространства печи соответственно, м;

- между дном печи-ванны и придонным слоем расплавленной сплошной среды, заполняющей печь-ванну:

$$q_{17,28,39} = ((l_L + l_P)R / 3) / (0,1H_1 / \lambda_{\text{stm}} + h_{\text{st}} / \lambda_{\text{st}} + h_{\text{m}} / \lambda_{\text{m}});$$

- между объемами придонного слоя расплавленной сплошной среды, заполняющей печь-ванну:

$$q_{78,89} = (2\lambda_{\text{stm}} (0,1H_1)R) / (l_L + l_P);$$

- между объемами дна и боковых стенок печи:

$$q_{14,36} = (\lambda_{st} \pi ((R - h_m)^2 - (R - h_m - h_{st})^2) + \lambda_m \pi (R^2 - (R - h_m)^2)) / 2H ;$$

- между объемами боковых стенок печи и крышки:

$$q_{45,56} = \lambda_m \pi (R^2 - (R - h_m)^2) / H ;$$

- в окружающую среду от дна печи горизонтально:

$$q_{c1,c2,c3} = (0,7\pi R^2 / 2)(\alpha_{IZL} + \alpha_{KONV} (D_{от}^a)^{0,5}),$$

где α_{IZL} – усредненный коэффициент теплоотдачи в окружающую среду излучением, Вт/(°С·м²);

α_{KONV} – усредненный коэффициент теплоотдачи в среду конвекцией в поле сил тяжести, Вт/(°С·м²);

$D_{от}^a$ – относительное атмосферное давление среды, Па;

- в окружающую среду от боковых стенок печи вертикально:

$$q_{c4,c6} = (\pi R^2 H)(\alpha_{IZL} + \alpha_{KONV} (D_{от}^a)^{0,5}),$$

- в окружающую среду от крышки печи:

$$q_{c5} = (1,3\pi R^2)(\alpha_{IZL} + \alpha_{KONV} (D_{от}^a)^{0,5}).$$

Коэффициенты теплоотдачи в окружающую среду, обусловленные свободной конвекцией и излучением, являются функциями температуры [267–271]. Предполагается, что коэффициенты теплоотдачи конвекцией и излучением от поверхностей печи-ванны в окружающую среду принимают определенные значения и не снижают степени адекватности построенной математической модели нагрева в электродной печи-ванне. Диапазон изменения коэффициентов теплоотдачи (при температурных перепадах в десятки и сотни градусов) конвекцией при ламинарном движении и конвективном теплообмене и излучением со средней степенью черноты поверхности печи 0,7 составляет $\approx 3 \dots 40$ Вт/(°С·м²).

Проведенный анализ, полученные уравнения и граничные условия позволяют провести численные оценки температурных градиентов в расплаве сплошной сре-

ды электродной печи-ванны, при которых тепловая конвекция возникает и является устойчивой (приложение *E*).

Эти уравнения и формулы дают возможность также проводить расчет и анализ полей скоростей конвективных потоков, а также решать обратные задачи идентификации теплофизических характеристик сплошной среды по заданным конфигурациям температурных полей.

Построенная математическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне позволяет определять скорости конвективного движения расплавленной сплошной среды, а также задавать, проверять или уточнять параметры конструкции печи, теплофизические характеристики материалов и сред, температурные и другие необходимые характеристики и параметры.

2.6 Выводы по главе

1. Оценка прогнозирования ресурса восстановленных и упрочненных стрельчатых лап культиваторов, произведенная расчетным методом по предложенной аналитической формуле, позволяет сделать вывод о том, что наибольшим ресурсом обладают борированные и наплавленные в жидком теплоносителе почвообрабатывающие рабочие органы культиваторов.

2. Осуществлено физико-химическое обоснование состава электролита для электролизного борирования, показавшее принципиальную возможность выделения атомарного бора (так как оксид натрия оказался устойчивее борного ангидрида на 1,316 В) на поверхности катода (детали). Разработанная математическая модель, описывающая движение ионов в расплаве электролита, дала возможность установить значительное влияние интенсивности конвекции электролита на скорость диффузии ионов бора, что позволяет рассмотреть механизм процесса, обуславливающий возможность получения диффузионных борированных слоев.

3. Предложена математическая модель, количественно описывающая кинетику диффузионных процессов, протекающих при электролизном борировании, и решающая вопросы управления составом и структурой упрочненного слоя за счет

изменения параметров насыщения (плотности тока, температуры, продолжительности насыщения, состава насыщающей среды, состава стали насыщаемой детали).

4. Разработана теоретическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне, связывающая конструктивные параметры печи-ванны и теплофизические процессы, происходящие в рабочем пространстве печи, что позволяет обосновать геометрические размеры ванны, конструктивные материалы и обеспечить задаваемую скорость конвекции.

5. Предложены теоретическая модель нагрева детали при наплавке металлопорошка в жидком теплоносителе и расчетно-аналитическая зависимость для определения толщины наносимого слоя суспензии, функционально учитывающая изменение плотности последней в процессе наплавки и исходный размер детали.

6. Разработана теоретическая модель нагрева детали в процессе наплавки, позволяющая обоснованно назначать технологические режимы (температуру нагрева и время выдержки) наплавки металлопорошка в жидком теплоносителе.

3 ПРОГРАММА 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 (рисунок 3.1) включала в себя:

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

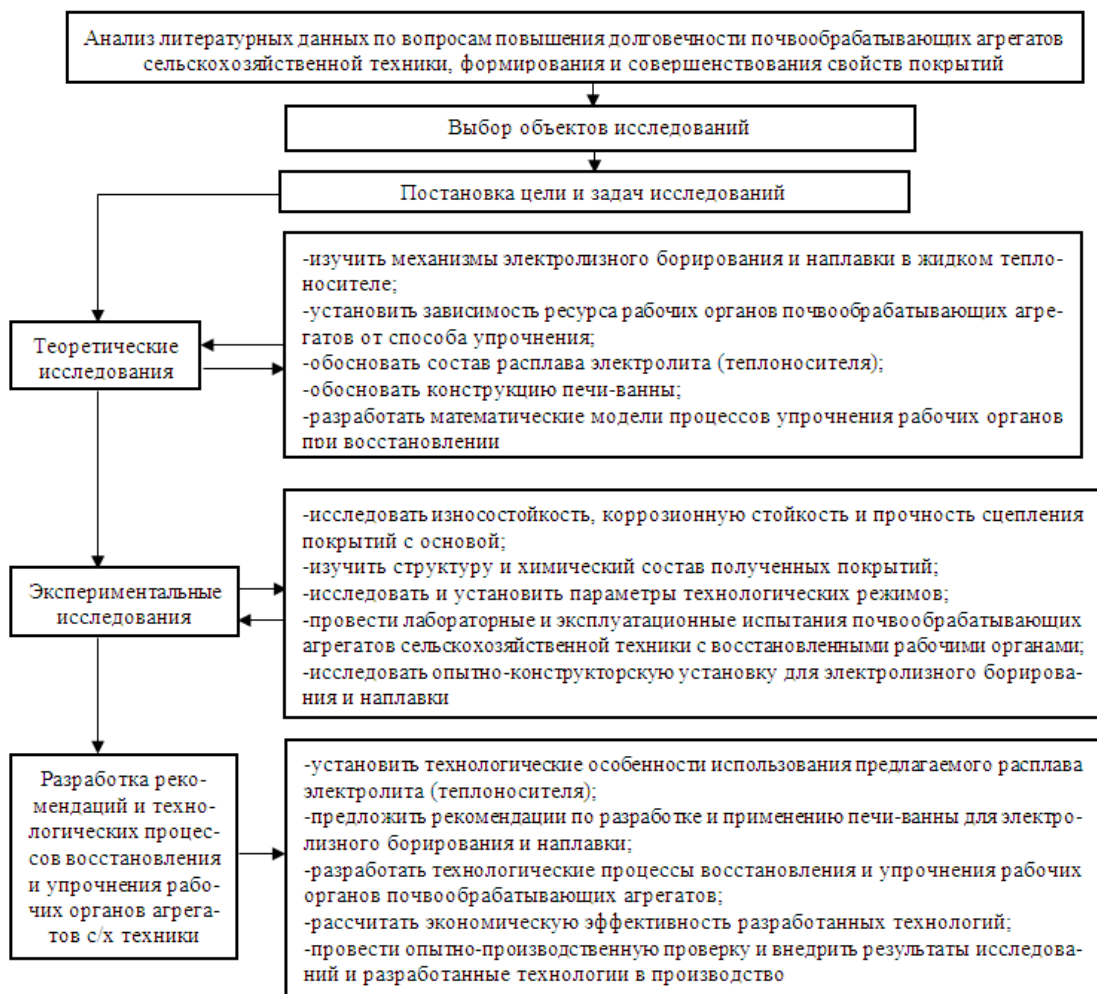


Рисунок 3.1– Структурная схема программы исследований

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

В процессе эксплуатации печей-ванн [213, 214, 227, 246–248, 252], 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.

При таком виде нагрева может 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 один за другим непрерывно. На первом этапе 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 теплоносителя [118, 134, 137, 139, 152, 157, 171, 175, 178, 184, 213, 214, 245–248, 271, 284]. После окончания процесса плавления за счет скрытой теплоты темп роста температуры непрерывно возрастает. В этой связи определение критических точек наплавляемого материала, несомненно, требует экспериментального исследования.

Физико-химическое взаимодействие расплава присадочного материала с поверхностью твердого тела начинается с ее смачиваемости, т. е. равномерного распределения (растекания) этого расплава, что является необходимым условием получения прочного неразъемного соединения [214–216, 227, 285]. В соответствии со вторым началом термодинамики это физическое взаимодействие представляет собой экзергоническую реакцию, которая сопровождается уменьшением свободной поверхностной энергии.

При равномерном и быстром нагреве изделий их деформации минимальны, т. е. обеспечивается возможность сохранения исходных размеров, что важно при ремонтной наплавке [214]. Поэтому необходима оценка 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 [118, 120, 127, 128, 134, 139, 141, 142, 148, 152, 169, 171, 172, 175, 178, 259, 261, 272, 285, 286, 289].

На практике определение этих факторов затруднительно из-за сложного химического состава сплавов и их взаимодействия. Наплавочные материалы, принятые для упрочнения деталей, по составу отличаются от металла основы, и их взаимодействие на линии сплавления необходимо оценить с позиции этого воздействия на механические и эксплуатационные свойства покрытия и, соответственно, на ресурс восстановленной детали, что обуславливает необходимость исследования механических свойств и износостойкости покрытий [119, 244, 255, 290, 297–300].

Планирование экспериментов и обработку результатов проводили с помощью математических методов (приложение *E*) [249, 274–276].

Перед исследованиями контрольно-измерительные приборы тарировали согласно соответствующим требованиям.

3.1 Методика исследования свойств теплоносителя

Исследование технологии наплавки в жидком теплоносителе и определение его показателей представляют собой достаточно сложный процесс, затрудненный массой взаимодействующих факторов [213, 214, 253, 254, 285–287, 289].

Для этих целей была разработана частная методика, согласно которой в тигель из карбонитрида бора загружали исследуемые образцы и теплоноситель. Тигель помещали в камерную печь, нагревали до температуры ликвидуса исследуемого материала образца и выдерживали при этой температуре в течение 0,5 ч. Высота барометрического столба жидкого теплоносителя над зеркалом расплавленного теплоносителя для предотвращения возможного испарения летучих компонентов составляла 0,04 м. Химический состав материала анализировали до и после нагрева, что позволяло судить о его изменениях, а также сделать заключение о способности жидкого теплоносителя взаимодействовать с наплавляемым материалом.

Для исключения активного участия воздуха на границе раздела сред при оценке разъедающего действия расплавов использовали водоохлаждаемые державки 1 (рисунок 3.2), внутри которых устанавливали образцы 2, представляющие собой шлифованные стальные планки размерами $0,2 \times 0,02 \times 0,02$ м.

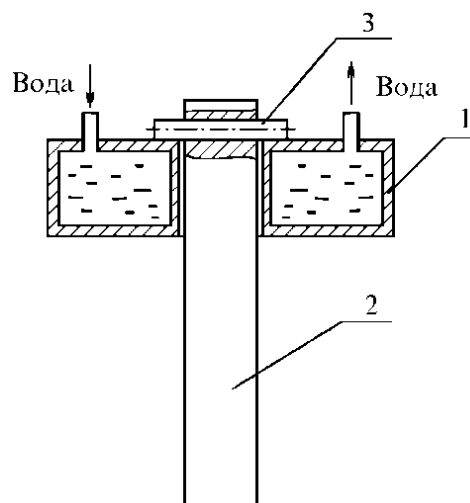


Рисунок 3.2 – Схема закрепления образца в державке:
1 – водоохлаждаемая державка; 2 – образец; 3 – штифт

Данную конструкцию погружали в теплоноситель и выдерживали в течение 35 мин. После этого образцы промывали в горячей воде. На профилографе-профилометре ВЭИ-201 завода «Калибр» фиксировали рельеф поверхности, при этом начало профилограммы соответствовало исходной поверхности металла, не имевшего контакта с расплавом теплоносителя. Соотношение площадей, заключенных между прямой, соответствующей начальной линии, с рельефной поверхностью характеризовало разъедающую активность теплоносителя.

Для исследования состава летучих компонентов над расплавом теплоносителя был использован масс-спектрометр МИ-1305 (рисунок 3.3).

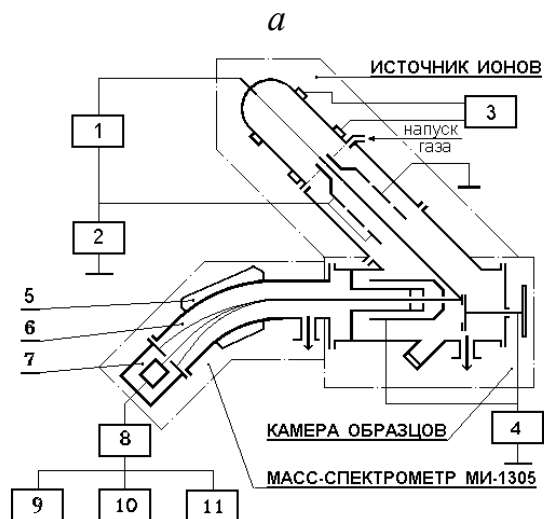


Рисунок 3.3 – Масс-спектрометрическая установка МИ-1305: *а* – общий вид; *б* – устройство рабочей камеры и схема действия: 1, 2, 3, 4 – источники питания; 5 – электромагнит; 6 – ионопровод; 7 – коллектор; 8 – усилитель; 9, 10, 11 – регистрирующие устройства

В вакуум-камеру прибора в тигле помещали навеску теплоносителя. Сфокусированный электромагнитными линзами (конденсорами) электронный луч расплавлял и испарял теплоноситель, при этом электроны, взаимодействуя с парогазовой фазой, вызывали вторичное излучение, которое регистрировалось прибором.

Последующую расшифровку спектрограмм проводили с целью определения состава летучих компонентов.

Потерю массы теплоносителя из-за выгорания составляющих определяли путем его нагрева в малообъемных тиглях из карбонитрида бора до температуры 1100 °С в камерной печи СНЗ-6.5.13.4/10М1. Периодически, через каждые два часа в течение 10 ч тигель охлаждали и взвешивали, начальная загрузка составляла 0,05 кг. По результатам взвешивания определяли относительную потерю массы теплоносителя (%) по формуле:

$$\Delta m_T = \frac{m_T^o - m_T^H}{m_T^o} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где m_T^o – масса тигля с теплоносителем до нагрева, кг;

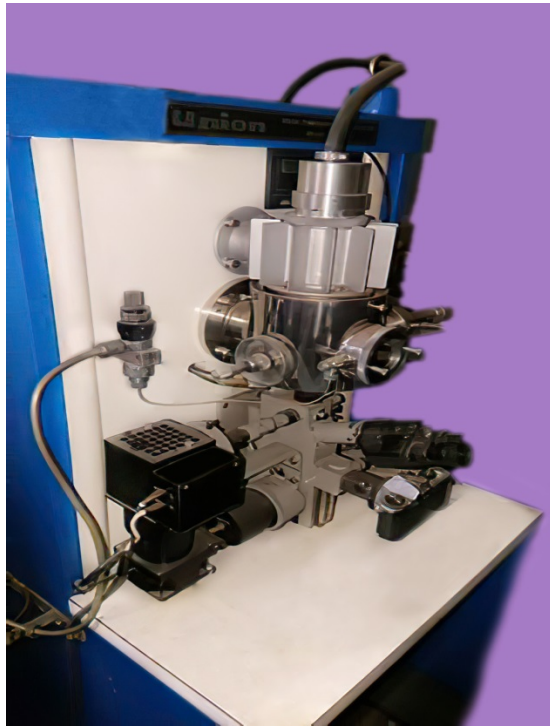
m_T^H – масса тигля с теплоносителем после нагрева, кг.

Стабильность состава теплоносителя определяли химическим анализом перед его загрузкой в печь-ванну и после эксплуатации в рабочем режиме в течение 120 ч. Через каждые 24 ч анализ повторяли, при этом добавку свежего теплоносителя в ванну не производили.

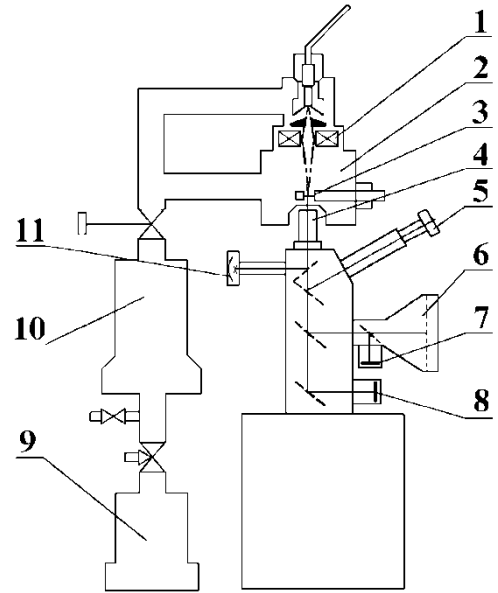
3.2 Методика исследования процесса наплавки

Характер плавления присадочного порошка изучали на высокотемпературном микроскопе марки НМ-100 «Union» (рисунок 3.4) с установленной последовательностью эксперимента. Исследуемый образец 3 устанавливали в держатель 4, который помещали в вакуумную камеру 2 через шлюз. Нагрев образца осуществляли электронным лучом, сфокусированным при помощи электромагнитных линз 1. Данная последовательность позволяет проводить визуальный контроль процесса плавления и кристаллизации материала. Скорость нагрева (5°С/с)

задавалась и контролировалась автоматически. Одновременно происходило фото-графирование этого процесса.



а



б

Рисунок 3.4– Высокотемпературный микроскоп НМ-100: а – общий вид; б – схема:
 1 – электромагнитные линзы; 2 – вакуумная камера; 3 – исследуемый образец;
 4 – держатель; 5 – оптическая система; 6 – фотокамера; 7 – фотоэкспонетр;
 8 – оптический параметр; 9 – роторный вакуумный насос; 10 – диффузионный
 вакуумный насос; 11 – ксеноновая лампа

Держатель микроскопа был модернизирован (рисунок 3.5).

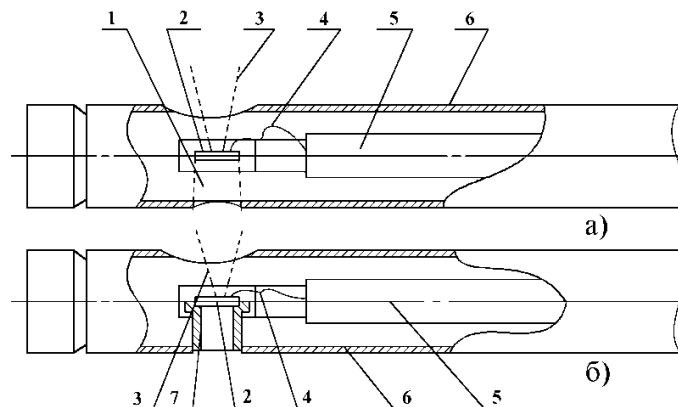


Рисунок 3.5 – Схема держателя микроскопа НМ-100: а – до модернизации;
 б – после модернизации: 1 – испарившееся металлическое облако; 2 – исследуемый
 образец; 3 – поток электронов; 4 – термопара; 5 – стержень; 6 – корпус;
 7 – защитный экран

Процесс нагрева и плавления в жидком теплоносителе исследовали по схеме, представленной на рисунке 3.6. В сердцевину образца из стальной пластины 1 герметично устанавливали хромель-алюмелевую термопару 2 на расстоянии 1 мм от наплавляемой поверхности. На боковую поверхность образца наносили слой наплавляемого присадочного порошка 6 и погружали в расплав жидкого теплоносителя.

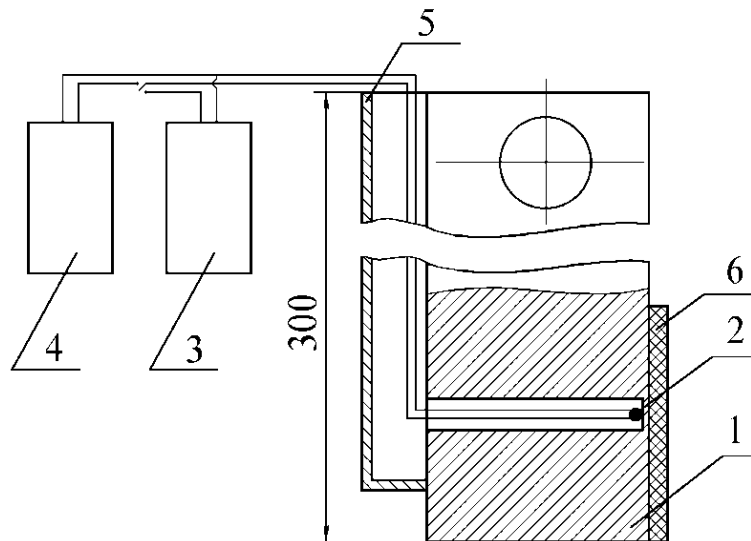


Рисунок 3.6 – Схема измерения температуры наплавки: 1 – образец; 2 – термопара; 3 – шлейфовый осциллограф; 4 – вольтметр; 5 – защитный экран; 6 – наплавляемый слой

Изменение температуры отслеживали на шлейфовом осциллографе Н-115. После расшифровки осциллограмм строили график изменения температуры при нагреве до плавления исследуемого материала. Полученные таким образом термограммы позволили определить критические точки присадочного материала – начало (солидус) и конец (ликвидус) плавления.

Для определения толщины наплавленного слоя использовали $1,57 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$ суспензии, которую укладывали в цилиндрическую стальную чашку (масса и объем которой соответственно $0,050 \text{ кг}$ и $6,37 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$), сушили, взвешивали на весах ВЛА-200г-М и нагревали до момента расплавления. Затем измеряли объем и массу слоя. По отношению массы к объему находили плотность. Размеры образцов до и после наплавки измеряли микрометром МК 25-2 с точностью до $0,01 \text{ мм}$.

Смачивающую способность жидкости оценивали на основе коэффициента смачивания, который равен косинусу угла θ , образующегося между твердой поверхностью и вектором силы поверхностного натяжения жидкости на границе раздела фаз (рисунок 3.7, *a*). При $\cos \theta > 0$ жидкость смачивает поверхность твердого тела, а при $\cos \theta < 0$ этого практически не происходит [24, 30, 31, 108, 166, 167, 270].

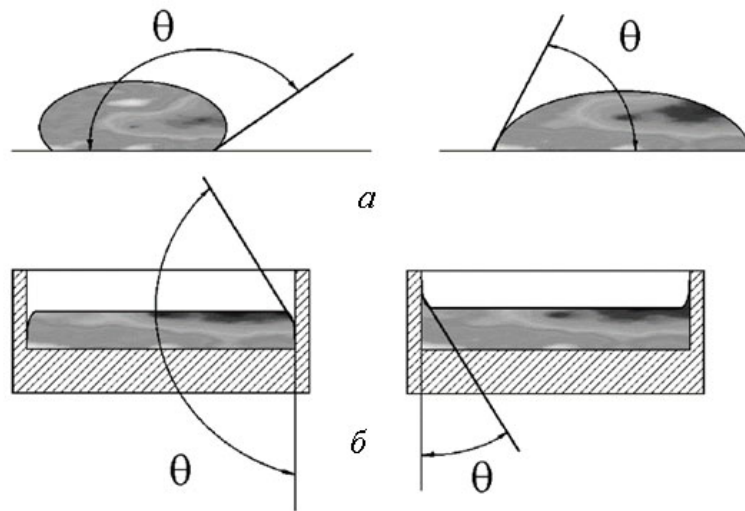


Рисунок 3.7– Схема определения смачиваемости:
a – на открытой горизонтальной поверхности;
б – в горизонтально расположенной стальной чашке

Влияние нагрева в жидком теплоносителе на деформацию деталей оценивали на шлифованных цилиндрических ($\varnothing 25$ мм) стальных (сталь 30) образцах длиной 250 мм.

3.3 Методика исследования характера диффузии элементов

Исследование диффузии элементов по толщине покрытия проводили с помощью рентгеновского микроанализатора «Супер Проб 733» с приставкой для рентгеноспектрального локального анализа (рисунок 3.8). Конструкция микроскопа позволяет наблюдать и фотографировать поверхность образца с одновременным получением информации о химическом составе рассматриваемого участка [261, 272, 277–281].

Наплавку образцов производили в соответствии с п. 2.5, выдерживая их в течение 30...360 с при температуре расплава 980...1100 °С. Затем образцы охлаждали на воздухе и разрезали на темплеты размерами 2×3×6 мм. После этого их фиксировали сплавом Вуда в оправке диаметром 14 мм и высотой 7 мм.

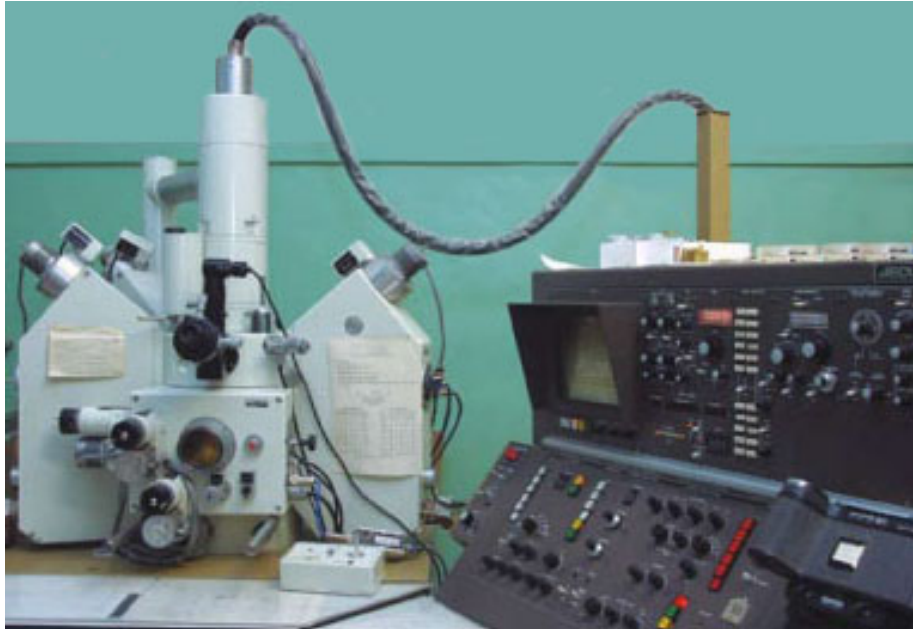


Рисунок 3.8 – Рентгеноструктурный микроанализатор «Супер Проб 733»

3.4 Методика исследования структуры и механических свойств упрочняемых деталей

Методика исследования структуры наплавленных деталей

Структуру наплавленных деталей исследовали на оптических и электронных микроскопах. При этом оценивали качество нанесенного слоя на предмет наличия неметаллических включений, раковин, пор и трещин. Вместе с тем анализировали линию сплавления – ее равномерность, наличие в ней интерметаллидных фаз и межкристаллитного проникновения присадочного металла [281].

Сначала шлифы изучали в нетравленном виде на предмет наличия пор, трещин и неметаллических включений по ГОСТ 1778-85.

Подготовленные образцы подвергали проверке на микротвердомере ПМТ-3 (рисунок 3.9) и металлографическом микроскопе МИМ-8М (рисунок 3.10).



Рисунок 3.9 – Микротвердомер ПМТ-3



Рисунок 3.10 – Металлографический микроскоп МИМ-8М

Методика исследования структуры борированных деталей

При исследовании структуры борированных деталей использовали электронный микроскоп МИМ-8М (см. рисунок 3.10).

Сначала шлифы изучали в нетравленном виде на предмет наличия дефектов. Затем для выявления микроструктуры металла основы и боридного слоя применяли химическое травление.

Подготовленные таким образом образцы изучали с помощью микротвердомера ПМТ-3 и металлографического микроскопа МИМ-8М при 100- и 600-кратном увеличении. Уколы наносили при нагрузке 0,981 Н в виде дорожек.

Методика исследования прочности сцепления наплавленного покрытия

Прочность сцепления покрытия определяли тремя методами [118, 122, 131, 132, 134–136, 141, 177, 178]: на отрыв, на проворачивание и на сдвиг.

Принимая во внимание природу сцепления покрытий с основным металлом и ожидаемую разницу количественных характеристик прочности, нами был принят метод отрыва образца от покрытия нормальной силой [118].

Для испытаний использовали образцы, изготовленные из двух элементов: трубы 1 и стержня 2, сваренных между собой (рисунок 3.11, а). Внутреннее пространство было полностью заплавлено, а затем образцы механически обрабатывали до нужных формы и размеров (рисунок 3.11, б).

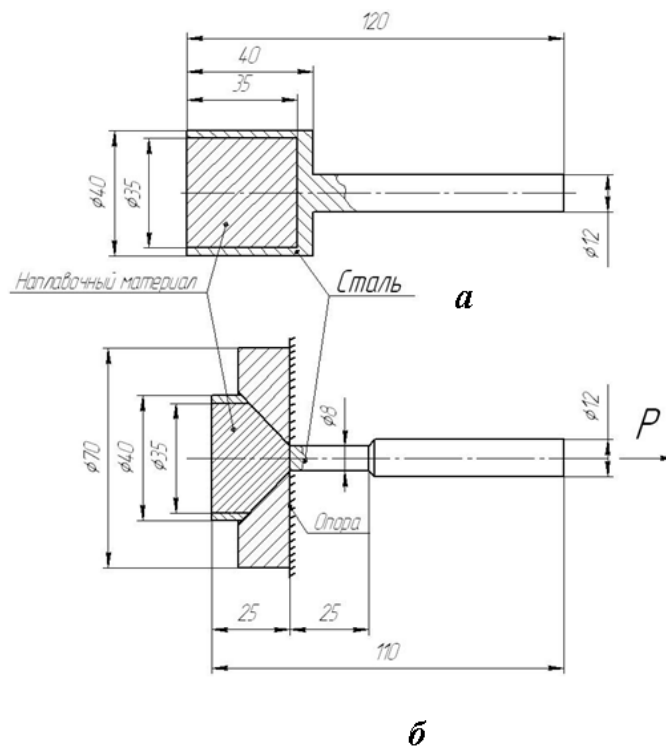


Рисунок 3.11– Образец и схема для определения прочности сцепления:
а – заготовка образца; б – схема его закрепления

Испытания проводили на универсальной испытательной машине УММ-10, при этом усилие фиксировали на диаграмме, а прочность сцепления σ^p подсчитывали по формуле:

$$\sigma^p = 4F^p / \pi d_{об}^2, \quad (3.2)$$

где F^p – усилие, при котором нарушается целостность образца, Н;

$d_{об}$ – диаметр стержня (образца) в месте контакта с наплавленным слоем, м.

Методика определения пористости покрытия

При определении размера пор прямоугольной или ромбической формы подсчитывали среднее арифметическое минимального и максимального размеров, принимая этот размер за сторону квадрата. При разнице между максимальным и минимальным размерами пор более чем в 2 раза группу устанавливали по площади поры. Общую площадь пор сложной формы подсчитывали суммированием площадей отдельных участков. Для этого количество пор каждой группы умножали на среднее значение площади пор этой группы и полученные произведения по всем группам суммировали. Среднюю площадь пор ($S_{ср}^n$) в одном поле зрения вычисляли по формуле:

$$S_{ср}^n = S_{об}^n n_{пз}^{-1}, \quad (3.3)$$

где $S_{об}^n$ – общая площадь пор, мм²;

$n_{пз}$ – количество полей зрения.

Содержание пор ω_n , %:

$$\omega_n = S_{ср}^n K_s^{пз}, \quad (3.4)$$

где $K_s^{пз}$ – коэффициент, учитывающий площадь поля зрения:

$$K_s^{пз} = 100 S_{пз}, \quad (3.5)$$

где $S_{пз}$ – площадь поля зрения на шлифе при установленном увеличении в делениях окулярной шкалы в квадрате:

$$S_{\text{пз}} = 0,25\pi d_{\text{пз}}^2, \quad (3.6)$$

где $d_{\text{пз}}$ – диаметр поля зрения в делениях окулярной шкалы (его определяли делением диаметра поля зрения, мм, на цену деления окулярной шкалы микроскопа микротвердомера ПМТ-3).

3.5 Методика исследования механизма процесса электролизного борирования

Кинетику процесса борирования изучали с помощью лабораторной установки (рисунки 3.12 и 3.13).

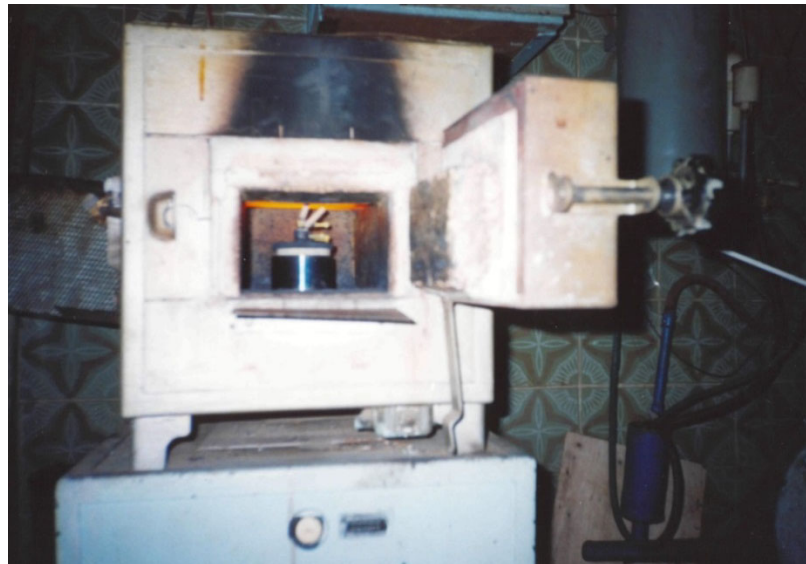


Рисунок 3.12 – Общий вид лабораторной установки электролизного борирования на базе печи сопротивления КО 14

Исследования проводились в электрической печи сопротивления 11 (см. рисунок 3.13) с неконтролируемой атмосферой марки КО 14, в рабочее пространство которой устанавливали тигель 1. Заданную температуру поддерживали постоянной $950 \pm 5^\circ\text{C}$ и контролировали предусмотренными в конструкции печи устройствами, состоящими из автоматического потенциометра типа КПУ-3 с градуировкой ХА до 1100°C и датчика температуры, которым служила хромель-алюмелевая термопара типа ТХА. Регулировку температуры расплава 10 осуществляли изменением величины тока, подводимого к силицидным нагревателям электрической печи сопротивления 11.

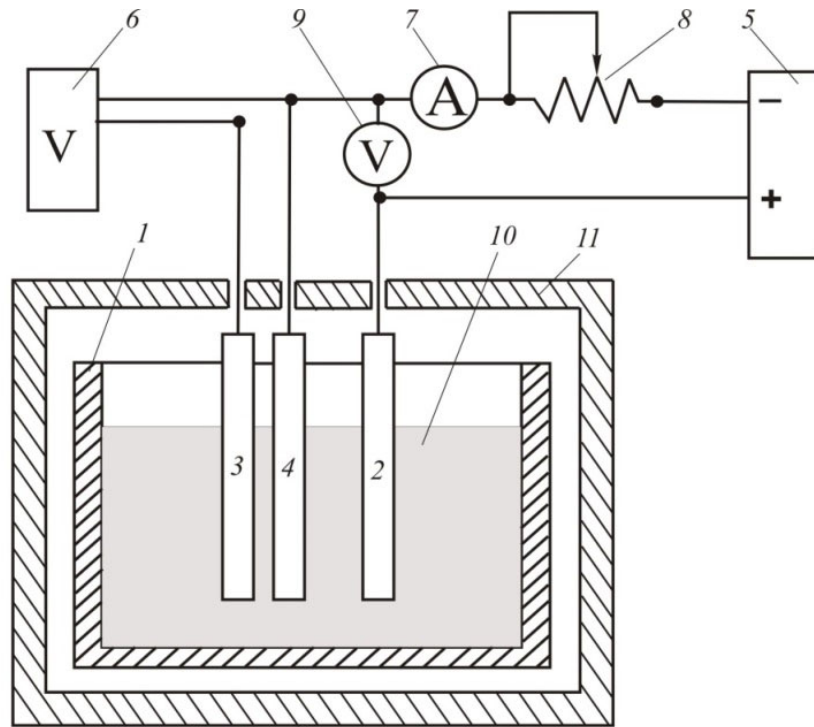


Рисунок 3.13 – Принципиальная схема лабораторной установки для определения поляризации: 1 – алундовый тигель; 2 – графитовый стержень; 3 – электрод сравнения; 4 – борлируемый образец; 5 – выпрямитель Б7-16А; 6 – цифровой вольтметр В7-16А; 7 – миллиамперметр М 104; 8 – реостат для регулировки тока; 9 – вольтметр; 10 – борсодержащий расплав; 11 – печь сопротивления КО 14

Катодом служила стальная пластинка (Ст3), площадь борлируемой поверхности которой в соответствии с объемом тигля составила $3 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$. Равновесные потенциалы бора измеряли относительно электрода сравнения 3, в качестве которого был использован образец, идентичный борлируемому.

Роль анода при измерении катодной поляризации выполнял графитовый стержень 2 диаметром 9 мм и длиной 8 см марки ГЭ-1 (ТУ 48-20-86-81, ГОСТ 4426-73). Рабочий ток создавался источником постоянного тока марки Б7-16А 5 и регистрировался миллиамперметром 7 постоянного тока М 104 (ГОСТ8711-93). В качестве регистрирующего и измерительного прибора был использован цифровой универсальный вольтметр 6 марки В7-16А. Ток насыщения изменяли ступенчато и последовательно через каждые 10 мА. Значения показаний напряжения фиксировали в установившемся режиме.

3.6 Методика проведения рентгенофазового анализа упрочненного слоя

Количественный фазовый анализ осуществляли рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3М в фильтрованном FeK_α -излучении с фокусировкой по Брегу-Брентано (рисунок 3.14). По перераспределению дифракционных максимумов анализировали изменение фазового состава и проводили идентификацию структуры образующихся фаз [278–280]. Сканирование образцов в интервале бреговских углов $0 \dots 40$ град. проводили с различными скоростями: 2 град./мин для первичной оценки состава и 0,5 град./мин для прецизионного фазового количественного анализа. Идентификацию фаз осуществляли на основе данных, представленных в Международной картотеке Общества испытаний и материалов ASTM.



Рисунок 3.14 – Дифрактометр рентгеновский ДРОН-3М

Концентрацию фаз S_i^k определяли по формуле [134, 135, 147]:

$$J_i^p (J_{i\max}^p)^{-1} = S_i^k / S_i^k \left(1 - M_{i+1}^* (M_i^*)^{-1} \right) + M_{i+1}^* (M_i^*)^{-1}, \quad (3.7)$$

где $J_{i\max}^p$ – интенсивность максимального рефлекса чистой фазы на дифрактограмме, отн. ед.;

J_i^p – интенсивность рефлекса упрочненного слоя на дифрактограмме, отн. ед.;
 M_{i+1}^* , M_i^* – коэффициенты поглощения составляющих фаз упрочненного слоя.

Для подтверждения результатов теоретических расчетов и определения оптимального режима работы ванны электролизного борирования стальных изделий был использован метод ротатбельного центрального композиционного планирования эксперимента [275, 276] (приложение Г).

На основании анализа составленных линейных моделей был осуществлен второй этап исследования – оптимизация процесса электролизного борирования методом наименьших квадратов [275, 276]. Расчеты полного трехфакторного эксперимента выполняли на ЭВМ в среде математических приложений (приложение Г).

3.7 Методика масс-спектрального анализа упрочненного слоя

Исследование образцов размерами $9 \times 6 \times 4$ мм, подготовленных в соответствии с п. 3.3, проводили методом масс-спектрометрии вторичных ионов на магнитной экспериментальной масс-спектрометрической установке с ионным зондом (см. рисунок 3.3) [278–280].

Снижение давления (создание вакуума) в источнике ионов, ионопроводе массоанализатора и в камере мишени осуществляли магниторазрядными насосами НОРД-250 и ТРИОН-150 производительностью соответственно 250 и 150 л/с, выполняющих необходимую откачку системы за 20–30 мин.

Вторичные ионы, выбиваемые из поверхностного слоя образца, собирались в пучок при помощи ионной оптики (вторичной) и отправлялись в массоанализатор. Измерительным оборудованием установки после разделения вторичных ионов по отношению массы к заряду их ток усиливали и фиксировали.

Атомные массы исследовали в диапазоне от 1 до 230 а.е.м. В держатель мишени устанавливали образцы и помещали в рабочую камеру установки, из которой удаляли атмосферный воздух до получения давления на уровне $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па. После этого ионами аргона с энергией 2 кэВ при плотности тока 1 мА/см^2 осуществлялась бомбардировка мишени. При этом диаметр пятна воздействия на образец составлял 1 мм, а сила тока 5 мкА.

Глубинные профили концентраций бора и углерода по толщине измеряли путем регистрации сигнала вторичных ионов исследуемого вещества как функцию времени распыления (толщины анализируемого слоя). При этом было принято, что концентрация вещества пропорциональна интенсивности вторичных ионов.

3.8 Методика исследования хрупкости

Оценку хрупкости материала осуществляли по числу и характеру трещин у отпечатка алмазной призмы, вдавливаемой при нагрузке 0,196 Н, 0,49 и 0,98 Н в исследуемую поверхность, а также по темпу нарастания разрушения слоя с ростом нагрузки. По характеру трещин и сколов у отпечатка по 5-балльной шкале микротвердомера (рисунок 3.15) определяли степень хрупкости [224, 232, 236].

Суммарная балльная оценка хрупкости Z_p^x :

$$Z_p^x = 0n_0^x + n_1^x + 2n_2^x + 3n_3^x + 4n_4^x + 5n_5^x, \quad (3.8)$$

где $n_0^x, n_1^x, n_2^x, n_3^x, n_4^x, n_5^x$ – количество отпечатков из общего числа (25...100) со средним баллом хрупкости.

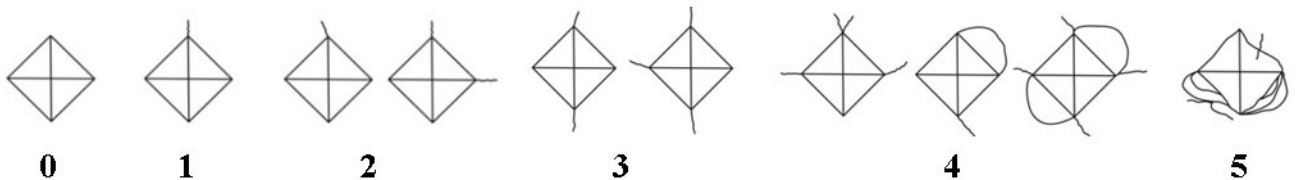


Рисунок 3.15 – Шкала для определения микрохрупкости: 0 – без видимых трещин и сколов; 1 – одна небольшая трещина; 2 – одна трещина, не совпадающая с продолжением диагонали или две трещины в смежных углах отпечатка; 3 – две трещины в противоположных углах отпечатка; 4 – больше трех трещин или один-два скола у сторон отпечатка; 5 – разрушение формы отпечатка

Для учета темпа нарастания хрупкого разрушения материала с ростом нагрузки рассчитывали отношение приращения суммарного балла хрупкости ΔZ_p^x к приращению нагрузки ΔF_p^x :

$$\left(\frac{\Delta Z_p^x}{\Delta F_p^x}\right) \approx \left(\frac{\partial Z_p^x}{\partial F_p^x}\right)_p. \quad (3.9)$$

Показатель хрупкости материала ζ^x , отражающий характер разрушения и темп его нарастания с увеличением нагрузки, определяли произведением суммарного балла хрупкости на величину его частной производной по нагрузке:

$$\zeta^x = Z_p^x \left(\frac{\partial Z_p^x}{\partial F_p^x} \right)_p. \quad (3.10)$$

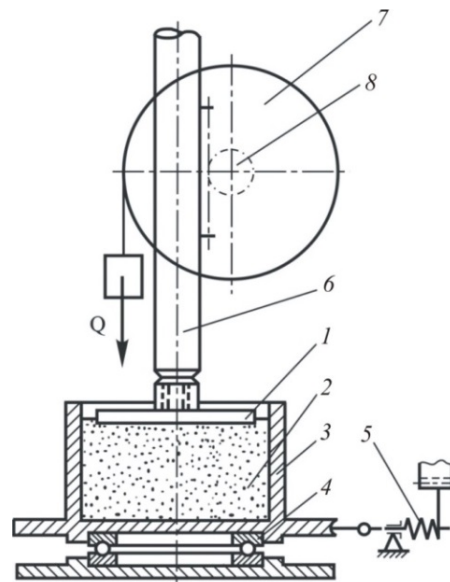
Длительность нагружения, выдержка под нагрузкой и ее снятие составляли 20 с, 15 и 5 с соответственно. Отпечатки оценивали при 300-кратном увеличении.

3.9 Методика лабораторных испытаний

Сравнительные испытания на износостойкость проводили на лабораторной установке для изучения абразивного изнашивания материалов [27, 29, 33, 35, 36, 61, 65] (рисунок 3.16). Плоский образец 1 закрепляли с помощью вала 6 в патроне шпинделя сверлильного станка, осуществляющего вращательное движение под дозированной нагрузкой по абразивной массе 2, которая находится в цилиндрическом стальном стакане 3, установленном на упорном шарикоподшипнике 4.



a



б

Рисунок 3.16 – Установка для испытания на абразивный износ:
a – общий вид; *б* – принципиальная схема: 1 – образец; 2 – абразивная масса;
 3 – стакан; 4 – подшипниковая опора; 5 – самописец; 6 – вал;
 7 – нагрузочный блок; 8 – шестерня

Днище корпуса представляет собой диск большего, чем корпус диаметра с закрепленной тягой, идущей к динамометрическому самописцу 5. Такая схема установки позволяет отслеживать и фиксировать момент трения в процессе испытания образца.

Удельную нагрузку на образец $F_{уд}$ рассчитывали по формуле:

$$F_{уд} = M_{гр} L_{рг} / \pi R_{об}^2 r_{ср}^{III}, \quad (3.11)$$

где $M_{гр}$ – масса груза, кг;

$L_{рг}$ – длина плеча нагрузочного рычага 7 (см. рисунок 3.16), см;

$R_{об}$ – радиус образца, см;

$r_{ср}^{III}$ – радиус средней окружности шестерни 8 привода перемещения шпинделя, см.

В связи с тем, что большинство почв в естественном состоянии содержат наибольшее количество песчинок диаметром 0,25...0,3 мм (18–20 %) [34, 62, 63], абразивным материалом принят кварцевый фракционированный пескоструйный песок с размером частиц 0,25...0,3 мм и влажностью не более 2 %.

Для приведения испытаний в соответствие с условиями работы рабочих органов при культивации были определены условия испытаний на абразивное изнашивание упрочненных и эталонных образцов. Частота вращения шпинделя 700 мин^{-1} ($\sim 2,7 \text{ м/с}$), удельная нагрузка на образец $\sim 22000 \text{ Н/м}^2$ (осевое усилие, передаваемое штоком, $\sim 100 \text{ Н}$). Продолжительность испытаний устанавливали исходя из результатов предварительных экспериментов. Для одного образца осуществляли 15 повторов по 4 мин, после 5 повторов абразивную массу меняли, так как острые грани этих частиц скруглялись и интенсивность изнашивания снижалась. Испытания повторяли для трех образцов по каждой технологии упрочнения.

Величину износа испытываемых и эталонных образцов определяли путем взвешивания до и после испытаний на аналитических весах ВЛА-200г-М с погрешностью не более 0,1 мг. Временной промежуток между взвешиваниями выбирался исходя из того, что потеря массы образца вследствие изнашивания при испытании должна составлять не менее 5 мг.

3.10 Методика исследования коррозионной стойкости

Ускоренные коррозионные испытания проводили по ГОСТ 9.308-85 с учетом особенностей наплавленных и борированных стальных образцов. Последние представляли собой цилиндрические стальные стержни длиной $30 \cdot 10^{-3}$ м и диаметром $25 \cdot 10^{-3}$ м, изготовленные из сталей 30 и 65Г. Изучали образцы:

- подвергнутые электролизному борированию на глубину 0,25...0,30 мм;
- наплавленные толщиной 0,25...0,30 мм;
- закаленные.

Экспериментальная установка состояла из 3 эбонитовых ванн, заполненных на 2/3 специальными жидкостями. Конструкция установки обеспечивала полное погружение образцов. Испытания проводили в различных средах:

- в кислой среде (рН = 4,0...4,5), которая представляла собой раствор соляной кислоты;
- в нейтральной среде (рН = 6,0...6,2) – дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72);
- в щелочной среде (рН = 7,5...8,0) – раствор гидроксида натрия в дистиллированной воде.

Объем жидкости в ваннах корректировали из расчета $30...50 \text{ см}^3$ жидкости на 1 см^2 площади поверхности образцов.

Продолжительность пребывания образцов в средах 10 мин, на воздухе – 50 мин. Смену раствора проводили каждые 25 ч испытаний.

Длительность исследований составляла 25 ч, 50, 75 и 100 ч, затем образцы сушили на воздухе. Продукты коррозии удаляли с их поверхности по ГОСТ 9.907-83. По потере массы образцов (ГОСТ 9.908-85) путем взвешивания на аналитических весах ВЛА-200г-М определяли их коррозионную стойкость.

3.11 Методика полевых ресурсных испытаний

Сравнительные ресурсные испытания стрелчатых лап проводили на культиваторах КПС-4, агрегатированных с тракторами Т-150К [23, 33, 34, 62, 64, 66, 108, 307–310]. Сравнимые показатели были обеспечены чередованием опытных вари-

антов восстановленных стрелчатых лап с лапами, восстановленными по существующей технологии [67]. Схема расстановки рабочих органов представлена на рисунках 3.17–3.19. Вышедшие из строя лапы, восстановленные по предлагаемым технологиям, заменяли серийными лапами, и дальнейшего наблюдения за ними не производили.

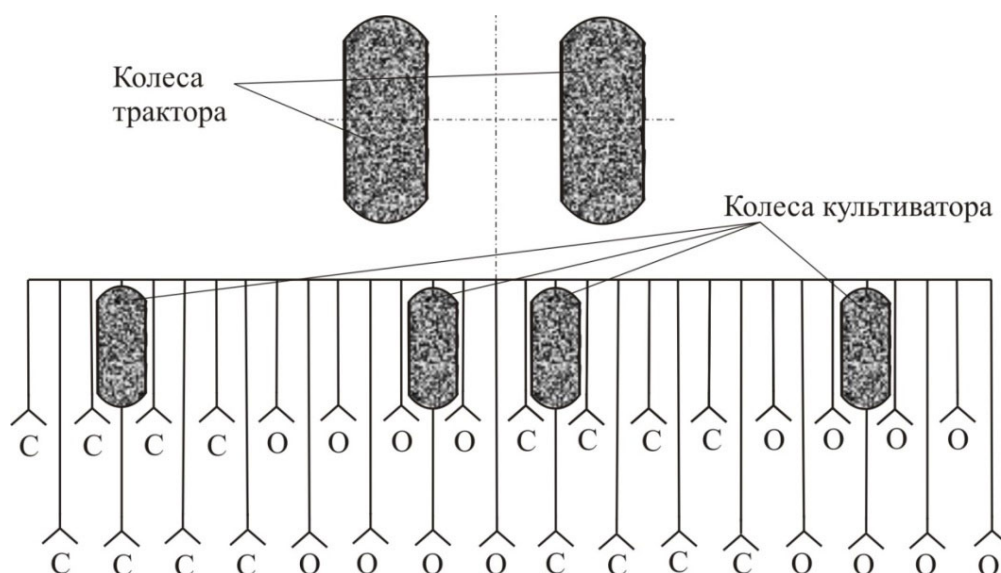


Рисунок 3.17– Схема расстановки рабочих органов на 2-культиваторном агрегате:
 О – рабочие органы, восстановленные по предлагаемым технологиям;
 С – рабочие органы, серийные (новые) или восстановленные по существующей технологии



Рисунок 3.18– Культиваторный агрегат из 2 КПС-4, укомплектованный рабочими органами по схеме (см. рисунок 3.17)



Рисунок 3.19 – Рабочие органы на агрегате из 2 культиваторов КПС-4, установленные по схеме (см. рисунок 3.17)

На рисунке 3.20 представлена 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.

Испытания рабочих органов (рисунки 3.21 и 3.22) проводили при культивации чистых паров, а также при обработке почвы под посев технических культур и яровых зерновых. Культиваторные агрегаты испытывали на полях, почвы которых были представлены либо черноземом обыкновенным, либо суглинком (средне- или тяжелосуглинистым). Диапазон значений показателей твердости и влажности почв на разных полях был достаточно широким: влажность почвы менялась от 15,3 до 35,4 %, а ее твердость – от 0,2 МПа в слое 0...5 см до 5 МПа в слое 10...15 см.

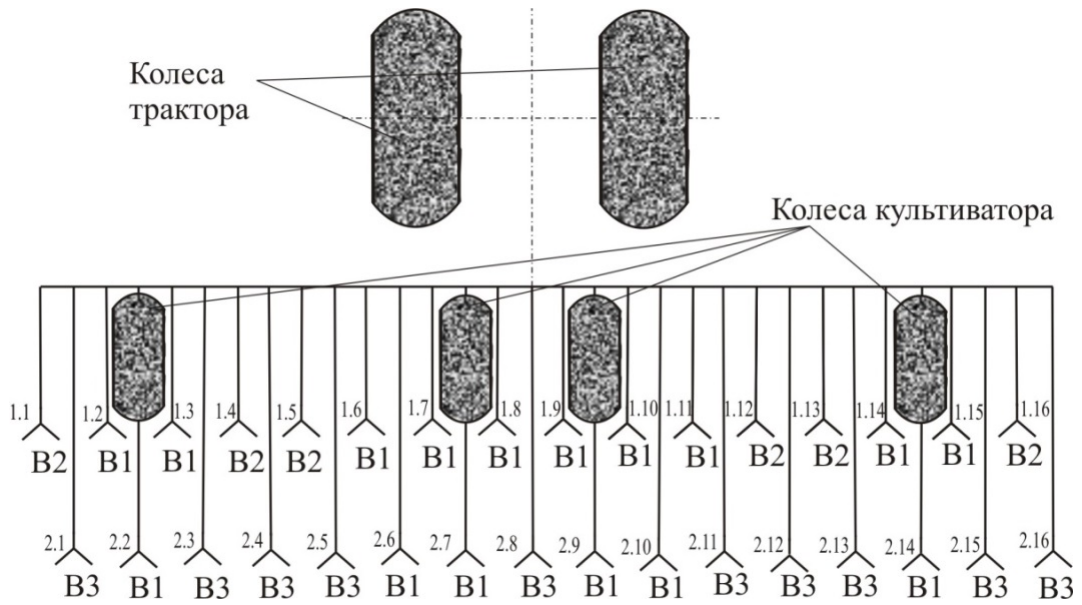


Рисунок 3.20 – Схема расстановки рабочих органов, восстановленных по предлагаемым технологиям, на 2-культиваторном агрегате:

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



Рисунок 3.21– Культиваторный агрегат из 2 КПС-4, укомплектованный рабочими органами по схеме (см. рисунок 3.20)



Рисунок 3.22 – Рабочие органы на агрегате из 2 культиваторов КПС-4, установленные по схеме (см. рисунок 3.20)

Техническая экспертиза (начальная) опытных и серийных лап включала в себя определение следующих конструктивных параметров (с точностью до $\pm 0,1$ мм): длины носка; ширины крыльев (в 4 точках с применением шаблона); ширины захвата лапы.

Критериями определения предельного состояния (ПС) были приняты (приложение А):

- износ носка (ПС 6);
- износ по ширине лапы (ПС 7);
- излом и изгиб крыльев лапы (ПС 1);
- износ лезвия по ширине (ПС 8);
- затупление лезвия (ПС 2);
- неравномерное изнашивание лезвия;
- износ лапы по толщине (ПС 9).

В процессе испытаний культиваторные лапы периодически (после обработки агрегатом 320 га) осматривали и оценивали их техническое состояние по установленным критериям ПС.

Техническую экспертизу проводили до наступления предельного состояния по одному или нескольким критериям последней из установленных исследуемых лап.

3.12 Обработка экспериментальных данных и оценка их точности

Для получения необходимой достоверности значений опытных параметров при проведении экспериментов обеспечивали условия, при которых были сведены к минимуму ошибки измерений значений параметров. При обработке и оценке точности результатов наблюдений использовали методы математической статистики.

При измерении соответствующих величин выбирали методы и приборы, обеспечивающие наибольшую точность. Тарировку и настройку приборов производили перед началом, в процессе и в конце опытов. Исследуемые параметры измеряли в установленной последовательности и в необходимом количестве. Своевременное выявление аномальных результатов исследуемых параметров и их исключение происходили за счет строгого контроля факторов, влияющих на условия экспериментов.

Обработку значений экспериментальных параметров и построение графиков и гистограмм осуществляли по средним величинам наименьших квадратов (приложение Г).

4 АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

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 настоящей работе при решении задач применены расчетный и экспериментальный подходы к изучению и разработке оптимального сочетания теоретических закономерностей и экспериментальных показателей. Данные, полученные в процессе теоретического исследования, обеспечивают возможность разработки новых технологий, позволяющих достичь рабочим органом нормативного ресурса и даже превысить его.

Как было установлено в ходе теоретических исследований, температурные режимы наплавки и время выдержки образца в печи-ванне оказывают решающее влияние на диффузионные процессы, происходящие в покрытии и в подложке, а также на их физико-механические свойства. В результате анализа наплавочным материалом был выбран самофлюсующийся хромоникелевый металлопорошок ПР-Н67Х18С5Р5. Недостаточность данных по наплавке самофлюсующихся хромоникелевых металлопорошков в жидком теплоносителе, представленных в технической литературе, обусловило необходимость исследования прочности сцепления, пористости и микротвердости покрытия, а также структуры зоны сплавления в зависимости от режима оплавления.

4.1 Результаты исследования процесса наплавки

Кинетика температуры расплава теплоносителя в печи-ванне

Анализ полученных измерений (рисунок 4.1) позволил установить, что распределение температурных порогов нагрева теплоносителя по объему расплава в печи-ванне неравномерно. В верхней части, ближе к зеркалу расплава и рядом с боковой стенкой (до 0,03 м) печи-ванны температура теплоносителя ниже на 150...200 °С. Объясняется это повышенным теплоотводом у водоохлаждаемых

стенок и теплоизлучением с ее зеркала. В связи с этим принято, что восстанавливаемые детали при наплавке предпочтительно размещать ближе к центру печи, в зону с максимальной температурой расплава. Это будет способствовать сокращению времени нагрева и повышению качества наплавки. Если же деталь расположить ближе установленных расстояний к зеркалу теплоносителя или к стенке, то достичь ею необходимой температуры будет невозможно. На этом основании была принята рабочая зона в печи-ванне, оптимальная в смысле обеспечения технологических режимов.

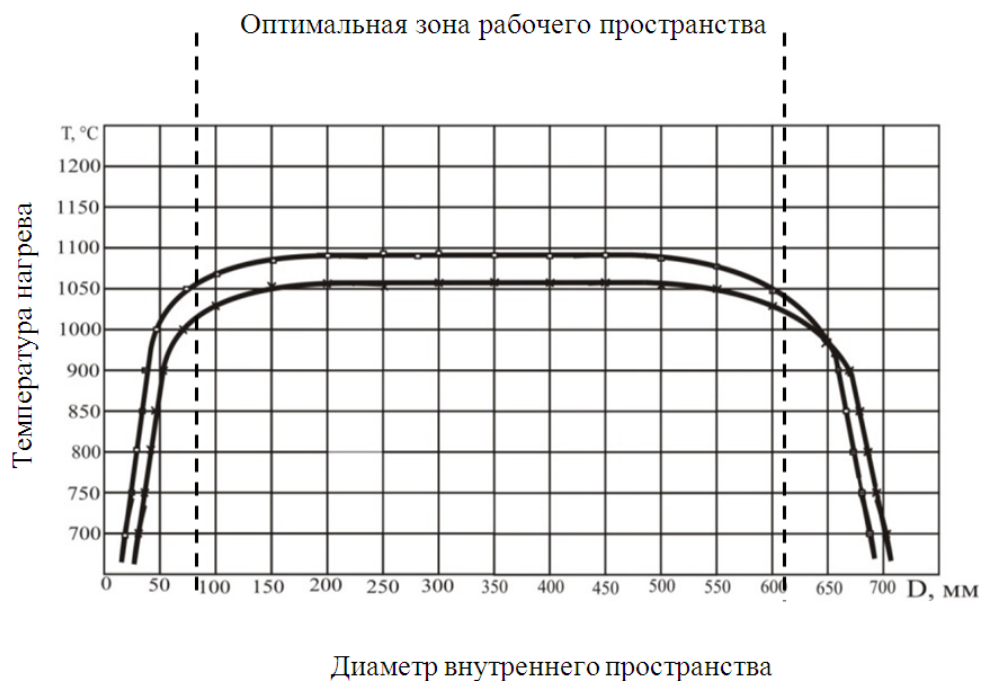


Рисунок 4.1—Распределение температуры в печи-ванне:
 ○ — теоретически определенные значения температуры;
 × — экспериментально определенные значения температуры

Температура плавления металлопорошка

Температура плавления металлопорошка является важным технологическим параметром. Установлены зоны солидуса и ликвидуса металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5 (рисунок 4.2), которые находятся в пределах 990...1000 °С и 1025...1035°С соответственно. Это позволяет назначать технологические режимы нагрева деталей при наплавке в расплаве теплоносителя.

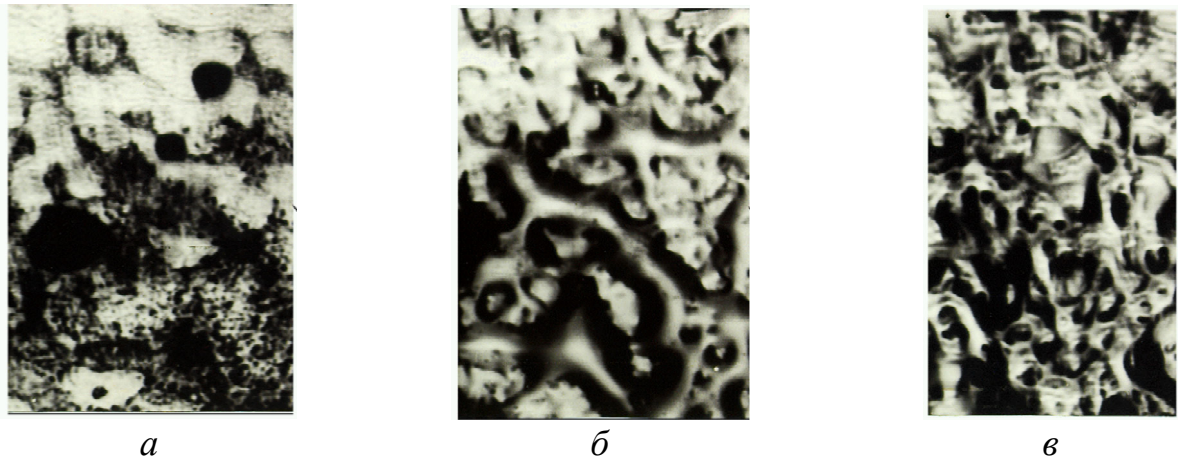


Рисунок 4.2 – Состояние плавящегося металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5:
 а – при температуре ликвидуса; б – между температурами солидуса
 и ликвидуса; в – при температуре солидуса

Нагрев детали для наплавки

При исследовании нагрева детали для наплавки выявлено, что изменение температуры в зоне сплавления, определенное экспериментально, отличается от расчетных значений в допустимых пределах 3–5 % (рисунок 4.3). Это обусловлено корректными допущениями при теоретическом исследовании и в первую очередь установление относительных значений коэффициента теплоотдачи, величина которого изменяется в широких пределах. Это свидетельствует о высокой схожести результатов, полученных с помощью предложенного расчетного метода, с экспериментальными показателями.

В экспериментальной зависимости $T = f(t)$ (см. рисунок 4.3) наблюдается участок с замедленной скоростью нагрева в интервале 990...1000 °С. Это, вероятно, связано с процессом образования жидкой фазы и осаждения покрытия. Участок, на котором рост возобновляется, соответствует ликвидусу. Полученные данные позволяют обосновать оптимальное время нагрева наплавленного слоя до необходимой температуры в зависимости от размера образца, толщины слоя металлопорошка и теплофизических свойств материала, а также определить степень оптимального температурного использования рабочего пространства печи-ванны. Знание этих параметров может быть использовано при проектировании технологических процессов наплавки и термообработки деталей в жидких теплоносителях.

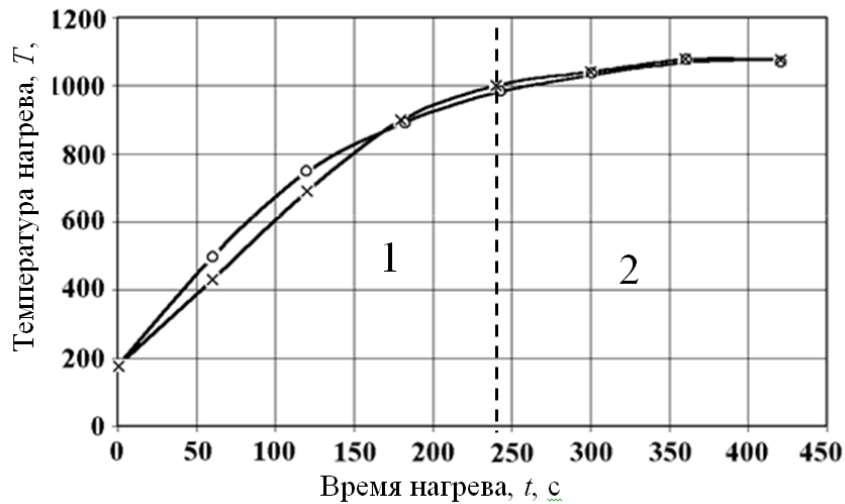


Рисунок 4.3 – Время нагрева в расплаве теплоносителя: x – теоретическое изменение температуры; o – экспериментальное изменение температуры

Определение деформации наплавляемой детали

Особое внимание было уделено определению величины деформации наплавляемой детали. Она оказалась незначительной – около 40...50 мкм. Такая величина деформации не окажет влияния на работоспособность восстанавливаемых деталей, поскольку не превышает допуск на размеры новой детали (100 мкм).

4.2 Влияние режимов наплавки на структуру покрытия и подложки

Структура материала во многом определяет его физико-механические и служебные свойства. Покрытия, полученные из хромоникелевого порошкового сплава ПР-Н67Х18С5Р5, нанесенные на стальную подложку (сталь 30) наплавкой в жидком теплоносителе, представляют собой твердый раствор на основе никеля сложной эвтектики и первичных кристаллов (рисунок 4.4).

Микротвердость твердого раствора ниже (3,0...3,75 ГПа), чем эвтектики (6,5...8,6 ГПа). Первичные кристаллы обладают большей микротвердостью. Кристаллы в форме тетраэдра представляют собой карбиды хрома, а ромбические – бориды хрома [117, 118, 139, 145, 152, 157, 171, 173, 178, 184, 284–286, 289]. Предположительно, во внутреннем кристаллическом строении присутствуют сложные соединения – карбобориды.

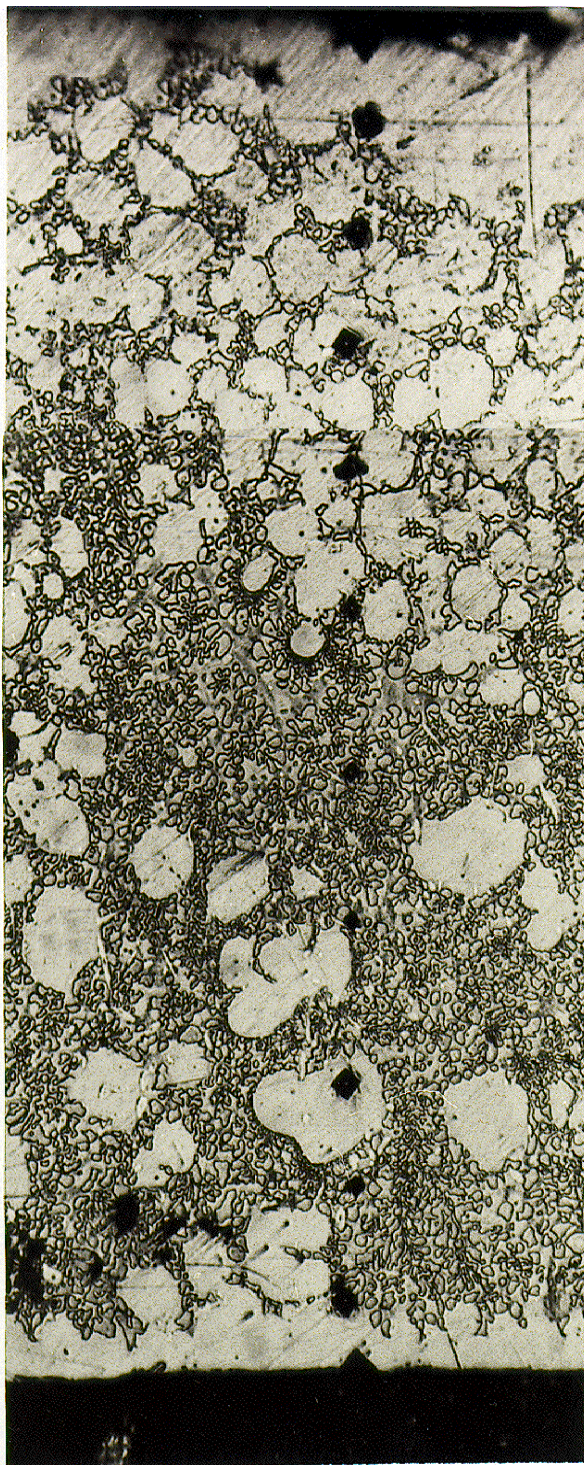


Рисунок 4.4 – Структура слоя, наплавленного металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5 ($\times 200$)

Подложка, зона сплавления и собственно наплавленный слой имеют достаточно сложное строение: зона белого цвета (см. рисунок 4.4), непосредственно прилегающая к подложке, представляет собой твердый раствор на основе никеля; выше в покрытии расположена прослойка, в которой сосредоточены зерна карби-

дов, боридов и карбоборидов ($H_{\mu} = 16,5 \dots 18,6$ ГПа). Со стороны основного металла наблюдается феррито-перлитная зона ($H_{\mu} = 2,0 \dots 3,4$ ГПа).

Металлографическими исследованиями установлено, что структура вышеуказанных покрытий характеризуется высокой степенью дисперсности и однородности распределения карбидных и боридных составляющих (Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , $Cr_{23}C_3$, $Cr_{23}C_6$, Ni_3B , Ni_2B , CrB , Cr_2B) по всему объему. Это обеспечивает высокие прочностные и эксплуатационные свойства наплавляемого покрытия восстанавливаемой детали.

Прослойка, прилегающая непосредственно к подложке (рисунок 4.5), полностью повторяет микрорельеф детали, а характер изменения ее ширины связан с технологическими параметрами наплавки. Максимум ее величины (80 мкм) наблюдается при температуре 1030 °С и времени выдержки 180 с. Это связано, видимо, с двухстадийностью процесса: сначала происходит выплавка легкоплавкой эвтектики на основе никеля из покрытия, а затем осаждение более тугоплавких включений и, соответственно, уменьшение ширины данной прослойки, что способствует получению более равномерной структуры. При этом наблюдаются взаимодиффузия и образование интерметаллидов [152, 171, 216, 259, 261, 272], что обеспечивает повышение прочности сцепления наплавленного слоя с основой.

При изучении строения зоны сплавления и покрытия отмечено наличие пор (рисунок 4.6), причем их величина и распределение зависят от режимов наплавки и состава суспензии (рисунок 4.7). С увеличением температуры и времени выдержки наблюдается неуклонное снижение пористости, так как при этом происходят более качественное осаждение покрытия (заполнение пустот) и вытеснение неметаллических включений на поверхность. Ввиду того, что в состав суспензии входит до 6 % метасиликата натрия, его влияние на адгезию и химический состав наплавленного слоя достаточно существенно. Установлена нижняя нестабильная граница с содержанием метасиликата натрия 2,5 %, что не обеспечивает целостность слоя в начальный момент времени наплавки. В результате этого образуются раковины и неравномерность покрытия.

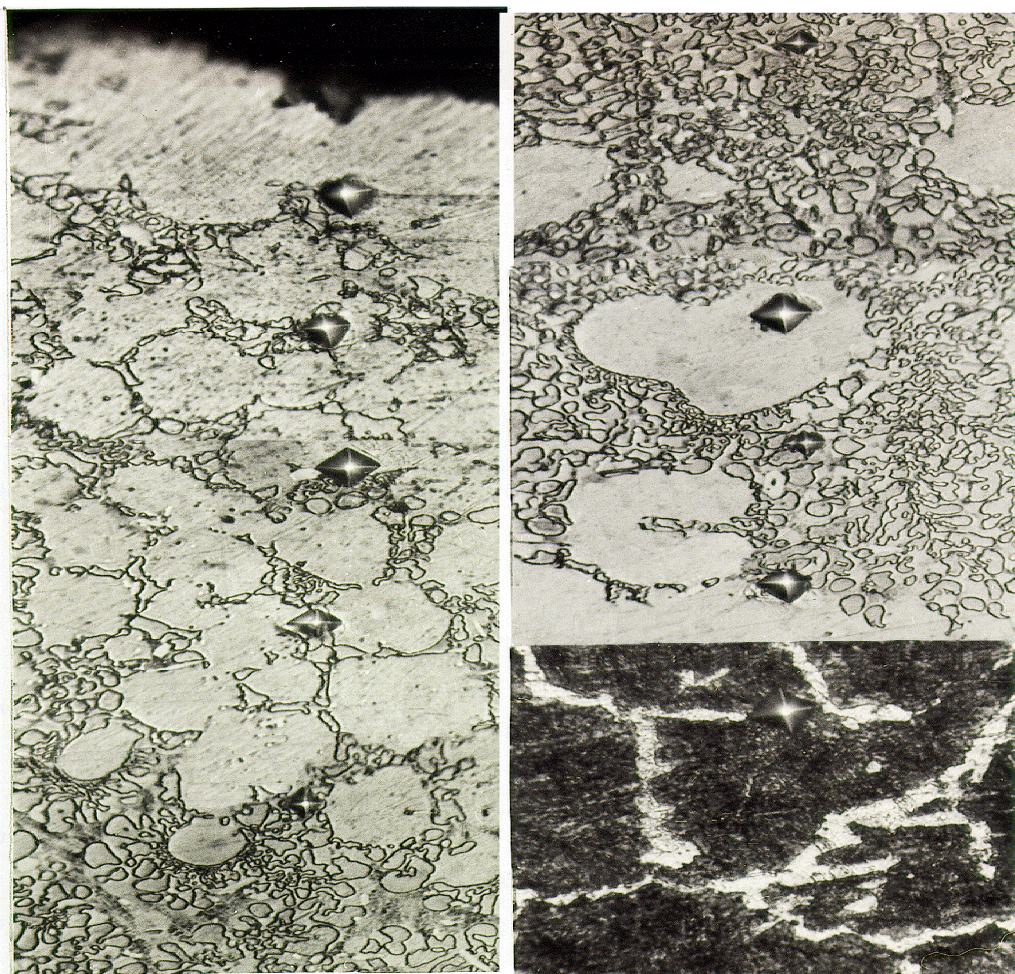
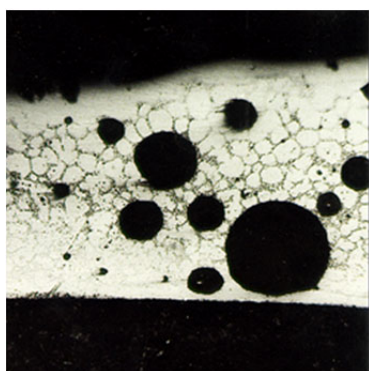
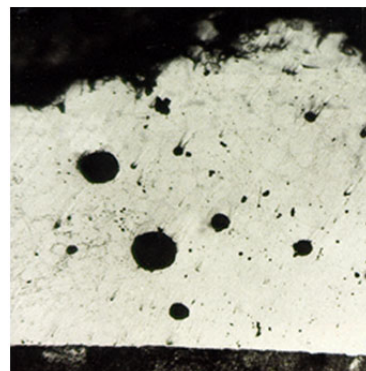


Рисунок 4.5 – Структура слоя, наплавленного
металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5 ($\times 400$)

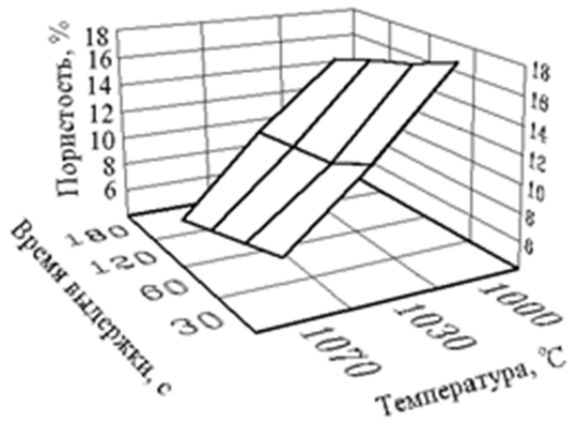


a

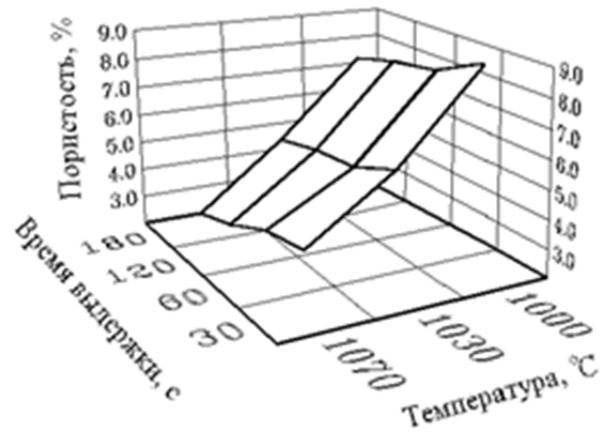


б

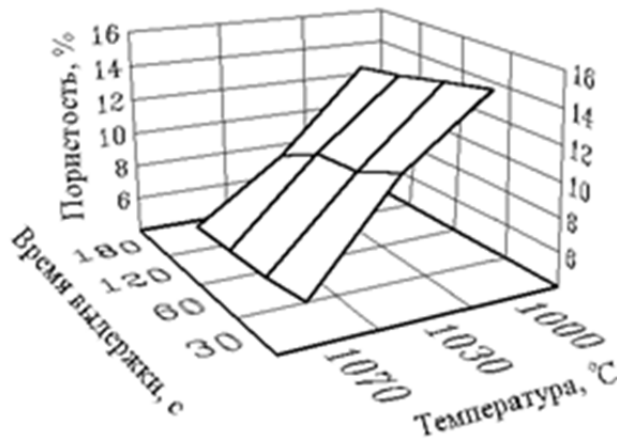
Рисунок 4.6 – Пористость в наплавленном слое: *a* – 17 %; *б* – 7 %



а



б



в

Рисунок 4.7– Исследование пористости покрытия при содержании связующего метасиликата натрия, %: а – 2,5; б – 5; в – 7,5

Верхнее 7,5 % и среднее 5,0 % значения содержания количества связующего метасиликата натрия обеспечивают удовлетворительную адгезию. Более низкая пористость получается при 5%-м содержании метасиликата натрия в суспензии при прочих равных условиях. Здесь существенную роль играет то, что метасиликат является гидратом, следовательно, при 7%-й его концентрации молекул воды больше, чем при 5%-й. Выделяющийся при воздействии высокой температуры водяной пар нерастворим в никеле, он стремится на поверхность, но часть остается в слое, что и увеличивает пористость [152, 171, 216, 259, 261, 272].

Оптимальные значения технологических параметров наплавки определяли из условия получения более низкой пористости, но с учетом процессов диффузии и образования интерметаллидов.

4.3 Исследование взаимодиффузии компонентов подложки и покрытия

Процесс взаимодействия твердой металлической фазы (подложки) с жидкой фазой, образующейся при наплавке покрытия, сопровождается гетерогенной диффузией в зоне сплавления. Интенсивность протекания этого процесса обусловлена температурой расплава и временем выдержки детали в нем, градиентом концентрации и диффузионной подвижностью атомов [261, 272, 277–281].

Диффузионные процессы на границе раздела твердой и жидкой фаз происходят с некоторым замедлением, так называемым временем ретардации [117, 137–139, 141, 148, 152, 157, 171, 175, 184]. Непосредственно в процессе наплавки время контактирования этих фаз существенно больше, чем время ретардации процессов гетеродиффузии. Анализ литературы показал, что диффузия железа в покрытие может достигать 10 % [118, 120, 284].

При наплавке в жидких теплоносителях диффузия железа в покрытие протекает в три этапа: в пористый нагреваемый слой до момента расплавления, в расплавленный слой при выдержке и в твердый слой при охлаждении.

В связи с быстрым изменением температуры, агрегатного состояния покрытия, его пористости и малым временем выдержки при заданной температуре имеет место нестационарная задача. Ее решение с учетом указанных факторов представляет затруднения. Рассматриваемая схема справедлива, когда концентрация диффундирующего компонента на значительном удалении от плоскости раздела в процессе опыта остается практически равной исходной концентрации, а коэффициент диффузии не зависит от концентрации. Это объясняется специфическими условиями диффузии при наплавке. Так как поток тепла в образец поступает через внешнюю поверхность слоя, то температура вблизи нее и коэффициент диффузии должны быть выше, чем у границы сплавления. Кроме того, в процессе наплавки резко увеличивается подвижность атомов поверхностных слоев жидкой фазы, что также способствует увеличению коэффициента диффузии.

Рассматривая концентрационную кривую распределения железа в переходной зоне (рисунок 4.8, *а*), можно убедиться, что его содержание в наплавленном металле не более 6 %, что незначительно превышает исходное количество. Это происходит из-за диффузии атомов железа при высокой температуре в наплавляемый слой. Наличие такого количества железа в наплавленном слое не снижает прочностных и эксплуатационных свойств наплавленного покрытия восстанавливаемой детали [118, 120, 284].

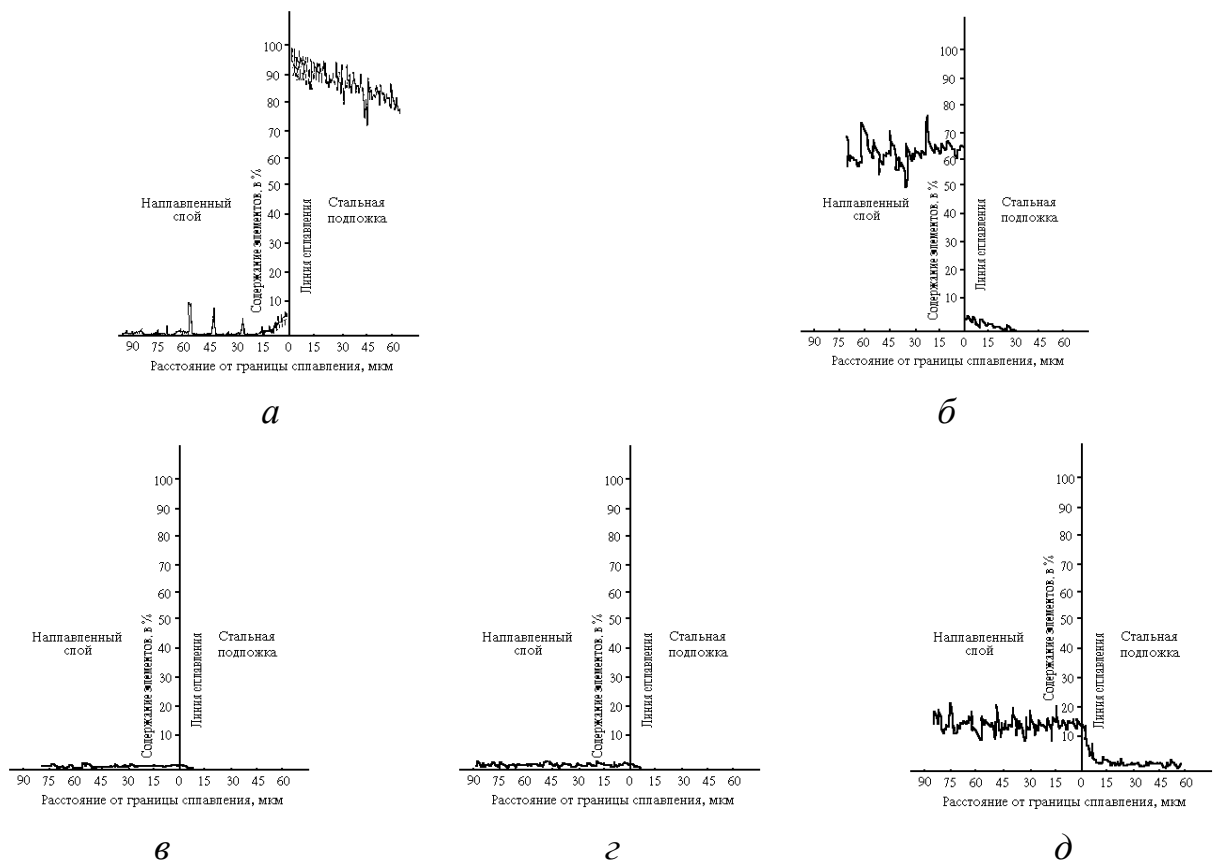


Рисунок 4.8 – Распределение элементов в переходной зоне:
а – железа; б – никеля; в – кремния; г – бора; д – хрома

Распределение никеля, перпендикулярное границе сплавления (рисунок 4.8, *б*), показывает резкий спад при переходе к основному металлу. Короткий «хвост» и его форма, обусловленные только размерами электронного зонда, дают основание утверждать, что зона диффузии никеля не превышает 0,4 мкм при температуре 1030 °С и времени выдержки 60 с. Это происходит из-за диффузии атомов никеля при высокой температуре в основной металл. Наличие такого количества никеля в

переходной зоне металла основы не снижает прочности сцепления наплавленного покрытия с металлом основы [120, 284].

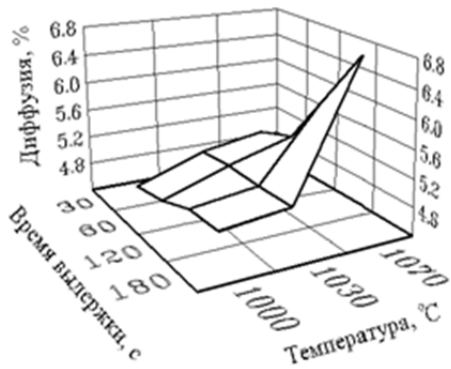
Анализ распределения кремния и бора (рисунок 4.8, *в* и *з*) показывает, что также наблюдается незначительная диффузия этих элементов в материал основы. Наличие такого количества кремния и бора в переходной зоне металла основы также не снижает прочности сцепления наплавленного покрытия с металлом основы [137–139, 141, 152, 157, 171, 175, 184].

Распределение хрома (рисунок 4.8, *д*) свидетельствует о более значительной его диффузии в материал основы. Атомы хрома обладают легирующим действием на стальную подложку, что не снижает прочности сцепления наплавленного покрытия с металлом основы [139, 152, 157, 171, 175, 184].

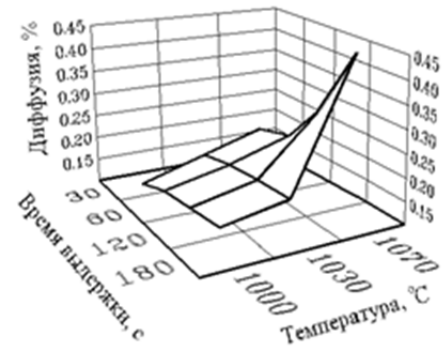
Основное влияние на распределение элементов оказывают режимы наплавки (рисунок 4.9).

Повышение интенсивности процессов взаимодиффузии с увеличением температуры и времени выдержки, по-видимому, связано с возрастанием длительности термической активации, что ведет к обеднению наплавленного слоя [117, 139, 141, 148, 152, 157, 171, 175, 184]. При повышении температуры наплавки до 1070 °С и времени выдержки до 180 с имел место рост взаимодиффузии, что значительно изменяло химический состав наплавляемого покрытия и металла основы. При этом образование стабильной металлической связи наплавленного слоя с подложкой наблюдалось при температуре 1030 °С и времени выдержки 60 с, а взаимодиффузия атомов компонентов практически не меняла химический состав наплавляемого покрытия и металла основы.

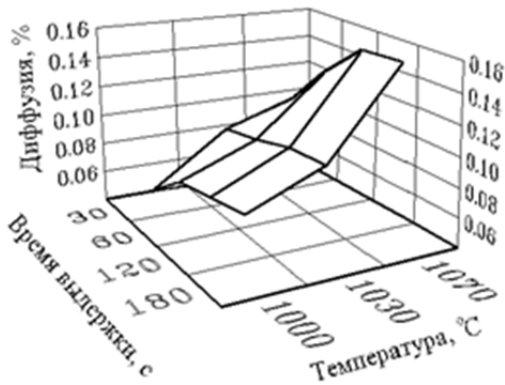
Рентгеноспектральный фазовый анализ показал, что бор и углерод образуют в наплавляемом покрытии следующие соединения: карбиды хрома – Cr_3C_2 , Cr_7C_3 , Cr_{23}C_3 , Cr_{23}C_6 ; бориды никеля и хрома – Ni_3B , Ni_2B , CrB , Cr_2B и твердый раствор кремния в никеле. Это повышает прочностные и эксплуатационные свойства наплавленного покрытия.



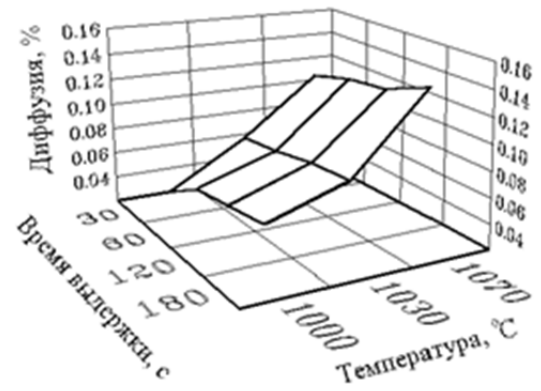
а



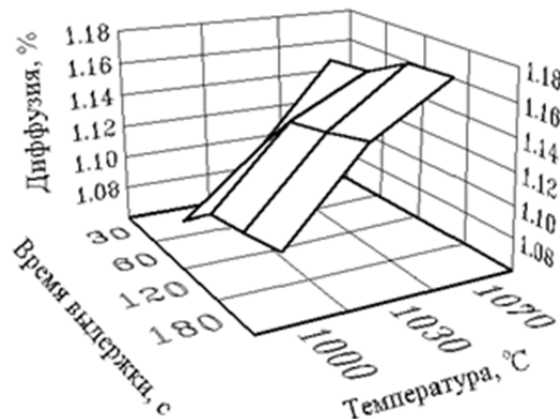
б



в



г



д

Рисунок 4.9 – Влияние режимов наплавки на диффузию элементов при содержании связующего 5 %: а – железа в покрытие; б, в, г, д – соответственно никеля, кремния, бора и хрома в подложку

4.4 Прочность сцепления покрытия

Результаты исследования влияния режимов наплавки на прочность сцепления позволяют сделать вывод о том, что максимальной величины (350 МПа) прочность сцепления достигает при температуре 1030 °С, времени выдержки 60 с и концентрации связующего 5 % (рисунок 4.10).

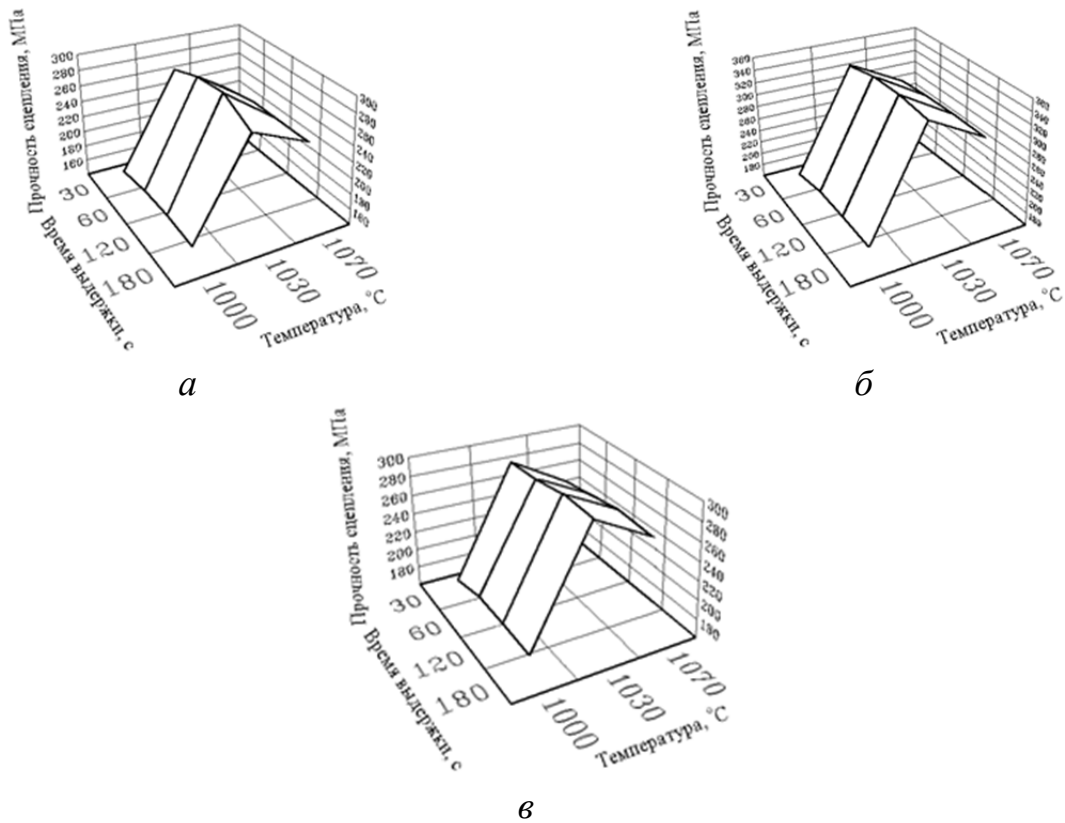


Рисунок 4.10 – Прочность сцепления при содержании связующего, %: а – 2,5; б – 5; в – 7,5

Уменьшение времени выдержки и температуры, как было показано (см. п. 4.2), приводит к увеличению пористости и, как следствие, к снижению прочности сцепления. Увеличение указанных параметров способствует взаимодиффузии (см. п. 4.3), что также снижает прочностные характеристики покрытия [118, 122, 131, 132, 134–136, 141, 177, 178].

Разрушение образцов происходило по линии сплавления основного металла и наплавленного слоя (рисунок 4.11, б) при температуре 990 °С и времени вы-

держки 30...180 с; по основному металлу (рисунок 4.11, *a*) – при 1070 °С и 30...180 с соответственно; по наплавленному слою (рисунок 4.11, *в*) – во всех остальных случаях.

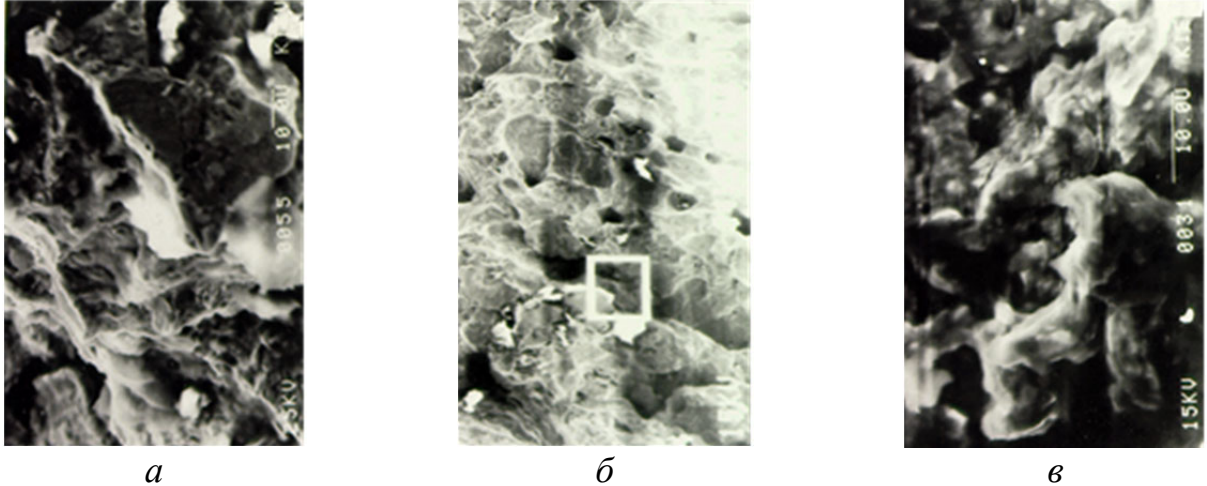


Рисунок 4.11 – Фрактограмма разрушения: *a* – по основному металлу; *б* – по зоне сплавления; *в* – по плакирующему металлу

4.5 Обоснование механизм процесса электролизного борирования

Механизм образования активных атомов бора на поверхности катода (детали) в процессе электролизного борирования основывается на том, что при достижении значения электрического потенциала $E_2 = 1,57$ В первыми на катоде начинают разряжаться ионы бора (рисунок 4.12). Увеличение разности потенциалов приводит к росту их количества (участок 1 на рисунке 4.12). При этом установлено, что чем больше угол наклона к оси абсцисс, тем интенсивнее протекает электродный процесс. Следовательно, на участке графика, соответствующим плотности тока 0,26...0,32 А/см², скорость этого процесса будет максимальной с учетом того, что увеличение скорости конвекции с 0,1 до 0,26 м/с приводит к увеличению диффузионного потока катионов бора в 1,6 раза. При этом возрастает предельная катодная плотность тока с 0,27 до 0,32 А/см², позволяющая гарантированно использовать ее большие значения.

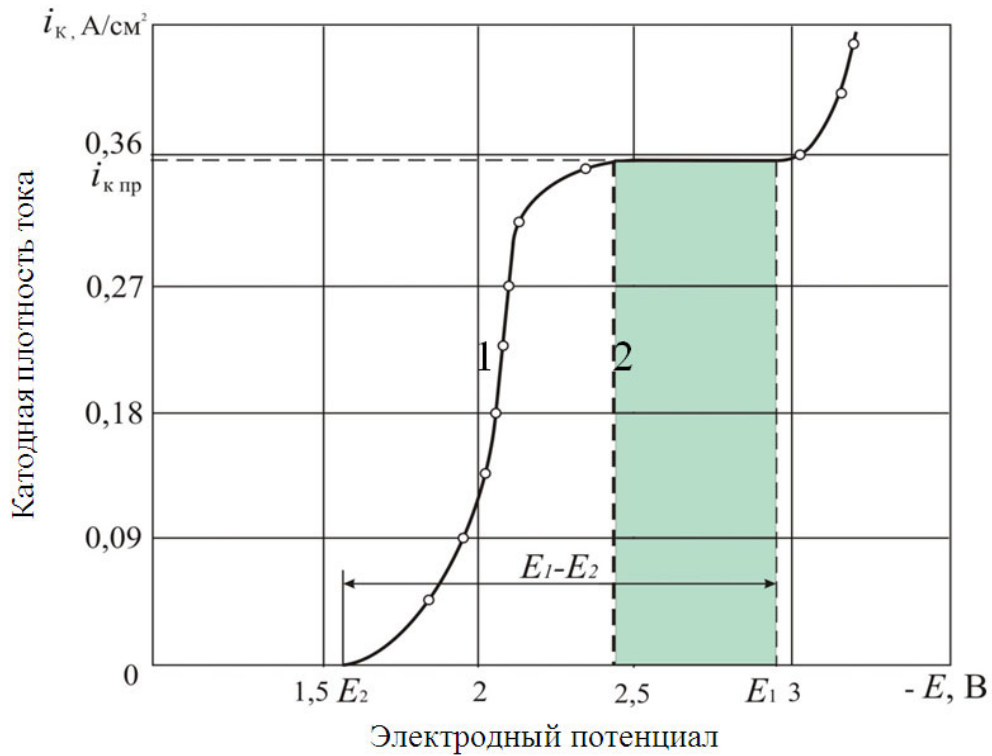


Рисунок 4.12 – Катодная поляризация натрия и бора

Обеднение катионами бора прикатодного слоя происходит из-за их низкой подвижности [219, 227–229, 241]. Интенсификация конвективного движения расплава электролита увеличивает диффузионный поток катионов бора, что значительно превосходит снижение их концентрации из-за низкой подвижности и с избытком компенсирует обеднение диффузионного слоя.

Создается равновесие количества разряжающихся катионов бора и восстанавливаемых их атомов, соответствующее напряжению 2,37 В и предельной плотности тока насыщения $0,34 A/cm^2$, которое при сопоставлении с теоретическим значением (см. п. 2.1) находится в пределах 5%-й ошибки. Рост катодной плотности тока приводит к возрастанию скорости реакции, но создается нехватка ионов в прикатодной зоне слоя из-за низкой скорости диффузии. Поэтому при высокой плотности тока на кинетику этого процесса значительно влияет скорость диффузии, а увеличение потенциала катода не приводит к последующей интенсификации процесса восстановления катионов бора в активные атомы.

При достижении напряжения $E_2 = 2,89$ В происходит разложение оксида натрия по реакции (2.27). Образующиеся при этом ионы натрия восстанавливаются до атомов. При температуре электролиза натрий переходит в газообразное состояние [258] и под действием выталкивающей силы оказывается в приповерхностном слое расплава. Часть атомов натрия может удерживаться около катода, постепенно взаимодействуя с расплавом, что способствует образованию некоторого дополнительного количества атомов активного бора. При приближении катодной плотности тока к предельным значениям для выделения бора (около $0,32$ А/см²) на поверхности детали начинает выделяться метаборат натрия, что снижает количество восстанавливающихся активных атомов бора. Подтверждением процесса выделения метабората натрия служит образование желто-белого налета на катоде. Это сопоставимо с результатами расчетов значения предельной плотности тока (п. 2.5). Предположительно, толщина осадка метабората натрия, препятствующего движению диффузанта к катоду, с приближением катодной плотности тока к предельному значению увеличивается, что замедляет движение катионов бора к поверхности катода и в пределе диффузия бора к поверхности катода прекращается. В результате получение борированного слоя толщиной $0,25...0,30$ мм становится невозможным.

Сопоставление экспериментально полученных значений электродвижущей силы поляризации ионов бора и натрия (см. рисунок 4.12) с термодинамически рассчитанными их значениями (см. п. 2.2) позволяет утверждать, что стабильное создание диффузионного слоя при электролизе этого расплава электролита происходит в соответствии с реакциями (2.25) и (2.28). Такой режим электролиза (участок 2 на рисунке 4.12) становится стационарным [186, 245, 265]. При этом зависимость электродного потенциала от катодной плотности тока является значимой технологической характеристикой этого процесса.

Проведенные расчеты, анализ данных технической литературы [177, 217, 219, 227–229, 234, 241, 243, 256, 266, 282] и предварительные экспериментальные

исследования позволяют утверждать, что оптимальными параметрами технологического процесса электролизного борирования стальных образцов являются:

- рабочая температура процесса насыщения – 930 °С;
- катодная плотность тока – 0,20 А/см²;
- время проведения процесса электролизного насыщения – 1,7 ч
- скорость движения расплава электролита 0,26 м/с.

4.6 Результат исследования микроструктуры борированного слоя

Согласно литературным источникам [177, 217, 219, 227–229, 234, 241, 243, 256, 266, 282], моноборид железа, борид дижелеза, а также переходная зона образуют борированный слой. Переходная зона в этом слое превышает суммарную толщину моноборида железа и борида дижелеза.

Диаграмма состояния системы «железо – бор» и теория формирования многофазного диффузионного слоя объясняют процесс получения этого слоя [216, 227, 228, 259].

Сначала происходит диффузия активного атомарного бора в α - или γ -фазу железа до полного ее насыщения. После достижения этого состояния на поверхности начинается образование (в соответствии с диаграммой состояния) следующей стабильной и термодинамически наиболее вероятной при данной температуре фазы борида дижелеза. Продолжающаяся диффузия бора вызывает перестройку тетрагональной решетки борида дижелеза в ромбическую решетку моноборида железа. Таким образом, борированный слой изменяется в направлении от поверхности вглубь детали. При этом он состоит из следующих структурных компонентов: моноборида железа; борида дижелеза и твердого раствора бора в альфа-железе.

На этом основании принято, что бориды представляют собой также твердые растворы химических соединений, иначе невозможно объяснить образование боридных фаз [216, 227, 228, 259].

Одновременно с процессом диффузии бора в сталь нарушается равномерное распределение углерода в поверхностных слоях, происходит обезуглероживание

зоны боридов и перемещение углерода в переходную зону. Карбид бора при этом не образуется, так как бор не является карбидообразующим химическим элементом. Возникающая зона α -фазы обладает малой растворимостью углерода [216, 227, 228, 259], поэтому он оттесняется растущей зоной α -фазы ближе к сердцевине. Максимальная концентрация углерода в переходной зоне в 1,5–2,0 раза превышает его среднее содержание в стали, при этом характер распределения зависит от количества этого элемента в стали и строения борированного слоя. Направленность и интенсивность перемещения атомов углерода обусловлены их сродством с бором и образующимися при этом фазами моноборида железа и борида дижелеза.

Проведенные в настоящей работе исследования согласуются с положениями о формировании боридного слоя. Диффузионный слой состоит из переплетающихся столбчатых кристаллов разного оттенка, более темные из них находятся у самой поверхности (рисунок 4.13).

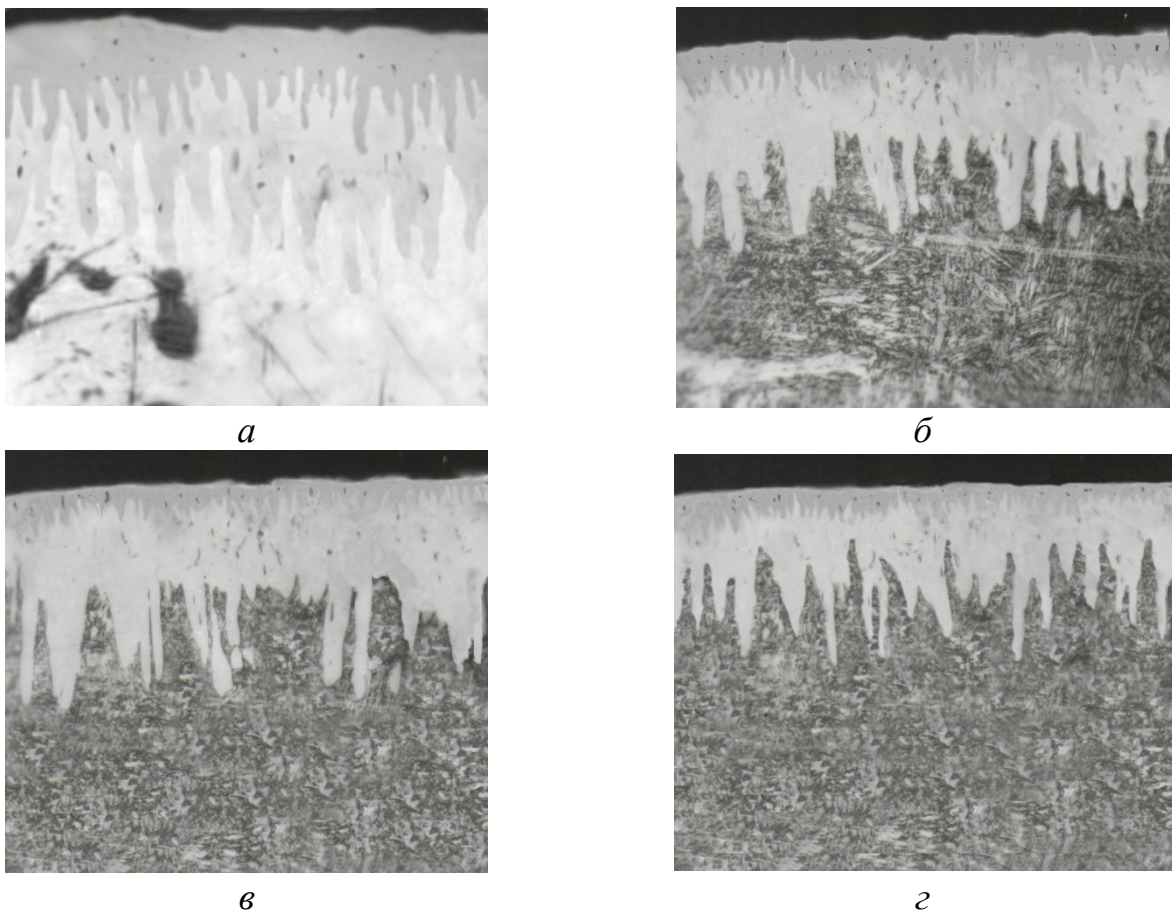


Рисунок 4.13 – Микроструктура зоны боридного слоя при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с ($\times 500$): а – сталь Ст3; б – сталь 20; в – сталь 30; з – сталь 45

Исследования показали, что поверхностная зона, имеющая более темный оттенок, представляет собой моноборид железа, а зона более светлого оттенка – борид дижелеза. 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, и ее величина зависит от количества углерода в стали.

4.7 Результаты исследования микротвердости борированного слоя

Существенными свойствами, определяющими целесообразность применения борирования для упрочнения деталей, работающих в тяжелых условиях абразивного изнашивания, являются высокая поверхностная твердость и прочность таких слоев, которые обусловлены микротвердостью боридов железа. В данном случае микротвердость следует характеризовать способностью кристаллической решетки в напряженно-деформированном состоянии противостоять упругопластической деформации при контактном сжатии.

Изменение микротвердости борированного слоя и, главным образом, поверхностной зоны связано с количеством образующегося моноборида железа, которое зависит от состава стали и режимов насыщения. Фаза моноборида железа обладает наибольшим значением микротвердости, равным 17,6...22,9 ГПа. Оптимальные значения микротвердости структурных составляющих зоны, состоящей преимущественно из борида дижелеза, – 12,6...19,6 ГПа [216, 227, 228, 259]. Увеличение содержания углерода в стали приводит к снижению микротвердости моноборида железа и практически не влияет на микротвердость борида дижелеза [216, 227, 228, 259].

Распределение микротвердости по толщине диффузионных слоев и переходной зоны, которые получены на различных сталях при скорости движения расплава электролита 0,1 и 0,26 м/с представлены на рисунке 4.14.

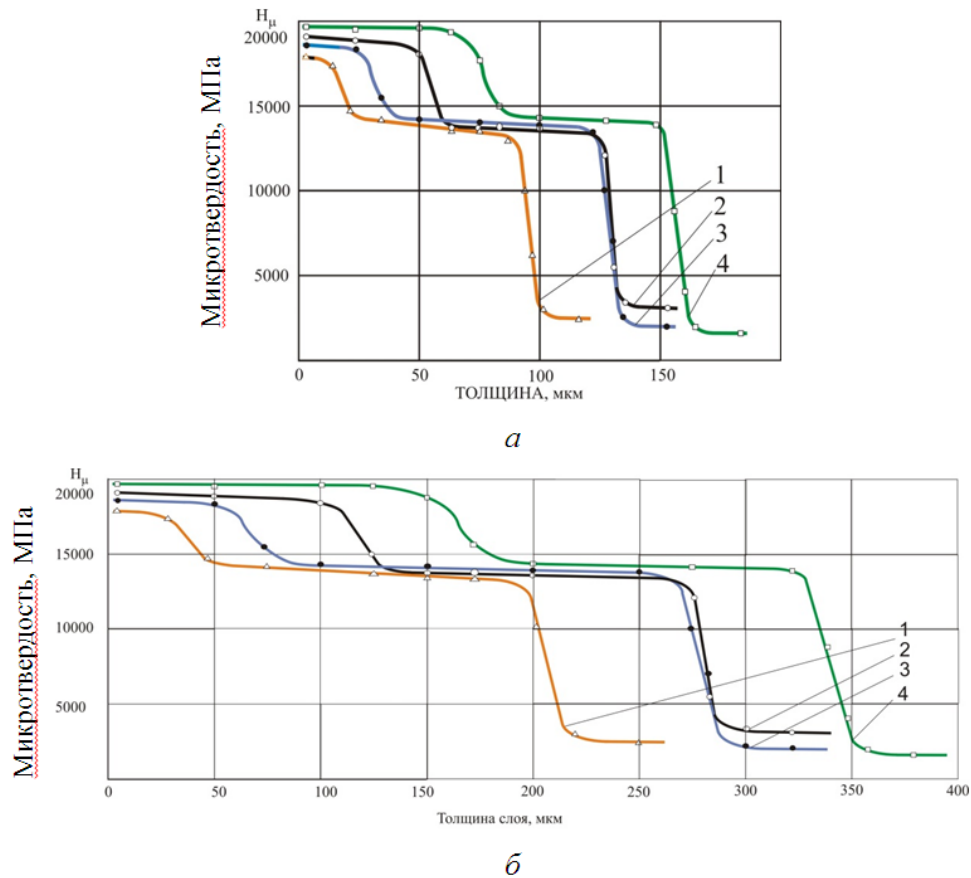


Рисунок 4.14 – Распределение микротвердости по толщине борированного слоя при скорости движения теплоносителя: *а* – 0,1 м/с; *б* – 0,26 м/с:
1 – сталь 45; 2 – сталь 20; 3 – сталь 30; 4 – сталь Ст3

Максимальной микротвердостью (около 19,7 ГПа) обладают боридные слои на Ст3, а наименьшей (17,1 ГПа) – на стали 45. При этом толщина боридного слоя увеличивается примерно в 2 раза.

Формирующийся боридный слой вытесняет углерод в переходную зону, где он заполняет вакансии в кристаллах железа, практически не растворяясь ни в монобориде железа, ни в бориде дижелеза [216, 227, 228, 259]. Следовательно, прямого воздействия углерода на микротвердость боридных фаз не будет, но его повышенное количество в переходной зоне создает там напряженно-деформированное состояние, которое будет оказывать влияние на напряженно-деформированное состояние в боридном слое. На этом основании предполагаем, что изменение поверхностной твердости упрочненного слоя связано с изменением величины и характера распределения остаточных напряжений [216, 227, 228, 259].

4.8 Результаты рентгенофазового анализа упрочненного слоя

Как было установлено ранее, основными микроструктурами диффузионного слоя борированных стальных деталей являются: моноборид железа, борид дижелеза и твердый раствор бора в α -железе. Переходная зона, содержащая углерод, оттесненный боридом, находится под диффузионным слоем [177, 217, 219, 227–229, 234, 241, 243, 256, 266, 282].

Проведенные исследования позволили установить, что в поверхностном слое находятся все перечисленные структурные составляющие, вне зависимости от режимов процесса насыщения, а также содержания углерода (приложение К).

Рентгенографические параметры, снятые с борированных образцов в процессе исследования, показали наличие таких основных фаз, как твердый раствор бора в α -железе, борид дижелеза, моноборид железа.

Максимальное содержание твердого раствора бора в α -железе в упрочненном слое не превышало 36 %, низкобористой фазы борид дижелеза – 63 %, а высокобористой фазы моноборид железа – 43 % (таблица 4.1). Содержание оксидов железа не превышало 2–3 % (приложение К).

Таблица 4.1 – Рентгенографические параметры фаз

| Фаза | Межплоскостное расстояние рефлекса $d_n, \text{Å}$ | Относительная интенсивность рефлекса J^p , отн. ед. | Координаты атомных плоскостей (индексы Миллера), hkl | Содержание фаз, % | Тип и характеристики кристаллической решетки |
|-------------------|--|---|--|-------------------|--|
| α -Fe | 2,01 1,428 1,66 1,010 | 100 15 38 10 | 100 200 211 220 | 30...36 | Кубическая объемноцентрическая ($Im\bar{3}m, z=2$) |
| Fe ₂ B | 2,56 2,12 2,01 1,63 | 15 25 100 18 | 200 002 121 202;130 | 57...63 | Тетрагональная объемноцентрическая ($I4/mmm, z=4$) |
| FeB | 3,26 2,74 2,38 2,19 1,90 1,81 1,60 1,30 | 60 80 80 100 100 80 80 60 | 40 020 101 021 210 121 211 140 | 37...43 | Орторомбическая примитивная ($Ptma, z=4$) |

На основании результатов статистической обработки экспериментальных данных составлены линейные модели (приложение Г), которые адекватно отражают результаты экспериментов.

Поверхности отклика, соответствующие линейным моделям, приведены на рисунке 4.15. Из них следует, что создания на поверхности образца упрочненного слоя, представляющего собой матрицу из борида дижелеза, содержащего 10–30 % включений моноборида железа, удалось достичь при насыщении образцов из сталей 30 и 45 (20 ± 3 % моноборида железа и 80 ± 3 % борида дижелеза).

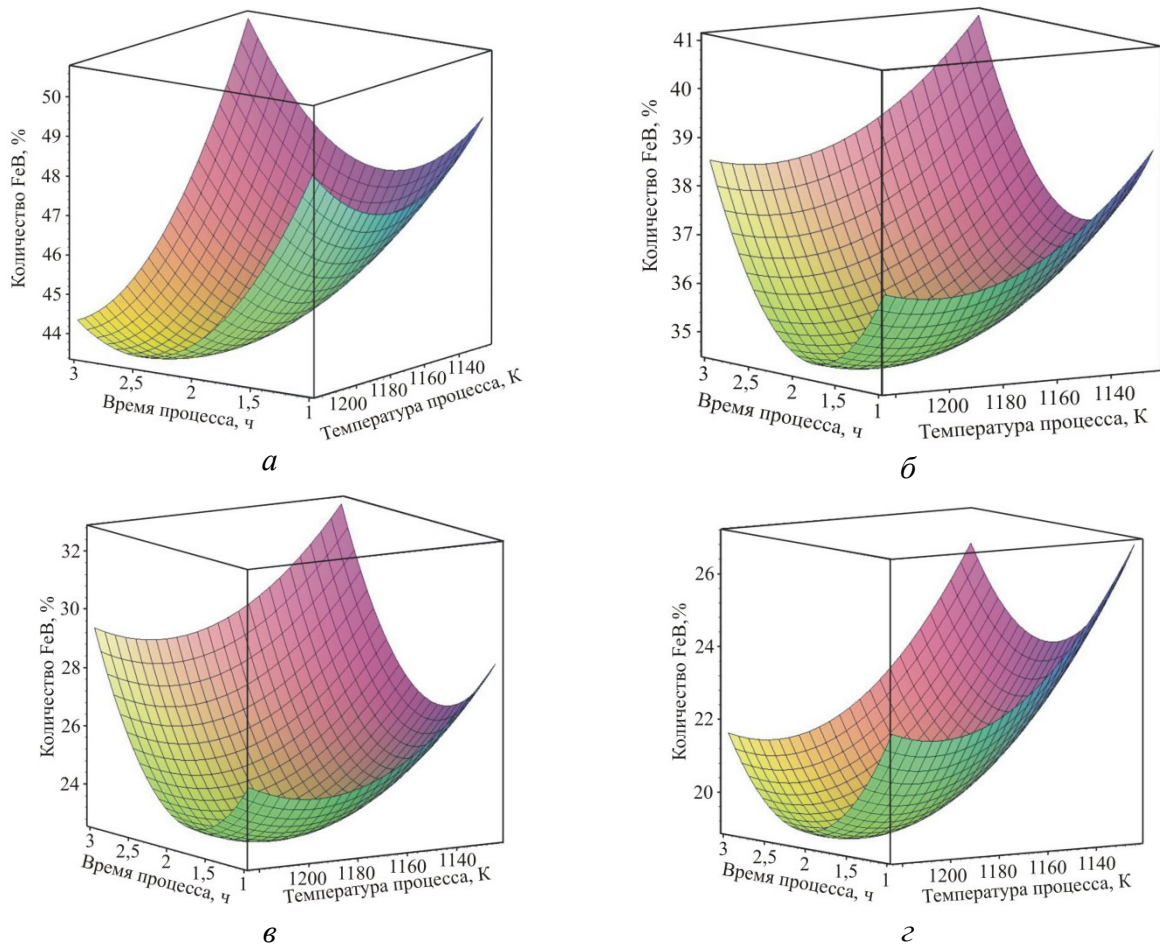


Рисунок 4.15 – Процентное содержание фазы FeB при электролизном борировании: *а* – сталь Ст3; *б* – сталь 20; *в* – сталь 30; *г* – сталь 45

При борировании образцов из сталей Ст3 и 20 указанного соотношения фаз достичь не удалось. Минимальное содержание фазы моноборида железа при этом составило 38 %. У стали 45 оптимальное соотношение фаз достигается при толщине боридной зоны менее 0,2 мм, но это не обеспечивает необходимой износостойкости. На стали 30 толщина боридного слоя составила 0,26...0,28 мм, что достаточно для обеспечения высокой износостойкости.

4.9 Результаты масс-спектрального анализа

Вторично-ионная масс-спектрометрия практически не оказывает влияния на образцы, так как вторичные ионы образуются путем передачи кинетической энергии первичных ионов поверхностным атомам, а не за счет разогрева (локального) поверхности образца.

В результате исследований установлено, что 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 (рисунки 4.16–4.19) (приложение Г).

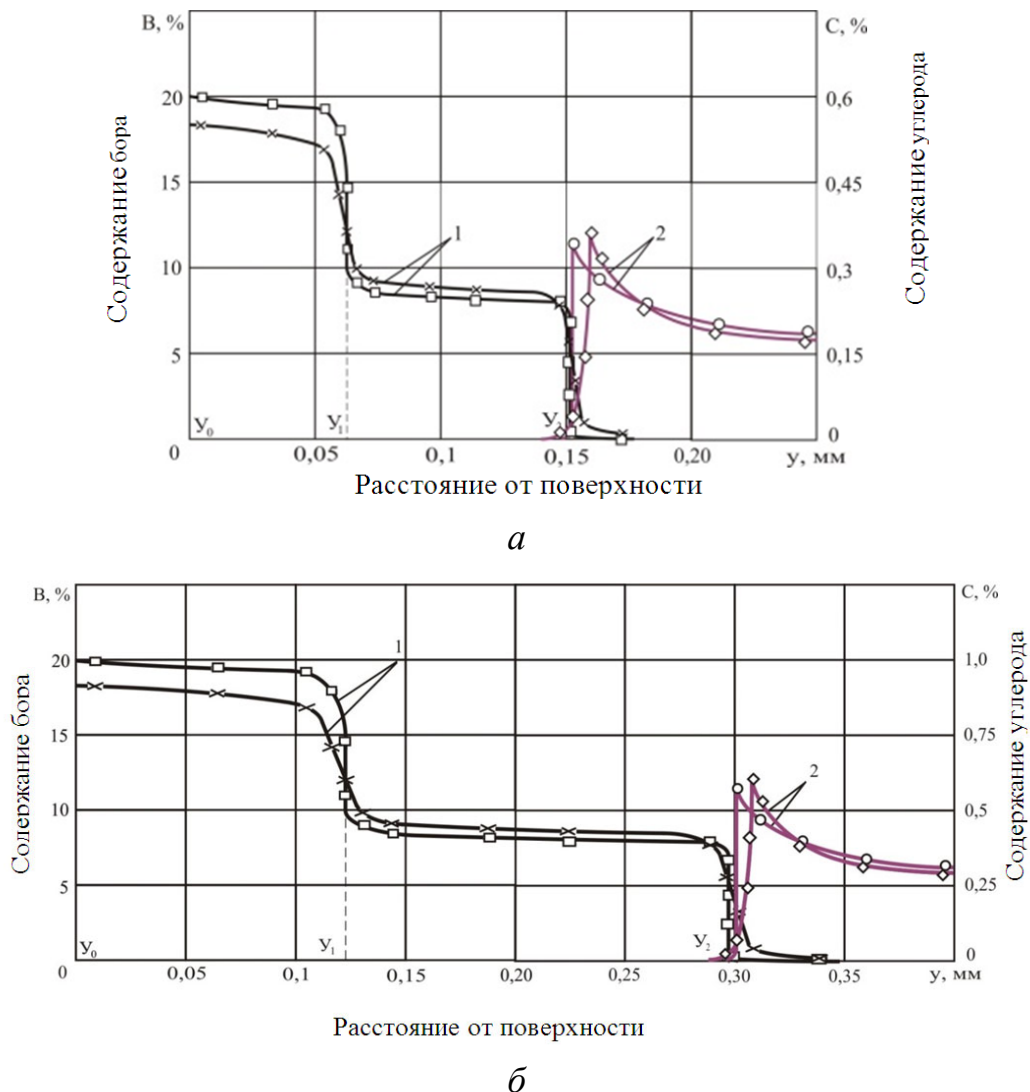
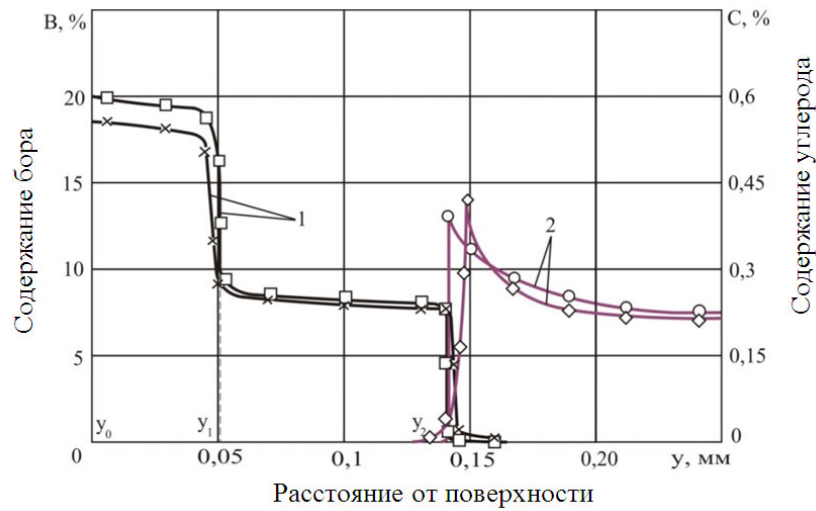
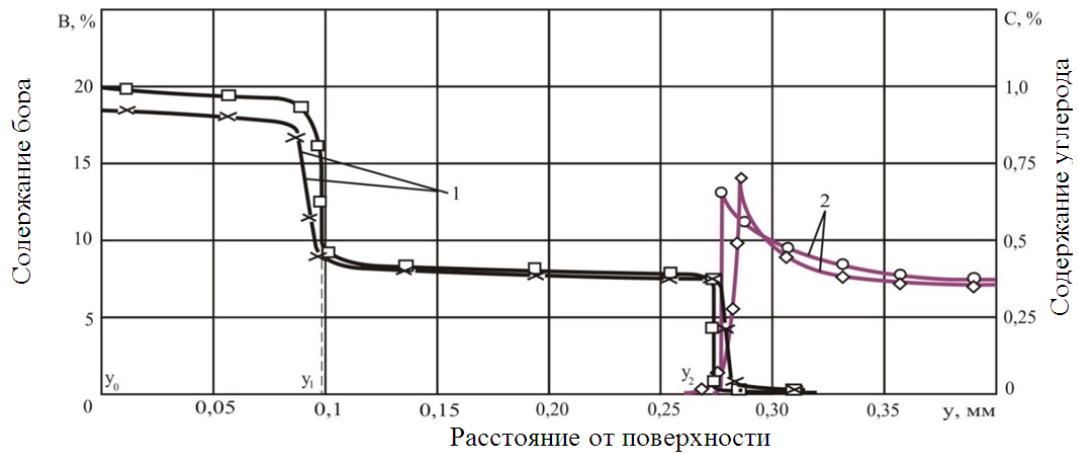


Рисунок 4.16 – Количество бора (1) и углерода (2) в Ст3 при скорости движения теплоносителя: *а* – 0,1 м/с; *б* – 0,26 м/с;
□, ○ – расчетное; ×, ◇ – экспериментальное



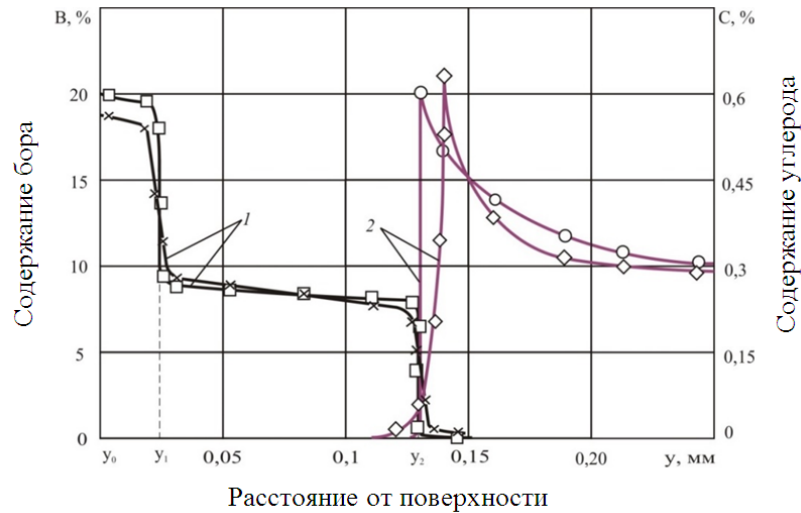
а



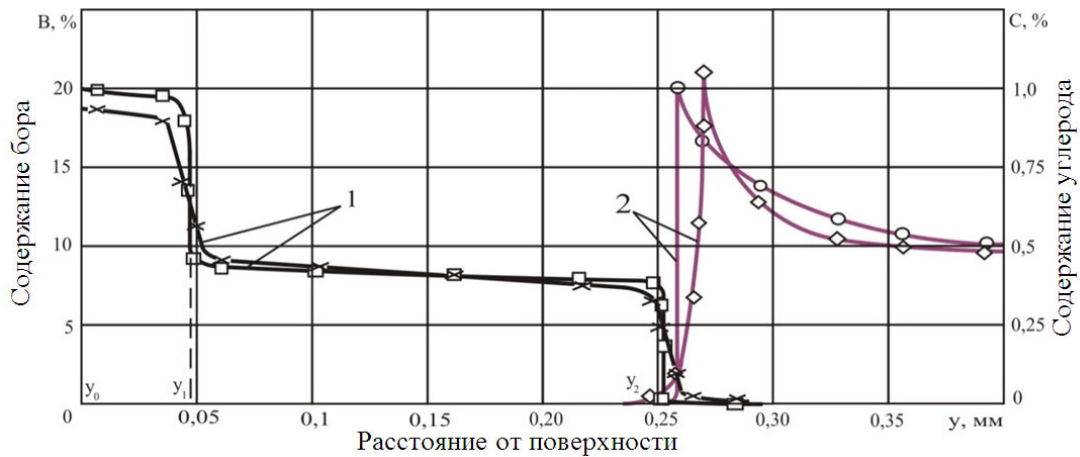
б

Рисунок 4.17 – Количество бора (1) и углерода (2) в стали 20 при скорости движения теплоносителя: а – 0,1 м/с; б – 0,26 м/с; □, ○ – расчетное; ×, ◇ – экспериментальное

В пределах каждой из фаз концентрация бора снижается в направлении от поверхности исследуемого образца вглубь: для моноборида железа – с 18 до 16 %; для борида дижелеза – с 9 до 7 %; для твердого раствора бора в α -железе – с 0,7 до 0 %. Это, как было установлено ранее, объясняется тем, что диффундирующий в образец бор оттесняет имеющиеся в стали атомы углерода вглубь. Процесс диффузии углерода постепенно замедляется, так как не образуется достаточного количества вакансий, и концентрация атомов углерода растет. Ее рост особенно заметен в начале переходной зоны, где он достигает максимального значения, что замедляет процесс диффузии бора.



а



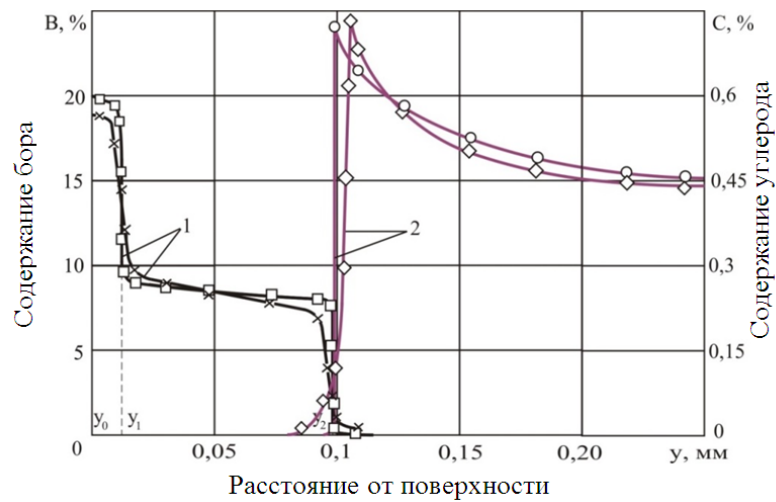
б

Рисунок 4.18 – Количество бора (1) и углерода (2) в стали 30 при скорости движения теплоносителя: а – 0,1 м/с; б – 0,26 м/с; □, ○ – расчетное; ×, ◇ – экспериментальное

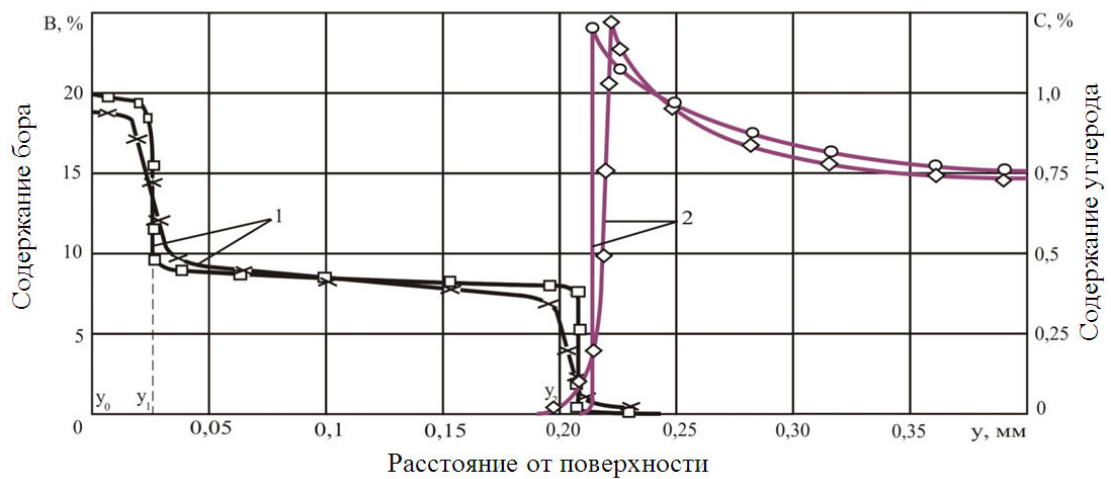
Следует отметить, что при увеличении скорости движения расплава электролита в 2,6 раза толщина образующегося борированного слоя увеличивается в 1,8–2,0 раза. При этом возрастает и количество отесненного углерода. Расчеты и экспериментальные исследования борированных образцов позволили установить следующее:

- в образцах из стали 3 количество углерода в начале переходной зоны при скорости движения расплава электролита 0,1 м/с составило 0,37 %, а при 0,26 м/с – 0,61 %;
- в образцах из стали 20 при аналогичных условиях – соответственно 0,42 и 0,74 %;
- в образцах из стали 30 при этих же условиях – 0,63 и 1,0 %;
- в образцах из стали 45 при таких же условиях – 0,74 и 1,2 %.

Далее концентрация плавно уменьшается до среднего содержания углерода в соответствующей марке стали.



а



б

Рисунок 4.19 – Количество бора (1) и углерода (2) в стали 45 при скорости движения теплоносителя: *а* – 0,1 м/с; *б* – 0,26 м/с; □, ○ – расчетное; ×, ◇ – экспериментальное

Результаты аналитических расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными, ошибка при этом не превышает 5 % (см. рисунки 4.16–4.19).

4.10 Хрупкость диффузионных слоев

Одной из важных механических характеристик поверхностей, упрочненных борированием, является сопротивляемость хрупкому разрушению боридных слоев. Если полученные электролизным борированием слои будут хрупкими, то применение

этого процесса для упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники невозможно [234, 241]. С этой целью проведены исследования послойного показателя хрупкости упрочненных слоев, полученных электролизным борированием.

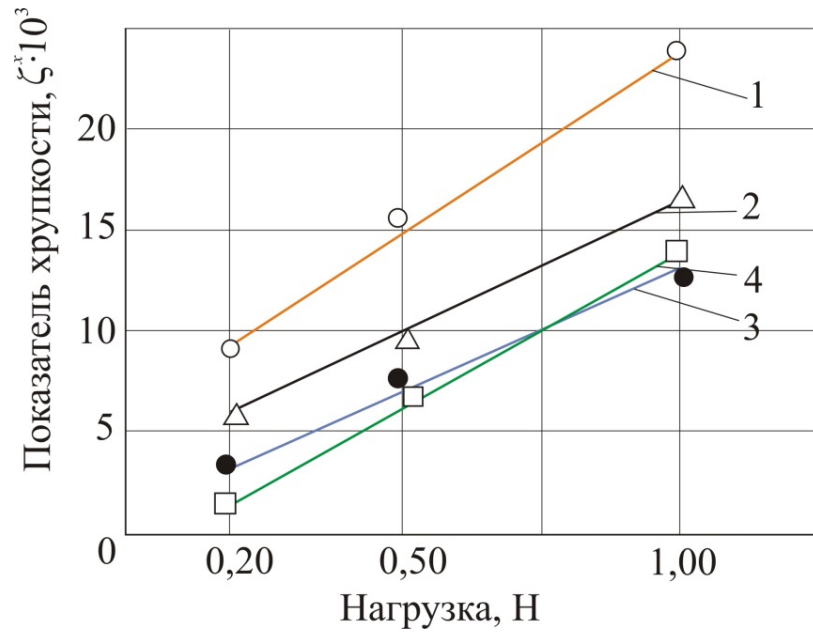
Хрупкость слоя как механическая характеристика обусловлена его напряженно-деформированным состоянием, т. е. регламентируется наличием в нем растягивающих и сжимающих внутренних остаточных напряжений. При этом наибольшее влияние на величину и знак остаточных напряжений оказывают толщина слоя и коэффициент термического расширения [224, 228, 229, 236]. При охлаждении после борирования вследствие различных коэффициентов расширения в монобориде железа возникают растягивающие, а в бориде дижелеза – сжимающие напряжения [230]. Если доля моноборида железа в общем слое большая, то деформация приведет к образованию трещин на границе между боридами и к частичному откалыванию слоя.

Поскольку упрочненные материалы не обладают достаточной способностью к рассредоточению упругих напряжений в объеме материала, то при вдавливании в них алмазной пирамиды на ребрах отпечатка концентрируются напряжения, ведущие к разрушению ее границ.

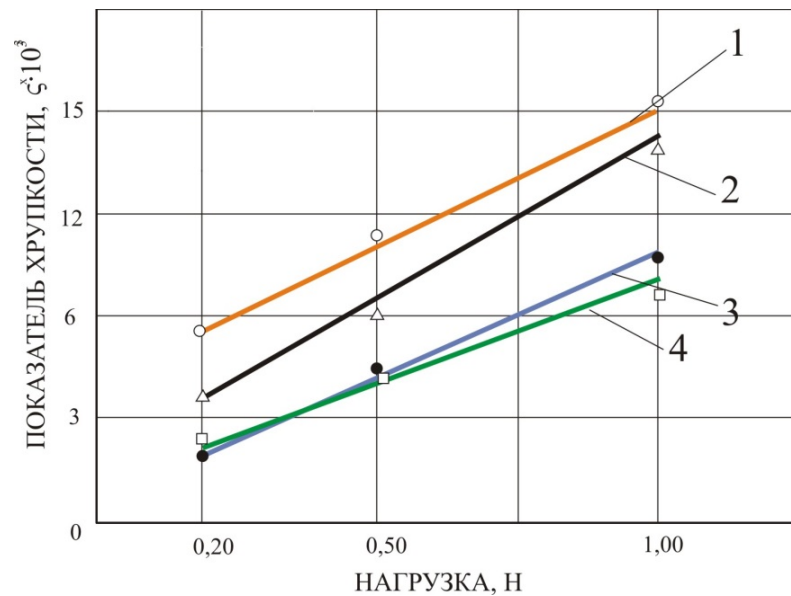
В результате проведенных исследований установлено, что упрочненные образцы из сталей 30 и 45 обладают наименьшей хрупкостью (рисунок 4.20), так как содержание моноборида железа в слое составляет 20 ± 3 и 10 ± 3 % соответственно (приложение Г).

Исследованиями установлено, что на величину показателя хрупкости прежде всего влияет толщина борированного слоя. Таким образом, исходя из приведенных графиков (см. рисунок 2.20), можно заключить, что слои в 1,8–2,0 раза большей толщины имеют в 1,5 раза меньший показатель хрупкости.

Следовательно, показатель хрупкости борированного слоя определяется следующими факторами: количеством и механическими свойствами высокобористой фазы моноборида железа, сочетанием фаз моноборида и борида дижелеза, а также толщиной боридного слоя.



а



б

Рисунок 4.20 – Показатель хрупкости борированного слоя на подложке из сталей при скорости движения теплоносителя: а – 0,1 м/с; б – 0,26 м/с; 1 – Ст3; 2 – сталь 20; 3 – сталь 45; 4 – сталь 30

4.11 Результаты лабораторных испытаний на изнашивание

Результаты лабораторных испытаний показали, что в условиях абразивного изнашивания образец из стали 30, борированный при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с, имеет величину износа в 2–3 раза, ниже, чем образцы из закаленной стали 65Г и стали 30, наплавленной газотермическим способом (рисунок 4.21). По мере износа борированного слоя скорость изнашивания опытных

образцов возрастает. Это объясняется тем, что при электролизе интенсивность продвижения атомов бора вглубь детали уменьшается, заодно уменьшаются и показатели твердости и износостойкости.

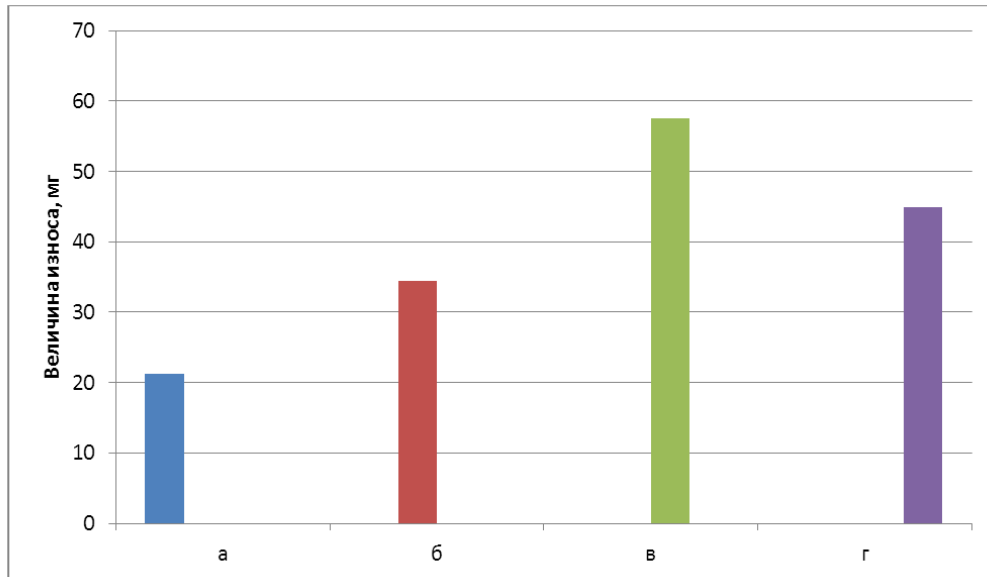


Рисунок 4.21 – Результаты сравнительных лабораторных исследований упрочненных образцов на износ: *а* – борированная сталь 30; *б* – сталь 30, наплавленная в жидком теплоносителе; *в* – закаленная сталь 65Г; *г* – сталь 30, наплавленная газотермическим способом

Повышенная поверхностная износостойкость борированного образца объясняется структурой упрочненного слоя, которая представляет собой матрицу из борида дижелеза, содержащего ~20 % включений моноборида железа, что способствует обеспечению высокой стабильности механических свойств и уменьшению количества возможных очагов разрушения при изнашивании.

Результаты лабораторных испытаний образцов, борированных и наплавленных в жидком теплоносителе хромоникелевым порошком ПР-Н67Х18С5Р5, позволяют сделать вывод о том, что они обладают высокой износостойкостью (см. рисунок 4.21). Величина их износа на 35–70 % ниже по сравнению с образцами из закаленной стали 65Г и стали 30, наплавленной газотермическим способом, что подтверждает прогнозируемые значения. Причиной этого являются мелкозернистая структура и равномерное распределение карбидно-боридных составляющих твердостью 16,5...18,6 ГПа в слое. Это обеспечивает стабильность механических свойств и уменьшает количество очагов разрушений при трении. Положительную

роль при этом играет способность покрытия образовывать вторичные структуры, выполняющие роль защитных пленок на поверхности контакта. Пористость наплавленных покрытий, равная 3–5 %, уменьшает износ восстанавливаемых поверхностей.

4.12 Коррозионная стойкость диффузионных слоев

Почвы сельскохозяйственного назначения обладают достаточно широким диапазоном значений водородного показателя. У значительной части таких почв рН составляет от 4,6 до 8,5. К ним относятся среднекислые, нейтральные и слабощелочные почвы. Однако встречаются и более кислые почвы с рН = 3,0...3,2 и сильнощелочные почвы с рН = 9,3...9,8 [24, 33, 50, 75, 88, 90, 92, 93, 102, 104, 106, 258]. Это позволяет говорить о коррозионной агрессивности почвы, что подразумевает проведение исследований коррозионной стойкости восстановленных образцов.

Проведенные исследования показали, что после нахождения в водном растворе соляной кислоты с рН = 4,0...4,5 в течение 75 ч (рисунок 4.22, а) образцы из стали 30, наплавленные газотермическим способом, и закаленные образцы из стали 65Г потеряли соответственно 98 и 107 г/м², а борированный и наплавленный образцы – 14 и 25 г/м². Заметное проявление коррозии закаленных стальных образцов наступает уже после 25-часового воздействия раствора соляной кислоты. Таким образом, наиболее коррозионностойкими оказались борированные образцы, потеря массы которых в течение 75 ч составила 14 г/м², что свидетельствует о повышении относительной износостойкости борированного слоя в 1,5–2,0 раза по сравнению с закаленными стальными образцами.

Аналогичные образцы показали в 2–3 раза более высокую коррозионную стойкость в растворе едкого натра по сравнению с раствором соляной кислоты (рисунок 4.22, в). Так, после 75-часового воздействия сильнощелочной среды образцы из стали 30, наплавленные газотермическим способом, и закаленные образцы из стали 65Г потеряли соответственно 49 и 44 г/м², а борированный и наплавленный образцы – 5 и 7 г/м². Борированные образцы теряют в 9 раз, а наплавленные в 6–7 раз меньше массы, чем закаленные стальные образцы.

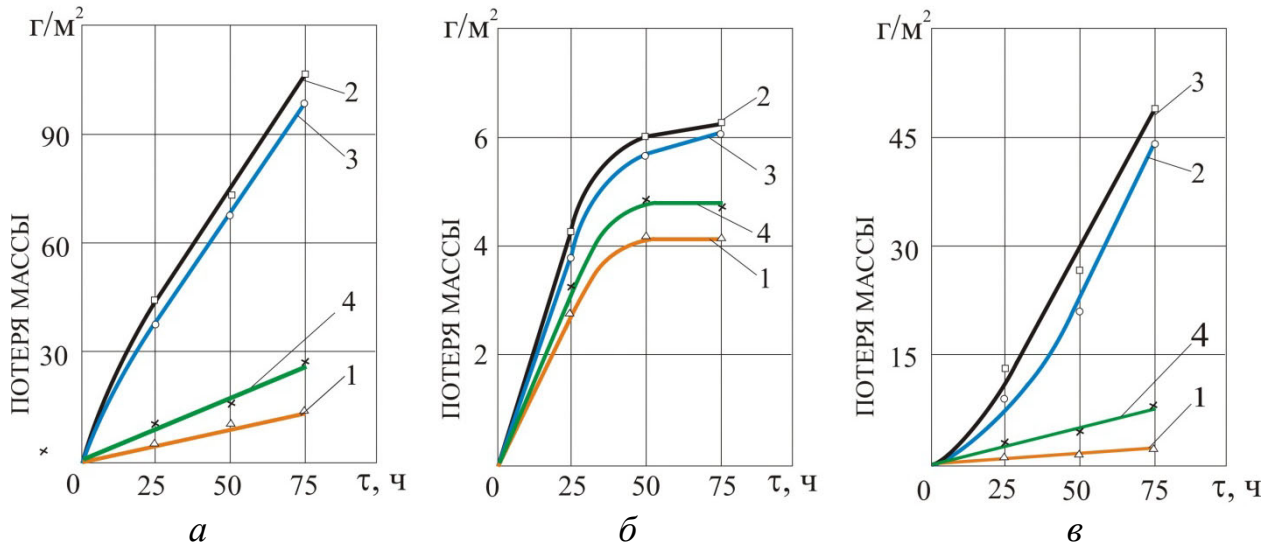


Рисунок 4.22 – Коррозионная стойкость образцов: 1 – борированная сталь 30; 2 – сталь 30, наплавленная газотермическим способом; 3 – закаленная сталь 65Г; 4 – наплавленная сталь 30; а – раствор соляной кислоты в дистиллированной воде (рН = 4,0...4,5); б – дистиллированная вода (рН = 6,0...6,2); в – раствор едкого натра в дистиллированной воде (рН = 7,5...8,0)

В нейтральной среде (рН = 6,0...6,2) наблюдается выравнивание коррозионной стойкости всех образцов (борированных, наплавленных и закаленных). За 75 ч испытаний (рисунок 4.22, б) образцы из стали 30, наплавленные газотермическим способом, и закаленные образцы из стали 65Г потеряли ~6 г/м² каждый, а борированный и наплавленный образцы – соответственно 4 и 5 г/м².

Проведенные исследования показали, что коррозионная стойкость образцов, подвергнутых электролизному борированию, в 6–9 раз, а наплавленных в жидком теплоносителе – в 4–7 раз превышает коррозионную стойкость образцов из стали 30, наплавленных газотермическим способом, и закаленных образцов из стали 65Г.

Поскольку соединения железа обладают амфотерностью и по своим химическим свойствам оказываются ближе к основаниям, то они будут интенсивнее взаимодействовать с растворами кислот (в частности, с раствором соляной кислоты). Поэтому наиболее агрессивной средой при исследовании на коррозионную стойкость оказался раствор соляной кислоты в дистиллированной воде (рН = 4,0...4,5), что дало возможность получить результаты коррозионной стойкости в ускоренном варианте.

4.13 Выводы по главе

1. Определены потенциалы выделения натрия и бора ($E_1 = -2,89$ В; $E_2 = -1,57$ В). Сопоставление этих значений с рассчитанным термодинамически свидетельствуют о том, что их разность находится в пределах ошибки 5 %. Это позволяет утверждать, что катионы бора будут восстанавливаться до атомарного состояния на катоде. Определены параметры технологического процесса электролизного борирования стальных образцов: рабочая температура процесса насыщения – 930 °С; катодная плотность тока – 0,20 А/см²; время проведения процесса электролизного насыщения – 1,7 ч при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с. Эти экспериментальные значения практически совпали с установленными аналитически (отклонения не превышают 5 %).

2. При исследовании кинетики изменения температуры расплава электролита в рабочем пространстве печи-ванны установлена зона оптимальной загрузки восстанавливаемых деталей, расположенная на расстоянии 0,03 м от боковых стенок. Определены точки солидуса (990...1000 °С) и ликвидуса (1025...1035 °С) для металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5.

3. Установлено, что расчетные и экспериментальные значения температуры в зоне сплавления практически совпадают. Разница между этими значениями составляет 3–5 %. Деформация детали в процессе наплавки минимальна – 4...5 мкм, что находится в пределах допуска на размер новой детали.

4. Определено влияние режимов наплавки и количества связующего в наносимом слое на пористость покрытия, взаимодиффузию элементов слоя и подложки, прочность сцепления и структуру покрытия. Оптимальными в данном случае будут следующие значения режимов наплавки и количества связующего материала: температура наплавки – 1030 °С; время выдержки – 60 с; концентрация связующего – 5 %. При соблюдении этих режимов были получены следующие значения: пористость покрытия – 5 %; взаимодиффузия элементов слоя и подложки – 0,4 мкм; прочность сцепления – 350 МПа.

5. При исследовании микроструктуры было установлено, что борированный слой состоит из следующих структурных составляющих: моноборида железа, борида дижелеза и твердого раствора бора в альфа-железе.

6. Определено влияние скорости конвекции электролита и количества угле-

рода в стали на глубину диффузии бора, толщину упрочненного слоя и образующегося соотношения высокобористой и низкобористой фаз. На образцах с содержанием углерода 0,3 % были получены оптимальные результаты при скорости конвекции 0,26 м/с по соотношению высокобористой и низкобористой фаз 20 на 80 % соответственно. Экспериментальные значения практически совпали с рассчитанными аналитически (отклонения не превышали 5 %).

7. Исследование микротвердости борированного слоя в зависимости от скорости конвекции электролита и количества углерода в стали показало следующее: моноборид обладает микротвердостью 17,1...19,7 ГПа, а борид дижелеза – 12,6...17,0 ГПа при скорости конвекции 0,26 м/с. Данное обстоятельство обуславливает тот факт, что борированные стальные образцы с содержанием углерода 0,3 и 0,45 % обладают наименьшей хрупкостью, так как содержание моноборида железа в слое – соответственно 20 ± 3 и 10 ± 3 %. Также установлено, что на показатель хрупкости оказывает толщина борированного слоя: слои в 1,8–2,0 раза большей толщины имеют в 1,5 раза меньший показатель хрупкости. На этом основании принято, что толщина упрочняемого борированного слоя регламентируется скоростью конвекции и увеличивается при ее возрастании с 0,1 до 0,26 м/с.

8. В результате лабораторных испытаний установлено, что в условиях абразивного изнашивания образцы из стали 30, борированные при скорости движения расплава электролита 0,26 м/с, имеют величину износа в 2–3 раза ниже по сравнению с образцами из стали 30, наплавленными газотермическим способом, и закаленными образцами из стали 65Г. Образцы из стали 30, наплавленные в жидком теплоносителе хромоникелевым порошком ПР-Н67Х18С5Р5, обладают высокой износостойкостью – величина их износа на 35–70 % ниже образцов из стали 30, наплавленных газотермическим способом, и закаленных образцов из стали 65Г, что подтверждает прогнозируемые значения.

9. Установлено, что коррозионная стойкость в агрессивных (щелочных или кислых) средах в 6–9 раз выше у образцов, подвергнутых электролизному борированию, и в 4–7 раз выше у образцов, наплавленных в жидком теплоносителе, по сравнению с образцами из стали 30, наплавленными газотермическим способом, и закаленными образцами из стали 65Г.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ ТЕХНИКИ И ОЦЕНКА ИХ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ

5.1 Обоснование технологических особенностей используемого теплоносителя и его компонентов

Для разработки технологий электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе необходимо исследовать технологические особенности предлагаемого расплава электролита.

Анализ технологических особенностей теплоносителя

Расплав теплоносителя состоит из нескольких компонентов, каждый из которых выполняет определенную функцию. Их состав оказывает особое воздействие на качество обработки.

Тетраборат натрия – агрессивное химическое соединение, применяемое в качестве теплоносителя в различных термических, химико-термических и наплавочных операциях. Расплав теплоносителя, на 100 % состоящий из тетрабората натрия, интенсивно разъедает поверхность стальной детали при нагревании, но не обезуглероживает ее. Для снижения разъедающей агрессивности необходимо добавить в состав теплоносителя компоненты, снижающие это вредное разъедающее воздействие и повышающие качественные показатели покрытия [214, 252–255, 258].

Борный ангидрид уменьшает вязкость расплава теплоносителя, улучшает отделимость его застывшей корки, сокращает обезуглероживание поверхности детали, улучшает флюсующие свойства, а также снижает температуру плавления теплоносителя и активность тетрабората натрия.

При превышении 18%-го уровня содержания борного ангидрида в расплаве уменьшается скорость нагрева обрабатываемых деталей из-за снижения конвекции теплоносителя. При этом увеличивается сила поверхностного натяжения расплава теплоносителя, что способствует образованию на поверхности детали более толстой и прочной корки при извлечении ее из печи-ванны и снижает закаливаемость в охлаждающей среде [214, 252–255, 258].

Поташ в расплаве теплоносителя усиливает его защитные свойства от действия атмосферных газов на деталь при соприкосновении с окружающей средой, а также от разъедающего действия тетрабората натрия в рабочем пространстве печи. Его наличие в ванне не влияет на обезуглероживание поверхности детали, а также улучшает флюсующие свойства расплава теплоносителя [214, 252–255, 258].

Метасиликат натрия при нагреве выше 900 °С диссоциирует на оксид натрия и оксид кремния. Действие этих оксидов способствует повышению растворимости оксидов железа без увеличения вязкости расплава и защите детали от воздействия атмосферных газов, тем самым улучшая флюсующие свойства теплоносителя и снижая агрессивность тетрабората натрия. При большем, чем 7 % количестве метасиликата натрия вязкость расплава начинает увеличиваться. При этом на растворимость оксида железа влияет отношение метасиликата натрия к борному ангидриду. Это отношение должно быть ~0,4, что обеспечивает высокий уровень растворимости в расплаве теплоносителя оксида железа без увеличения вязкости расплава [214, 252–255, 258].

Фторцирконат калия улучшает смачивание поверхности металла и флюсующие свойства, образует легкоплавкие эвтектики, снижающие температуру плавления теплоносителя, уменьшает вязкость расплава теплоносителя, повышая его текучесть, а также способствует полной и быстрой отделимости теплоносителя при остывании. Процесс отделения корки теплоносителя начинается в интервале температур 625...650 °С, что ниже температуры интенсивного окисления стали. Отделение происходит самопроизвольно, так как из-за разности коэффициентов термического расширения стали и застывшей пленки в ней возникают напряжения сжатия, способствующие ее разрушению [253–255, 258].

Разработанный состав теплоносителя обладает флюсующими и защитными свойствами, поэтому его можно применять при наплавке присадочных металлов, сплавов и металлокерамических композиций.

Благодаря хорошей смачивающей способности и достаточной вязкости расплавленный теплоноситель защищает нагретую деталь от окисления и обезуглероживания при переносе в закалочную ванну, так как на ее поверхности образуется защитная пленка.

Для изготовления теплоносителя используют следующие компоненты: бура (ГОСТ 8429-67); борный ангидрид (ГОСТ 10068-72); поташ; метасиликат натрия (ГОСТ 13078-81) и фторцирконат калия.

Эти исходные материалы переплавляют в дуговой печи до получения гомогенного состояния. Затем этот расплав для гранулирования медленно сливают в ванну с технической водой температурой 50 °С.

На этом основании исследовали технологические свойства теплоносителя (электролита) для определения возможности его использования при восстановлении и упрочнении деталей сельскохозяйственной техники.

5.1.1 Исследование технологических свойств жидкого теплоносителя при его взаимодействии с деталью

При выборе теплоносителя анализировали несколько составов: синтетический боратный шлак АН-ШТ1, хлорид бария и предлагаемый состав.

Как видно из профилограмм, представленных на рисунке 5.1, где штриховая линия соответствует исходной поверхности металла, наименьшей разъедающей способностью обладает предложенный теплоноситель (рисунок 5.1, *а*).

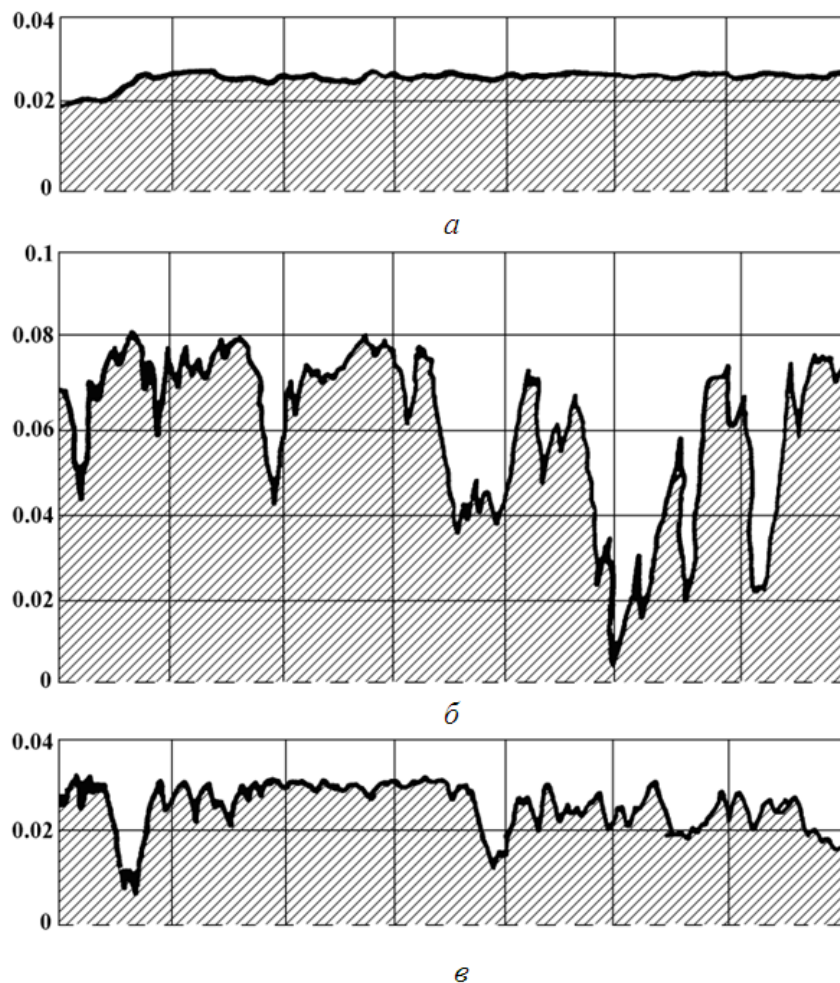


Рисунок 5.1 – Разъедающее действие теплоносителя:
а – предлагаемого состава; *б* – соли хлорида бария; *в* – шлака АН-ШТ1

На этом основании считаем, что предварительный выбор и его функциональное технологическое обоснование подтверждены экспериментальными данными о целесообразности использования разработанного состава теплоносителя в производственных целях.

5.1.2 Исследование процесса потери массы теплоносителя

В ходе исследования устанавливали зависимость относительной потери массы при нагреве расплавов синтетического шлака и теплоносителя предлагаемого состава (5.1).

Таблица 5.1 – Потери массы при нагреве расплавов теплоносителей

| Расплав теплоносителя | Относительная потеря массы, % при длительности нагрева | | | | |
|-----------------------|--|------|------|------|------|
| | 2 ч | 4 ч | 6 ч | 8 ч | 10 ч |
| АН-ШТ1 | 0,54 | 0,69 | 0,87 | 1,08 | 1,24 |
| Предлагаемый | 0,35 | 0,48 | 0,64 | 0,77 | 0,79 |

Результаты, приведенные в таблице 5.1, свидетельствуют о том, что выгорание предлагаемого теплоносителя на 30–35 % ниже, чем шлака АН-ШТ1. На этом основании с точки зрения экологии важно определить содержание токсичных элементов в сравниваемых теплоносителях (рисунок 5.2).

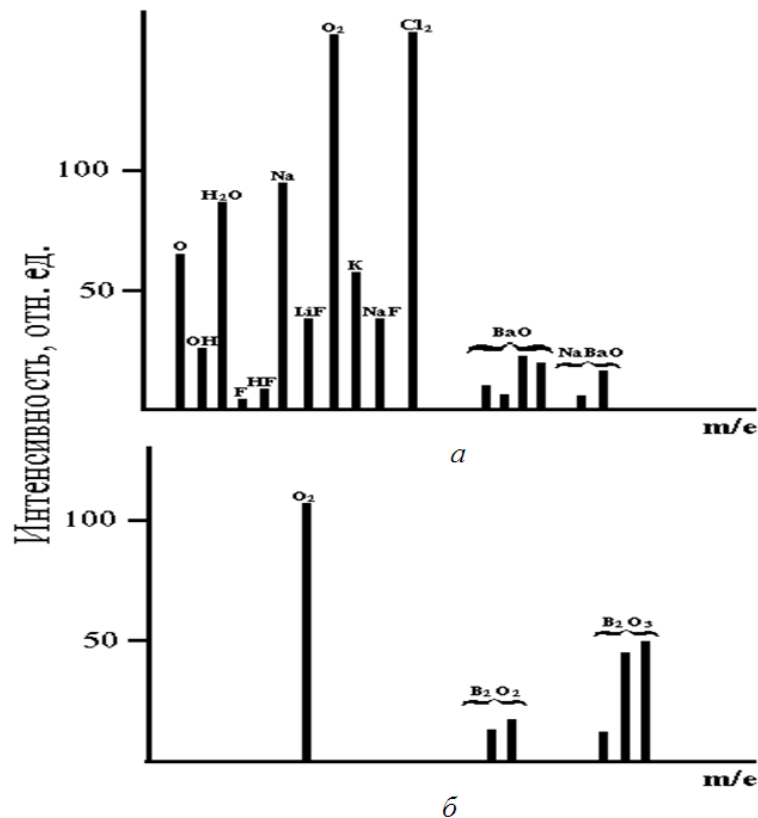


Рисунок 5.2–Масс-спектрограмма над зеркалом расплава: а – смеси солей хлоридов натрия и бария; б – предлагаемого теплоносителя

Из представленных зависимостей (см. рисунок 5.2) видно, что после достижения рабочей температуры 1100 °С интенсивность летучих выделений из предлагаемого теплоносителя ниже, чем у смеси солей хлоридов натрия и бария, а токсичные выделения у него вообще отсутствуют.

5.1.3 Исследование стабильности состава предлагаемого теплоносителя

Анализ изменения химического состава предлагаемого теплоносителя в процессе непрерывной и длительной (в течение 160 ч) эксплуатации показал, что первые 80 ч он стабилен (рисунок 5.3). Затем из-за насыщения расплава оксидом железа более 5 % наблюдается резкое изменение химического состава и выход его за обоснованные пределы [213, 253], что требует замены теплоносителя.

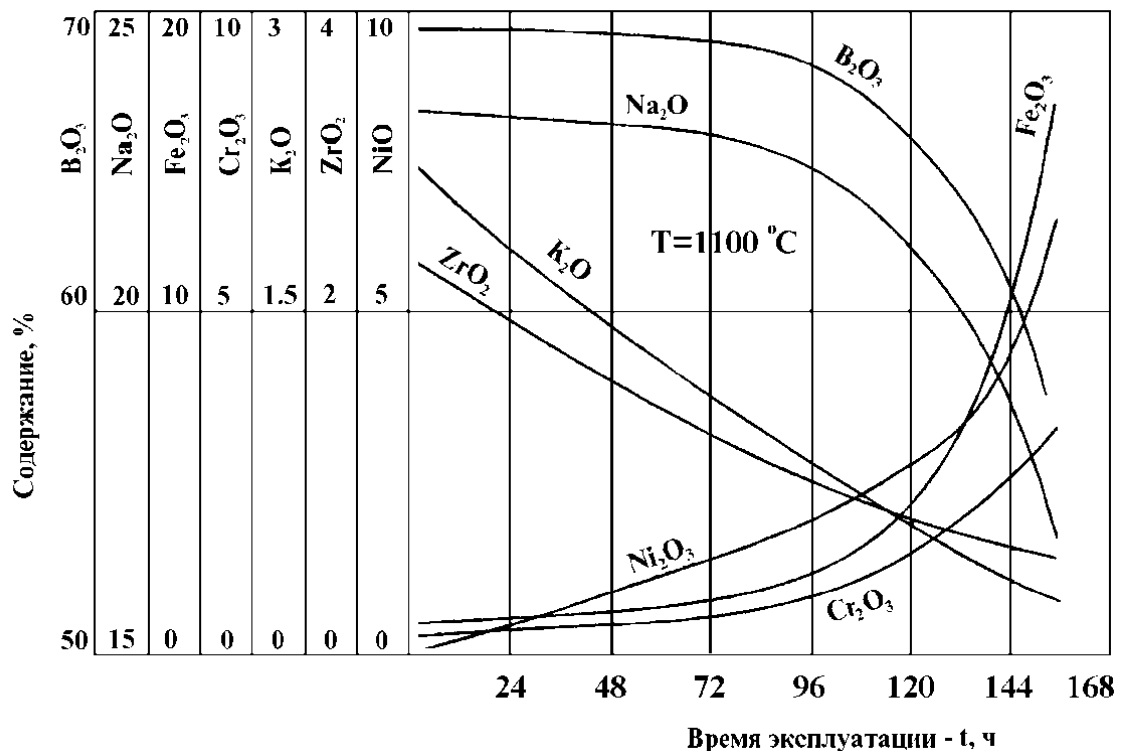


Рисунок 5.3 – Изменение химического состава предлагаемого теплоносителя

Однако следует отметить, что в процессе производственной эксплуатации часть теплоносителя выносится из ванны вместе с деталями. Поэтому приходится периодически добавлять свежий теплоноситель, что позволяет поддерживать содержание оксида железа не более 3 %.

Таким образом, изменение состава предлагаемого теплоносителя в ходе эксплуатации не оказывает существенного влияния на его свойства и не ведет к необходимости его замены. Продолжительность его использования составляет 500 ч [213, 214, 253].

5.2 Технологические особенности процесса наплавки на деталь металлопорошка в жидком теплоносителе

При выполнении технологического процесса наплавки в жидком теплоносителе на поверхность детали наносят слой присадочного металлопорошка при соблюдении установленного условия, что температура ликвидуса присадочного материала ниже температуры солидуса металлического сплава изделия. Затем осуществляют наплавочную операцию путем нагрева подготовленной детали в расплаве теплоносителя [290].

В процессе нагрева наплавляемого изделия оксиды, находящиеся на его поверхности, и кислород, адсорбированный на поверхности частиц и подложки, вступают в реакцию с раскислителями бором и кремнием, образуя оксиды, объединяющиеся в конгломераты легкоплавких шлаков. Основная роль при этом отводится борному ангидриду, который, химически воздействуя на оксидные пленки основного металла и частиц наплавляемого покрытия, образует различные бораты [213, 214].

Сложные оксиды кремния образуют боросиликатные комплексы, связывающие оксиды металлов и благоприятно влияющие на металлургические процессы при наплавке, а также способствующие смачиванию поверхности подложки расплавленным покрытием. Удельная масса и температура плавления таких составов – соответственно $1900...3500 \text{ кг/м}^3$ и $600...800 \text{ }^\circ\text{C}$ [118, 213, 214, 252, 258, 259].

С образованием жидкой фазы обеспечивается возможность протекания процесса наплавки по принципам перегруппировки и растворения-осаждения. Жидкая фаза заполняет зазоры между частицами, становясь своего рода смазкой, облегчает взаимное перемещение частиц наплавляемого материала, приводящее к уплотнению покрытия. Перегруппировка частиц, сопровождающаяся уменьшени-

ем площади свободной поверхности жидкой фазы, происходит под влиянием капиллярного давления. В связи с равномерным распределением жидкой фазы в объеме слоя капиллярное давление эквивалентно действию всестороннего сжатия [118, 120, 139, 141, 152, 171, 175, 178, 184, 213, 215, 245, 259, 284].

Присутствие жидкой фазы способствует процессу растворения-осаждения как между частицами наплавляемого материала в слое, так и между жидкой фазой и поверхностью подложки. Обтекание жидкостью микронеровностей на твердой поверхности возможно за счет действия поверхностной диффузии и растекания. Преобладающим здесь является механизм растекания. Его сущность заключается в вязком течении постепенно утончающегося слоя жидкости, которое обусловлено уменьшением энергии поверхностного натяжения. Растекание происходит при условии полного смачивания поверхности жидкой фазой, а капиллярность, образованная шероховатостью подложки и частиц, способствует процессу смачивания [215, 285, 286, 287, 289, 290].

Кроме раскисления и флюсования при наплавке происходит восстановление оксидов хрома, железа и никеля свободным кремнием и бором, а при плавлении в восстановительной среде – водородом или углеродом. Образующиеся шлаки выделяются на поверхности покрытия [47, 117–120, 137–139, 146, 147, 152, 171, 175–178, 184, 258, 259, 284].

Принятое условие проведения процесса наплавки при неполном расплавлении создает зону термического воздействия на слой, произвольно расположенный в пространстве, с исключением стекания покрытия. Значительный интервал кристаллизации самофлюсующихся сплавов, который может достигать 40...50 °С, упрощает ведение данного процесса при соблюдении температурных режимов на верхней границе интервала кристаллизации в присутствии минимального количества жидкой фазы [117–120, 139, 152, 175, 177, 178, 184, 259, 284–290].

Наличие жидкой фазы в наплавляемом слое, температура плавления которой ниже температуры плавления других компонентов, способствует образованию прочной металлической связи как между атомами наплавляемого слоя, так и с атомами основного металла в процессе смачивания, но без расплавления металла основы.

С учетом образования наплавленного слоя в твердожидком состоянии сплавление металлических композиций осуществляется в две стадии. На первой происходят образование физического контакта, т. е. осуществляется сближение соединяемых компонентов на расстояние, необходимое для межатомного взаимодействия, и подготовка поверхности к взаимодействию. На этой стадии из элементарных процессов важную роль играют процессы электростатического взаимодействия поверхностных атомов. На второй стадии заканчивается процесс образования металлической связи. Решающую роль при этом играют процессы электронного взаимодействия [137, 147, 178, 213].

Протекание в зоне контакта соединяемых металлов процессов электронного взаимодействия требует определенной величины энергии для активации поверхностей. Энергия активации необходима для образования межатомных связей твердого тела и внешней наплавленной среды, а также для создания свободных связей, требуемых для очистки поверхности, с которыми взаимодействуют атомы наплавленного металла, насыщая эти связи. Энергия активации расходуется на повышение энергии поверхностных атомов до такого уровня, при котором возможно возникновение между ними металлической связи. Эта энергия может сообщаться в виде термической активации – тепла, механической – упругопластической деформации и радиационной – электронного, ионного и других видов облучения [134, 152, 178, 215, 216, 261, 272, 285–290].

Так, при наплавке предварительно нанесенного слоя сближение атомов металла покрытия с основой при наличии жидкой фазы достигается за счет смачивания и активации поверхностей тепловой энергией. Наличие раскислителей бора и кремния, образующих поверхностно-активную фазу в составе покрытия, способствует протеканию этих процессов. На этом заканчивается первая стадия процесса соединения металлов в твердожидком состоянии – непосредственное физическое контактирование фаз.

При образовании физического контакта за счет расплавления покрытия на границе фаз сначала будет наблюдаться пик межфазной энергии [118, 134, 152, 215, 216, 259, 261, 272]. При этом переход системы в новое состояние осуществ-

ляется за конечный дополнительный промежуток времени. Это время необходимо для приобретения атомами энергии, достаточной для преодоления межфазного барьера, после прохождения которого атомы продолжают мигрировать в соседнее тело, преодолевая энергию внутреннего энергетического барьера. Миграция атомов из одного положения в другое, когда они преодолевают энергию межфазного барьера и затем энергию внутреннего энергетического барьера в процессе наплавки происходит в результате взаимной диффузии элементов соединяемых металлов [117–120, 127, 128, 137, 139, 141, 142, 152, 171, 177, 178, 213, 215, 261, 265, 284]. При этом миграция атомов отдельных элементов, согласно градиенту концентраций, направлена в сторону меньшей их концентрации независимо от фазового состояния. Поэтому при наплавке хромоникелевых сплавов следует ожидать диффузии железа в покрытие, а хрома и никеля – в стальную подложку.

Таким образом, для завершения процесса взаимодействия, позволяющего получить металлическую связь между подложкой и покрытием, кроме обеспечения физического контактирования жидких и твердых фаз металлов, требуются приложение внешней энергии в виде тепла, необходимого для прохождения атомами межфазного барьера, и время для получения этой энергии. Приложение внешней теплоты до расплавления покрытия и определенное время выдержки при этой температуре обеспечивают обретение достаточной прочности сцепления покрытия с подложкой. Соединение металлов в твердожидком состоянии при выполнении этих условий происходит в результате взаимной диффузии элементов покрытия и подложки.

Предложенный способ наплавки [285–290] позволяет осуществить предварительную фиксацию порошка на поверхности посредством применения различных клеевых составов. Использовать органику не представляется возможным ввиду образования при нагревании в печи-ванне продуктов сгорания. Интерес представляет применяемый в сварочной промышленности метасиликат натрия. Это коллоидный раствор переменного состава, состоящий из щелочных силикатов и растворенного кремнезема [186, 258].

Температура плавления метасиликата натрия, применяемого в качестве связующего, около 850 °С [186, 258]. Металлопорошок смешивается с ним, образуя суспензию. Количество связующего вещества выбирают исходя из обеспечения следующих технологических условий: связывание всех частиц между собой, сцепление полученной суспензии с подложкой по всей поверхности, получение такой консистенции, которая способствует образованию равномерного по толщине слоя.

Предложенный состав суспензии представляет собой механическую смесь металлического порошка (93–97,5 %) и связующего вещества (2,5–7,0 %) [285–290].

5.2.1 Определение смачивающей способности расплавленного порошка

Из технологических свойств наплавочного металлопорошка одним из основных является его смачивающая способность в расплавленном состоянии, которая способствует получению плотного и прочного покрытия

Для обеспечения эксплуатационных и прочностных свойств наплавленных покрытий имеет значение толщина наплавленного слоя. Поэтому необходимо исследовать технологические особенности процесса наплавки металлопорошка в жидком теплоносителе (рисунок 5.4).

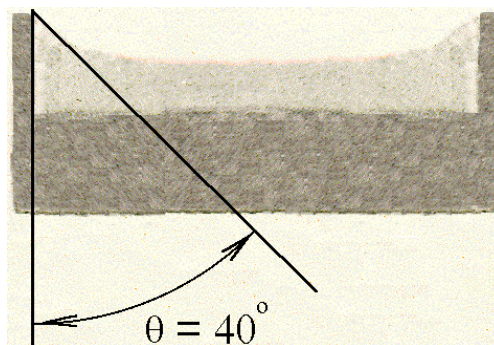


Рисунок 5.4 – Смачиваемость стальной подложки расплавленным металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5

Смачивающая способность определяется углом между касательной к мениску наплавленного слоя и стенкой стальной чашки. Чем меньше величина этого угла, тем лучше смачиваемость, а следовательно, выше качество наплавки. Смачи-

вающая способность расплавленного порошка ПР-Н67Х18С5Р5 составляет 0,7...0,8 ($\cos \theta$), что обеспечивает хорошую смачиваемость стали 30 и сплошность зоны сплавления (минимум внутренних дефектов).

5.2.2 Исследование изменения химического состава наплавляемого материала

Для оценки качества полученного наплавленного слоя проведено исследование изменения химического состава наплавляемого материала.

Результаты исследования взаимодействия металлопорошков с расплавами АН-ШТ1 и предлагаемого теплоносителя представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Массовая доля элементов после наплавки ПР-Н67Х18С5Р5, %

| Показатель | Ni | C | Cr | Si | B | Fe | Mn |
|--|------|-----|------|------|-----|-----|-----|
| После обработки в АН-ШТ1 | 61,9 | 0,8 | 16,5 | 0,4 | 0,4 | 3,3 | 0,6 |
| После обработки в предлагаемом теплоносителе | 65,3 | 1,1 | 17,8 | 0,25 | 0,2 | 4,3 | 0,8 |
| Исходное количество | 65,9 | 1,1 | 18 | 5,0 | 4,7 | 4,5 | 0,8 |

Таким образом, плавление металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5 в предлагаемом теплоносителе практически не приводит к изменению его химического состава (за исключением флюсующих компонентов бора и кремния), чего нельзя сказать о шлаке АН-ШТ1, где наблюдаются обезуглероживание и уменьшение содержания легирующих компонентов (хрома и никеля). Это влияет на качество наплавленного слоя, снижая его механические и эксплуатационные свойства.

5.2.3 Исследование толщины слоя, наплавленного металлопорошком

При проведении данного эксперимента установили значения плотности присадного материала до и после наплавки – соответственно $(2,8...2,9) \cdot 10^3$ и $(7,6...7,7) \cdot 10^3$ кг/м³.

Сравнивая теоретическую зависимость толщины наплавленного слоя от толщины предварительно нанесенного слоя с экспериментально определенной его толщиной, можно сказать, что несовпадение показателей не превышает 5 % (рисунк 5.5).

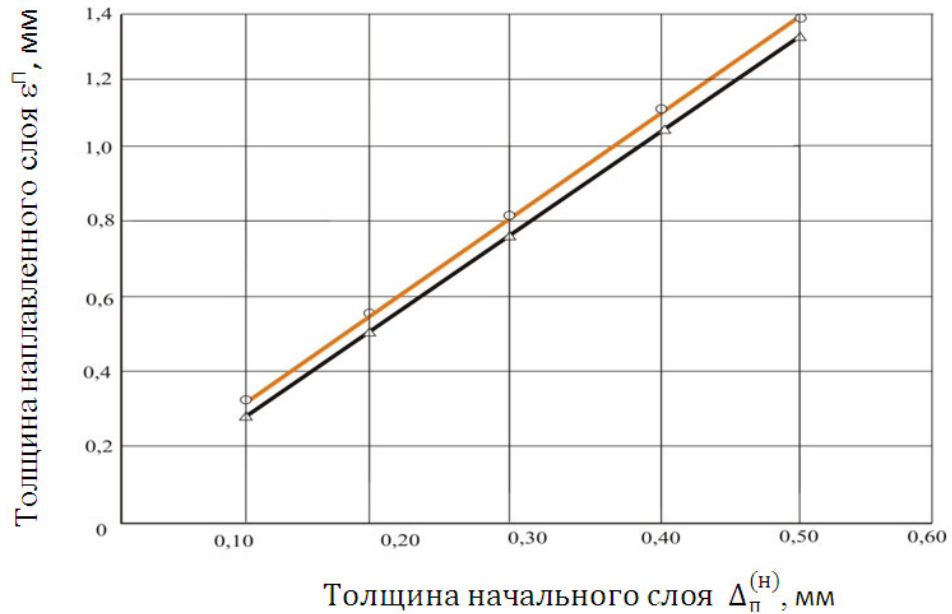


Рисунок 5.5 – Изменение толщины наплавленного слоя:
о – экспериментальное; Δ – расчетное

Следовательно, предлагаемая зависимость (2.76) позволяет с достаточной точностью прогнозировать толщину наплавленного покрытия.

5.3 Математическая модель и алгоритм проектирования конструкции установки для электролизного борирования и наплавки в жидком теплоносителе

Математическая модель тепломассообменных процессов в электродной печи-ванне, являющаяся основой для конструирования реальной установки, была реализована путем обработки числовых данных (рисунок 5.6). Это позволило обеспечить динамическую визуализацию расчетных значений поэтапного изменения температур с учетом переменных по времени действия конвективных потоков в рабочем пространстве печи-ванны.

Расчет осуществляли в среде персональных электронно-вычислительных машин на языках программирования C++ и Fortran-77. Входными данными этой математической модели задавались уточняемые или проверяемые параметры конструкции печи-ванны, тепловые и физические характеристики материалов и сред, поля температур и скоростей течения сплошной среды теплоносителя в рабочих зонах печи-ванны, а также факторы управления, и другие параметры, учитываемые по ходу эксперимента.

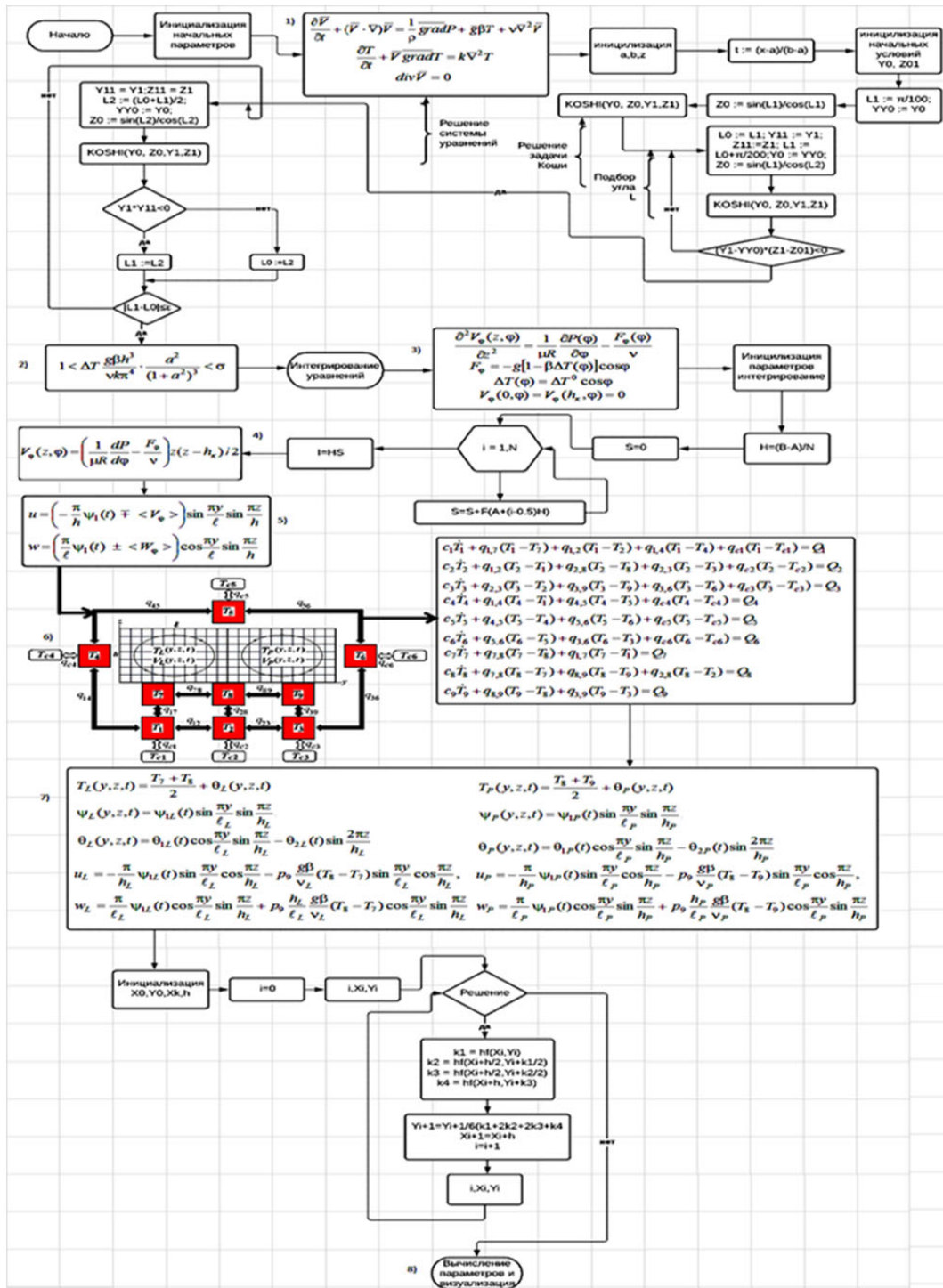


Рисунок 5.6 – Алгоритм математической модели тепломассообменных процессов в печи-ванне

Блок-схема математической модели тепломассообменных процессов в печи-ванне (см. рисунок 5.6) состоит из 8 функциональных блоков, решающих поставленные задачи.

Первый блок осуществляет:

- выявление условия возникновения конвективного движения в сплошной среде;

- определение и исследование нестационарных полей скоростей течения и температур как функции теплофизических характеристик среды, геометрических параметров и возмущающих тепловых воздействий от имеющихся источников тепловыделения;

- решение плоской связанной задачи, описываемой системой уравнений с учетом нелинейных членов в предположении, что в ванне расплава печи имеют место вертикальные составляющие температурных градиентов, обусловленные наличием источников тепловыделения.

Второй блок обеспечивает получение необходимого условия возникновения конвекции в размерном виде. При этом уравнения и соотношения, представленные в блоке, позволяют также проводить расчет и анализ полей скоростей конвективных потоков и решать обратные задачи по идентификации теплофизических характеристик сплошной среды по заданным конфигурациям температурных полей.

Третий блок представляет собой разрешающую систему уравнений и соотношений. В этом блоке решается уравнение неизотермического движения вязкой среды в полярной системе координат с учетом проекции массовых сил, конфигурации температурного поля и граничных условий.

Четвертый блок предназначен для интегрирования уравнения скорости движения расплавленной среды и получения выражения для ее составляющей.

Пятый блок осуществляет расчетную оценку максимальных составляющих скоростей течения расплавленной среды, вызванного горизонтальными температурными градиентами в поле сил тяжести с учетом непрерывности течения с применением соответствующих соотношений. При этом полученные качественные оценки в первом приближении являются базой для проведения вычислительных экспериментов и для дальнейшего исследования развития и совершенствования построенной математической модели, качественного и количественного анализа динамических тепловых процессов в электродной печи.

Шестой блок предназначен для полного анализа динамических тепловых процессов в печи-ванне на основе метода элементарных балансов и вышеприведенного аналитического исследования, составления математической модели, опи-

сываемой системой дифференциальных уравнений и аналитических соотношений, позволяющих учитывать тепломассоперенос за счет теплопроводности, свободной и вынужденной конвекции и излучения.

Седьмой блок осуществляет решение системы нелинейных дифференциальных уравнений и соотношений численными методами с помощью алгоритмов Рунге – Кутта при математическом моделировании.

Восьмой блок служит для построения и виртуализации по решенным уравнениям выходных данных: неоднородных нестационарных температурных полей и неоднородных нестационарных полей скоростей течения сплошной среды в функциональных зонах печи.

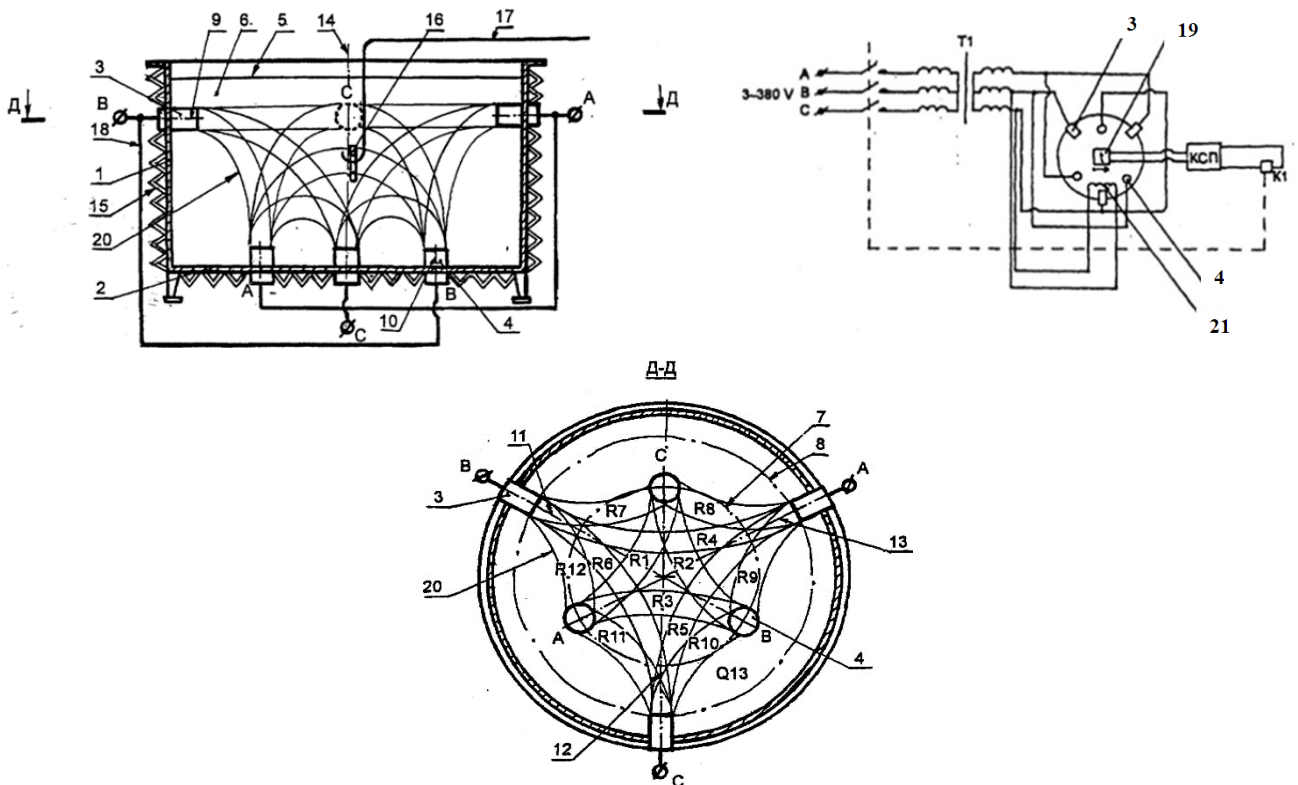
Разработанная программа позволяет моделировать процессы, происходящие в рабочем пространстве печи-ванны для конструктивно различного расположения электродов, а также интенсивности теплоотвода в окружающую среду. Полученные данные (приложение *E*) дают возможность сделать вывод о том, что скорость течения теплоносителя или интенсивность конвекции в предлагаемой конструкции электродной печи-ванне возрастает в 2,5–4,0 раза по сравнению с существующей конструкцией с донным расположением электродов [264, 265, 296, 301, 306].

С помощью предлагаемой программы разработана конструкция электродной печи-ванны (рисунок 5.7), которая состоит из цилиндрического стального корпуса 1, стального днища 2 и электродов 3 и 4, изготовленных из жаропрочного сплава.

Электроды 3 установлены в рабочем пространстве ванны на стенке корпуса 1 ниже уровня расплава 5 теплоносителя 6, а электроды 4 смонтированы на днище 2 по концентрическим окружностям 7 и 8 расположения электродов. При этом оси симметрии 9 и 10 электродов 3 и 4, соединенных с одной из электрических фаз (*A*, *B* или *C*), находятся в плоскостях 11, 12 или 13, проходящих через ось симметрии 14 корпуса 1 ванны. На наружной поверхности корпуса 1 и днища 2 размещен охладитель, представляющий собой спиральный теплообменник 15 [264, 265, 296, 301, 306].



а



б

Рисунок 5.7 – Электродная печь-ванна: а – общий вид; б – схема: 1 – корпус; 2 – днище; 3 и 4 – группы электродов; 5 – уровень расплава; 6 – расплав теплоносителя; 7 и 8 – concentрические 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

Электроды 3 и 4 шинами 18 присоединены к силовому трансформатору. Регулирование температуры в рабочем пространстве ванны осуществляется посредством управляющего действия линейно-релейной системы, которая дозированно подает необходимое количество энергии в соответствии со следующей системой [57, 64, 79,203].

Дозированная подача необходимого количества энергии происходит за счет ступенчатого изменения силы тока при помощи выключателей, термодатчиков и контрольно-следящих приборов. При этом измеренное значение температуры теплоносителя принимает одно из значений $(T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9)$ в зависимости от места расположения термодатчика.

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

Первоначальный запуск печи-ванны в эксплуатацию осуществляют с помощью нагревательной спирали. Ее опускают в рабочее пространство печи-ванны и засыпают кусочно-измельченным теплоносителем, плавление которого происходит при прохождении по спирали переменного тока. Расплавленный теплоноситель электропроводен с большим электрическим сопротивлением. В результате между электродами 4 возникает электрический ток и при этом интенсивно выделяется теплота. Теплоноситель плавится и заполняет рабочий объем ванны. Нагревательную спираль удаляют из печи-ванны, как только жидкий теплоноситель покрывает электроды 4 [57, 64, 79,203].

Электрическое сопротивление расплава теплоносителя δ между парами электродов (фазами A и B , B и C , A и C) практически одинаково. Электрическая нагрузка между фазами распределяется равномерно из-за симметричного расположения электродов, что обеспечивает их равный ресурс. Электрическое напряжение во вторичной цепи силового трансформатора – 20...30 В. Технические возможности печи-ванны позволяют обеспечить температуру расплава теплоносителя 850...1150 °С [264, 265, 296, 301, 306].

Расплавленный теплоноситель обладает коррозионной агрессивностью и интенсивно разъедает корпус на границе раздела «теплоноситель – атмосфера». Защита от разъедания внутренней поверхности печи-ванны обеспечивается эффектом «намораживания» корки теплоносителя на внутренней поверхности корпуса 1. Необходимую толщину этой корки создают регулированием интенсивности циркуляции охлаждающей жидкости в спиральном теплообменнике 15 [246–248, 260–265, 273, 288, 296, 301, 306], который состоит из герметично приваренных к наружной поверхности корпуса стальных элементов, образующих треугольное поперечное сечение. Такая форма пропускного сечения при одинаковой пропускной способности с полукруглым сечением теплообменника в 1,2 раза улучшает теплоотдачу в окружающую среду из-за большей площади наружной поверхности [260, 262, 273].

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

5.4 Особенности технологии восстановления стрельчатых лап культиваторов

Выполненный комплекс теоретических и экспериментальных исследований позволил разработать конкретные производственные рекомендации по повышению ресурса стрельчатых лап культиваторов восстановлением и упрочнением их режущей части электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе металлопорошка.

Ремонт стрельчатых лап культиваторов включает в себя все основные операции типового технологического процесса восстановления: разборка, мойка, дефектация и т. д. Это не требует специальных научных исследований, поэтому технологические операции проектируют в соответствии с установленными правилами и техническими требованиями.

При разработке технологий восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники необходимо стремиться осуществить комплекс

мероприятий, направленных на снижение трудовых и материальных затрат с соблюдением технических требований. Это может быть достигнуто в результате применения дифференцированного подхода к модифицированию рабочих поверхностей и восстановлению их формы, основанного на фактическом состоянии ремонтного фонда, а также на рациональном расходовании ремонтных материалов и инструмента.

Технологии восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники должны быть высокомеханизированными и автоматизированными как по основным, так и по вспомогательным операциям.

Технологические операции восстановления работоспособности деталей осуществляют на оборудовании предприятия технического сервиса. Техническая оснащённость производства в сочетании с наличием квалифицированных кадров позволяют 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. Ремонтную деталь, компенсирующую удаленную часть, вырубали на кривошипном прессе из углеродистой стали (рисунок 5.8).

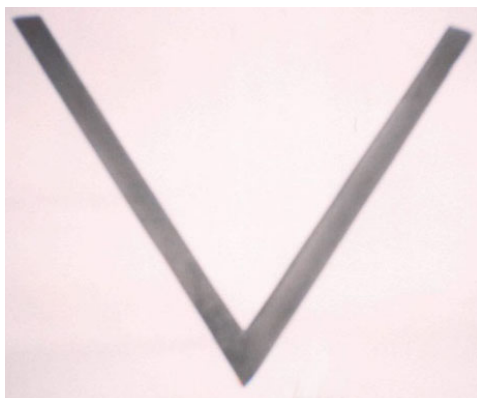
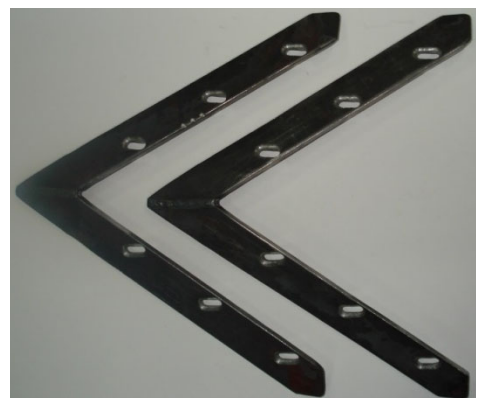
*а**б*

Рисунок 5.8 – Ремонтные детали: *а* – для приварки; *б* – для винтового крепления

Режущую кромку пластины затачивали под углом 12° на плоскошлифовальном станке. При восстановлении стрелчатой лапы посредством винтового крепления ремонтной детали к ее остову в этих деталях выполняли сквозные овальные отверстия 3, а в остове лапы 1 нарезали резьбовые отверстия 4 (рисунок 5.9).

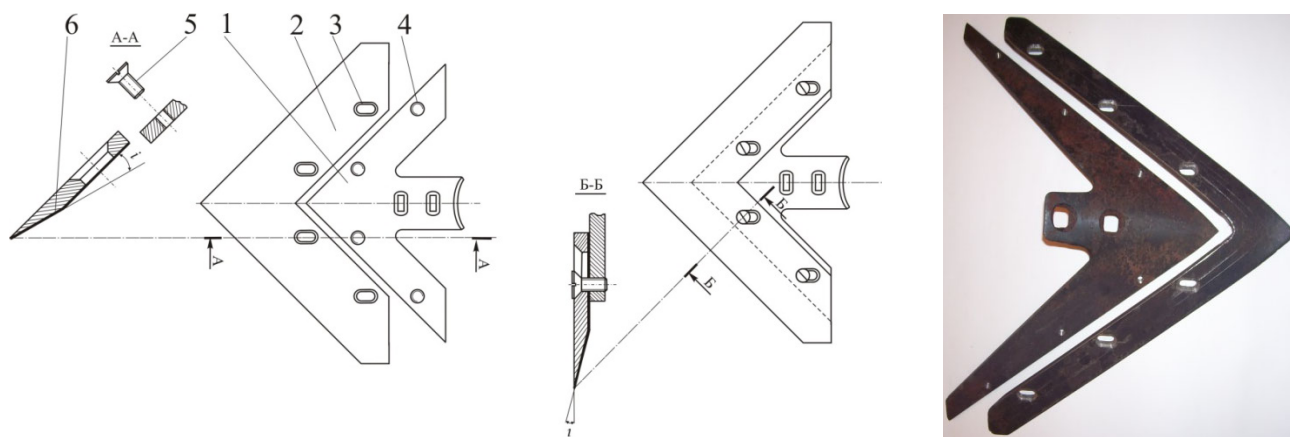


Рисунок 5.9 – Схема восстановления, стрелчатой лапы культиватора постановкой ремонтной детали: 1 – остов стрелчатой лапы; 2 – сменная режущая часть (компенсирующая деталь); 3 – крепежные отверстия; 4 – резьбовые отверстия; 5 – винты; 6 – одно- или двустороннее упрочняющее покрытие

После этого ремонтные детали подвергали электролизному борированию с соблюдением режимов, приведенных в таблице 5.3, либо с тыльной стороны лезвия с обеспечением эффекта самозатачивания, либо с обеих сторон лезвия, получая упрочненный слой 6. Аналогично изготавливали ремонтные детали, которые затем наплавляли металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5 с тыльной стороны лезвия с соблюдением режимов (см. таблицу 5.3).

Таблица 5.3 – Режимы борирования и наплавки

| Показатель | Значение |
|--|-------------|
| <i>Борирование</i> | |
| Температура расплава, $^\circ\text{C}$ | 930 |
| Плотность тока, A/cm^2 | 0,20 |
| Время выдержки, ч | 1,7 |
| Глубина слоя, мм | 0,26...0,28 |
| Скорость движения теплоносителя, м/с | 0,26 |
| <i>Наплавка</i> | |
| Температура расплава, $^\circ\text{C}$ | 1100 |
| Время выдержки, ч | 0,25 |
| Толщина слоя, мм | 0,26...0,28 |
| Скорость движения теплоносителя, м/с | 0,26 |

После электролизного борирования или наплавки металлопорошком в жидком теплоносителе ремонтную деталь соединяли неразъемно (рисунок 5.10) или разъемно (рисунок 5.11) с остовом лапы.

*a**б*

Рисунок 5.10 – Схема восстановления стрелчатой лапы культиватора приваркой ремонтной детали: *a* – электроконтактной сваркой; *б* – электродуговой сваркой

В процессе эксплуатации по мере износа рабочей части лапы винты 5 (см. рисунок 5.9) ослабляют и компенсируют износ за счет перемещения угловой пластины вперед вдоль отверстий 3.

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

В случае, если упрочненную заготовку необходимо приварить к остову лапы электроконтактной или электродуговой сваркой, то используют ремонтную деталь без отверстий (см. рисунки 5.8, *a* и 5.10).

Выбор режимов и материалов при проектировании сварочных конструкций из среднеуглеродистой нелегированной стали и марганцовистой стали 65Г является сложной технологической задачей. При ее решении необходимо учитывать кроме состава и свойств материалов также технико-экономические, технологические и эксплуатационные факторы [131–136]. Назначение электродов и режимов сварки разнородных сплавов производят с учетом особенностей конструкции, условий

эксплуатации и технических возможностей производства. Следует учитывать также возможность образования в сварном шве и околошовной зоне структурной, химической и механической неоднородностей, а также полей внутренних остаточных сварочных напряжений, которые при различии коэффициентов линейного расширения не могут быть сняты термической обработкой. Эти факторы значительно снижают работоспособность и долговечность таких сварных конструкций.

*a**б**в*

Рисунок 5.11 – Стрельчатые культиваторные лапы, восстановленные постановкой ремонтной детали и упрочненные: *a* – наплавкой в жидком теплоносителе; *б* – односторонним борированием; *в* – двусторонним борированием

При сварке среднеуглеродистой стали с высокоуглеродистой марганцовистой сталью 65Г возможно образование трещин как в основном металле, так и в сварном шве [131–136]. Для получения качественных соединений необходим предварительный подогрев изделия до 200...300 °С. При сварке применяют электроды марки ЭА-1Г6 диаметром 4 мм. Лучшие результаты обеспечивает сварка постоянным током

прямой полярности силой 180 А при напряжении 32...36 В. Скорость сварки 0,3...0,5 м/мин [131–136]. Эти мероприятия снижают содержание углерода в металле шва и предупреждают появление кристаллизационных трещин [131–136].

5.5 Результаты эксплуатационных испытаний восстановленных стрелчатых лап культиваторов

Эксплуатационные испытания в полевых условиях позволяют получить окончательный ответ об эффективности принятых технологических и технических решений. Они дают практически полную информацию о ресурсе стрелчатых лап культиваторов, восстанавливаемых по различным технологиям (приложения 3 и К).

Анализ условий работы и изнашивания стрелчатых лап культиваторов показал, что наиболее интенсивное их изнашивание происходит при движении по следам тракторных движителей и опорных колес. Потеря работоспособного состояния рабочих органов вызывает остановку культиватора для ремонта. Серийные лапы, двигающиеся по этим следам, через 25...26 га наработки достигают предельного состояния (см. верхний ряд на рисунке 5.12). Для визуального сравнения на рисунке 5.12 показаны новые не изношенные серийные рабочие органы (нижний ряд).



Рисунок 5.12 – Серийные лапы до полевых испытаний (нижний ряд) и после наработки 25,8 га при движении по следам движителей и опорных колес (верхний ряд)

Восстановленные по предлагаемым технологиям стрелчатые лапы также подвергали ресурсным испытаниям. Для этого их устанавливали на раме культиватора (рисунок 5.13, *а*). После наработки каждой лапой 15 га (рисунок 5.13, *б*) у восстановленной по предлагаемой технологии лапе наблюдался незначительный износ. Следующий визуальный осмотр, проведенный через 30 га после начала испытаний (рисунок 5.13, *в*) показал большую величину износа.

*а**б**в*

Рисунок 5.13 – Контроль стрелчатых лап культиватора: *а* – начало испытаний; *б* – после наработки 15 га; *в* – после наработки 30 га

При этом стрелчатые лапы, восстановленные по существующей технологии, уже были сняты с испытаний из-за достижения ими предельного состояния.

Для комплектования равнопрочного (равноизносостойкого) культиватора необходимо испытать стрелчатые лапы, восстановленные по предлагаемым технологиям, в одинаковых нагрузочных условиях. Такие условия создавали постановкой лап на раме культиватора в те места, которые обеспечивают им движение по следам движителей трактора или опорных колес.

Результаты полевых эксплуатационных испытаний стрелчатых лап, восстановленных по предлагаемым (рисунки 5.14, 5.15 и 5.16) и существующей технологиям, а также новых представлены в таблице 5.4.

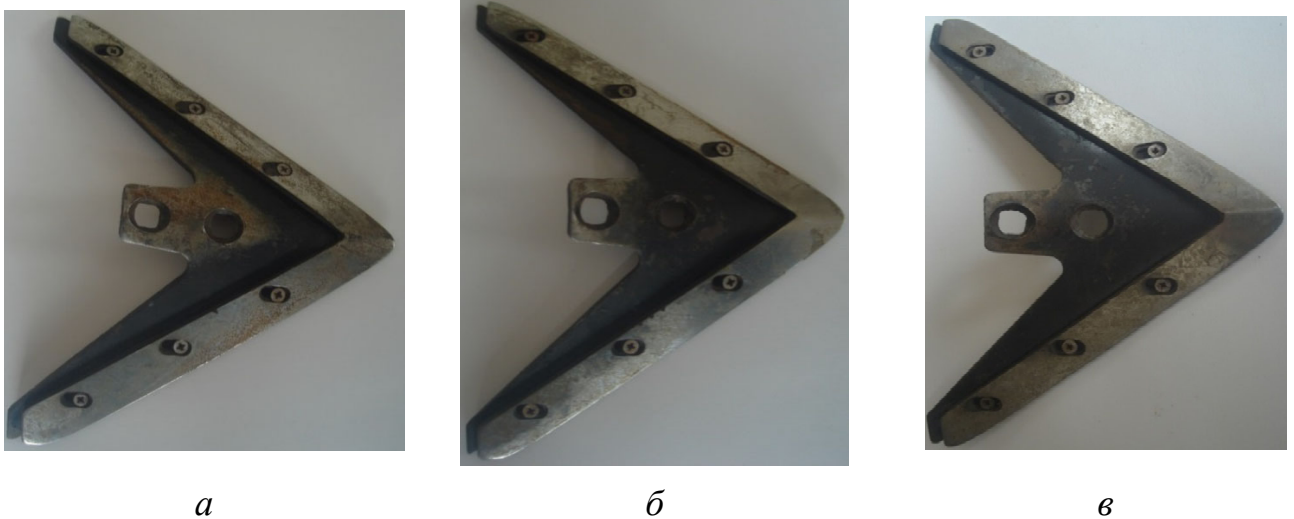


Рисунок 5.14 – Стрелчатые лапы культиватора с одинаковой величиной износа, перемещавшиеся следу движителя трактора: *а* – борированная с тыльной стороны после наработки 22 га; *б* – борированная с двух сторон после наработки 32 га; *в* – наплавленная в жидком теплоносителе после наработки 19 га

Полученные значения величин ресурса позволили установить 3 зоны с различающимися условиями эксплуатации лап культиватора (см. рисунок 3.20):

- зона перемещения движителей и опорных колес;
- первый ряд расположения рабочих органов;
- второй ряд рабочих органов.

В эти характерные места культиватора необходимо устанавливать восстановленные по предлагаемым технологиям лапы.

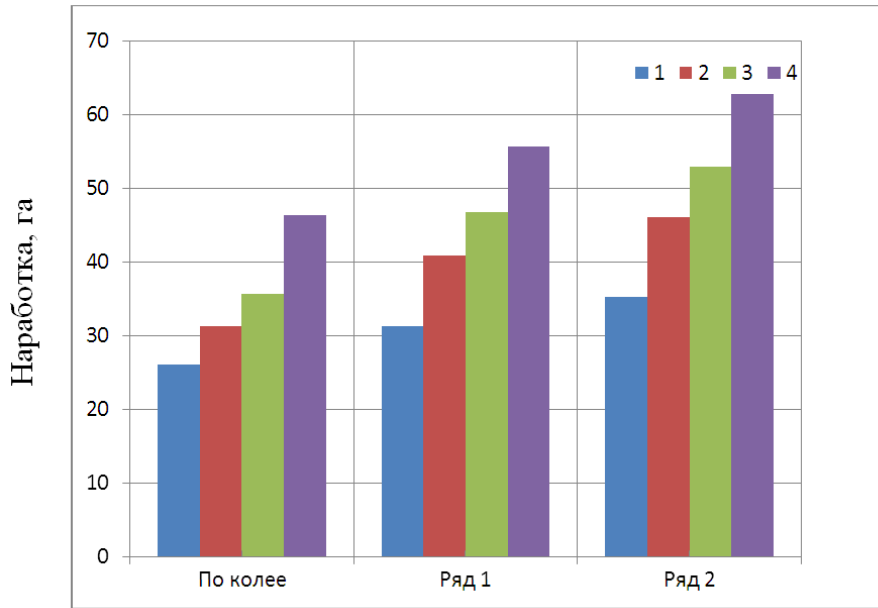


Рисунок 5.15 – Результаты ресурсных испытаний культиваторов, укомплектованных рабочими органами, восстановленными следующими способами: 1 – существующий способ восстановления; 2 – восстановление с упрочнением наплавкой; 3 – восстановление с односторонним борированием; 4 – восстановление с двухсторонним борированием

Таблица 5.4 – Результаты эксплуатационных испытаний стрелчатых лап культиваторов, установленных по следу движителя

| Стрелчатые культиваторные лапы | Ресурс, га | Линейный износ, мм | | Радиус кромки, мм |
|--|------------|--------------------|---------|-------------------|
| | | носка | крыльев | |
| Новые серийные | 25,8 | 31,2 | 15,7 | 2,8 |
| Восстановленные по существующей технологии [289] | 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 |

Размещать в зоне перемещения движителей и опорных колес необходимо лапы, упрочненные двусторонним борированием. Первый ряд рабочих органов культиватора следует комплектовать лапами, упрочненными односторонним борированием, а второй – лапами, упрочненными наплавкой в жидком теплоносителе. Укомплектованные таким образом культиваторы эксплуатировали до выработки ресурса (см. рисунок 5.16). В этой же сцепке испытывали культиватор, укомплектованный рабочими органами, восстановленными по существующей технологии. Его также эксплуатировали до выработки ресурса (рисунок 5.17).

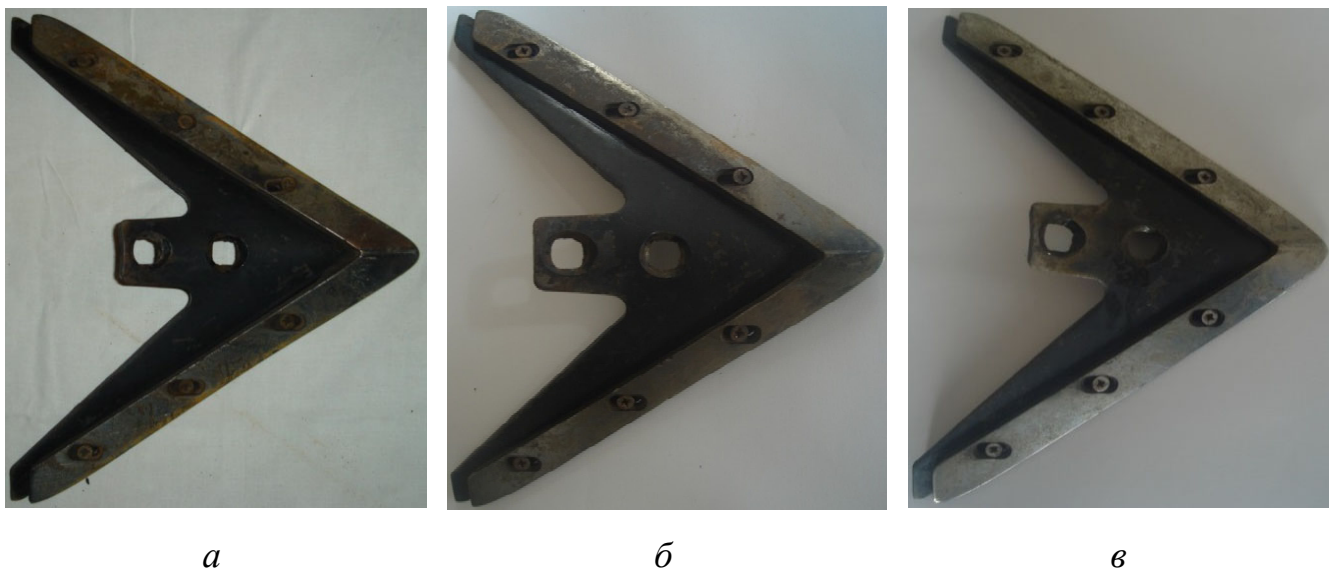


Рисунок 5.16 – Стрельчатые лапы культиватора с предельной величиной износа:
a – борированная с тыльной стороны, перемещавшаяся в первом ряду, после наработки 47 га; *б* – борированная с двух сторон, перемещавшаяся по следу движителя трактора, после наработки 48 га; *в* – наплавленная в жидком теплоносителе, перемещавшаяся во втором ряду, после наработки 46 га

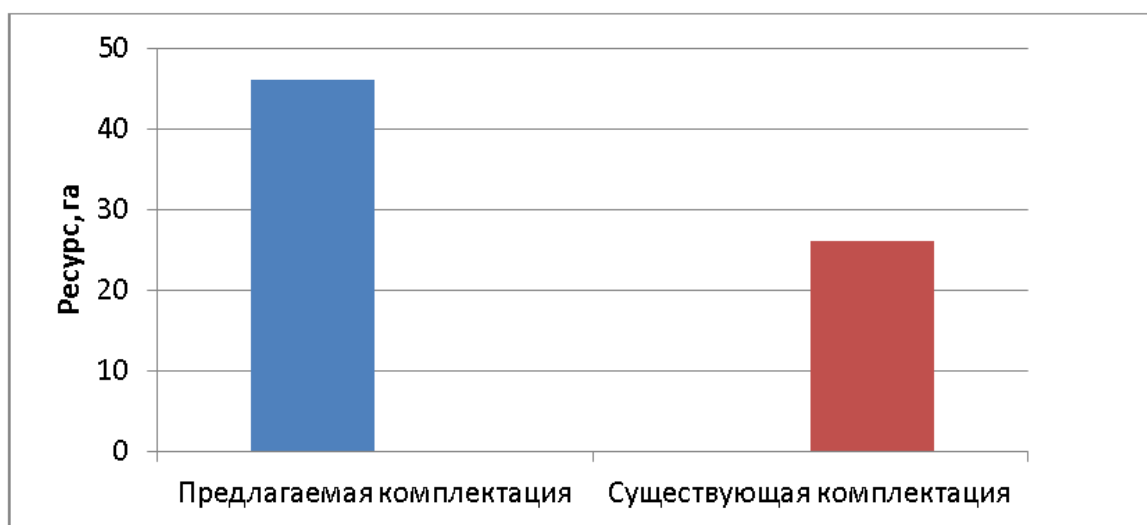


Рисунок 5.17 – Результаты ресурсных испытаний культиваторов

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

5.6 Техничко-экономическая эффективность технологии восстановления стрелчатых лап культиваторов

Экономическую эффективность применения разработанных технологий восстановления рабочих органов почвообрабатывающей или посевной техники выявляли путем сравнения основных технико-экономических показателей, обеспечиваемых существующими и предлагаемыми технологиями [67, 266, 283 286, 289, 302–304, 311, 312].

Все существующие технологии восстановления рабочего органа почвообрабатывающей или посевной техники экономически обсчитать не представляется возможным. Анализ, представленный в первой главе, позволят остановить выбор на наиболее передовом технологическом процессе, при котором изношенную часть лезвия удаляют, а взамен приваривают дополнительную компенсирующую деталь, изготовленную из стали 65Г, с последующей газотермической наплавкой металлического порошка на тыльную сторону лезвия и высокочастотной закалкой внешней стороны. Исходными данными для проведения таких расчетов являются результаты эксплуатационных (полевых) испытаний и методические нормативно-справочные материалы [311, 312]. Все расчеты выполняли с учетом цен на январь 2020 г.

С экономической точки зрения принципиальная возможность использования существующей технологии восстановления рабочего органа почвообрабатывающей или посевной техники проверяется сравнением значений предельного и действительного критериев экономической эффективности восстановления детали $K_{эф}^{(э)}$ [311, 312]:

$$K_{эф}^{(э)} = (Ц_n^{(э)} - C_{ост}^{(э)}) / T_n^{(р)}, \quad (5.1)$$

где $Ц_n^{(э)}$ – цена новой детали, руб.;

$C_{ост}^{(э)}$ – остаточная стоимость детали после выработки доремонтного ресурса, руб.;

$T_n^{(р)}$ – ресурс новой детали до ремонта, га.

Действительный критерий экономической эффективности восстановления детали по существующей технологии представляет собой удельные издержки по отношению к ресурсу восстановленной детали:

$$K_{p(c.t.)}^{(3)} = (C_{1ocт}^{(3)} + C_{в(c.t.)}^{(3)} + E_{нд}^{(3)} K_{y(c.t.)}^{(3)} - C_{2ocт}^{(3)}) / T_{в(c.t.)}^{(p)}, \quad (5.2)$$

где $K_{p(c.t.)}^{(3)}$ – действительный критерий эффективности восстановления детали по существующей технологии, руб./га;

$C_{1ocт}^{(3)}$ – стоимость ремонтного фонда с учетом транспортных и заготовительных расходов по данной технологии, руб., $C_{1ocт}^{(3)} = 10,45$ руб.;

$C_{в(c.t.)}^{(3)}$ – себестоимость восстановления детали по существующей технологии, руб.;

$E_{нд}^{(3)}$ – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, $E_{нд}^{(3)} = 0,124$;

$K_{y(c.t.)}^{(3)}$ – удельные капитальные вложения в расчете на одну восстановленную деталь по существующей технологии, руб.;

$C_{2ocт}^{(3)}$ – остаточная стоимость восстановленной детали после ее использования, руб., $C_{2ocт}^{(3)} = 5$ руб.;

$T_{в(c.t.)}^{(p)}$ – ресурс детали, восстановленной по существующей технологии, га.

$$K_{эф}^{(3)} \geq K_{p(c.t.)}^{(3)}. \quad (5.3)$$

Если выполняется неравенство (5.3), то восстанавливать эту деталь по предлагаемой технологии экономически оправданно.

Существенное значение имеют удельные капитальные вложения в расчете на одну деталь $K_y^{(3)}$. Этот показатель определяли из отношения затрат на приобретение оборудования к годовой программе восстановления деталей:

$$K_y^{(3)} = K_3^{(3)} / N_{г.п.}^{(3)}, \quad (5.4)$$

где $K_3^{(э)}$ – капитальные затраты для осуществления технологии восстановления детали, руб.;

$N_{г.п.}^{(э)}$ – годовая программа восстановления деталей, $N_{г.п.}^{(э)} = 50000$ шт.

Остаточную стоимость после выработки доремонтного ресурса $C_{ост}^{(э)}$ рассчитывали исходя из закупочной цены металлолома:

$$C_{ост}^{(э)} = M_{дет}^{(э)} \Pi_{мл}^{(э)}, \quad (5.5)$$

где $M_{дет}^{(э)}$ – масса изношенной детали, кг, $M_{дет}^{(э)} = 0,76$ кг;

$\Pi_{мл}^{(э)}$ – цена металлолома, руб./кг, $\Pi_{мл}^{(э)} = 12,5$ руб./кг.

Стоимость ремонтного фонда с учетом транспортных и заготовительных расходов связана с его остаточной стоимостью:

$$C_{1ост}^{(э)} = 1,1 C_{ост}^{(э)}. \quad (5.6)$$

Восстановленная деталь после ее использования также обладает остаточной стоимостью, зависящей от цены новой детали:

$$C_{2ост}^{(э)} = 0,025 \Pi_{н}^{(э)}. \quad (5.7)$$

Себестоимость восстановления рабочего органа почвообрабатывающей или посевной техники $C_{в}^{(э)}$ определяли по формуле:

$$C_{в}^{(э)} = C_{1ост}^{(э)} + C_{р.м.}^{(э)} + 3_{зп}^{(э)} + H_{нр}^{(э)}, \quad (5.8)$$

где $C_{р.м.}^{(э)}$ – затраты на ремонтные материалы, руб.;

$3_{зп}^{(э)}$ – заработная плата, приходящаяся на восстановление одной детали, руб.;

$H_{нр}^{(э)}$ – накладные расходы, связанные с организацией производства и управлением, руб.

Затраты на ремонтные материалы, приходящиеся на одну деталь, рассчитывали как сумму произведений нормы расхода i -го материала на цену этого материала:

$$C_{\text{рм}}^{(3)} = \sum_{i=1}^n (g_i^{(3)} \Pi_i^{(3)}), \quad (5.9)$$

где n – количество наименований материалов, применяемых при восстановлении;

$g_i^{(3)}$ – норма расхода i -го материала, кг/дет.;

$\Pi_i^{(3)}$ – цена 1 кг i -го материала, руб./кг.

Норма расхода материала:

$$g_i^{(3)} = S_{\text{в.п.}}^{(3)} h^{(3)} \gamma_i^{(3)} K_{\text{п.м.}}^{(3)}, \quad (5.10)$$

где $S_{\text{в.п.}}^{(3)}$ – площадь восстанавливаемой поверхности детали, м^2 ;

$h^{(3)}$ – толщина покрытия, м;

$\gamma_i^{(3)}$ – плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$K_{\text{п.м.}}^{(3)}$ – коэффициент, учитывающий технологические потери материала, $K_{\text{п.м.}}^{(3)} = 1,1 \dots 1,4$.

Зарботную плату, приходящуюся на восстановление одной детали, определяют как произведение основной заработной платы рабочих на соответствующие коэффициенты:

$$З_{\text{зп}}^{(3)} = K_{\text{п}}^{(3)} K_{\text{зпд}}^{(3)} K_{\text{с}}^{(3)} З_{\text{осн}}^{(3)}, \quad (5.11)$$

где $K_{\text{п}}^{(3)}$ – коэффициент, учитывающий премиальную доплату, $K_{\text{п}}^{(3)} = 1,2 \dots 1,4$;

$K_{\text{зпд}}^{(3)}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату,

$K_{\text{зпд}}^{(3)} = 1,1 \dots 1,5$;

$K_{\text{с}}^{(3)}$ – коэффициент, учитывающий отчисления в фонды социального страхования, $K_{\text{с}}^{(3)} = 1,262$;

$З_{\text{осн}}^{(3)}$ – основная заработная плата рабочих, руб.

Основную заработную плату рабочих рассчитывали как сумму произведений норм времени выполнения операций технологического процесса восстановления (в расчете на одну деталь) на часовые тарифные ставки, соответствующие разря-

дам выполняемых операций:

$$Z_{\text{осн}}^{(3)} = 0,017 \sum_{i=1}^q (t_{\text{ни}}^{(3)} C_{\text{pi}}^{(3)}), \quad (5.12)$$

где q – количество операций в технологическом процессе восстановления;

$t_{\text{н1}}^{(3)}, t_{\text{н2}}^{(3)}, \dots, t_{\text{ни}}^{(3)}$ – нормы времени на выполнение операций технологического процесса восстановления в расчете на одну деталь, мин;

$C_{\text{p1}}^{(3)}, C_{\text{p2}}^{(3)}, \dots, C_{\text{pi}}^{(3)}$ – часовые тарифные ставки, соответствующие разрядам выполняемых операций, руб./ч;

Накладные расходы $H_{\text{нр}}^{(3)}$, связанные с организацией производства и управлением:

$$H_{\text{нр}}^{(3)} = 23 Z_{\text{осн}}^{(3)}. \quad (5.13)$$

Для рейтинговой технико-экономической оценки технологических процессов восстановления рабочего органа почвообрабатывающей или посевной техники необходимо подсчитать значение действительного критерия экономической эффективности восстановления предлагаемой и существующей технологии восстановления этих деталей. Так как затраты на восстановление этих рабочих органов и величина обеспечиваемого им ресурса различны для каждой технологии восстановления, то экономически выгоднее применять ту технологию, у которой действительный критерий экономической эффективности восстановления меньше:

$$K_{\text{р(п.т.)}}^{(3)} = (C_{\text{лост}}^{(3)} + C_{\text{в(п.т.)}}^{(3)} + E_{\text{н}}^{(3)} K_{\text{у(п.т.)}}^{(3)} - C_{\text{2ост}}^{(3)}) / T_{\text{в(п.т.)}}^{(p)}, \quad (5.14)$$

где $K_{\text{р(п.т.)}}^{(3)}$ – действительный критерий эффективности восстановления детали по предлагаемой технологии, руб./га;

$C_{\text{в(п.т.)}}^{(3)}$ – себестоимость восстановления детали по предлагаемой технологии, руб.;

$K_{\text{у(п.т.)}}^{(3)}$ – удельные капитальные вложения в расчете на одну восстановленную деталь по предлагаемой технологии, руб.;

$T_{\text{в(п.т.)}}^{(p)}$ – ресурс детали, восстановленной по предлагаемой технологии, га.

$$K_{p(c.t.)}^{(э)} \geq K_{p(п.т.)}^{(э)}. \quad (5.15)$$

Внедрение нового технологического процесса для восстановления рабочего органа почвообрабатывающей или посевной техники на предприятии технического сервиса необходимо также рассматривать с позиции получения при этом прибыли. Планируемая балансовая прибыль $\Pi_B^{(э)}$ является весьма важным экономическим показателем, который определяется нормой прибыли и себестоимостью восстановления:

$$\Pi_B^{(э)} = 0,01 N_{пр}^{(э)} C_B^{(э)}, \quad (5.16)$$

где $N_{пр}^{(э)}$ – норма прибыли, %, $N_{пр}^{(э)} = 20$ %.

Величину нормы прибыли брали не ниже ставки рефинансирования (7,5 %), установленной Центральным банком РФ, умноженной на коэффициент гарантии получения положительного эффекта, т. е. на 2.

Минимальную и при этом рентабельную цену продажи восстановленной детали $\Pi_{Bmin}^{(э)}$ определяли по формуле:

$$\Pi_{Bmin}^{(э)} = C_B^{(э)} + \Pi^{(э)}. \quad (5.17)$$

Годовой экономический эффект $\mathcal{E}_r^{(э)}$ при внедрении процесса восстановления лап культиваторов определяли с учетом ресурсов деталей, восстановленных по предлагаемой и существующей технологиям, а также годовой программы их восстановления [311, 312]:

$$\mathcal{E}_r^{(э)} = \left[\frac{T_{в(п.т.)}^{(р)}}{T_{в(с.т.)}^{(р)}} \left(C_{в(с.т.)}^{(э)} + E_{нд}^{(э)} \frac{K_{з(с.т.)}^{(э)}}{N_{г.п.}^{(э)}} \right) - \left(C_{в(п.т.)}^{(э)} + E_{нд}^{(э)} \frac{K_{з(п.т.)}^{(э)}}{N_{г.п.}^{(э)}} \right) \right] N_{г.п.}^{(э)}, \quad (5.18)$$

где $K_{з(с.т.)}^{(э)}$, $K_{з(п.т.)}^{(э)}$ – соответственно капитальные затраты для существующей и предлагаемой технологий восстановления детали, руб.

Срок окупаемости инвестиций $C_{ок(п.т.)}^{(э)}$:

$$C_{ок(п.т.)}^{(э)} = 1/E_{нд}^{(э)}. \quad (5.19)$$

Данные расчетов технико-экономической эффективности представлены в таблице 5.5.

Сравнив значения действительных критериев эффективности восстановления культиваторной лапы борированием, наплавкой в жидком теплоносителе и газотермической наплавкой [67], установили, что этот критерий у предлагаемых технологий в 1,57–1,72 раза меньше чем у существующего технологического процесса. Следовательно, технологические процессы восстановления культиваторной лапы борированием и наплавкой в жидком теплоносителе предпочтительнее с технико-экономической точки зрения.

Таблица 5.5 – Показатели технико-экономической эффективности

| Показатель | Обозначение | Газотермическая наплавка | Борирование | Наплавка в жидком теплоносителе |
|---|-----------------------|-----------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Удельные капитальные вложения, руб./шт. | $K_y^{(э)}$ | 71,51 | 152,1 | 152,11 |
| Годовая программа восстановления, шт. | $N_{г.п.}^{(э)}$ | 50000 | 50000 | 50000 |
| Себестоимость восстановления детали, руб. | $C_B^{(э)}$ | 116,82 | 149,93 | 138,71 |
| Цена продажи, руб. | $C_{B\min}^{(э)}$ | 140,18 | 179,92 | 169,1 |
| Прибыль, руб. | $P_B^{(э)}$ | 23,36 | 29,99 | 30,39 |
| Ресурс восстановленных деталей, га | $T_B^{(р)}$ | 26 | 48 | 46 |
| Действительный критерий экономической эффективности восстановления, руб./га | $K_p^{(э)}$ | 6,65 | 3,87 | 4,23 |
| Годовой экономический эффект, тыс. руб. | $\mathcal{E}_г^{(э)}$ | – | 2650 | 2620 |
| Срок окупаемости инвестиций, лет | $C_{ок(п.т.)}^{(э)}$ | – | 8 | – |

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

5.7 Выводы по главе

1. Обоснован состав теплоносителя, состоящий из следующих компонентов:

тетраборат натрия – 52–58 %; борный ангидрид – 14–18 %; поташ – 15–17 %; метасиликат натрия – 5–7 %; фторцирконат калия – 4–5 %. Проанализирован каждый компонент с технологической точки зрения. Установлено, что предлагаемый состав теплоносителя позволяет проводить упрочнение (электролизное борирование и закалку) и восстановление (наплавку) деталей сельскохозяйственной техники с обеспечением высокого уровня качества поверхностного слоя и стабильных характеристик насыщающей среды. При этом практически отсутствует разъедающее действие теплоносителя на стальную поверхность. Определено, что выгорание компонентов предлагаемого состава в 1,3–1,35 раза меньше, чем у существующего. Токсичные выделения при работе с предлагаемым теплоносителем отсутствуют, а продолжительность его эксплуатации без замены составляет 500 ч.

2. Установлено, что образующаяся жидкая фаза обеспечивает возможность протекания наплавки по принципу перегруппировки и растворения-осаждения. Она заполняет зазоры между тугоплавкими частицами, становясь своего рода смазкой, и способствует взаимному перемещению частиц наплавляемого материала, приводящее к повышению плотности покрытия. Под влиянием капиллярного давления происходит перегруппировка частиц, которая сопровождается уменьшением свободной поверхности жидкой фазы. Капиллярное давление действует как всестороннее сжатие, так как жидкая фаза в объеме слоя распределена равномерно. Определено, что расплавленный металлопорошок ПР-Н67Х18С5Р5 обладает хорошей смачивающей способностью – 0,7...0,8 (максимальная смачиваемость – 1,0), при этом плавление металлопорошка ПР-Н67Х18С5Р5 в предлагаемом теплоносителе практически не приводит к изменению его химического состава (за исключением флюсующих компонентов бора и кремния). Расчетное значение толщины наплавленного слоя практически совпадает с экспериментально определенным ее значением (отклонение не превышает 5 %).

3. Разработанная конструкция печи-ванны позволяет изменять скорость конвекции теплоносителя при проведении электролизного борирования или наплавки от 0,1 до 0,26 м/с, что повышает интенсивность этих процессов. При электролизном борировании такое повышение скорости позволяет в 2 раза увеличить толщину упрочненного слоя. Регулировку температуры в ванне осуществляют посредством управляющего действия линейно-релейной системы, которая обеспечивает подачу необходимого количества энергии.

4. Особенности разработанных технологий восстановления и упрочнения стрельчатых лап электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе заключаются в следующем. Изношенную часть лезвия лапы культиватора удаляют, дополнительную компенсирующую деталь изготавливают штамповкой из полосовой стали. В случае использования винтового крепления к остову лапы на ней выполняют сквозные продолговатые отверстия, а на остова лапы нарезают резьбовые отверстия. При сварке такие отверстия не делают. Дополнительную компенсирующую деталь подвергают электролизному борированию либо с тыльной стороны, либо с обеих сторон лезвия. Такие же пластины наплавляют хромоникелевым металлопорошком ПР-Н67Х18С5Р5 с тыльной стороны лезвия.

5. При эксплуатационных испытаниях рабочие органы на культиватор устанавливали следующим образом: упрочненные двусторонним борированием размещали в зоне перемещения движителей трактора и опорных колес; упрочненные односторонним борированием – в первом ряду культиватора; упрочненные наплавкой в жидком теплоносителе – во втором ряду. Установлено, что ресурс укомплектованного таким образом культиватора увеличился в 1,8 раза по сравнению с культиваторами, укомплектованными лапами, восстановленными по существующей технологии. При этом каждая экспериментальная лапа обработала 47 га, полностью выработав ресурс, а лапы, восстановленные по существующей технологии, – по 26 га. При этом ресурс выработали лапы,двигающиеся по следам движителей и опорных колес, а у остальных оставался запас ресурса от 4 до 6 га. Результаты ресурсных эксплуатационных испытаний подтвердили адекватность расчетной модели его прогнозирования. Расчетное значение превышения ресурса – 1,95 раза, а фактически полученное значение – 1,8 раза (погрешность составила 8 %).

6. Годовой экономический эффект при восстановлении культиваторных лап электролизным борированием и наплавкой в жидком теплоносителе при годовой программе 50000 шт. – 2650 тыс. руб. При этом действительные критерии эффективности восстановления культиваторной лапы борированием, наплавкой в жидком теплоносителе и газотермической наплавкой в 1,57–1,72 раза меньше, чем у существующего технологического процесса. Таким образом, технологические процессы восстановления культиваторной лапы борированием и наплавкой в жидком теплоносителе предпочтительнее с технико-экономической точки зрения.

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 прове-

дения 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, борид 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 практически 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 абразив-

ного 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Завражнова, А. И.* Современные проблемы науки и производства в агроинженерии / А. И. Завражнова. – СПб. : Лань, 2013. – 496 с.
2. *Лялякин, В. П.* Состояние и перспективы упрочнения и восстановление деталей почвообрабатывающих машин сварочно-наплавочными методами / В. П. Лялякин, С. А. Соловьев, А. В. Аулов // Сварочное производство – 2014. – № 7. – С. 96–104.
3. *Полухин, А. А.* Организационно-экономический основы технического переоснащения сельского хозяйства / А. А. Полухин. – Орел: Картуш, 2014. – 330 с.
4. *Тарасова, С. В.* Современное состояние машинно-тракторного парка в АПК (Технические науки: тенденции, перспективы и технологии развития) / С. В. Тарасова, И. А. Бородина // Сб. науч. трудов по итогам Междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2015. – № 2. – С. 228.
5. Государственная программа развития сельского хозяйства и регулирования рынков сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013 –2020 годы. Утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 14.07.2012 г. № 717. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. – 204 с.
6. Доктрина продовольственной безопасности Российской Федерации. Утв. Указом Президента Российской Федерации от 30 января 2010 г. № 120 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://old.mcx.ru/documents/document/v7_show/14857.133.htm
7. *Лачуга, Ю. Ф.* Стратегия машинно-технологической модернизации сельского хозяйства России на период до 2020 года / Ю. Ф. Лачуга. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2009. – 80 с.
8. *Лялякин, В. П.* Концепция развития ремонта техники на базе восстановления и упрочнения деталей / В. П. Лялякин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – № 6. – С. 2–7.
9. *Усуфов, М. М.* Перспективы развития автосервиса / М. М. Усуфов // Техно-технологические проблемы сервиса. – 2012. – № 1. – С. 72–77.

10. *Чеботарев, М. И.* Проблемы и перспективы развития технического сервиса АПК / М. И. Чеботарев, И. Г. Савин // Научный журнал Куб ГАУ. – 2014. – № 97 (03). – С. 564–592.
11. *Рудик, Ф. Я.* Проблемы организации технического сервиса в Саратовской области / С. А. Богатырев, А. А. Морозов, Ф. Я. Рудик // Проблемы научного обеспечения и экономической эффективности орошаемого земледелия в рыночных условиях : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Волгоград, 2001. – С. 205–206.
12. Целесообразность восстановления и пути повышения ресурса режущего инструмента промышленных мясорубок / Ф. Я. Рудик [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 115. – С. 128–133.
13. *Величко, С. А.* Экономическая эффективность ремонта гидроагрегатов методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, А. В. Мартынов // Сельский механизатор. – 2018. – № 1. – С. 18–20.
14. *Величко, С. А.* Ремонт сопряжения «поршень – гильза» силовых гидроцилиндров / С. А. Величко, П. В. Чумаков, М. Г. Тятюшкина // Сельский механизатор. – 2018. – № 1. – С. 38–40.
15. *Буренко, Л. А.* Ремонт сельскохозяйственных машин / Л. А. Буренко, В. Н. Винокуров. – М.: Росагропромиздат, 1991. – 298 с.
16. *Лялякин, В. П.* Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники / В. П. Лялякин // Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК : матер. IX междунар. конф. «ИнформАгро – 2017», 7–9 июня 2017 г. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2017. – С. 473–477.
17. Инновационные направления развития ремонтно-эксплуатационной базы для сельскохозяйственной техники / С. А. Соловьев [и др.]. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2014. – 160 с.
18. *Рассказов, М. Я.* Восстановлению детали – индустриальную основу / М. Я. Рассказов // Техника в сельском хозяйстве. – 1978. – № 11. – С. 42–45.
19. *Черепанов, С. С.* Технические и экономические основы восстановления деталей / С. С. Черепанов, В. П. Андреев // Техника в сельском хозяйстве. – 1979. – № 7. – С. 15–20.

20. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин / В. И. Черноиванов. – М. : Агропромиздат, 1989. – 336 с.

21. Концепция модернизации инженерно-технической системы сельского хозяйства России на период до 2020 года / В. И. Черноиванов [и др.]. – М. : ФГБНУ «Росинформагротех», 2010. – 46 с.

22. Водяников, В. Т. Практикум по организации и управлению производством на сельскохозяйственных предприятиях / В. Т. Водяников, А. И. Лысюк ; под ред. В. Т. Водяникова. – М. : Колос, 2005. – 448 с.

23. Иофинов, С. А. Эксплуатация машинно-тракторного парка / С. А. Иофинов, Г. П. Лышко. – М. : Колос, 1984. – 340 с.

24. Лынов, А. М. Земледелие с почвоведением / А. М. Лынов, А. А. Коротков, Г. И. Бездырев. – М. : Агропромиздат, 1990. – 464 с.

25. Гапич, Д. С. Структурирование функциональных зон рабочих органов чизельных орудий / Д. С. Гапич, В. А. Моторин, Д. Б. Курбанов // Орошаемое земледелие. – 2019. – № 4. – С. 51–54.

26. Соловьев, С. А. Влияние расположения стрельчатых лап культиваторов посевных комплексов на их износ / С. А. Соловьев, И. В. Козарез, С. А. Феськов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 11. – С. 40–42.

27. Кащеев, В. Н. Абразивное разрушение твердых тел / В. Н. Кащеев. – М. : Наука, 1970. – 248 с.

28. Кащеев, А. А. Повышение износостойкости деталей почвообрабатывающих машин / А. А. Кащеев, Г. В. Гуднов // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 6. – С. 57–58.

29. Крагельский, И. В. Основы расчета на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 357 с.

30. Влияние прочности компонентов электрохимических композитов на их износостойкость / Г. В. Гурьянов [и др.] // Труды Кубанского государственного аграрного университета. – 2013. – № 43. – С. 303–306.

31. *Кисель, Ю. Е.* Повышение износостойкости электрохимических покрытий / Ю. Е. Кисель, А. Н. Лысенко, С. П. Симохин // Сельский механизатор. – 2016. – № 10. – С. 36–37.
32. *Кисель, Ю. Е.* Повышение износостойкости деталей машин композиционными покрытиями с включением полиэпоксидов / Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2018. – № 3. – С. 13–16.
33. *Севернев, М. М.* Износ деталей сельскохозяйственных машин / М. М. Севернев, Г. П. Каплун. – Л. : Колос, 1972. – 288 с.
34. *Тененбаум, М. М.* Износостойкость и долговечность сельскохозяйственных машин / М. М. Тененбаум, С. Н. Шамшетов. – Нукус : Каракалпакстан, 1986. – 149 с.
35. *Хрущов, М. М.* Абразивное изнашивание / М. М. Хрущов, М. А. Бабичев. – М. : Наука, 1970. – 251 с.
36. *Хрущов, М. М.* Закономерности абразивного изнашивания / М. М. Хрущов // Износостойкость. – М. : Наука, 1975. – С. 5–28.
37. *Воловик, Е. Л.* Справочник по восстановлению деталей / Е. Л. Воловик. – М. : Колос, 1981. – 351 с.
38. *Ерохин, М. Н.* К вопросу об импортозамещении рабочих органов зарубежных почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – Т. 121. – С. 206–212.
39. *Рудик, Ф. Я.* Повышение износостойкости и прочности на изгиб ножей к центробежным свеклорезкам / Ф. Я. Рудик, С. А. Бредихин // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2019. – Т. 13. – № 4. – С. 58–64.
40. Повышение износостойкости и усталостной прочности режущих инструментов перерабатывающей отрасли / Ф. Я. Рудик [и др.] // Вестник машиностроения. – 2015. – № 4. – С. 43–47.
41. *Рудик, Ф. Я.* Повышение ресурса корпусных деталей бандажированием / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, Л. В. Павлович // Технический сервис машин. – 2019. – № 4 (137). – С. 136–143.

42. *Гапич, Д. С.* Повышение износостойкости рабочих органов почвообрабатывающих машин / Д. С. Гапич, Л. В. Костылева // Стратегическое развитие АПК и сельских территорий РФ в современных международных условиях : матер. междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию Победы в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг. – Волгоград, 2015. – С. 64-67.

43. *Козаровец, Н. В.* Инновационные технологии упрочнения деталей сельскохозяйственной техники / Н. В. Козаровец, Г. Ф. Бетень, Г. И. Анискович // Модернизация сельскохозяйственного производства на базе инновационных машинных технологий и автоматизированных систем : сб. докл. 12 Междунар. науч.-техн. конф., 10–12 сентября 2012 г. – Углич, 2012. – С. 219–228.

44. *Легун, В. А.* Восстановленные детали – как новые / В. А. Легун // Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – № 4. – С. 53–55.

45. *Денисов, А. С.* Повышение межремонтного ресурса коленчатых валов дизелей, восстановленных наплавкой под слоем флюса / А. С. Денисов, А. Р. Асоян, Б. Ф. Тугушев // Мир транспорта и технологических машин. – 2011. – № 4 (35). – С. 9–13.

46. Методы повышения долговечности деталей машин / В. Н. Ткачев [и др.] // – М., Машиностроение, 1971. – 272 с.

47. *Авдеев, М. В.* Технология ремонта машин и оборудования / М. В. Авдеев, Е. И. Воловик, И. Е. Ульман. – М. : Агропромиздат, 1986. – 248 с.

48. *Воловик, Е. Л.* Резервы ремонтного производства / Е. Л. Воловик // Техника в сельском хозяйстве. – 1980. – № 1. – С. 53–55.

49. *Ахметшин, Т. Ф.* Прогнозирование долговечности лезвий стрельчатых лап культиваторов / Т. Ф. Ахметшин // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2014. – № 5 (49). – Ч. 1. – С. 70–74.

50. *Бартнев, И. М.* изнашивающая способность почв и ее влияние на долговечность рабочих органов почвообрабатывающих машин / И. М. Бартнев, Е. В. Поздняков // Лесотехнический журнал. – 2013. – № 3. – С. 114–122.

51. *Ерохин, М. Н.* Прогнозирование ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин / М. Н. Ерохин, В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Сельский механизатор. – 2015. – № 11. – С. 6–9.

52. *Ишков, А. В.* Влияние технологических факторов на износ поверхностно упрочненных стрельчатых лап / А. В. Ишков, Н. Т. Кривочуров // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2010. – № 10. – С. 92–96.

53. *Гапич, Д. С.* Повышение износостойкости рабочих органов чизельных орудий за счет рационального структурирования металлографической структуры высокоуглеродистых сплавов / Д. С. Гапич, В. А. Моторин, Д. Б. Курбанов // Орошаемое земледелие. – 2019. – № 4. – С. 55–58.

54. *Гапич, Д. С.* Энергетические и качественные показатели работы культиваторного МТА в режиме автоколебаний рабочих органов / Д. С. Гапич, С. Д. Фомин, О. А. Денисова // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 1. – № 4 (26). – С. 17–20.

55. *Гапич, Д. С.* Почвообрабатывающее орудие с рабочими органами принудительного вибрационного типа / Р. А. Косульников, Д. С. Гапич, С. Ю. Фандеев // Развитие АПК на основе принципов рационального природопользования и применения конвергентных технологий / Волгогр. гос. аграр. ун-т. – Волгоград, 2019. – Т. 2. – С. 148–153.

56. Проблемные вопросы повышения энергоэффективности МТА с упруго закрепленными рабочими органами [почвообрабатывающие агрегаты] / Д. С. Гапич [и др.] // Изв. Нижневолж. агроунив. комплекса. Наука и высш. проф. образование. – Волгоград, 2018. – № 1(49). – С. 312–318.

57. *Величко, С. А.* Точечная оценка параметров распределения доремонтного ресурса импортных гидрораспределителей сельхозтехники / С. А. Величко, А. В. Мартынов // Тракторы и сельхозмашины. – 2015. – № 3. – С. 47–49.

58. *Величко, С. А.* Пути повышения межремонтного ресурса силовых гидроцилиндров / С. А. Величко, П. В. Сенин, П. В. Чумаков // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2015. – № 4. – С. 36–41.

59. Рабинович, А. Ш. Анализ изнашивания культиваторных лап / А. Ш. Рабинович, В. Н. Винокуров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1963. – № 6. – С. 27–29.
60. Сидоров, С. А. Технический уровень и ресурс рабочих органов сельхозмашин / С. А. Сидоров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 3. – С. 29–33.
61. Wahl, H. Verschleissprobleme im Braunkohlinbergbau / H. Wahl. – Sunkohle, Wärme und Energie, 1971, Bd. No. 5/6, S.75–87.
62. Тененбаум, М. М. Методика установления предельных состояний рабочих органов почвообрабатывающих машин. Общие положения / М. М. Тененбаум. – М. : ВИСХОМ, 1985. – 33 с.
63. Тененбаум, М. М. Сопротивление абразивному изнашиванию. – М. : Машиностроение, 1976. – 271 с.
64. Ткачев, В. Н. Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин / В. Н. Ткачев. – М. : Машиностроение, 1971. – 264 с.
65. Wellinger, K. Heitverschleiss, Spülvezschleiss, Stahlverschleiss unter der Wirkung von körnigen Stoffen / K. Wellinger, H. Vetz. VDI – Forschungsheft 449, 1995, Ausgabe B, Bd. 21, 40 S.
66. Феськов, С. А. Компьютерные технологии при оценке линейных износов / С. А. Феськов, О. В. Федукова // Бюллетень научных работ Брянского филиала МИИТ. – 2012. – № 2. – С. 34–37.
67. Юшков, В. В. Поточно-механизованная линия восстановления лап культиваторов / В. В. Юшков, А. Г. Квакин, А. А. Князев // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 8. – С. 51–52.
68. Katavič, I. Untersuchungen über die Beinflussung Jefüges karbidischer jusseisen bei abrasiver Verschleissespruchung / I. Katavič // Wear, 1978, Vol. 48, S. 35–53.
69. Новиков, В. С. Повышение ресурса рабочих органов машин для основной обработки почвы / В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Основные направления раз-

вития техники и технологий в АПК : 7-я Всерос. науч.-практ. конф. – М., 2016. – С. 288–293.

70. *Новиков, В. С.* Повышение долговечности стрелчатых лап культиваторов / В. С. Новиков, Д. И. Петровский // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В. П. Горячкина. – 2017. – № 4. – С. 49–55.

71. *Петровский, Д. И.* К вопросу о повышении долговечности рабочих органов почвообрабатывающих машин / Д. И. Петровский, В. С. Новиков // Инновационные направления развития технологии и технических средств механизации сельского хозяйства : матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию кафедры сельскохозяйственных машин агроинженерного факультета имени императора Петра I. – Воронеж, 2015. – Ч. 2. – С. 125–129.

72. *Горячкин, В. П.* Собрание сочинений / В. П. Горячкин. – М. : Колос, 1968. – Т. 2. – 445 с.

73. Методическое указание к лабораторным работам по изучению конструкции и регулировок машин для обработки почвы / сост. Б. Н. Емелин, А. Г. Рыбалко, А. В. Дружкин. – Саратов, 1994. – 83 с.

74. *Желиговский, В. А.* Элементы теории почвообрабатывающих машин и механической технологии сельскохозяйственных материалов / В. А. Желиговский. – Тбилиси, 1960. – 147 с.

75. *Синеоков, Г. Н.* Теория и расчёт почвообрабатывающих машин / Г. Н. Синеоков, И. М. Панов. – М. : Машиностроение, 1977. – 328 с.

76. *Черноиванов, В. И.* Сельскохозяйственная техника : каталог / В. И. Черноиванов. – М. : ГОСНИТИ, 1991. – Т. 1. – 364 с.

77. *Красниченко, А. В.* Справочник конструктора сельскохозяйственных машин : в 2 т. / под ред. А. В. Красниченко. – М. : Машиностроение, 1961. – 546 с.

78. *Анурьев, В. И.* Справочник конструктора-машиностроителя : в 3 т. / В. И. Анурьев. – М. : Машиностроение, 1982.

79. *Рахштадт, А. Г.* Справочник металлиста / А. Г. Рахштадт. – М. : Машиностроение, 1976. – 717 с.

80. Рабинович, А. Ш. Повышение работоспособности и сроков службы режущих рабочих органов машин путем обеспечения их самозатачивания / А. Ш. Рабинович // Повышение надежности и долговечности сельскохозяйственных машин. – М. : ГОСНИТИ, 1964. – С. 342–553.

81. Ткачев, В. Н. Повышение долговечности почвообрабатывающих рабочих органов / В. Н. Ткачев, Н. В. Казинцев, А. В. Загребин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 12. – С. 46.

82. Инаекян, С. А. Повышение ресурса культиваторных стрельчатых лап / С. А. Инаекян, П. А. Рогозников, В. А. Цепулин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1991. – № 10. – С. 44–45.

83. Тищ, М. Ю. Повышение износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин : обзорная информация / М. Ю. Тищ, В. Н. Федоров, Е. Ю. Покровская. – М. : ЦНИИТЭИ Тракторосельхозмаш, 1986. – 53 с.

84. Лебедев, К. А. Повышение ресурса культиваторных лап / К. А. Лебедев, А. Л. Лебедев // Научное обозрение. – 2015. – № 3. – С. 50–55.

85. Новиков, В. С. Упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. С. Новиков. – М., 2013. – 112 с.

86. Сидоров, С. А. Повышение ресурса почвообрабатывающих органов наплавочными сплавами / С. А. Сидоров, А. И. Сидоров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2003. – № 9. – С. 20–22.

87. Сидоров, С. А. Условия резания почвы лезвием с образующимся уплотненным ядром / С. А. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 5. – С. 8–11.

88. Бахтин, П. У. Физико-механические и технологические свойства почв / П. У. Бахтин. – М. : Знание, 1971. – 64 с.

89. Рабочев, И. С. Уменьшение отрицательного воздействия мобильных агрегатов на почву / И. С. Рабочев, П. У. Бахтин // Вестник сельскохозяйственной науки. – 1979. – № 4. – С. 10–13.

90. Растворова, О. Г. Физика почв / О. Г. Растворова. – Ленинград, 1983. – 194 с.

91. *Русанов, В. А.* Воздействие движителей тракторов на почву и ее плодородие / В. А. Русанов, А. Н. Садовников, Е. С. Юшков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1993. – № 3. – С. 3–8.

92. *Русинов, А. В.* Изменение физико-механических свойств мелиоративных почв в результате механического воздействия / А. В. Русинов, В. В. Слюсаренко // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях : матер. II Междунар. науч.-практ. конф. – Саратов, 2015. – С. 30–33.

93. *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.

94. *Савин, А. М.* Особенности воздействия на почву колесных и гусеничных движителей тракторов / А. М. Савин // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1989. – № 5. – С. 10–12.

95. *Слюсаренко, В. В.* Агрэкологическая совместимость энергонасыщенных мобильных машин с почвой / В. В. Слюсаренко. – Саратов, 2000. – 309 с.

96. *Старовойтов, С. И.* Физические аспекты суглинистой почвы / Я. П. Лобачевский, С. И. Старовойтов. – Брянск : Изд-во Брянского ГАУ, 2015. – 92 с.

97. *Gill, W. R.* Economic Assessment of Soil Compaction // Compaction of Agricultural Soil / W. R. Gill // ASAE. – 1971. – P. 431–458.

98. *Murrell, L. J.* What the Consultant Should Know about Compaction / L. J. Murrell // Ag. Consultant and Fieldman. – 1984. – Vol. 40. – No. 3. – P. 16–18.

99. Обоснование влияния тягового сопротивления на параметры износа стрельчатых рабочих органов / В. И. Беляев [и др.] // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2009. – № 10 (60). – С. 92–95

100. *Гапич, Д. С.* Фурье-анализ экспериментальных осциллограмм тягового сопротивления рабочего органа культиваторного МТА / Д. С. Гапич, Е. В. Ширяева, О. А. Денисова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. Наука и высшее профессиональное образование. – 2015. – № 3 (39). – С. 151–154.

101. *Гапич, Д. С.* Теоретико-экспериментальный метод определения массово-инерционных показателей рабочего органа почвообрабатывающего орудия / Д. С. Га-

пич, Р. А. Косульников, С. А. Чумаков // Актуальные направления научных исследований в АПК : от теории к практике : матер. национальной науч.-практ. конференции / ФГОУ ВО «Волгоградский государственный аграрный университет». – Волгоград, 2017. – С. 28–33.

102. *Винокуров, В. Н.* Результаты исследования изнашивающей способности почв не черноземной зоны / В. Н. Винокуров, В. А. Белян, А. И. Кутепов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1975. – № 1. – С. 26–28.

103. *Buylov, V. N.* Identifying Reasons for Failure of Soil Processing Units of Working Bodies / V. N. Buylov [et al.] // 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.

104. *Огрызков, Е. П.* Агротехнические основы абразивного изнашивания лезвий лемехов / Е. П. Огрызков, В. Е. Огрызков, П. В. Огрызков // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2002. – № 11. – С. 44–45.

105. *Шитов, А. Н.* Влияние различных факторов на изнашивание рабочих органов почвообрабатывающих машин / А. Н. Шитов, А. А. Веденеев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2002. – № 7. – С. 29–33.

106. *Ожегов, Н. М.* Методы снижения изнашивающей способности почвы при трении деталей почвообрабатывающих машин / Н. М. Ожегов, Д. А. Капошко, С. И. Будко // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2009. – № 13. – С. 132–133.

107. *Винокуров, В. Н.* Исследование, разработка и внедрение в производство самозатачивающихся рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий / В. Н. Винокуров. – М., 2009. – 311 с.

108. *Винокуров, В. Н.* Определение выбраковочных параметров режущих элементов рабочих органов почвообрабатывающих машин и орудий / В. Н. Винокуров // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1976. – № 10. – С. 23–25.

109. *Балан, В. П.* Точечное упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. П. Балан, В. Н. Ключенко, В. И. Олисенко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 2. – С. 44–45.

110. *Батищев, А. Н.* Обоснование рационального способа восстановления деталей / А. Н. Батищев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1992. – № 9–12. – С. 30–31.

111. *Бочаров, А. П.* Упрочнение почворезущих деталей / А. П. Бочаров, В. А. Сероватов, В. А. Кириевский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1989. – № 3. – С. 47.

112. *Михальченков, А. М.* Эффективность импортозамещающих технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей почвообрабатывающих орудий / А. М. Михальченков, С. А. Соловьев, М. А. Михальченкова // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – № 11. – С. 17–22.)

113. *Михальченков, А. М.* Восстановление стрелчатых лап / А. М. Михальченков, С. А. Феськов, Н. А. Якушенко // Сельский механизатор. – 2014. – № 3. – С. 24–25.

114. *Подкатилов, К. Е.* К вопросу самозатачивания культиваторных лап с верхним упрочнением твердым сплавом / К. Е. Подкатилов // Проектирование рабочих органов уборочных, почвообрабатывающих сельскохозяйственных машин, агрегатов для кормопроизводства : межвуз. сб. / ВИСХОМ. – Ростов-н/Д., 1982. – С. 98–104.

115. *Шепелев, Ю. С.* Наплавка рабочих органов почвообрабатывающих машин / Ю. С. Шепелев, А. И. Любич, А. А. Аникин // Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – № 7. – С. 51–52.

116. *Сенчишин, В. С.* Современные методы наплавки рабочих органов почвообрабатывающих и уборочных сельскохозяйственных машин (обзор) / В. С. Сенчишин, Ч. В. Пулька // Автоматическая сварка. – 2012. – № 9. – С. 43–54.

117. *Сидоров, А. И.* Восстановление деталей машин напылением и наплавкой / А. И. Сидоров. – М. : Машиностроение, 1987. – 289 с.

118. *Хасуи, А.* Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки. – М., 1985. – 231 с.

119. Пат. 2107601 Российская Федерация, МКП6 В 23 К 35/362. Флюс для электродуговой сварки / Буйлов В. Н., Деев В. А., Петряков В. К., Богатырев С. А.

; заявитель и патентообладатель НПЦ «Волгоагротехника». – № 96111652/02 ; заявл. 11.06.96 ; опубл. 27.03.98, Бюл. № 9.

120. *Черновол, М. И.* Газовая наплавка композиционных покрытий / М. И. Черновол // Сварочное производство. – 1991. – № 3 – С. 7–9.

121. *Деев, В. А.* Методика расчета остаточных напряжений в наплавленных деталях / В. А. Деев, В. И. Дроздов // Автоматическая сварка. – 1972. – № 5. – С. 23–27.

122. *Деев, В. А.* Оценка циклической прочности наплавленных цилиндрических деталей / В. А. Деев, Л. Д. Линкин // Вестник машиностроения. – 1975. – № 17. – С. 11–13.

123. *Деев, В. А.* Твердости и остаточные напряжения в цилиндрических деталях, наплавленных износостойкими материалами / В. А. Деев, Л. Д. Линкин // Сварочное производство. – 1976. – № 7. – С. 33–36.

124. *Ожегов, Н. М.* Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин на основе совершенствования наплавочных технологий / Н. М. Ожегов, В. А. Ружьев, Д. А. Капошко // Труды ГОСНИТИ. – 2015. – С. 191–197.

125. *Шило, И. Н.* Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, Г. Ф. Бетенья, Л. А. Маринич. – Минск : БГАТУ, 2010. – 319 с.

126. *Lehmann, H.* Auftragsschweißen von Packerscheiben / H. Lehmann, J. Herrmann // ZIS-Mitt. – 1979. – No. 8. – S. 826–840.

127. *Trivedi, R.* Morphological Stability of a Planar Interface under Rapid Solidification Condition / R. Trivedi, W. Kurz // Acta Metall. – 1986. – Vol. 34. – P. 1663–1670.

128. *Kurz, W.* Fundamentals of Solidification / W. Kurz, D. J. Fisher. Aedermannsdorf : Trans Tech Publication, 1992. – 305 p.

129. Михальченков, А. М. Восстановление деталей двухслойной наплавкой / А. М. Михальченков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1995. – № 1. – С. 22–23.

130. Selective Surfacing Takes the Brunt of High Abrasive Wear / Weld. J. – 1982. – No. 11. – P. 56.

131. *Винокуров, В. А.* Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности / В. А. Винокуров, С. А. Куркин, Г. А. Николаев ; ред. Б. Е. Патон. – М. : Машиностроение, 1996. – 576 с.

132. *Куркин, С. А.* Сварные конструкции : технология изготовления, механизация, автоматизация и контроль качества в сварочном производстве : учебник для вузов / С. А. Куркин, Г. А. Николаев. – М. : Высш. шк., 1991. – 398 с.

133. *Kretzschmar, E.* Verfügbare Auftragsschweißschutzwerkstoffe zum Verschleißschutz an Maschinenbauteilen und Werkzeugen / E. Kretzschmar // Stahlberandung. – 1980. – No. 1. – S. 16–24.

134. *Махненко, В. И.* Тепловые и деформационные процессы в шве и околошовной зоне при сварке : курс лекций для специалистов-сварщиков / В. И. Махненко. – Киев : Наукова думка, 1983. – 54 с.

135. *Сагалевиц, В. М.* Стабильность сварных соединений и конструкций / В. М. Сагалевиц, В. Ф. Савельев. – М. : Машиностроение, 1986. – 264 с.

136. *Труфяков, В. И.* Прочность сварных соединений при переменных нагрузках / В. И. Труфяков ; АН Укр. ССР. Институт электросварки. – Киев : Наукова думка, 1990. – 256 с.

137. *Боженко, Б. Л.* Физико-химические процессы при плазменной сварке с присадочной проволокой / Б. Л. Боженко // Сварочное производство. – 1991. – No 11. – С. 24.

138. *Боженко, Б. Л.* Кинетика изменения состава газовой фазы при плавлении присадочного металла плазменной дугой / Б. Л. Боженко, В. Н. Шалимов, А. И. Беденко // Сварочное производство. – 1991. – No 4. – С. 31.

139. *Косилов, А. И.* Плазменная наплавка деталей порошковыми композициями / А. И. Косилов, В. С. Чупахин, С. М. Плотников // Техника в сельском хозяйстве. – 1983. – No 1. – С. 51.

140. *Гурьянов, Г. В.* Лазерная обработка композиционных электрохимических покрытий / Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель // Тракторы и сельхозмашины. – 2013 – No 4. – С. 53–55.

141. *Стеклов, О. И.* Влияние режима на свойства зоны сплавления при плазменно-дуговой наплавке коррозионностойкой проволокой низколегированной стали / О. И. Стеклов, А. В. Алексеев, О. А. Александров // Сварочное производство. – 1991. – № 6. – С. 15–17.
142. *Gerdeman, D. A.* Arc Plasma Technology / D. A. Gerdeman, N. L. Hecht // Int. Materials Science, Springer – Verlag (1972).
143. *Smith, A. A.* Welding in the World / A. A. Smith. 8 (1970) ¹1, 28–34.
144. *Smith, B.* Could Autogeneity be the answer? / B. Smith // Weld. and Metal. Fabr. – 1981. – No. 8. – P. 471–472.
145. *Коломейченко, А. В.* Испытания на изнашивание рабочих поверхностей лап культиваторов, упрочненных газопламенным напылением порошкового материала / А. В. Коломейченко, С. А. Зайцев // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 204–207.
146. *Аблаев, А. А.* Практика и перспектива применения лазерных технологических комплексов в ремонтном производстве / А. А. Аблаев, В. Е. Архипов, Е. М. Биргер // Сварочное производство. – 1990. – № 5. – С. 21.
147. *Архипов, В. Е.* Лазерная наплавка изношенных деталей / В. Е. Архипов, Е. М. Биргнер, Е. М. Воловик // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 11. – С. 47.
148. Тенденции развития электронно-лучевой сварки / Б. Е. Патон [и др.] // – Автоматическая сварка. – 1976. – № 10. – С. 1–9.
149. Industrial Applications of Lasers / Edited Hans Koebner. 1984 by John Wiley and Sons Ltd. New York.
150. *Новосельцов, В. А.* Электроконтактная наплавка деталей порошковыми заготовками / В. А. Новосельцов // Автомобильная промышленность. – 1990. – № 8. – С. 21–23.
151. *Ахметшин, Т. Ф.* Повышение износостойкости и долговечности почвообрабатывающих рабочих органов / Т. Ф. Ахметшин // Известия Оренбургского гос. агр. ун-та. – 2013. – № 3 (41). – Ч. 1. – С. 81–84.

152. *Ощепков, Ю. П.* Особенности структурообразования сплавов системы Ni – Cr – В – Si – С при индукционной наплавке / Ю. П. Ощепков, Н. В. Ощепкова // *МиТОМ.* – 1979. – № 10. – С. 14.

153. *Константинов, В. М.* Технология упрочнения рабочих поверхностей почвообрабатывающих деталей / В. М. Константинов, С. Н. Жабуренок // *Инженерно-техническое обеспечение и машинно-технологические станции в условиях реформирования АПК : тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. : в 2 т. – Орёл : ОрёлГАУ, 2000. – Т. 1. – С. 116–118.*

154. *Титов, Н. В.* Восстановление и упрочнение стрелчатых лап почвообрабатывающих машин металлокерамическими материалами / Н. В. Титов, А. В. Колмейченко // *Тракторы и сельхозмашины.* – 2014. – № 1. – С. 42–43.

155. *Ситников, А. А.* Покрытия из механоактивированных свс-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом / А. А. Ситников, В. И. Яковлев, А. В. Собачкин // *Ползуновский вестник.* – 2012. – № 1–1. – С. 273–277.

156. *Бетенья, Г. Ф.* Нанесение износостойких покрытий при упрочнении и восстановлении почворезущих элементов наплавкой намораживанием / Г. Ф. Бетенья, Н. В. Кардаш, Н. А. Зайко // *Защитные покрытия на металлах.* – 1990. – Вып. 24. – С. 94–97.

157. *Киселев, В. С.* Технологические аспекты управления процессом сверхзвуковой газопорошковой наплавки / В. С. Киселев, Н. Н. Палаткин, М. В. Радченко // *Вестник алтайской науки.* – 2013. – № 2–2. – С. 227–231.

158. *Фаюршин, А. Ф.* Газопламенное нанесение порошковой износостойкой паяльной смеси на рабочие органы почвообрабатывающих машин / А. Ф. Фаюршин // *Достижения молодых ученых – аграрному производству : матер. республиканской науч.-практ. конф. молодых ученых и аспирантов.* – Уфа, 2004. – С. 107–108.

159. *Фаюршин, А. Ф.* Повышение долговечности лезвийных рабочих органов / А. Ф. Фаюршин, В. Г. Петряков, М. Н. Фархшатов // *Ресурсосберегающие технологии технического сервиса : матер. Междунар. науч.-практ. конф.* – Уфа, 2007. – С. 153–157.

160. *Фаюршин, А. Ф.* Особенности получения износостойкого слоя газопламенным упрочнением / А. Ф. Фаюршин, Р. Р. Хакимов // Ремонт. Восстановление. Реновация : матер. Междунар. науч.-практ. конф. – Уфа, 2014. – С. 235–238.

161. *Титов, Н. В.* К вопросу применения металлокерамических материалов для упрочнения лап культиваторов / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, В. В. Виноградов // Труды ГОСНИТИ. – 2013. – Т. 113. – С. 364–367.

162. *Титов, Н. В.* Исследование твердости и износостойкости рабочих органов машин, упрочнённых вибродуговой наплавкой с применением металлокерамических материалов / Н. В. Титов, А. В. Коломейченко, В. Н. Логачев // Сварочное производство. – 2014. – № 9. – С. 33–36.

163. *Юдина, Е. М.* Влияние прочностных параметров композиционных покрытий на их износостойкость при абразивном изнашивании / Е. М. Юдина, Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2017. – № 6 (68). – С. 89–92.

164. *Кисель, Ю. Е.* Улучшение свойств износостойких композитов обработкой ТВЧ / Ю. Е. Кисель, Г. В. Гурьянов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 1. – С. 31–34.

165. *Афанасенко, Н. Ф.* Опыт восстановления деталей газотермическим напылением / Н. Ф. Афанасенко, Е. В. Соболевский // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 11. – С. 42.

166. *Буйлов, В. Н.* Анализ газотермических методов напыления при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, Д. С. Чернышев // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2009. – С. 32–34.

167. *Буйлов, В. Н.* Движение металловоздушной струи при электродуговой металлизации / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, Д. С. Чернышев // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2010. – С. 16–18.

168. Металлизация распылением / Н. В. Катц [и др.]. – М. : Машиностроение, 1966. – 199 с.

169. *Knotek, O.* Diffusions- und Grenzflächen vorgänge in und an Ni-Cr-B-Si-Legierungen / О. Knotek, Н.Т. Steineю "Radex-Rundschau", Heft 3/4, 1972.

170. *Шамко, В. К.* Применение электродуговой металлизации при восстановлении деталей / В. К. Шамко, Г. Д. Захаренко, В. Л. Гуревич // Техника в сельском хозяйстве. – 1986. – № 11. – С. 40.

171. *Клинская-Руденская, Н. А.* Взаимодействие Ni- Cr- В- Si-покрытий со сталью в процессе оплавления / Н. А. Клинская-Руденская, В. А. Копысов, В. А. Вилисов // Сварочное производство. – 1991. – № 4. – С. 32.

172. *Baxter, F. G.:* 8th Int. Thermal Spray, Conference (1976) Rep. of Papers, 271.

173. *Кречмар, Э.* Износостойкость покрытий из самофлюсующихся сплавов / Э. Кречмар // Получение покрытий высокотемпературным распылением. – М. : Атомиздат, 1973. – С. 10–12.

174. *Kayser, H.* 8th Int. Thermal Spray, Conference (1976) Rep. of Papers, 176.

175. *Малик, М. П.* Применение плазменного напыления для восстановления / М. П. Малик // Получение покрытий высокотемпературным распылением. – М., 1973. – С. 7–8.

176. *Burgoin, B.* 8th Int Thermal Spray, Conference (1976) Rep. of Papers, 137.

177. *Полевой, С. Н.* Упрочнение металлов / С. Н. Полевой, В. Д. Евдокимов. – М. : Машиностроение, 1986. – 319 с.

178. *Рыкалин, Н. Н.* Образование прочного сцепления при напылении порошком и металлизации / Н. Н. Рыкалин, М. Х. Шошоров, В. В. Кудинов // Получение покрытий высокотемпературным распылением. – М. : Атомиздат, 1973. – С. 140–165.

179. *Allnat, N. J.* Metal Spraying by the Electric Arc. Handbook / N. J. Allnat, 1973 (Weld. Inst.). – P. 211.

180. *Соловьев, Б. М.* Детонационно-газовое напыление изношенных деталей / Б. М. Соловьев // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1991. – № 12. – С. 34.

181. *Sheppard, J. A.:* 8th Int. Thermal Spray, Conference (1976) Rep. of Pap. 187.

182. *Козырев, В. В.* Получение наплавочных композиционных материалов по экологически безопасным технологиям / В. В. Козырев, М. Ю. Петров, Л. В. Козырева // Сварочное производство. – 2015. – № 11. – С. 45–48.

183. *Петров, М. Ю.* Получения композиционных порошков для напыления износостойких покрытий cvd-методом / М. Ю. Петров // Повышение управленческого, экономического, социального, инновационно-технологического и технического потенциала предприятий и отраслей АПК : сб. науч. трудов. – М., 2017. – С. 159–162.

184. *Кутепов, И. Б.* Восстановление деталей газопорошковой наплавкой / И. Б. Кутепов // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 9. – С. 57.

185. *Кареев, А. С.* Восстановление изношенных деталей железнением / А. С. Кареев // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 3. – С. 46.

186. *Чеботин, В. Н.* Электрохимия твердых электролитов / В. Н. Чеботин, М. В. Перфильев. – М. : Химия, 1978. – 315 с.

187. *Dietz, A.* Galvanotechnik / A. Dietz, 96 (2005) 7, S. 1611–1617.

188. *Гурьянов, Г. В.* Свойства композиционных гальванических покрытий на основе сплавов железа / Г. В. Гурьянов, Ю. Е. Кисель, А. С. Горьков // Сельский механизатор. – 2016. – № 11. – С. 34–36.

189. *Nasser, K.* Chemische Vernickiung. Nickel-Phosphor-Schichten / K. Nasser, 2007. – 800 s.

190. *Кисель, Ю. Е.* Совершенствование свойств композиционных электрохимических покрытий лазерной обработкой / Ю. Е. Кисель, Г. В. Гурьянов // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2011. – № 5.– С. 4–8.

191. *Watson, S. A.* Galvanoformung mit Nickel / S. A. Watson, 1989.104 s.

192. *Кисель, Ю. Е.* Термическая обработка композиционных электрохимических покрытий / Ю. Е. Кисель, М. А. Швыряев, А. С. Горьков // Вестник Брянского гос. техн. ун-та. – 2013. – № 1 (37). – С. 87–90.

193. *Langer, J. S.* Theory of dendritic growth. Elements of stability analysis / J. S. Langer, H. Muller-Krumbhaar // Acta Metall. 1978. Vol. 26. P. 1681–1688.

194. Формообразование ножей промышленных мясорубок при их восстановлении и изготовлении пластической деформацией / Ф. Я. Рудик [и др.] // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 116. – С. 75–86.

195. Рудик, Ф. Я. Расчет перемещаемого объема металла при восстановлении шлицевых втулок карданных передач накаткой / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, В. П. Лялякин // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 124. – № 3. – С. 89–94.

196. Рудик, Ф. Я. Условия работы и обоснование способа восстановления шлицевых деталей карданных передач / Ф. Я. Рудик, С. А. Богатырев, В. П. Лялякин // Труды ГОСНИТИ. – 2016. – Т. 122. – С. 213–216.

197. Громов, Н. П. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Металлургия, 1978. – 360 с.

198. Пашин, Ю. Д. Восстановление деталей автомобилей, тракторов, комбайнов и других сельскохозяйственных машин способом давления : аналитический обзор / Ю. Д. Пашин. – Саратов : ЦНТИ, 1983.

199. Буйлов, В. Н. Возможности применения электроискрового легирования для восстановления деталей машин / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК : матер. Межгос. науч.-техн. семинара. – Саратов, 2009. – С. 37–39.

200. Электроискровая обработка металлов – универсальный способ восстановления изношенных деталей / Ф.Х. Бурумкулов [и др.] // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2001. – № 4. – С. 23–28.

201. Свойства нанокompозитных покрытий, образованных на поверхности стали 20Х электроискровой обработкой стержневыми электродами из сталей 65Г и Св08 / Ф. Х. Бурумкулов [и др.] // Электронная обработка материалов . – 2009 . – № 6 . – С. 22–29 .

202. Величко, С. А. Экономическая эффективность ремонта гидроагрегатов методом электроискровой обработки / С. А. Величко, П. В. Чумаков, А. В. Мартынов // Сельский механизатор. – 2018. – № 1. – С. 18–20.

203. *Гитлевич, А. Е.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Царканский. – Кишинев : Штиинца, 1985. – 196 с.

204. *Лазаренко, Н. И.* Электроискровое легирование металлических поверхностей / Н. И. Лазаренко. – М. : Машиностроение, 1976. – 44 с.

205. *Barash, M. H.* Experiments with electric spark toughening / M. H. Barash, C.S. Kahlon // *Machine Tool Design*. – Vol. 4. – No. 1. – P. 1–8.

206. *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.

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

208. *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.

209. *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.

210. *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.

211. *Буйлов, В. Н.* Исследование электроискрового покрытия, полученного в среде защитных газов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, Р. М. Косачев // *Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : матер. XI Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 65-летию факультета механизации сельского хозяйства, в рамках XVII Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал – 2015»*. – Ставрополь : АГРУС, 2015. – С. 324–326.

212. *Буйлов, В. Н.* Исследование многослойного электроискрового покрытия / 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. 4 февраля 2017 года. – Душанбе, 2017. – С. 71–73.

213. *Бизик, Н. К.* Совершенствование оборудования и технологии наплавки деталей гидротрансмиссий в боратных шлаках / Н. К. Бизик, В. Г. Медяник, И. А. Рябцев // Сварщик. – 2005. – № 3. – С. 8–9.

214. *Фрумин, Е. И.* Нагрев стали в синтетических шлаках / Е. И. Фрумин. – Киев, 1973. – 129 с.

215. *Лашко, С. В.* Пайка металлов / С. В. Лашко, Н. Ф. Лашко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1988. – 376 с.

216. *Лахтин, Ю. М.* Металловедение и термическая обработка металлов / Ю. М. Лахтин. – М. : Metallurgy, 1984. – 360 с.

217. *Борисов, В. Т.* Диффузионные покрытия на металлах / В. Т. Борисов, В. М. Голиков, Г. Н. Дубинин. – Киев : Наукова думка, 1965. – С. 26–37.

218. *Колпаков, А. В.* Повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин науглероживанием угольным электродом / А. В. Колпаков // Техника в сельском хозяйстве. – 2008. – № 1. – С. 42.

219. *Ляхович, Л. С.* Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Л. С. Ляхович. – М. : Metallurgy, 1981. – 491 с.

220. *Ляхович, Л. С.* Современное направление применения жидкостного борирования для повышения стойкости изделий / Л. С. Ляхович, М. Г. Крукович, Ю. В. Туров // Экспресс-информация БелНИИНТИ. Сер. Metalloobrabotka. – Минск : БелНИИНТИ, 1975. – 20 с.

221. *Шадричев, Е. В.* Относительная износостойкость однофазных и двухфазных боридных слоев / Е. В. Шадричев, А. Е. Иванов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1984. – № 3. – С. 44–47.

222. *Афанасьев, А. А.* Интенсификация процесса диффузионного насыщения поверхности стальных изделий / А. А. Афанасьев, Ю. М. Вененцев // Матер. 34-й отчет. науч. конф. Воронеж. гос. технол. акад. за 1994 год., Воронеж, 8–13 дек. 1994. – Воронеж, 1994. – С. 269.

223. *Афиногенов, А. И.* Борирование стальных деталей / А. И. Афиногенов, В. И. Кузьмина, В. М. Шенгалев // Актуальные проблемы машиностроения на современном этапе. – Владимир, 1995. – С. 86.
224. *Бабушкин, Б. В.* Остаточные напряжения в стали после насыщения бором из расплавов / Б. В. Бабушкин, Б. З. Поляков // МиТОМ. – 1973. – № 7. – С. 27–30.
225. *Баландин, В. М.* Исследование процесса борирования твердосплавного инструмента / В. М. Баландин // Актуальные проблемы машиностроения на современном этапе. – Владимир, 1995. – С. 89–90.
226. *Балтер, М. А.* Фазовый состав борированного слоя сталей / М. А. Балтер, И. С. Дукаревич., Л. Я. Гольдштейн // МиТОМ. – 1964. – № 12. – С. 39–41.
227. *Ворошнин, Л. Г.* Борирование стали / Л. Г. Ворошнин, Л. С. Ляхович. – М. : Металлургия, 1978. – 239 с.
228. *Глухов, В. П.* Боридные покрытия на железе и сталях / В. П. Глухов. – Киев : Наукова думка, 1970. – 208 с.
229. *Гуревич, Б. Г.* Электролизное борирование стальных деталей / Б. Г. Гуревич, Е. А. Говязина. – М. : Машиностроение, 1976. – 71 с.
230. *Дукаревич, И. С.* Перераспределение элементов в борированном слое / И. С. Дукаревич, М. В. Можаров, А. С. Шигарев // Металловедение и термическая обработка металлов. – 1973. – № 2. – С. 45–48.
231. *Косицин, Ю. Н.* Повышение качества боридных покрытий / Ю. Н. Косицин, А. Г. Казанцев, А. М. Фирсов // Науч.-техн. творчество аспирантов и проф.-преп. состава Бийского технол. ун-та : 3-я юбилейная науч.-практ. конф. – Бийск, 1995. – Ч. 2. – С. 12–13.
232. *Крукович, М. Г.* Пластичность боридных слоев / М. Г. Крукович, Б. А. Прусаков, И. Г. Сизов. – М. : Физматлит, 2010. – 384 с.
233. *Лялякин, В. П.* Скоростное ТВЧ-борирование для упрочнения пальцев гусениц тракторов / В. П. Лялякин, В. Ф. Аулов, А. В. Ишков // Технология машиностроения. – 2017. – № 1. – С. 40–44.
234. *Минкевич, А. Н.* Химико-термическая обработка металлов и сплавов / А. Н. Минкевич. – М. : Машиностроение, 1965. – 491 с.

235. Михайлин, В. Н. Диффузионное упрочнение деталей сельскохозяйственной техники / В. Н. Михайлин, В. И. Носов // Защитные покрытия на металлах. – 1985. – Вып. 19. – С. 93–94.

236. Риле, М. Причины образования трещин в борированных слоях стали / М. Риле // МиТОМ. – 1974. – № 10. – С. 20–23.

237. Рыжих, Ю. Л. Методы скоростного электродугового борирования и экзотермического металлоплакирования для упрочнения и восстановления деталей / Ю. Л. Рыжих, В. В. Коршунов, А. С. Юдников // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2007. – № 11. – С. 12–16.

238. Wierzchon, T. Properties of Composite Borided Layers on Steel Produced by Combined Surface Treatments / T. Wierzchon, P. Bielinski // Mater. and Manuf. Processes. – 1995. – Vol. 10, No. 2. – P. 309–313.

239. Смирнов, А. В. Физико-химические основы газового борирования / А. В. Смирнов, Ю. С. Кулешов, В. Г. Нефедов // Защитные покрытия на металлах. – Киев, 1975. – Вып. 9. – С. 45–49.

240. Wang, Xiouchun. Granular Material for Boriding from Graphite and Boron Oxide / Xiouchun Wang [et al.] // Jinshu rechuli = Heat Treat. Metals. – 1995. – No. 8. – P. 26–28.

241. Соркин, Л. М. Упрочнение деталей борированием / Л. М. Соркин. – М. : Машиностроение, 1972. – 64 с.

242. Liu, Ximing e. a. Shelf Life Ni Carbing in Combination with Boriding for Raising Bend Die / Ximing e. a. Liu // Qiche jishu = Automob. Technol. – 1995. – No. 8. – P. 41–43.

243. Юкин, Г. И. О механизме электролизного борирования / Г. И. Юкин // МиТОМ. – 1971. – № 8. – С. 42–46.

244. Пат. 2164963 Российская Федерация, МКП7 С 23 С 8/02. Способ борирования 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.

245. *Барабошкин, А. Н.* Электрокристаллизация металлов из расплавленных солей / А. Н. Барабошкин. – М. : Наука, 1976. – 223 с.
246. *Глинков, М. А.* Общая теория тепловой работы печей : учебник для вузов / М. А. Глинков, Г. М. Глинков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Metallurgy, 1990. – 232 с.
247. *Кауфман, В. Г.* Электрические печи с жидким теплоносителем / В. Г. Кауфман. – М. : Энергия, 1973. – 103 с.
248. *Смольников, Е. А.* Термическая обработка инструментов в соляных ваннах / Е. А. Смольников. – М. : Машиностроение, 1981. – 271 с.
249. *Корн, Г. К.* Справочник по математике / Г. К. Корн, Т. К. Корн. – 2-е изд. – М. : Наука, 1970. – 321 с.
250. *Буйлов, В. Н.* К вопросу об условиях работы и изнашивания стрелчатых лап культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Актуальные проблемы научно-технического прогресса в АПК : сб. науч. статей / под общ. ред. А. Т. Лебедева. – Ставрополь, 2017. – С. 3–5.
251. *Буйлов, В. Н.* Расчетная оценка прогнозирования ресурса упроченных при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих и посевных агрегатов / В. Н. Буйлов // Аграрный научный журнал. – 2019. – № 6. – С. 70–74.
252. *Кожеев, В. А.* Термодинамика металлургических шлаков / В. А. Кожеев. – Свердловск, 1955. – 164 с.
253. *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. 65–68.
254. *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.
255. 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.

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

257. *Буйлов, В. Н.* Исследование процесса электролизного борирования стальных деталей / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков // Электронная обработка материалов. – 2017. – № 53 (3). – С. 25–32.

258. *Ершов, Ю. А.* Общая химия. Биофизическая химия. Химия биогенных элементов / Ю. А. Ершов. – 8-е изд., перераб. – М. : Высш. шк., 2010. – 559 с.

259. *Фетисов, Г. П.* Материаловедение и технология металлов : учебник для студентов машиностроит. спец. вузов / Г. П. Фетисов, М. Г. Карпман, В. М. Матюнин ; под ред. Г. П. Фетисова. – 3-е изд., испр. и доп. – М. : Высш. шк., 2005. – 862 с.

260. *Кириллов, П. Л.* Справочник по теплогидравлическим расчетам / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 246 с.

261. *Криштал, М. А.* Многокомпонентная диффузия в металлах / М. А. Криштал, А. И. Волков. – М. : Металлургия, 1985. – 176 с.

262. *Лойцянский, Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М. : Наука, 1987. – 840 с.

263. *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, 2005. – С. 39–42.

264. *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.

265. *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.

266. *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.

267. *Джашитов, В. Э.* Математическая модель динамических тепломассообменных процессов в стекловаренной печи / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов, А. В. Голиков // ИФЖ. – 2003. – Т. 76. – № 5. – С. 117–124.

268. *Берже, П.* Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль ; пер. с франц. – М. : Мир, 1991. – 368 с.

269. *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. – № 5. – С. 79–82.

270. *Джашитов, В. Э.* Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий / В. Э. Джашитов, В. М. Панкратов ; под общ. ред. В. Г. Пошехонова. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. – 404 с.

271. *Дульнев, Г. Н.* Методы расчёта теплового режима приборов / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. – М. : Радио и связь, 1990. – 312 с.

272. *Павлов, П. В.* Физика твердого тела / П. В. Павлов, А. Ф. Хохлов. – М. : Высш. шк., 2000. – 494 с.

273. *Цветков, Ф. Ф.* Тепломассообмен : учебник для вузов / Ф. Ф. Цветков, Б. А. Григорьев. – М. : Издательский дом МЭИ, 2011. – 562 с.

274. *Самарский, А. А.* Метода решения сеточных уравнений / А. А. Самарский. – М. : Наука, 1978. – 589 с.

275. *Адлер, Ю. П.* Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – М. : Наука, 1976. – 139 с.

276. Саутин, С. Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии / С. Н. Саутин. – Л., 1975. – 48 с.

277. Горелик, С. С. Рентгенографический и электронно-оптический анализ : учеб. пособие для вузов / С. С. Горелик, Ю. А. Скаков, Л. Н. Расторгуев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : МИСИС, 1994. – 328 с.

278. Зевин, Л. С. Количественный рентгенографический фазовый анализ / Л. С. Зевин, Л. Л. Завьялова. – М., 1974. – 184 с.

279. Иванов, А. С. Рентгенография металлов / А. С. Иванов. – Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 77 с.

280. Ковба, М. П. Рентгенофазовый анализ / М. П. Ковба, В. К. Трунов. – М. : Изд. Моск. ун-та, 1976. – 232 с.

281. Салтыков, С. А. Стереометрическая металлография : учеб. пособие / С. А. Салтыков. – М. : Metallurgia, 1976. – 270 с.

282. 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 : сб. науч. статей. – Саратов, 2003. – С. 241–242.

283. Буйлов, В. Н. Борирование наплавленных деталей / В. Н. Буйлов // Повышение надёжности сельскохозяйственной техники при эксплуатации и ремонте : сб. науч. работ. – Саратов, 2001. – С. 48–52.

284. Порошковая металлургия : материалы, технология, свойства, область применения / И. М. Федорченко [и др.] ; отв. ред. И. М. Федорченко. – Киев : Наукова думка, 1985. – 624 с.

285. Буйлов, В. Н. Наплавка металлических порошков на стальную подложку в жидком теплоносителе / В. Н. Буйлов, В. А. Деев // Ресурсосберегающие технологии при ремонте машин и восстановлении деталей : сб. науч. трудов. – Челябинск, 1990. – С. 45–47.

286. Буйлов, В. Н. Наплавка металлических порошков в жидком теплоносителе на стальную подложку / В. Н. Буйлов, В. А. Деев // Научно-технический про-

гресс в авторемонтном производстве : тез. докл. Всесоюз. науч.-техн. конф. – М., 1990. – С. 56–58.

287. *Буйлов, В. Н.* Восстановление деталей в электродной печи-ванне / В. Н. Буйлов, А. Я. Змеев, В. К. Петряков // *Степные просторы.* – 1997. – № 1–2. – С. 57–60.

288. *Буйлов, В. Н.* Температура в межэлектродном пространстве / В. Н. Буйлов, А. Я. Змеев, В. К. Петряков // *Степные просторы.* – 1997. – № 5–6. – С. 32–35.

289. *Буйлов, В. Н.* Восстановление автотракторных деталей наплавкой порошков на никелевой основе / В. Н. Буйлов // *Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ : матер. Межгос. науч.-техн. семинара.* – Саратов, 1997. – Вып. 9. – С. 46–47.

290. А. с. 1688981 СССР, МКИ⁵ В22 F 7/04. Способ получения износостойкого покрытия / В. Н. Буйлов, В. А. Деев, 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.

291. *Буйлов, В. Н.* Ремонт рабочих органов почвообрабатывающих агрегатов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков. – Саратов, 2007. – 134 с.

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

293. Восстановление и упрочнение рабочих органов почвообрабатывающих машин / В. Н. Буйлов [и др.] // *Научное обеспечение АПК : матер. науч.-практ. конф. 2-й специализированной агропромышленной выставки «САРАТОВ-АГРО. 2011».* – Саратов, 2011. – С. 141–144.

294. *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.* 4 февраля 2017 г. – Душанбе, 2017. – С. 73–75.

295. *Буйлов, В. Н.* Повышение эффективности технологического процесса упрочнения лезвий рабочих органов культиваторов / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // *Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники : матер. Межгос. науч.-техн. семинара им. В. В. Михайлова.* – Саратов : КУБиК, 2012. – Вып. 25. – С. 30–33.

296. 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.

297. 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.

298. 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.

299. 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.

300. 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.

301. *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, 1999. – Вып. 11. – С. 37–38.

302. *Буйлов, В. Н.* Способ восстановления стрельчатых 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, 2006. – С. 43–45.

303. *Буйлов, В. Н.* Упрочнение почворезущих элементов при их восстановлении / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, С. А. Пронин // Совершенствование технологий и организации обеспечения работоспособности машин : сб. науч. трудов. – Саратов, 2006. – С. 33–35.

304. *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 рождения академика Николая Ивановича Вавилова. – Саратов, 2006. – С. 3–5.

305. *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.

306. *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.

307. *Кардашевский, С. В.* Испытания сельскохозяйственной техники / С. В. Кардашевский, Л. В. Погорелый, Т. М. Фудиман. – М. : Машиностроение, 1979. – 288 с.

308. РД 10.2.2.-89. Испытания сельскохозяйственной техники. Методы энергетической оценки. – Кинель, 1989. – 25 с.

309. *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 рождения профессора Д. Г. Вадивасова. – Саратов, 2009. – С. 20–24.

310. *Буйлов, В. Н.* Эксплуатационные испытания стрельчатых лап культиваторов, восстановленных с применением электроискрового способа / В. Н. Буйлов, И. В. Люляков, В. С. Еременко // Проблемы эксплуатации и ремонта автотракторной техники : материалы Межгос. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию Г. П. Шаронова. – Саратов : КУБиК, 2012. – С. 44–47.

311. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники : нормативно-справочный материал : [в 2 ч.] – М., 1999.

312. *Пасько, В. И.* Практикум по экономике техсервиса на предприятиях АПК : учеб. пособие / В. И. Пасько, Н. А. Щербакова, Ю. Б. Емелин. – Саратов, 2009. – 49 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Таблица А.1- Критерии предельных состояний лап культиваторов

| Критерии предельных состояний | | Значимость признака предельного состояния, % | Влияние на функциональные качества и надежность машин |
|-------------------------------|---|--|---|
| шифр | Внешние признаки | | |
| ПС 1 | Деформация или разрушение | 5 | Отказ, полная утрата работоспособности |
| ПС 2 ПС 3 | Затупление лезвия вследствие увеличения: радиуса закругления кромки угла заострения | 15 | Ухудшение подрезания сорняков и повышение тягового сопротивления |
| ПС 4 ПС 5 | Образование затылочной фаски: по величине ширины по углу наклоном к дну борозды | 3 | Снижение глубины обработки, повышение тягового сопротивления |
| ПС 6 | Износ носка по длине | 36 | Снижение глубины обработки, повреждение стойки, увеличение тягового сопротивления, повышение износа хвостовой части лапы и головок болтов |
| ПС 7 ПС 8 | Износ лапы по ширине: захвата крыла лезвия | 5 25 | Снижение прочности детали и степени подрезания сорняков |
| ПС 9 | Износ лапы по толщине | 5 | Снижение прочности детали, ослабление крепления детали, ускоренный износ носка |
| ПС 10 | Износ головок крепежных болтов | 6 | Отказ из-за деформации, разрушения или потери детали |

Таблица Б.1-Техническая характеристика установки

| Наименование параметра | Единица | Величина |
|--|-------------------|----------|
| Номинальное напряжение трехфазной сети | В | 380 |
| Частота | Гц | 50 |
| Напряжение на электродах | В | 25...29 |
| Потребляемая мощность | кВт | 100 |
| Рабочая температура теплоносителя | °С | 1100 |
| Масса теплоносителя | кг | 100 |
| Расход охлаждающей воды | м ³ /ч | 2+0.5 |

Таблица Б.2 - Технические данные трансформатора ТТЭС3-100/17

| Ступень | Мощность, кВа | Первичная сторона ВН | | | Вторичная сторона НН | | | |
|---------|---------------|----------------------|---------------|--------------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| | | Сила тока, А | Напряжение, В | Соединение обмоток | Δ | | Y | |
| | | | | | Сила тока, А | Напряжение, В | Сила тока, А | Напряжение, В |
| 1 | 100 | 152,1 | 380 | X-B, Y-C, Z-A | 3344 | 17,3 | 1933 | 29,9 |
| 2 | 85,2 | 129,6 | | X-3B, Y-3C, Z-3A | | 14,8 | | 25,6 |
| 3 | 73,1 | 111,2 | | X-2B, Y-2C, Z-2A | | 12,7 | | 21,9 |
| 4 | 62,8 | 95,5 | | X-1B, Y-1C, Z-1A | | 10,9 | | 18,8 |
| 5 | 57,6 | 87,6 | | X-Y-Z | | 10 | | 17,3 |

Соединение выводов НН: Соединение Δ (a-z; b-x; c-y), соединение Y (x-y-z).

Таблица В.1- Данные для расчета изобарного потенциала для реакции разложения оксида натрия

| № п/п | Вещество (с учетом химической реакции) | Энтальпия при стандартной температуре, кДж/моль | Энтропия при стандартной температуре, $\text{кДж/моль}\cdot\text{К}$ | Коэффициенты для определения теплотемкостей компонентов | | | Температурный интервал, К | $T_{\text{плав}}$, К | $T_{\text{кип}}$, К | $\frac{\Delta H_{\text{пл}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\frac{\Delta H_{\text{возг}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------|--|--|--|---|----------------|--------------------|------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|--|---|
| | | | | a | $b \cdot 10^3$ | $c' \cdot 10^{-5}$ | | | | | | |
| 1 | $\text{Na}(\text{кр})$ | 0 | 102,42 | 33,64 | 75,64 | — | 298...371 | 371 | 1173 | 2,64 | 96,73 | 108,78 |
| 2 | $\text{O}_2(\text{г})$ | 0 | 102,52 | 15,73 | 1,695 | 1,885 | 298...300 | — | — | — | — | — |
| 3 | $\text{Na}_2\text{O}(\text{кр})$ | -418 | 75,06 | 77,11 | 19,33 | -12,59 | 298..1100 | — | 1548 (возгонка) | — | — | — |

Таблица В.2- Данные для расчета изобарного потенциала для реакции разложения борного ангидрида

| № п/п | Вещество (с учетом химической реакции) | Энтальпия при стандартной температуре, кДж/моль | Энтропия при стандартной температуре, $\text{кДж/моль}\cdot\text{К}$ | Коэффициенты для определения теплотемкостей компонентов | | | Температур. Ин-вал, К | $T_{\text{плав}}$, К | $T_{\text{кип}}$, К | $\frac{\Delta H_{\text{плав}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\frac{\Delta H_{\text{исп}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | $\frac{\Delta H_{\text{возг}}}{\text{моль}}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------|--|--|--|---|----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|---|--|---|
| | | | | a | $b \cdot 10^3$ | $c' \cdot 10^{-5}$ | | | | | | |
| 1 | $\text{B}(\text{кр})$ | 0 | 11,72 | 33,56 | 18,08 | 14,98 | 298...1700 | 2348 | 4133 | — | — | — |
| 2 | $\text{O}_2(\text{г})$ | 0 | 307,56 | 47,19 | 5,085 | -5,65 | 298...300 | — | — | — | — | — |
| 3 | $\text{B}_2\text{O}_3(\text{кр})$ | -1270 | 53,84 | 36,53 | 106,3 | -5,48 | 298...723 | 723 | 1523 | 22,1 | 322,2 | — |

Продолжение приложения В

Таблица В.3 - Данные для расчета энергии смешения образования тетрабората натрия

| № п/п | Вещество (с учетом химической реакции) | Энтальпия при стандартной температуре, $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ | Коэффициенты для определения теплоемкостей компонентов | | | Температурный интервал, K | $T_{\text{плав}}, K$ | $\Delta H_{\text{плав}}, \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$ |
|-------|--|---|--|----------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|--|
| | | | a | $b \cdot 10^3$ | $c' \cdot 10^{-5}$ | | | |
| 1 | $Na_2B_4O_7(\text{кр})$ | -3276,7 | 206,1 | 77,09 | -37,49 | 298...1000 | 1014 | 25,45* |
| 2 | $Na_2O(\text{кр})$ | -417,98 | 77,11 | 19,33 | -12,59 | 298...1100 | — | — |
| 3 | $B_2O_3(\text{кр})$ | -2540,86 | 73,06 | 212,64 | -10,96 | 298...723 | 723 | 44,10 |

Примеч.:*- величина $\Delta H_{\text{плав}}$ для тетрабората натрия из уравнения $\frac{\Delta H}{T_{\text{плав}}} = \Delta H_{\text{плав}}$.

Определять изменение изобарного потенциала необходимо для той температуры, при которой проводится процесс борирования, ввиду его зависимости от величины температуры. К тому же при высоких температурах могут быть фазовые переходы: плавление твердых веществ и переход их в пар (возгонка).

Разность потенциалов выделения натрия и бора фактически считаются для ячеек. Расчеты ведутся с учетом активностей, в основу которых положена оценка свободной энергии расплава исходя из его катионного и анионного состава, модели строения и энергии химических связей между ионами (модель Кожеурова) [252]. В этой модели учитывается взаимодействия катионов натрия и бора с общим анионом кислорода. При этом учитывается энергия (теплота смешения) ионов и изменение энтропии при смешении в зависимости от катионного состава расплава (теория регулярных растворов).

Следует заметить, что определяются химические потенциалы не отдельных оксидов натрия и бора, а в составе расплава. Это фактически парци

Продолжение приложения В

альные свободные энергии, учитывающие вклад каждого оксида в изменение свободной энергии расплава в расчете на моль оксида при постоянстве состава расплава.

В итоговой расчетной формуле расчет энергии смешения ионов делается на основе оценки теплового эффекта образования тетрабората натрия из оксидов. Таким образом, приравнивается энергия смешения тепловому эффекту образования тетрабората натрия из кристаллических компонентов с учетом теплоты фазовых переходов от кристаллического состояния до расплавленного оксидов и тетрабората натрия при температуре борирования.

Далее для состава, отвечающего тетраборату натрия энергию смешения необходимо подставлять в джоулях, так как иначе в дальнейших расчетах не получится размерность в вольтах.

Ниже приведены необходимые термодинамические расчеты.

Метод абсолютной энтропии. Данные для термодинамических расчетов в таблице В.1. Ряд значений теплоемкостей для каждого компонента определяется следующим образом.

$$\Delta H_{1,298}^0 = 0 + 0 - (-) 417980 = 417980 \text{ [Дж]}$$

$$\Delta S_{1,298}^0 = 102,42 + 102,52 - 75,06 = 129,88 \text{ [Дж/моль К]}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{1,T}^0 &= 417980 + \int_{298}^T \left(-27,74 + 58,00 \cdot 10^3 T + \frac{10,705 \cdot 10^5}{T^2} \right) dT + 96,73 \cdot 10^3 \cdot 2 + 2 \cdot 2,64 \cdot 10^3 = \\ &= 417980 - 27,74(T - 298) + \frac{58,00 \cdot 10^3}{2} (T^2 - 298^2) - 10,705 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) + 193460 + 5280 = \\ &= (417980 + 8266,52 - 2575,32 + 3592,28 + 193460 + 5280) - 27,74T + 29,00 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - \frac{10,705 \cdot 10^5}{T} = \\ &= 626003,48 - 27,74T + 29,00 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - \frac{10,705 \cdot 10^5}{T} \end{aligned}$$

$$\Delta C_p = \left(-27,74 + 58,00 \cdot 10^3 T + \frac{10,705 \cdot 10^5}{T^2} \right) - \text{теплоемкостный ряд;}$$

$(96,73 \cdot 10^3 \cdot 2)$ - переход кристаллического натрия ($\text{Na}_{\text{кр}}$) в пар при температуре борирования 1173К;

$(2 \cdot 2,64 \cdot 10^3)$ - плавление кристаллического натрия (расчет велся по теплоемкости $\text{Na}_{\text{кр}}$ и при температуре выше 371К).

Продолжение приложения В

$$\begin{aligned} \Delta S_{1,T}^0 &= 129,88 + \int_{298}^T \left(\frac{-27,74 + 58,00 \cdot 10^{-3} T + \frac{10,705 \cdot 10^5}{T^2}}{T} \right) dT + \frac{2 \cdot 2,64 \cdot 10^3}{371} + \frac{2 \cdot 96,73 \cdot 10^3}{1173} = \\ &= 129,88 + 14,23 + 164,93 - 27,74 \ln T \Big|_{298}^T + 58,00 \cdot 10^{-3} T \Big|_{298}^T - \frac{10,705 \cdot 10^5}{2T^2} \Big|_{298}^T = \\ &= 309,04 + 27,74 \ln 298 - 58,00 \cdot 10^{-3} \cdot 298 + \frac{10,705 \cdot 10^5}{2 \cdot 298^2} - 27,74 \ln T + 58,00 \cdot 10^{-3} \cdot T - \frac{10,705 \cdot 10^5}{2T^2} = \\ &= (309,04 + 158,04 - 17,284 + 6,027) - 27,74 \ln T + 58,00 \cdot 10^{-3} \cdot T - \frac{10,705 \cdot 10^5}{2T^2} = \\ &= 455,823 - 27,74 \ln T + 58,00 \cdot 10^{-3} \cdot T - \frac{10,705 \cdot 10^5}{2T^2} \end{aligned}$$

$\left(\frac{2 \cdot 2,64 \cdot 10^3}{371} + \frac{2 \cdot 96,73 \cdot 10^3}{1173} \right)$ - учет изменения энтропии при плавлении и испарении натрия.

$$\begin{aligned} \Delta G_{1,T} &= (626003,48 - 27,74T + 29,00 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 10,705 \cdot 10^5 \cdot T^{-1}) - \\ &- T(455,823 - 27,74 \ln T + 58,00 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,5 \cdot 10,705 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}) = \\ &= 626003,48 - 483,56T + 27,74T \ln T - 29,00 \cdot 10^{-3} T^2 - 0,5 \cdot 10,705 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot T^{-1} \end{aligned}$$

$$\Delta G_{1,T_{cm}}^0 = 626003,48 - 567215,88 + 229963,66 -$$

$$-39901,94 - 458,23 = 248391,09 \text{ [Дж]} \text{ (при 1173 К).}$$

$$\Delta H_{2,298}^0 = 1270430 \text{ [Дж]}$$

$$\Delta S_{2,298}^0 = 11,72 + 307,56 - 53,84 = 265,44 \text{ [Дж/мольК]}$$

$$\begin{aligned} \Delta H_{2,T}^0 &= 1270430 + \int_{298}^T \left(44,22 - 83,155 \cdot 10^{-3} T - \frac{15,155 \cdot 10^5}{T^2} \right) dT - 22050 = \\ &= 1248380 + 44,22(T - 298) - \frac{83,155 \cdot 10^{-3}}{2} (T^2 - 298^2) + 15,155 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) = \\ &= (1248380 - 13177,56 + 3692,25 - 5085,57) + 44,22T - \frac{83,155}{2} 41,78 \cdot 10^{-3} T^2 + 15,155 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{T} = \\ &= 1233809 + 44,22T - 41,78 \cdot 10^{-3} T^2 + 15,155 \cdot 10^5 \cdot \frac{1}{T} \end{aligned}$$

Продолжение приложения В

$$\begin{aligned} \Delta G_{2,T} &= (1233809 + 44,22T - 41,78 \cdot 10^{-3} T^2 + 15,155 \cdot 10^5 \cdot T^{-1}) \\ &- T(-0,733 + 44,22 \ln T - 83,155 \cdot 10^{-3} T + 0,5 \cdot 15,155 \cdot 10^5 \cdot T^2) = \\ &= 1233809 + 44,953T - 44,22T \ln T + 41,78 \cdot 10^{-3} T^2 + 0,5 \cdot 15,155 \cdot 10^5 \cdot T^{-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{2,1173} &= 1233809 + 44,953 \cdot 1173 - 44,22 \cdot 1173 \ln 1173 + 41,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1173^2 + \frac{15,155 \cdot 10^5}{2 \cdot 1173} = \\ &= 1233809 + 52729,9 - 366582,3 + 57486,3 + 646 = 978089 [\text{Дж}] \quad \text{при } 1173\text{K} \end{aligned}$$

$$\text{ИТАК: } \Delta G_{1,1173} = 248391 [\text{Дж}]$$

$$\Delta G_{2,1173} = 978089 [\text{Дж}]$$

Метод Темкина-Шварцмана для температур, различающихся на 100° .
В этом случае уравнение для расчета имеет следующий вид:

$$\Delta G_{i,T} = (\Delta H_{i,298}^0 \pm \Delta H_{\text{ф.п.}}) - T \left(\Delta S_{i,298}^0 \pm \frac{\Delta H_{\text{ф.п.}}}{T_{\text{ф.п.}}} \right) - T (\Delta a_i M_0 + \Delta b_i M_1 + \Delta c_i' M_{-2}),$$

где Δa_i , Δb_i , $\Delta c_i'$ – коэффициенты теплоемкости ряда ΔC_i^p для i -ых реакций,
 M_0, M_1, M_{-2} – коэффициенты в таблицах Темкина-Шварцмана для определения температур (при 1200K: $M_0 = 0,6410$, $M_1 = 0,3389 \cdot 10^{-3}$ и $M_{-2} = 0,3176 \cdot 10^5$).

Проводим расчет для реакции:

$$\begin{aligned} \Delta G_{1,1200} &= (417980 + 193460 + 5280) - T(129,88 + 14,23 + 164,93) - \\ &- T(-27,74 \cdot 0,6410 + 58 \cdot 10^3 \cdot 0,3389 \cdot 10^{-3} + 10,705 \cdot 10^5 \cdot 0,3176 \cdot 10^5) = \\ &= 616720 - 1200 \cdot 309,04 - 1200(-17,78 + 19,66 + 3,40) = \\ &= 616720 - 370848 - 6336 = 239536 [\text{Дж}] \end{aligned}$$

Незначительно отличается от значений определенных для температуры 1173K в связи с различием температур на 27° .

Проводим расчет для реакции:

$$\begin{aligned} \Delta G_{2,1200} &= (1270430 - 22050) - T(265,44 - 30,5) - \\ &- T(44,22 \cdot 0,6410 - 83,155 \cdot 10^3 \cdot 0,3389 \cdot 10^{-3} - 15,155 \cdot 10^5 \cdot 0,3176 \cdot 10^5) = \\ &= 1248380 - 1200 \cdot 234,94 - 1200(28,34 - 28,18 - 4,81) = \\ &= 1248380 - 281928 + 5580 = 972032 [\text{Дж}] \end{aligned}$$

Продолжение приложения В

Незначительно отличается от значений определенных для температуры 1173К в связи с различием температур на 27°.

Расчет молярной доли катионов натрия и бора для ванны борирования.

В составе ванны борирования содержит в среднем 55 масс% тетрабората натрия и 16 масс% борного ангидрида. Влияние остальных компонентов, содержащих ионы натрия незначительно (не учитываем). Молярная масса тетрабората натрия равна 202. Молярная масса борного ангидрида равна 70. Моль тетрабората натрия можно представить как 1 моль оксида натрия и 2 моля борного ангидрида. В 100 г расплава содержится 55 г тетрабората натрия и 16 г борного ангидрида.

$$\frac{55}{202} = 0,27 \text{ моля тетрабората натрия.}$$

$$\frac{16}{70} = 0,23 \text{ моля борного ангидрида.}$$

Таким образом, в составе ванны находятся 0,27 моль оксида натрия и 0,77 моль борного ангидрида.

Молярная доля ионов натрия и бора:

$$\phi_1 = \frac{2 \cdot 0,27}{2 \cdot 0,27 + 2 \cdot 0,77} = \frac{0,27}{1,04} = 0,26 \quad \phi_2 = \frac{0,77}{1,04} = 0,74 .$$

Рассчитываем энтальпию для реакции образования тетрабората натрия из оксидов натрия бора. Необходимо расчеты вести при 1173К с учетом теплостойкостей участников реакций и возможных фазовых переходов (таблица В.3).

Окончание приложения В

$$\begin{aligned}
\Delta H^s &= -317860 + \int_{298}^T \left(55,93 - 154,88 \cdot 10^{-3} T' - \frac{13,94 \cdot 10^5}{T'^2} \right) dT' + 25450 - 44100 = \\
&= -336510 + 55,93(T' - 298) - \frac{154,88 \cdot 10^{-3}}{2} (T'^2 - 298^2) + 13,94 \cdot 10^5 \left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{298} \right) = \\
&= (-336510 - 16667 + 6877 - 4678) + 55,93T - \frac{154,88 \cdot 10^{-3}}{2} T^2 + \frac{13,94 \cdot 10^5}{T} = \\
&= -35,978 + 55,93T - 77,44 \cdot 10^3 \cdot T^2 + \frac{13,94 \cdot 10^5}{T} \\
\Delta H^s &= -350978 + 55,93 \cdot 1173 - 77,44 \cdot 10^{-3} \cdot 1173^2 + \frac{13,94 \cdot 10^5}{1173} = \\
&= -350978 + 65606 - 106552 + 1188 = -390736 [\text{Дж}]
\end{aligned}$$

$$Q = \frac{3}{4}(-390736) = -293052 [\text{Дж}]$$

Расчет разности ЭДС поляризации ячейки и при 1173 К:

$$\begin{aligned}
E_1 - E_2 &= \frac{(3 \cdot 248319 - 978089)}{6 \cdot 96500} + \frac{8,314 \cdot 1173}{96500} \ln \left(\frac{0,74^{1/3}}{0,26} \right) + \left(\frac{2}{3} 0,26^2 - 2 \cdot 0,74^2 \right) \cdot \left(-\frac{293052}{2 \cdot 96500} \right) = \\
&= -0,402 + 0,125 + 1,593 = 1,316 [\text{В}].
\end{aligned}$$

Таким образом, основываясь на термодинамических расчетах процессов происходящих в исследуемом расплаве электролита, можно утверждать, что преимущественно первым на катоде будет выделяться бор. При этом нельзя исключить возможного выделения незначительного количества натрия в прикатодной зоне из-за особенностей протекания химических и электрохимических процессов в реальных условиях. Необходимо отметить, что натрий способен химически восстанавливать бор, из расплава электролита, способствуя тем самым обогащению прикатодного слоя активными атомами бора. Так как количество выделяющегося натрия не будет существенным, то кинетика выделения бора будет в основном электрохимическая.

*** Программа BORIROVANIE ***

Образец из стали марки Ст3

| | |
|--|------|
| * NTRAP – (количество фаз в упрочненном слое) | - 3 |
| * NR(NT) – (порядок системы алгебраических уравнений) | - 43 |
| – (число элементов в матрице коэффициентов) | -129 |
| * ZR – (массив концентраций на межфазных границах) | - |
| 16.250 8.840 8.000 0.003 0.000 | |
| * TC – (массив коэффициентов диффузии) | - |
| $4.940 \cdot 10^{-11}$ $3.910 \cdot 10^{-10}$ $7.84 \cdot 10^{-9}$ | |

$$TD = 0.5000$$

$$NTM = 720.000$$

| НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ (Н.У.) | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---|---|
| 1. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 2. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 3. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |

| (массив начального распределения концентраций) | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
| 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 |
| 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 17.500

Граница 2

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 18.200

Граница 3

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 19.700

Продолжение приложения Г

Граница 4

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 20.400

Граница 5

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на межфазной границе 0. 8.840

Граница 6

Г.У. 2-го рода, концентрация углерода в стали равна 0.180 0.370

* SH – (массив информации о граничных условиях) –

17.500 18.200 19.700 20.400 8.840 0.180 0.370

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.053 | | | | | |
| 18.400 | 18.070 | 17.300 | 16.900 | 16.400 | 16.070 |
| 0.048 | | | | | |
| 9.300 | 8.940 | 8.840 | 8.640 | 7.340 | 6.920 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.720 | 0.630 | 0.480 | 0.305 | 0.1203 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.050 | | | | | |
| 18.240 | 18.050 | 17.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.057 | | | | | |
| 9.270 | 8.930 | 8.860 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.058 | | | | | |
| 18.250 | 18.120 | 17.280 | 16.770 | 16.220 | 16.020 |
| 0.061 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.915 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.235 | 0.205 | 0.178 | 0.165 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.052 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.058 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.870 | 8.660 | 7.315 | 6.860 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.710 | 0.630 | 0.445 | 0.315 | 0.090 | 0.000 |
| 0.3650 | 0.276 | 0.233 | 0.205 | 0.183 | 0.172 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.050 | | | | | |
| 20.140 | 19.050 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.067 | | | | | |
| 9.220 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.320 | 6.810 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.053 | | | | | |
| 18.240 | 18.120 | 17.280 | 16.780 | 16.220 | 16.020 |
| 0.065 | | | | | |
| 9.270 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.910 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.071 | | | | | |
| 20.140 | 18.120 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.058 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.310 | 6.910 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.057 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.093 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

Продолжение приложения Г

*** Программа BORIROVANIE ***

Образец из стали марки 20

* NTRAP – (количество фаз в упрочненном слое) - 3

* NR(NT) – (порядок системы алгебраических уравнений) - 43

– (число элементов в матрице коэффициентов) -129

* ZR – (массив концентраций на межфазных границах) -

16.250 8.840 8.000 0.003 0.000

* TC – (массив коэффициентов диффузии) -

 $4.940 \cdot 10^{-11}$ $3.910 \cdot 10^{-10}$ $7.84 \cdot 10^{-9}$

TD = 0.5000

NTM = 720.000

| НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ (Н.У.) | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---|---|
| 1. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 2. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 3. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |

| (массив начального распределения концентраций) | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
| 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 |
| 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 17.500

Граница 2

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 18.200

Граница 3

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 19.700

Продолжение приложения Г

Граница 4

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 20.400

Граница 5

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на межфазной границе 0. 8.840

Граница 6

Г.У. 2-го рода, концентрация углерода в стали равна 0.210 0.420

* SH – (массив информации о граничных условиях) –

17.500 18.200 19.700 20.400 8.840 0.210 0.420

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.044 | | | | | |
| 18.240 | 18.050 | 17.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.053 | | | | | |
| 9.300 | 8.940 | 8.840 | 8.640 | 7.340 | 6.920 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.720 | 0.630 | 0.480 | 0.305 | 0.1203 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.042 | | | | | |
| 18.300 | 18.050 | 17.190 | 16.680 | 16.210 | 16.020 |
| 0.064 | | | | | |
| 9.270 | 8.930 | 8.860 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.021 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.048 | | | | | |
| 18.250 | 18.120 | 17.280 | 16.770 | 16.220 | 16.020 |
| 0.067 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.915 |
| 0.020 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.235 | 0.205 | 0.178 | 0.165 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.039 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.070 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.870 | 8.660 | 7.315 | 6.860 |
| 0.022 | | | | | |
| 0.710 | 0.630 | 0.445 | 0.315 | 0.090 | 0.000 |
| 0.3650 | 0.276 | 0.233 | 0.205 | 0.183 | 0.172 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.045 | | | | | |
| 20.140 | 19.050 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.084 | | | | | |
| 9.220 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.320 | 6.810 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.053 | | | | | |
| 18.240 | 18.120 | 17.280 | 16.780 | 16.220 | 16.020 |
| 0.087 | | | | | |
| 9.270 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.910 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.069 | | | | | |
| 20.140 | 18.120 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.057 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.310 | 6.910 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.049 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.064 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

Продолжение приложения Г

*** Программа BORIROVANIE ***

Образец из стали марки 30

* NTRAP – (количество фаз в упрочненном слое) - 3

* NR(NT) – (порядок системы алгебраических уравнений) - 43

– (число элементов в матрице коэффициентов) -129

* ZR – (массив концентраций на межфазных границах) -

16.250 8.840 8.000 0.003 0.000

* TC – (массив коэффициентов диффузии) -

4.940 · 10⁻¹¹ 3.910 · 10⁻¹⁰ 7.84 · 10⁻⁹

TD = 0.5000

NTM = 720.000

| НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ (Н.У.) | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---|---|
| 1. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 2. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 3. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |

| (массив начального распределения концентраций) | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
| 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 |
| 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 17.500

Граница 2

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 18.200

Граница 3

Продолжение приложения Г

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 19.700

Граница 4

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 20.400

Граница 5

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на межфазной границе 0. 8.840

Граница 6

Г.У. 2-го рода, концентрация углерода в стали равна 0.310 0.630

* SH – (массив информации о граничных условиях) –

17.500 18.200 19.700 20.400 8.840 0.310 0.630

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.037 | | | | | |
| 18.400 | 18.070 | 17.300 | 16.900 | 16.400 | 16.070 |
| 0.084 | | | | | |
| 9.300 | 8.940 | 8.840 | 8.640 | 7.340 | 6.920 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.720 | 0.630 | 0.480 | 0.305 | 0.1203 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.026 | | | | | |
| 18.240 | 18.050 | 17.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.104 | | | | | |
| 9.270 | 8.930 | 8.860 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.038 | | | | | |
| 18.250 | 18.120 | 17.280 | 16.770 | 16.220 | 16.020 |
| 0.077 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.915 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.235 | 0.205 | 0.178 | 0.165 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.034 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.079 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.870 | 8.660 | 7.315 | 6.860 |
| 0.021 | | | | | |
| 0.710 | 0.630 | 0.445 | 0.315 | 0.090 | 0.000 |
| 0.3650 | 0.276 | 0.233 | 0.205 | 0.183 | 0.172 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.028 | | | | | |
| 20.140 | 19.050 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.098 | | | | | |
| 9.220 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.320 | 6.810 |
| 0.021 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.041 | | | | | |
| 18.240 | 18.120 | 17.280 | 16.780 | 16.220 | 16.020 |
| 0.098 | | | | | |
| 9.270 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.910 |
| 0.023 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.052 | | | | | |
| 20.140 | 18.120 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.087 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.310 | 6.910 |
| 0.024 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.053 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.096 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.025 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

Продолжение приложения Г

*** Программа BORIROVANIE ***

Образец из стали марки 45

* NTRAP – (количество фаз в упрочненном слое) - 3

* NR(NT) – (порядок системы алгебраических уравнений) - 43

– (число элементов в матрице коэффициентов) -129

* ZR – (массив концентраций на межфазных границах) -

16.250 8.840 8.000 0.003 0.000

* TC – (массив коэффициентов диффузии) -

4.940 · 10⁻¹¹ 3.910 · 10⁻¹⁰ 7.84 · 10⁻⁹

TD = 0.5000

NTM = 720.000

| НАЧАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ (Н.У.) | | | | |
|--------------------------|--------|----------|---|---|
| 1. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 2. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |
| 3. Н. У. ПОСТОЯННОЕ | 60.000 | 1123.000 | 0 | 0 |

| (массив начального распределения концентраций) | | | | | |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 | 20.000 |
| 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 | 8.840 |
| 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.003 |

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 17.500

Граница 2

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 18.200

Граница 3

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 19.700

Продолжение приложения Г

Граница 4

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на поверхности образца равна 0. 20.400

Граница 5

Г.У. 2-го рода, концентрация бора на межфазной границе 0. 8.840

Граница 6

Г.У. 2-го рода, концентрация углерода в стали равна 0.460 0.740

* SH – (массив информации о граничных условиях) –

17.500 18.200 19.700 20.400 8.840 0.460 0.740

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.024 | | | | | |
| 18.400 | 18.070 | 17.300 | 16.900 | 16.400 | 16.070 |
| 0.045 | | | | | |
| 9.300 | 8.940 | 8.840 | 8.640 | 7.340 | 6.920 |
| 0.017 | | | | | |
| 0.720 | 0.630 | 0.480 | 0.305 | 0.1203 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.027 | | | | | |
| 18.240 | 18.050 | 17.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.053 | | | | | |
| 9.270 | 8.930 | 8.860 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.018 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 90$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.027 | | | | | |
| 18.250 | 18.120 | 17.280 | 16.770 | 16.220 | 16.020 |
| 0.063 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.915 |
| 0.018 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.235 | 0.205 | 0.178 | 0.165 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.029 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.066 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.870 | 8.660 | 7.315 | 6.860 |
| 0.017 | | | | | |
| 0.710 | 0.630 | 0.445 | 0.315 | 0.090 | 0.000 |
| 0.3650 | 0.276 | 0.233 | 0.205 | 0.183 | 0.172 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.022 | | | | | |
| 20.140 | 19.050 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.075 | | | | | |
| 9.220 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.320 | 6.810 |
| 0.018 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

Продолжение приложения Г

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 120$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1223 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.014 | | | | | |
| 18.240 | 18.120 | 17.280 | 16.780 | 16.220 | 16.020 |
| 0.089 | | | | | |
| 9.270 | 8.925 | 8.875 | 8.570 | 7.410 | 6.910 |
| 0.019 | | | | | |
| 0.700 | 0.640 | 0.465 | 0.305 | 0.110 | 0.000 |
| 0.380 | 0.275 | 0.235 | 0.215 | 0.184 | 0.175 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1123 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.038 | | | | | |
| 20.140 | 18.120 | 18.290 | 16.780 | 16.210 | 16.030 |
| 0.071 | | | | | |
| 9.275 | 8.935 | 8.850 | 7.970 | 7.310 | 6.910 |
| 0.018 | | | | | |
| 0.690 | 0.645 | 0.455 | 0.315 | 0.105 | 0.000 |
| 0.370 | 0.265 | 0.225 | 0.200 | 0.180 | 0.178 |

| МОМЕНТ ВРЕМЕНИ $\tau = 150$ | | | ТЕМПЕРАТУРА 1173 | | |
|-----------------------------|--------|--------|------------------|--------|--------|
| 0.042 | | | | | |
| 19.200 | 18.090 | 17.300 | 16.7950 | 16.130 | 16.030 |
| 0.077 | | | | | |
| 9.275 | 8.925 | 8.875 | 8.670 | 7.310 | 6.910 |
| 0.017 | | | | | |
| 0.715 | 0.645 | 0.465 | 0.315 | 0.095 | 0.000 |
| 0.370 | 0.290 | 0.240 | 0.210 | 0.185 | 0.18 |

```

> Процентное содержание фазы FeВ при электролизном борировании
  стали марки Ст3.
> restart;
> Y:=43.77+1.36*(x1-2)-1.38*(0.02*x3-23.4)+5.11*(x1-2)*(10*x2-2)+1
  .07*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)-1.54*(x1-2)*(0.02*x3-23.4)+2.44*(x1
  -2)^2+3.22*(10*x2-2)^2+1.65*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 73.342 + 1.36 x1 - 0.0276 x3 + 5.11 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    + 1.07 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) - 1.54 (x1 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.44 (x1 - 2)^2
    + 3.22 (10 x2 - 2)^2 + 1.65 (0.02 x3 - 23.4)^2
> simplify(Y);
997.9000000 + 17.41600000 x1 - 1.553200000 x3 + 51.10000000 x1 x2 - 481.3800000 x2
    + 0.2140000000 x2 x3 - 0.03080000000 x1 x3 + 2.440000000 x1^2 + 322. x2^2
    + 0.0006600000000 x3^2
> a:=diff(Y,x1);
a := 17.416 + 51.10 x2 - 0.0308 x3 + 4.88 x1
> b:=diff(Y,x2);
b := 51.10 x1 - 481.380 + 0.2140 x3 + 644.00 x2
> c:=diff(Y,x3);
c := -1.55320 + 0.2140 x2 - 0.0308 x1 + 0.001320 x3
> a=0;b=0;c=0;
17.416 + 51.10 x2 - 0.0308 x3 + 4.88 x1 = 0
51.10 x1 - 481.380 + 0.2140 x3 + 644.00 x2 = 0
-1.55320 + 0.2140 x2 - 0.0308 x1 + 0.001320 x3 = 0
> solve({a,b,c},{x1,x2,x3});
{x2 = 0.1647381451, x1 = 2.303257364, x3 = 1203.701791}
> restart;
> Y:=43.77+1.36*(x1-2)-1.38*(0.02*x3-23.4)+5.11*(x1-2)*(10*x2-2)+1
  .07*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)-1.54*(x1-2)*(0.02*x3-23.4)+2.44*(x1
  -2)^2+3.22*(10*x2-2)^2+1.65*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 73.342 + 1.36 x1 - 0.0276 x3 + 5.11 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    + 1.07 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) - 1.54 (x1 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.44 (x1 - 2)^2
    + 3.22 (10 x2 - 2)^2 + 1.65 (0.02 x3 - 23.4)^2
> x2:=0.16;x1:=2.3;x3:=1204;
x2 := 0.16
x1 := 2.3
x3 := 1204
> Y;
43.518960

```

Продолжение приложения Г

```

> Процентное содержание фазы FeB при электролизном борировании
  стали марки 20.
> restart;
> Y:=35.15+1.01*(x1-2)+0.41*(10*x2-2)-1.37*(0.02*x3-23.4)+4.5*(x1-
  2)*(10*x2-2)+0.47*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)+2.64*(x1-2)^2+3.42*(1
  0*x2-2)^2+1.06*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 64.368 + 1.01 x1 + 4.10 x2 - 0.0274 x3 + 4.5 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    + 0.47 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.64 (x1 - 2)^2 + 3.42 (10 x2 - 2)^2
    + 1.06 (0.02 x3 - 23.4)^2
> simplify(Y);
709.0176000 - 18.55000000 x1 - 332.6800000 x2 - 1.038360000 x3 + 45. x1 x2
    + 0.09400000000 x2 x3 + 2.640000000 x1^2 + 342. x2^2 + 0.0004240000000 x3^2
> a:=diff(Y,x1);
a := -18.55 + 45.0 x2 + 5.28 x1
> b:=diff(Y,x2);
b := -332.680 + 45.0 x1 + 0.0940 x3 + 684.00 x2
> c:=diff(Y,x3);
c := -1.03836 + 0.0940 x2 + 0.000848 x3
> a=0;b=0;c=0;
-18.55 + 45.0 x2 + 5.28 x1 = 0
-332.680 + 45.0 x1 + 0.0940 x3 + 684.00 x2 = 0
-1.03836 + 0.0940 x2 + 0.000848 x3 = 0
> solve({a,b,c},{x1,x2,x3});
{x2 = 0.2050703415, x3 = 1201.749278, x1 = 1.765498983}
> restart;
> Y:=35.15+1.01*(x1-2)+0.41*(10*x2-2)-1.37*(0.02*x3-23.4)+4.5*(x1-
  2)*(10*x2-2)+0.47*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)+2.64*(x1-2)^2+3.42*(1
  0*x2-2)^2+1.06*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 64.368 + 1.01 x1 + 4.10 x2 - 0.0274 x3 + 4.5 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    + 0.47 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.64 (x1 - 2)^2 + 3.42 (10 x2 - 2)^2
    + 1.06 (0.02 x3 - 23.4)^2
> x2:=0.2;x1:=1.8;x3:=1202;
x2 := 0.2
x1 := 1.8
x3 := 1202
> Y;
34.610976

```

```

> Оптимизация процесса электролизного борирования методом
  наименьших квадратов
> Процентное содержание фаз FeB при электролизном борировании
  стали марки 30.
> restart;
> Y:=23.34+0.88*(x1-2)-1.9*(0.02*x3-23.4)+5.59*(x1-2)*(10*x2-2)+3.
  69*(x1-2)^2+3.85*(10*x2-2)^2+1.96*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 66.04 + 0.88 x1 - 0.038 x3 + 5.59 (x1 - 2) (10 x2 - 2) + 3.69 (x1 - 2)^2
    + 3.85 (10 x2 - 2)^2 + 1.96 (0.02 x3 - 23.4)^2
> simplify(Y);
1191.777600 - 25.06000000 x1 - 1.872560000 x3 + 55.90000000 x1 x2 - 265.8000000 x2
    + 3.690000000 x1^2 + 385. x2^2 + 0.0007840000000 x3^2
> a:=diff(Y,x1);
a := -25.06 + 55.90 x2 + 7.38 x1
> b:=diff(Y,x2);
b := 55.90 x1 - 265.80 + 770.00 x2
> c:=diff(Y,x3);
c := -1.87256 + 0.001568 x3
> a=0;b=0;c=0;
-25.06 + 55.90 x2 + 7.38 x1 = 0
55.90 x1 - 265.80 + 770.00 x2 = 0
-1.87256 + 0.001568 x3 = 0
> solve({a,b,c},{x1,x2,x3});
{x2 = 0.2192322278, x1 = 1.735083803, x3 = 1194.234694}
> restart;
> Y:=23.34+0.88*(x1-2)-1.9*(0.02*x3-23.4)+5.59*(x1-2)*(10*x2-2)+3.
  69*(x1-2)^2+3.85*(10*x2-2)^2+1.96*(0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 66.04 + 0.88 x1 - 0.038 x3 + 5.59 (x1 - 2) (10 x2 - 2) + 3.69 (x1 - 2)^2
    + 3.85 (10 x2 - 2)^2 + 1.96 (0.02 x3 - 23.4)^2
> x2:=0.22;x1:=1.74;x3:=1194;
x2 := 0.22
x1 := 1.74
x3 := 1194
> Y;
22.763548

```

```

> Процентное содержание фазы FeB при электролизном борировании
  стали марки 45.
> restart;
> Y:=19.89-0.39*(x1-2)-2.56*(0.02*x3-23.4)+5.23*(x1-2)*(10*x2-2)-
  .47*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)+2.7*(x1-2)^2+4.43*(10*x2-2)^2+1.91*
  (0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 80.574 - 0.39 x1 - 0.0512 x3 + 5.23 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    - 0.47 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.7 (x1 - 2)^2 + 4.43 (10 x2 - 2)^2
    + 1.91 (0.02 x3 - 23.4)^2
> simplify(Y);
1153.857600 - 21.65000000 x1 - 1.820160000 x3 + 52.30000000 x1 x2 - 171.8200000 x2
  - 0.09400000000 x2 x3 + 2.700000000 x1^2 + 443. x2^2 + 0.0007640000000 x3^2
> a:=diff(Y,x1);
      a := -21.65 + 52.30 x2 + 5.4 x1
> b:=diff(Y,x2);
      b := 52.30 x1 - 171.820 - 0.0940 x3 + 886.00 x2
> c:=diff(Y,x3);
      c := -1.82016 - 0.0940 x2 + 0.001528 x3
> a=0;b=0;c=0;
      -21.65 + 52.30 x2 + 5.4 x1 = 0
      52.30 x1 - 171.820 - 0.0940 x3 + 886.00 x2 = 0
      -1.82016 - 0.0940 x2 + 0.001528 x3 = 0
> solve({a,b,c},{x1,x2,x3});
      {x2 = 0.1983208079, x3 = 1203.404552, x1 = 2.088485508}
> restart;
> Y:=19.89-0.39*(x1-2)-2.56*(0.02*x3-23.4)+5.23*(x1-2)*(10*x2-2)-
  .47*(10*x2-2)*(0.02*x3-23.4)+2.7*(x1-2)^2+4.43*(10*x2-2)^2+1.91*
  (0.02*x3-23.4)^2;
Y:= 80.574 - 0.39 x1 - 0.0512 x3 + 5.23 (x1 - 2) (10 x2 - 2)
    - 0.47 (10 x2 - 2) (0.02 x3 - 23.4) + 2.7 (x1 - 2)^2 + 4.43 (10 x2 - 2)^2
    + 1.91 (0.02 x3 - 23.4)^2
> x2:=0.2;x1:=2.09;x3:=1203;
      x2 := 0.2
      x1 := 2.09
      x3 := 1203
> Y;
      19.019166

```

Продолжение приложения Г

Таблица Г1-Матрица планирования и результаты эксперимента (Ст3)

| Система опытов | № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_{12} | X_{23} | X_{13} | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | Y_3^1 | Y_3^2 | Y_3 | Y_p |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Полный факторный эксперимент | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 59 | 61 | 60 | 59,24 |
| | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 56 | 54 | 55 | 55,63 |
| | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 48 | 46 | 47 | 47,67 |
| | 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 62 | 64 | 63 | 63,69 |
| | 5 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 55 | 57 | 56 | 55,58 |
| | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 45 | 43 | 44 | 43,42 |
| | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 48 | 46 | 47 | 47,73 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 56 | 58 | 57 | 57,76 |
| Опыты в «звёздных» точках | 9 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 55 | 53 | 54 | 54,82 |
| | 10 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 47 | 49 | 48 | 48,93 |
| | 11 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 55 | 53 | 54 | 54,23 |
| | 12 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 54 | 52 | 53 | 52,34 |
| | 13 | 0 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 48 | 50 | 49 | 49,75 |
| | 14 | 0 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 47 | 49 | 48 | 48,78 |
| Опыты в «Центре» плана | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 45 | 43 | 44 | 43,77 |
| | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 44 | 43 | 43,77 |
| | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44 | 42 | 43 | 43,77 |
| | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 44 | 43 | 43,77 |
| | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 43 | 45 | 44 | 43,77 |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 | 44 | 43 | 43,77 |

Примечание: Y_3^1, Y_3^2 – экспериментально полученные значения; Y_p – расчетные значения.

Таблица Г2-Матрица планирования и результаты эксперимента (сталь 20)

| Система опытов | № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_{12} | X_{23} | X_{13} | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | Y_3^1 | Y_3^2 | Y_3 | Y_p |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Полный факторный эксперимент | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 52 | 50 | 51 | 50,33 |
| | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 47 | 45 | 46 | 45,54 |
| | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 42 | 44 | 43 | 43,78 |
| | 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 55 | 53 | 54 | 54,73 |
| | 5 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 49 | 46 | 47 | 46,46 |
| | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 34 | 36 | 35 | 34,33 |
| | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 39 | 37 | 38 | 38,86 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 47 | 49 | 48 | 48,64 |
| Опыты в «звёздных» точках | 9 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 44 | 46 | 45 | 45,77 |
| | 10 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 40 | 38 | 39 | 39,82 |
| | 11 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 44 | 46 | 45 | 44,18 |
| | 12 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 43 | 45 | 44 | 43,27 |
| | 13 | 0 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 41 | 39 | 40 | 40,63 |
| | 14 | 0 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 37 | 35 | 36 | 36,61 |
| Опыты в «Центре» плана | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 37 | 36 | 35,15 |
| | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 35 | 37 | 36 | 35,15 |
| | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 | 34 | 35 | 35,15 |
| | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 | 35 | 36 | 35,15 |
| | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 36 | 35 | 35,15 |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 36 | 35 | 35,15 |

Примеч.: Y_3^1, Y_3^2 – экспериментально полученные значения; Y_p – расчетные значения.

Продолжение приложения Г

Таблица Г3-Матрица планирования и результаты эксперимента (сталь 30)

| Система опытов | № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_{12} | X_{23} | X_{13} | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | Y_9^1 | Y_9^2 | Y_9 | Y_p |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Полный факторный эксперимент | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 40 | 42 | 41 | 40,23 |
| | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 32 | 34 | 33 | 32,35 |
| | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 30 | 32 | 31 | 31,68 |
| | 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 45 | 43 | 44 | 43,83 |
| | 5 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 38 | 36 | 37 | 37,27 |
| | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 25 | 27 | 26 | 25,43 |
| | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 24 | 22 | 23 | 22,96 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 39 | 37 | 38 | 38,74 |
| Опыты в «звёздных» точках | 9 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 34 | 36 | 35 | 34,69 |
| | 10 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 32 | 34 | 33 | 33,72 |
| | 11 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 36 | 34 | 35 | 35,28 |
| | 12 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 33 | 35 | 34 | 34,17 |
| | 13 | 0 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 27 | 29 | 28 | 28,52 |
| | 14 | 0 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 30 | 28 | 29 | 29,61 |
| Опыты в «Центре» плана | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 23 | 22 | 22,34 |
| | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 22 | 23 | 22,34 |
| | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 22 | 24 | 23 | 22,34 |
| | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 23 | 21 | 22 | 22,34 |
| | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 | 23 | 22 | 22,34 |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24 | 22 | 23 | 22,34 |

Примечание: Y_9^1, Y_9^2 – экспериментально полученные значения; Y_p – расчетные значения.

Таблица Г4-Матрица планирования и результаты эксперимента (сталь 45)

| Система опытов | № опыта | X_1 | X_2 | X_3 | X_{12} | X_{23} | X_{13} | X_1^2 | X_2^2 | X_3^2 | Y_9^1 | Y_9^2 | Y_9 | Y_p |
|------------------------------|---------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|-------|-------|
| Полный факторный эксперимент | 1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 37 | 39 | 38 | 38,52 |
| | 2 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 29 | 31 | 30 | 29,46 |
| | 3 | -1 | +1 | -1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 28 | 30 | 29 | 29,27 |
| | 4 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 41 | 39 | 40 | 40,92 |
| | 5 | -1 | -1 | +1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 35 | 33 | 34 | 33,17 |
| | 6 | +1 | -1 | +1 | -1 | -1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 23 | 25 | 24 | 24,36 |
| | 7 | -1 | +1 | +1 | -1 | +1 | -1 | +1 | +1 | +1 | 21 | 19 | 20 | 20,42 |
| | 8 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | +1 | 36 | 34 | 35 | 35,63 |
| Опыты в «звёздных» точках | 9 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 21 | 23 | 22 | 22,87 |
| | 10 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 0 | 29 | 31 | 30 | 30,51 |
| | 11 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 33 | 31 | 32 | 31,47 |
| | 12 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 0 | 30 | 32 | 31 | 30,26 |
| | 13 | 0 | 0 | +1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 18 | 20 | 19 | 19,64 |
| | 14 | 0 | 0 | -1,68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | +2,82 | 28 | 26 | 27 | 27,43 |
| Опыты в «Центре» плана | 15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 17 | 16 | 16,06 |
| | 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 18 | 17 | 16,06 |
| | 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 16 | 17 | 16,06 |
| | 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15 | 17 | 16 | 16,06 |
| | 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 17 | 15 | 16 | 16,06 |
| | 20 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 18 | 16 | 17 | 16,06 |

Примечание: Y_9^1, Y_9^2 – экспериментально полученные значения; Y_p – расчетные значения.

Продолжение приложения Г

Таблица Г5-Результаты статической обработки экспериментальных данных

| Параметр оптим. | Коэффициенты регрессии | | | | | | | | | | Оценка дисперсии воспроизв-ти, S_{y^2} | Оценка дисперсии адекватности, S_{a^2} | Критерий Фишера | |
|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---|---|---------------------|---------------------|
| | b_0 | b_1 | b_2 | b_3 | b_{12} | b_{23} | b_{13} | b_{11} | b_{22} | b_{33} | | | $F_{f_1f_2}^{расч}$ | $F_{f_1f_2}^{табл}$ |
| Y_1 | 43,8 | 1,36 | 0,05 | -1,38 | 5,11 | 1,07 | -1,54 | 2,44 | 3,22 | 1,65 | 0,27 | 1,36 | 5,03 | 5,05 |
| Y_2 | 35,15 | 1,44 | -0,02 | -2,1 | 4,5 | -0,24 | -0,24 | 2,64 | 3,42 | 1,06 | 0,3 | 1,5 | 5 | 5,05 |
| Y_3 | 22,34 | 0,88 | 0,06 | -1,9 | 5,59 | -0,36 | -0,12 | 3,69 | 3,85 | 1,96 | 0,3 | 0,79 | 2,62 | 5,05 |
| Y_4 | 16,06 | 0,81 | -0,02 | -1,84 | 5,23 | -0,47 | 0,23 | 3,72 | 3,88 | 2,31 | 0,3 | 1,29 | 4,32 | 5,05 |

В качестве независимых переменных (факторов) были выбраны: x_1 – время насыщения, ч; x_2 – плотность катодного тока, А/см²; x_3 – температура насыщения, К. Требовалось с помощью полного факторного эксперимента найти математическое описание этого процесса в окрестности точки факторного пространства с координатами: $x_{01} = 2$ ч, $x_{02} = 0,2$ А/см², $x_{03} = 1173$ К.

Математическое описание рассматриваемого процесса выражается следующим уравнением регрессии:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_{12}X_1X_2 + b_{23}X_2X_3 + b_{13}X_1X_3 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{33}X_3^2,$$

где b – коэффициент регрессии; X_1, X_2, X_3 – кодированные переменные, связанные с временем, плотностью катодного тока и температурой расплава,

$$X_1 = \frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1}; X_2 = \frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2}; X_3 = \frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3},$$

где x_1, x_2, x_3 – верхний уровень проведения эксперимента; x_{01}, x_{02}, x_{03} – основной уровень проведения эксперимента; $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3$ – интервал варьирования.

При проведении полного факторного эксперимента зададимся условиями, представленными в табл. Г6.

Продолжение приложения Г

Параметром оптимизации служило процентное содержание высокобористой фазы FeB (Y_i).

Матрицы планирования и результаты полного факторного эксперимента представлены выше (таб.Г1 и Г2)

Таблица Г6 Основные характеристики плана эксперимента

| Характеристика | x_1 , ч | x_2 , А/см ² | x_3 , К |
|-----------------------|-----------|---------------------------|-----------|
| Основной уровень | 2 | 0,2 | 1173 |
| Интервал варьирования | 0,5 | 0,1 | 50 |
| Верхний уровень | 2,5 | 0,3 | 1223 |
| Нижний уровень | 1,5 | 0,1 | 1123 |

Для того чтобы убедиться в воспроизводимости опытов, проводили параллельные опыты в каждой области изменения влияющих факторов.

Для нахождения коэффициентов регрессии вычисляли следующие вспомогательные коэффициенты:

$$A = \frac{1}{2B[(n+2)B-n]},$$

$$B = \frac{nN}{(n+2)(N-N_0)},$$

$$C = \frac{N}{N-N_0},$$

где n – число факторов; N – общее число опытов ротатабельного ЦКП; N_0 – число опытов в центре плана.

Среднее арифметическое значение функции отклика вычисляли по формуле

$$\bar{y}_j = \frac{1}{k^*} \sum_{i=1}^{k^*} y_{ji},$$

где k^* – число параллельных опытов ($k^* = 2$).

На основании результатов эксперимента вычисляли следующие суммы:

$$S_0 = \sum_{j=1}^N \bar{y}_j,$$

$$S_i = \sum_{j=1}^N X_{ji} \bar{y}_j,$$

$$S_{ik^*} = \sum_{j=1}^N X_{ji} X_{jk^*} \bar{y}_j \quad (i \neq k^*),$$

$$S_{ii} = \sum_{j=1}^N X_{ji}^2 \bar{y}_j \quad (i = 1, \dots, n),$$

где j – номер опыта; i – номер фактора.

Формулы для расчета коэффициентов регрессии имеют вид:

$$b_0 = \frac{2AB}{N} \left[S_0 B(n+2) - C \sum_{i=1}^n S_{ii} \right],$$

$$b_i = \frac{CS_i}{N},$$

$$b_{ik} = \frac{C^2 S_{ik}}{BN} \quad (i \neq k),$$

$$b_{ii} = \frac{AC}{N} \left[S_{ii} C(B(n+2) - n) + C(1-B) \sum_{i=1}^n S_{ii} - 2BS_0 \right].$$

Оценку дисперсии воспроизводимости можно найти на основании результатов опытов, проведенных в центре плана:

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_0} y_j^0.$$

Тогда

$$S_y^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{j=1}^{N_0} (y_j^0 - \bar{y})^2.$$

Эта величина найдена нами при числе степеней свободы

$$f = N_0 - 1.$$

Оценки дисперсии в определении коэффициентов регрессии вычисляли по следующим формулам:

$$S_{b_0}^2 = \frac{2AB(n+2)}{N} S_y^2,$$

$$S_{b_i}^2 = \frac{S_y^2}{N - N_0} \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

$$S_{b_{ik}}^2 = \frac{C^2 S_y^2}{N} \quad (i \neq k),$$

$$S_{b_n}^2 = \frac{AC^2 S_y^2}{N} [B(n+1) - (n-1)].$$

В ротатабельном ЦКП принято считать, что коэффициент b_i значим, если $|b_i| \geq S_{b_i} t$, где t – значение критерия Стьюдента при числе степеней свободы, с которыми определялась S_y^2 , и выбранном уровне значимости. Аналогичные условия значимости справедливы и для других коэффициентов регрессии.

Адекватность модели определяли по критерию Фишера:

$$F_p = \frac{\max(S_{ад}^2; S_y^2)}{\min(S_{ад}^2; S_y^2)},$$

где $S_{ад}^2$ – дисперсия адекватности,

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j^o - y_j^p) - S_y^2 (N_0 - 1)}{N - \frac{(n+2)(n+1)}{2} - (N_0 - 1)},$$

где y_j^p – расчетные значения функции отклика.

С дисперсией адекватности связано число степеней свободы:

$$f_{ад} = N - \frac{(n+2)(n+1)}{2} - (N_0 - 1).$$

Обработка экспериментальных данных и построение графиков производились по средним величинам замеренных параметров (по способу наименьших квадратов):

$$a_{вер} = \frac{\sum_{k'=1}^n X_{k'}}{n},$$

где $a_{вер}$ – среднее арифметическое значение; $X_{k'}$ – случайный результат при k' -м измерении; n – количество измерений.

Чтобы учесть возможные отклонения $a_{вер}$ от искомого точного значения, вычисляли среднеквадратическую ошибку среднего арифметического, которая является вероятностной характеристикой совокупности всевозможных значений средних арифметических из n измерений:

$$D(a) = \frac{\sigma_{из}^2}{n},$$

где a – среднеквадратическая ошибка среднего арифметического; $\sigma_{из}$ – среднеквадратическая ошибка одного измерения; n – количество измерений;

$$\sigma_{из} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^n (X_n - a_{вер})^2}{n-1}}.$$

Среднеквадратическая ошибка является числовой характеристикой качества совокупности измерений, для которых она задана или вычислена. Чем больше σ , тем хуже качество измерений.

Для оценки качества измерений пользовались еще тремя величинами:

а) вероятностной ошибкой:

$$r_{ои} = \frac{2}{3} \sigma_{из};$$

б) абсолютной ошибкой:

$$m_{ои} \approx 0,86;$$

в) мерой точности:

$$\tau_{то} = \frac{0,7}{\sigma_{из}}.$$

Вероятностная и абсолютная ошибка тем больше, чем хуже качество измерений; мера точности растет с повышением точности измерений.

| ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ (В.И.) | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| 1. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 2. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 3. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 4. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 5. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |

*QH - (массив информации о внутренних источниках) -

2.000 0.000 2.000 0.000 2.000 0.000

2.000 0.000 2.000 0.000

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 2

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 3

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 4

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0.

3.000 0.008 1373.000

Граница 5

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 6

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

*SH - (массив информации о граничных условиях) -

4.000 4.000 4.000 3.000 0.008 1373.000 4.000 4.000

| Момент времени $t = 5.000$ | | | | | |
|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 466.782 | 467.101 | 467.848 | 469.075 | 470.799 | 473.040 |
| 475.816 | 479.145 | 483.574 | 488.739 | 494.640 | 501.260 |
| 508.590 | 513.635 | 525.237 | 534.203 | 544.769 | 750.353 |
| 1058.285 | 1249.281 | 1339.143 | 1367.755 | 1373.096 | 1373.097 |
| 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 |

| Момент времени $t = 10.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 505.907 | 506.229 | 506.978 | 508.196 | 509.883 | 512.034 |
| 514.644 | 517.283 | 520.554 | 524.739 | 528.421 | 532.989 |
| 537.951 | 543.293 | 549.004 | 555.043 | 627.962 | 731.279 |
| 930.335 | 1092.477 | 1211.815 | 1291.492 | 1340.274 | 1373.097 |
| 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 |

| Момент времени $t = 15.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 539.574 | 539.838 | 540.455 | 541.455 | 542.843 | 544.614 |
| 546.763 | 549.283 | 552.554 | 556.273 | 560.421 | 564.986 |
| 569.251 | 575.292 | 581.004 | 587.043 | 659.962 | 731.279 |
| 930.335 | 1092.477 | 1211.815 | 1291.492 | 1340.274 | 1373.097 |
| 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 | 1373.098 |

| Момент времени $t = 30.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 614.352 | 614.735 | 615.163 | 615.859 | 616.824 | 618.060 |
| 619.565 | 621.335 | 623.643 | 626.280 | 629.240 | 632.518 |
| 636.108 | 640.002 | 644.194 | 648.675 | 702.981 | 756.296 |
| 895.651 | 1019.342 | 1123.408 | 1206.319 | 1268.726 | 1370.146 |
| 1372.455 | 1372.812 | 1372.996 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 60.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 718.608 | 718.734 | 719.028 | 719.507 | 720.171 | 721.023 |
| 722.060 | 723.283 | 724.881 | 726.710 | 728.768 | 731.053 |
| 733.563 | 736.295 | 739.246 | 742.411 | 780.863 | 818.679 |
| 911.810 | 990.034 | 1061.463 | 1124.912 | 1179.720 | 1323.560 |
| 1364.479 | 1372.500 | 1372.625 | 1372.976 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 90.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 856.469 | 856.549 | 856.736 | 857.040 | 857.462 | 858.003 |
| 858.663 | 859.442 | 860.459 | 861.626 | 862.940 | 864.402 |
| 866.010 | 867.762 | 869.658 | 971.696 | 896.480 | 920.876 |
| 969.076 | 1015.989 | 1060.898 | 1103.190 | 1142.375 | 1271.001 |
| 1338.659 | 1364.969 | 1372.026 | 1372.058 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 120.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 950.295 | 950.352 | 950.486 | 950.705 | 951.009 | 951.398 |
| 951.874 | 952.435 | 953.169 | 954.010 | 954.958 | 956.014 |
| 957.175 | 958.441 | 959.812 | 961.287 | 979.231 | 996.901 |
| 1027.061 | 1057.203 | 1086.919 | 1115.834 | 1143.617 | 1245.438 |
| 1309.280 | 1349.658 | 1365.797 | 1371.366 | 1372.808 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 150.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1019.785 | 1019.830 | 1019.932 | 1020.098 | 1020.329 | 1020.625 |
| 1020.986 | 1021.413 | 1021.971 | 1022.611 | 1023.333 | 1024.136 |
| 1025.020 | 1025.984 | 1027.030 | 1028.154 | 1041.844 | 1055.326 |
| 1075.304 | 1095.793 | 1116.392 | 1136.959 | 1157.215 | 1236.832 |
| 1297.122 | 1336.021 | 1357.474 | 1364.494 | 1371.437 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 180.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1073.465 | 1073.501 | 1073.580 | 1073.711 | 1073.892 | 1074.124 |
| 1074.407 | 1074.742 | 1075.181 | 1075.684 | 1076.250 | 1076.881 |
| 1077.576 | 1078.334 | 1079.156 | 1080.041 | 1080.814 | 1101.424 |
| 1115.004 | 1129.261 | 1143.980 | 1158.961 | 1174.021 | 1236.515 |
| 1288.414 | 1325.838 | 1349.519 | 1362.636 | 1369.030 | 1573.000 |

| Момент времени $t = 240.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1116.048 | 1116.075 | 1116.139 | 1116.244 | 1116.389 | 1116.575 |
| 1116.803 | 1117.071 | 1117.423 | 1117.826 | 1118.281 | 1118.789 |
| 1119.346 | 1119.955 | 1120.615 | 1121.327 | 1129.986 | 1138.516 |
| 1147.822 | 1157.888 | 1168.536 | 1179.606 | 1190.952 | 1240.312 |
| 1284.383 | 1318.846 | 1342.828 | 1357.730 | 1366.050 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 390.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1238.320 | 1238.330 | 1238.360 | 1238.400 | 1238.460 | 1238.530 |
| 1238.620 | 1238.730 | 1238.870 | 1239.030 | 1239.220 | 1239.420 |
| 1239.650 | 1239.890 | 1240.160 | 1240.450 | 1243.960 | 1247.430 |
| 1248.160 | 1249.560 | 1251.530 | 1253.990 | 1256.880 | 1274.470 |
| 1297.080 | 1315.220 | 1332.640 | 1350.450 | 1363.160 | 1371.990 |

| Момент времени $t = 450.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1314.740 | 1314.740 | 1314.750 | 1314.760 | 1314.770 | 1314.800 |
| 1314.820 | 1314.860 | 1314.900 | 1314.940 | 1315.000 | 1315.060 |
| 1315.130 | 1315.200 | 1315.280 | 1315.370 | 1316.440 | 1317.500 |
| 1315.980 | 1314.850 | 1314.060 | 1313.550 | 1313.300 | 1315.060 |
| 1320.040 | 1330.800 | 1341.630 | 1352.230 | 1363.620 | 1371.140 |

| ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ (В.И.) | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| 1. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 2. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 3. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 4. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 5. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |

*QH - (массив информации о внутренних источниках) -

2.000 0.000 2.000 0.000 2.000 0.000

2.000 0.000 2.000 0.000

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 2

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 3

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 4

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0.

3.000 0.008 1373.000

Граница 5

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 6

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

*SH - (массив информации о граничных условиях) -

4.000 4.000 4.000 3.000 0.008 1373.000

4.000 4.000

| Момент времени $t = 60.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 769.273 | 770.216 | 772.413 | 775.975 | 780.897 | 787.154 |
| 794.707 | 803.508 | 804.102 | 805.056 | 806.338 | 807.927 |
| 809.806 | 811.963 | 814.385 | 817.064 | 850.052 | 882.578 |
| 958.129 | 1029.660 | 1095.250 | 1153.540 | 1203.730 | 1332.950 |
| 1369.630 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 90.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 915.610 | 916.173 | 917.483 | 919.611 | 922.555 | 926.377 |
| 930.851 | 936.165 | 936.528 | 937.111 | 937.898 | 938.876 |
| 940.033 | 941.033 | 942.859 | 944.517 | 964.950 | 984.114 |
| 1023.980 | 1062.530 | 1099.980 | 1135.700 | 1169.130 | 1281.180 |
| 1341.590 | 1365.530 | 1372.070 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 120.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1009.960 | 1009.850 | 1010.750 | 1012.210 | 1014.240 | 1016.820 |
| 1019.960 | 1023.640 | 1023.890 | 1024.300 | 1024.850 | 1025.530 |
| 1026.340 | 1027.270 | 1028.310 | 1029.480 | 1043.800 | 1057.930 |
| 1080.970 | 1104.570 | 1128.310 | 1151.780 | 1174.640 | 1260.640 |
| 1319.350 | 1351.870 | 1366.400 | 1371.480 | 1372.820 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 150.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1076.190 | 1076.470 | 1077.130 | 1078.200 | 1079.690 | 1081.600 |
| 1083.900 | 1086.610 | 1086.800 | 1087.100 | 1087.510 | 1088.010 |
| 1088.610 | 1089.300 | 1090.080 | 1090.940 | 1101.560 | 1112.050 |
| 1126.470 | 1141.720 | 1157.530 | 1173.611 | 1189.710 | 1255.100 |
| 1306.310 | 1340.090 | 1359.030 | 1368.000 | 1372.700 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 180.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1126.100 | 1126.310 | 1126.810 | 1127.630 | 1128.770 | 1130.220 |
| 1131.980 | 1134.050 | 1134.200 | 1134.430 | 1134.740 | 1135.130 |
| 1135.590 | 1136.110 | 1136.710 | 1137.370 | 1145.530 | 1153.590 |
| 1162.780 | 1172.880 | 1183.670 | 1194.950 | 1206.530 | 1256.520 |
| 1299.690 | 1331.610 | 1352.170 | 1363.720 | 1369.420 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 240.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1164.610 | 1164.780 | 1165.170 | 1165.810 | 1166.700 | 1167.840 |
| 1169.220 | 1170.840 | 1170.950 | 1171.130 | 1171.380 | 1171.680 |
| 1172.040 | 1172.460 | 1172.930 | 1173.450 | 1179.870 | 1186.210 |
| 1192.030 | 1198.760 | 1206.210 | 1214.220 | 1222.660 | 1261.160 |
| 1297.120 | 1326.040 | 1346.550 | 1359.490 | 1366.800 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 390.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1269.330 | 1269.400 | 1269.540 | 1269.770 | 1270.100 | 1270.520 |
| 1271.030 | 1271.630 | 1271.670 | 1271.730 | 1271.830 | 1271.840 |
| 1272.070 | 1272.230 | 1272.400 | 1272.600 | 1275.220 | 1277.400 |
| 1277.040 | 1277.320 | 1278.140 | 1279.440 | 1281.160 | 1293.310 |
| 1308.910 | 1324.830 | 1350.370 | 1364.430 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 450.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1329.320 | 1329.340 | 1329.370 | 1329.440 | 1329.530 | 1329.640 |
| 1329.780 | 1329.950 | 1329.960 | 1329.980 | 1330.000 | 1330.030 |
| 1330.070 | 1330.120 | 1330.160 | 1330.220 | 1330.920 | 1331.610 |
| 1330.120 | 1328.950 | 1328.060 | 1327.420 | 1327.000 | 1327.520 |
| 1335.820 | 1347.240 | 1357.260 | 1364.060 | 1371.100 | 1372.990 |

| ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ (В.И.) | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| 1. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 2. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 3. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 4. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 5. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |

*QH - (массив информации о внутренних источниках) -

2.000 0.000 2.000 0.000 2.000 0.000

2.000 0.000 2.000 0.000

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 2

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 3

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 4

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0.

3.000 0.008 1373.000

Граница 5

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 6

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

*SH - (массив информации о граничных условиях) -

4.000 4.000 4.000 3.000 0.008 1373.000

4.000 4.000

| Момент времени $t = 60.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 788.714 | 788.859 | 789.196 | 789.745 | 790.507 | 791.482 |
| 792.672 | 794.073 | 795.542 | 797.188 | 799.008 | 801.001 |
| 803.164 | 805.498 | 840.282 | 874.364 | 953.988 | 1028.280 |
| 1095.670 | 1155.030 | 1205.750 | 1335.570 | 1370.410 | 1373.000 |
| 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 90.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 941.130 | 941.213 | 941.413 | 941.736 | 942.184 | 942.758 |
| 943.458 | 944.283 | 945.149 | 946.121 | 947.196 | 948.374 |
| 949.655 | 951.038 | 971.676 | 991.917 | 1031.260 | 1069.810 |
| 1106.980 | 1142.210 | 1175.040 | 1285.920 | 1344.320 | 1366.630 |
| 1372.370 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 120.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1037.520 | 1037.570 | 1037.710 | 1037.920 | 1038.230 | 1038.610 |
| 1039.080 | 1039.640 | 1040.220 | 1040.880 | 1041.600 | 1042.400 |
| 1043.260 | 1044.200 | 1058.150 | 1071.840 | 1094.260 | 1117.030 |
| 1139.810 | 1162.270 | 1184.090 | 1264.400 | 1323.630 | 1354.170 |
| 1367.430 | 1371.850 | 1372.910 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 150.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1104.520 | 1104.560 | 1104.660 | 1104.810 | 1105.030 | 1105.310 |
| 1105.650 | 1106.050 | 1106.460 | 1106.930 | 1107.460 | 1108.030 |
| 1108.650 | 1109.320 | 1119.350 | 1129.190 | 1142.660 | 1156.870 |
| 1171.550 | 1186.480 | 1201.440 | 1263.460 | 1311.860 | 1343.450 |
| 1360.850 | 1368.860 | 1371.900 | 1372.820 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 180.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1153.510 | 1153.540 | 1153.610 | 1153.730 | 1153.810 | 1154.090 |
| 1154.340 | 1154.640 | 1154.950 | 1155.300 | 1155.690 | 1156.120 |
| 1156.580 | 1157.080 | 1164.580 | 1171.930 | 1180.130 | 1189.180 |
| 1198.890 | 1209.060 | 1219.530 | 1266.000 | 1306.240 | 1335.850 |
| 1354.710 | 1365.710 | 1370.090 | 1372.120 | 1372.810 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 240.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1190.500 | 1190.530 | 1190.580 | 1190.670 | 1190.720 | 1190.950 |
| 1191.140 | 1191.370 | 1191.610 | 1191.880 | 1192.180 | 1192.510 |
| 1192.860 | 1193.250 | 1198.990 | 1204.630 | 1209.540 | 1215.310 |
| 1221.780 | 1228.790 | 1236.230 | 1271.330 | 1304.400 | 1330.980 |
| 1349.730 | 1361.390 | 1367.840 | 1371.000 | 1372.340 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 390.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1286.280 | 1286.290 | 1286.300 | 1286.330 | 1286.370 | 1286.430 |
| 1286.490 | 1286.570 | 1286.650 | 1286.740 | 1286.840 | 1286.950 |
| 1287.080 | 1287.210 | 1289.180 | 1291.110 | 1290.390 | 1290.300 |
| 1290.730 | 1291.620 | 1292.900 | 1292.950 | 1316.370 | 1330.310 |
| 1342.880 | 1353.005 | 1360.540 | 1365.620 | 1370.550 | 1372.140 |

| Момент времени $t = 450.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1337.000 | 1337.000 | 1337.000 | 1337.010 | 1337.020 | 1337.030 |
| 1337.050 | 1337.070 | 1337.090 | 1337.110 | 1337.140 | 1337.170 |
| 1337.200 | 1337.240 | 1337.760 | 1338.280 | 1336.820 | 1335.680 |
| 1334.810 | 1334.170 | 1333.730 | 1333.970 | 1336.700 | 1340.910 |
| 1345.830 | 1350.850 | 1355.510 | 1362.880 | 1368.760 | 1371.360 |

| ВНУТРЕННИЕ ИСТОЧНИКИ (В.И.) | | |
|-----------------------------|-------|-------|
| 1. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 2. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 3. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 4. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |
| 5. В.И. ПОСТОЯННОЕ | 2.000 | 0.000 |

*QH - (массив информации о внутренних источниках) -

2.000 0.000 2.000 0.000 2.000 0.000

2.000 0.000 2.000 0.000

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ (Г.У.)

Граница 1

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 2

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 3

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 4

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0.

3.000 0.008 1373.000

Граница 5

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

Граница 6

Г.У. 2 - го рода, плотность теплового потока равна 0. 4.000

*SH - (массив информации о граничных условиях) -

4.000 4.000 4.000 3.000 0.008 1373.000

4.000 4.000

| Момент времени $t = 60.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 886.727 | 887.793 | 890.272 | 894.285 | 899.819 | 906.832 |
| 915.269 | 925.059 | 925.561 | 926.327 | 927.336 | 928.575 |
| 930.032 | 931.696 | 957.178 | 982.289 | 1039.890 | 1095.350 |
| 1146.900 | 1193.230 | 1233.500 | 1340.300 | 1370.500 | 1373.000 |
| 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 90.000$ | | | | | |
|-----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1041.270 | 1041.830 | 1043.110 | 1045.200 | 1048.090 | 1051.770 |
| 1056.200 | 1061.380 | 1061.650 | 1062.060 | 1062.610 | 1063.280 |
| 1064.070 | 1064.980 | 1078.840 | 1092.520 | 1117.540 | 1143.230 |
| 1168.890 | 1193.920 | 1217.790 | 1302.170 | 1348.930 | 1367.470 |
| 1372.910 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 120.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1129.020 | 1129.370 | 1130.160 | 1131.460 | 1133.250 | 1135.530 |
| 1138.290 | 1141.520 | 1141.680 | 1141.940 | 1142.290 | 1142.710 |
| 1143.210 | 1143.780 | 1152.540 | 1161.190 | 1173.690 | 1187.300 |
| 1201.620 | 1216.300 | 1231.020 | 1290.630 | 1333.350 | 1357.500 |
| 1368.310 | 1372.010 | 1372.920 | 1373.000 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 150.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1185.610 | 1185.840 | 1186.370 | 1187.240 | 1188.450 | 1189.980 |
| 1191.850 | 1194.030 | 1194.140 | 1194.320 | 1194.550 | 1194.840 |
| 1195.180 | 1195.570 | 1201.530 | 1207.420 | 1213.840 | 1221.390 |
| 1229.790 | 1238.800 | 1248.206 | 1290.240 | 1325.440 | 1349.460 |
| 1363.120 | 1369.580 | 1372.080 | 1372.860 | 1373.000 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 180.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1224.580 | 1224.740 | 1225.120 | 1225.740 | 1226.590 | 1227.670 |
| 1228.990 | 1230.540 | 1230.620 | 1230.750 | 1230.910 | 1231.120 |
| 1231.360 | 1231.640 | 1235.900 | 1240.100 | 1243.250 | 1247.430 |
| 1252.430 | 1258.080 | 1264.230 | 1294.210 | 1322.380 | 1344.150 |
| 1358.520 | 1366.650 | 1370.620 | 1372.280 | 1372.850 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 240.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1252.589 | 1252.708 | 1252.985 | 1253.435 | 1254.060 | 1254.857 |
| 1255.830 | 1256.970 | 1257.030 | 1257.120 | 1257.240 | 1257.390 |
| 1257.570 | 1257.780 | 1260.920 | 1264.030 | 1265.300 | 1267.490 |
| 1270.430 | 1274.000 | 1278.060 | 1299.690 | 1322.080 | 1341.060 |
| 1354.917 | 1363.760 | 1368.880 | 1371.390 | 1372.470 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 390.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1319.070 | 1319.110 | 1319.190 | 1319.320 | 1319.500 | 1319.740 |
| 1320.020 | 1320.360 | 1320.380 | 1320.410 | 1320.450 | 1320.490 |
| 1320.550 | 1320.610 | 1321.580 | 1322.530 | 1321.240 | 1320.450 |
| 1320.080 | 1320.090 | 1320.410 | 1325.350 | 1333.460 | 1342.540 |
| 1351.110 | 1358.260 | 1363.640 | 1367.340 | 1372.030 | 1373.000 |

| Момент времени $t = 450.000$ | | | | | |
|------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1350.400 | 1350.410 | 1350.430 | 1350.460 | 1350.500 | 1350.560 |
| 1350.630 | 1350.710 | 1350.720 | 1350.720 | 1350.730 | 1350.750 |
| 1350.760 | 1350.780 | 1351.040 | 1351.290 | 1350.130 | 1349.200 |
| 1348.460 | 1347.880 | 1347.450 | 1347.050 | 1348.480 | 1351.020 |
| 1354.150 | 1357.430 | 1360.520 | 1363.250 | 1367.270 | 1371.330 |

**Программные комплексы, базы исходных данных,
результаты и визуализация математического моделирования**

Для реализации построенной математической модели тепломассообменных процессов в электродной печи, обработки полученных числовых данных, включая их визуализацию путем построения графиков значений температур и параметров конвективных потоков, разработаны и адаптированы к вычислительной среде персональных компьютеров программные комплексы "РЕСН-F", "РЕСН-C++", расположенные в одноименных папках. Комплексы составлены на алгоритмическом языке C++ и на языке Fortran. Общий объем программных комплексов, включая исходные и исполняемые модули и файлы баз данных, не превосходит 2 Мб.

Для работы комплексов минимальными требованиями, предъявляемыми к компьютеру, являются стандартные характеристики операционной системы Windows XP, объем оперативной памяти не менее 8 Мб, разрешение монитора не менее 800×600.

Входные данные построенной математической модели - это параметры конструкции печи, теплофизические характеристики материалов и сред, температурные возмущающие и управляющие факторы и другие необходимые характеристики и параметры.

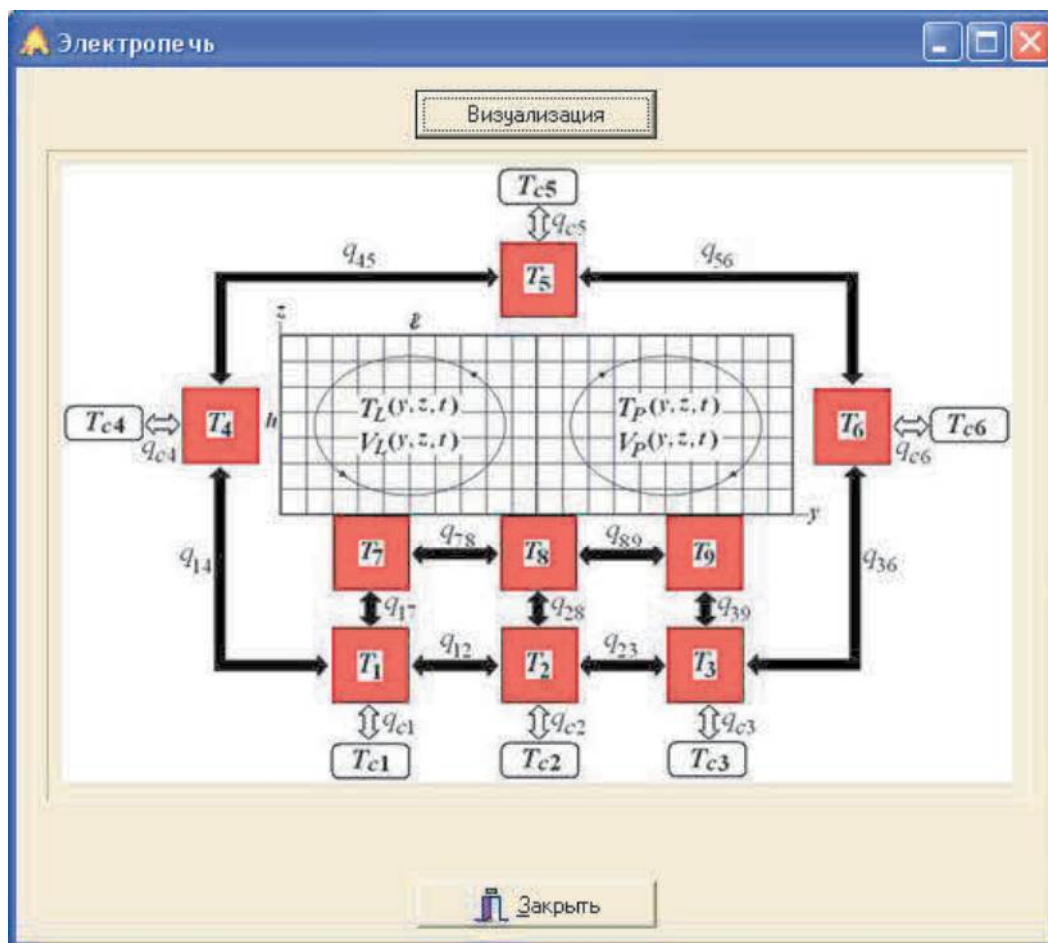
Выходные данные - неоднородные нестационарные температурные поля и неоднородные нестационарные поля скоростей течения сплошной среды в функциональных зонах печи.

Программные комплексы, осуществляющие по разработанным соотношениям, содержат основные файлы базы исходных данных и исполняемые файлы. В программном комплексе "РЕСН-F" это файлы: *aglav.dat*, *isparam.dat*, *r13d.dat*, *uw.dat* и *mtt13.exe*. В программном комплексе "РЕСН-C++" это файлы: *isparam.dat*, *param.dat* и *pechka.exe*. При запуске исполняемого файла *pechka.exe* открывается основное диалоговое окно программного комплекса "РЕСН-C++", позволяющее в интерактивном режиме с помощью

Продолжение приложения Е

дружественного интерфейса проводить моделирование заданных режимов работы электродной печи.

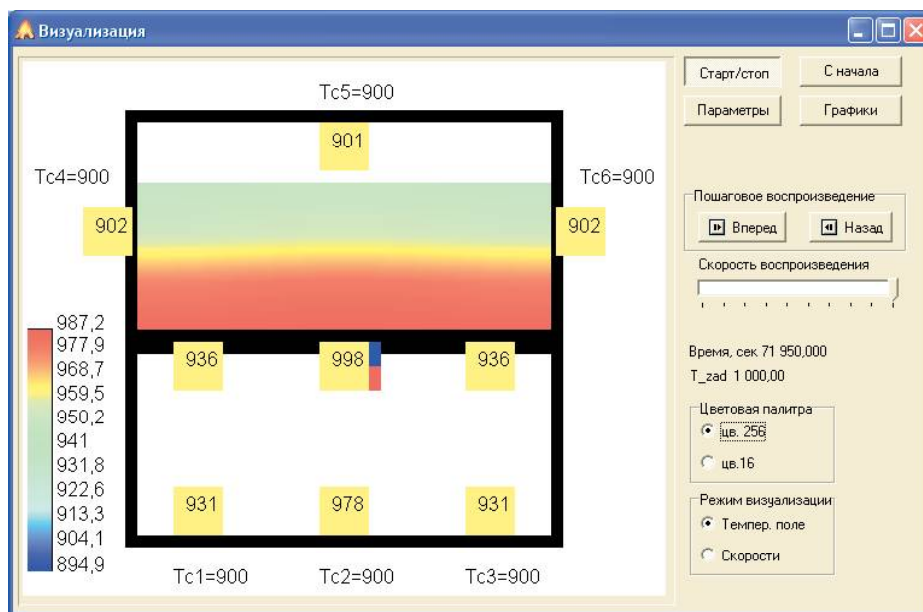
Диалоговое окно программного комплекса "РЕСН-С++"



При нажатии соответствующих кнопок “Визуализация” и “Параметры” раскрываются диалоговые окна входных и выходных данных, позволяющие вводить и изменять исходные данные, проводить компьютерные эксперименты и визуализировать выходную информацию по нестационарным температурным полям, тепловым и конвективным процессам в виде графиков или динамически изменяющихся цветowych топограмм.

Возможен также вывод и запоминание в текстовом файле числовых матриц температурных полей с течением времени (протокол расчета). Для этого нужно установить флажок в окошке “Сохранять протокол расчета” вспомогательных диалоговых окон.

Диалоговые окна исходных и выходных данных программного комплекса "РЕСН-С++"



| Параметры расчета | Параметры печи | |
|-------------------|--|--------|
| 0.2 | Шаг расчета, с | 0.2 |
| 50 | Шаг печати, с | 300 |
| 72000 | Время остановки счета, с | 72000 |
| 9.8 | Ускорение свободного падения м/с ² | 9.8 |
| 0.0008 | коэф. объемного расширения сплошной среды, 1/°C | 0.0008 |
| 0.3 | длина конвективного вала в лев. зоне, м | 0.3 |
| 0.6 | высота слоя сплошной среды в лев. зоне, м | 0.6 |
| 0.02 | коэф. кинем. вязк. сплошной среды в лев. зоне, м ² /с | 0.02 |
| 0.3 | длина конвективного вала в прав. зоне, м | 0.3 |
| 0.6 | высота слоя сплошной среды в прав. зоне, м | 0.6 |
| 0.02 | коэф. кинематич. вязкости сплошной среды в прав. зоне, м ² /с | 0.02 |
| 900 | F0(4) нач. усл. на температуру бок. стенок, °C | 900 |

Buttons: Принять, Отмена, Сохранить протокол расчета

Примечание.

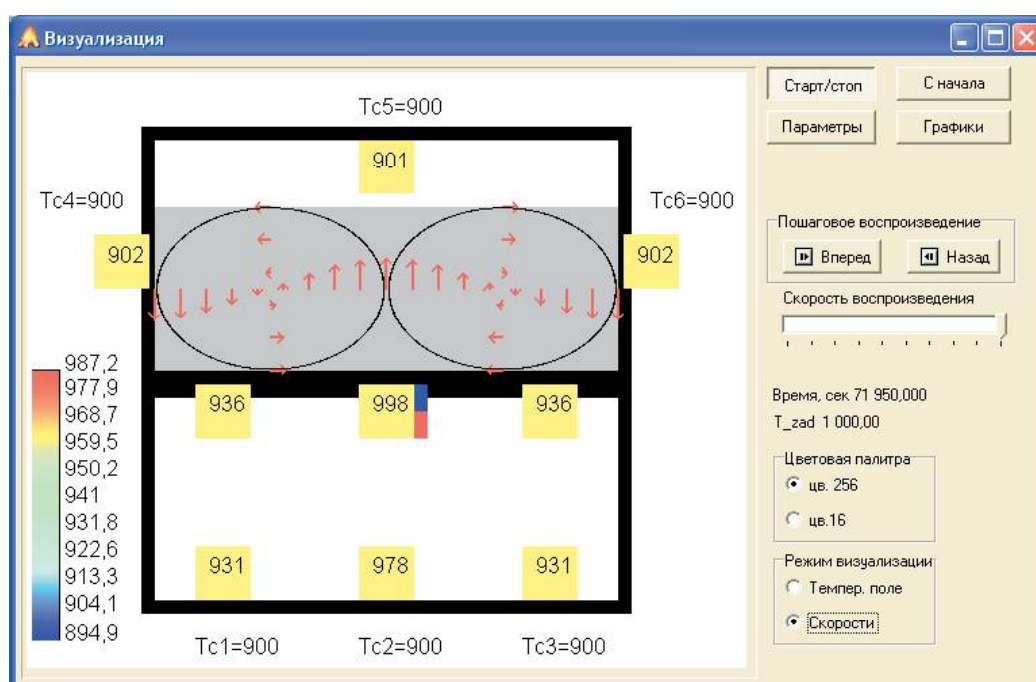
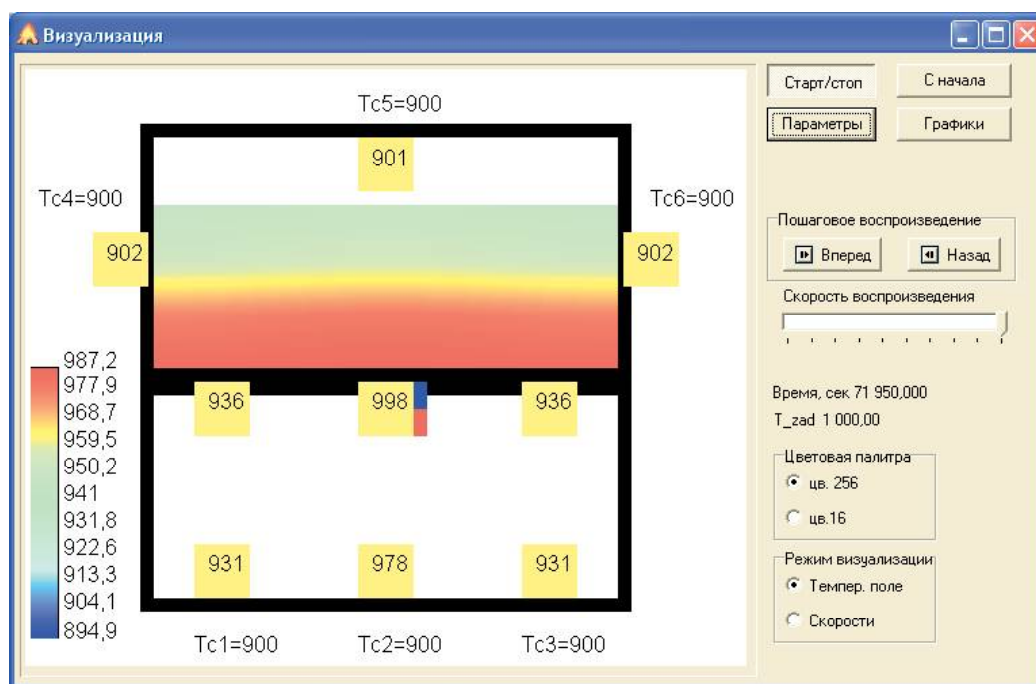
Разработанные программные комплексы занимают минимальный объем (≤ 2 Mb). Эти комплексы обеспечивают максимальное быстродействие расчетов (время моделирования теплового процесса в тысячи и более раз меньше реального времени протекания тепломассообменных процессов), что позволяет Пользователю решать не только задачи анализа, но и синтеза по оптимизации и проводить при необходимости расширение на использование интерактивных сред Delphi, Excel и других.

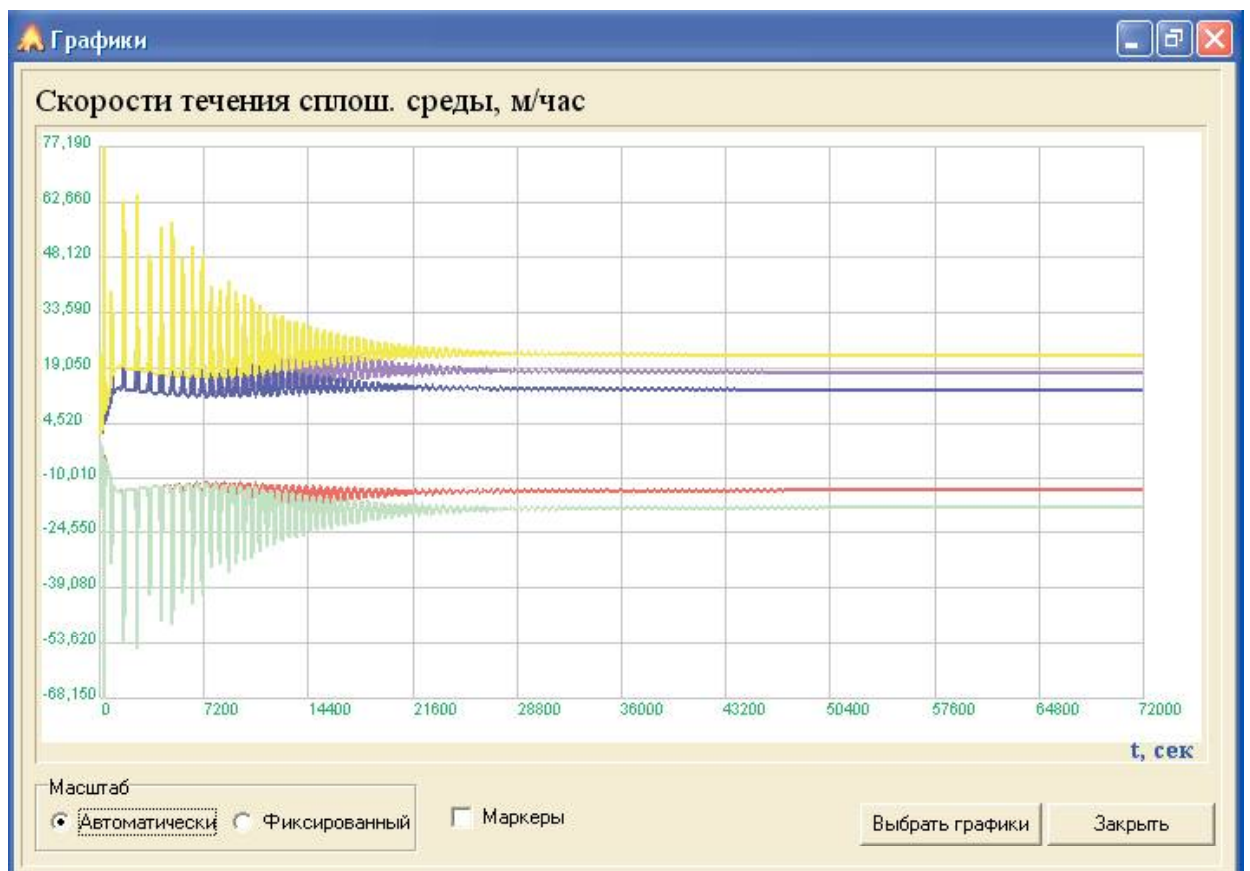
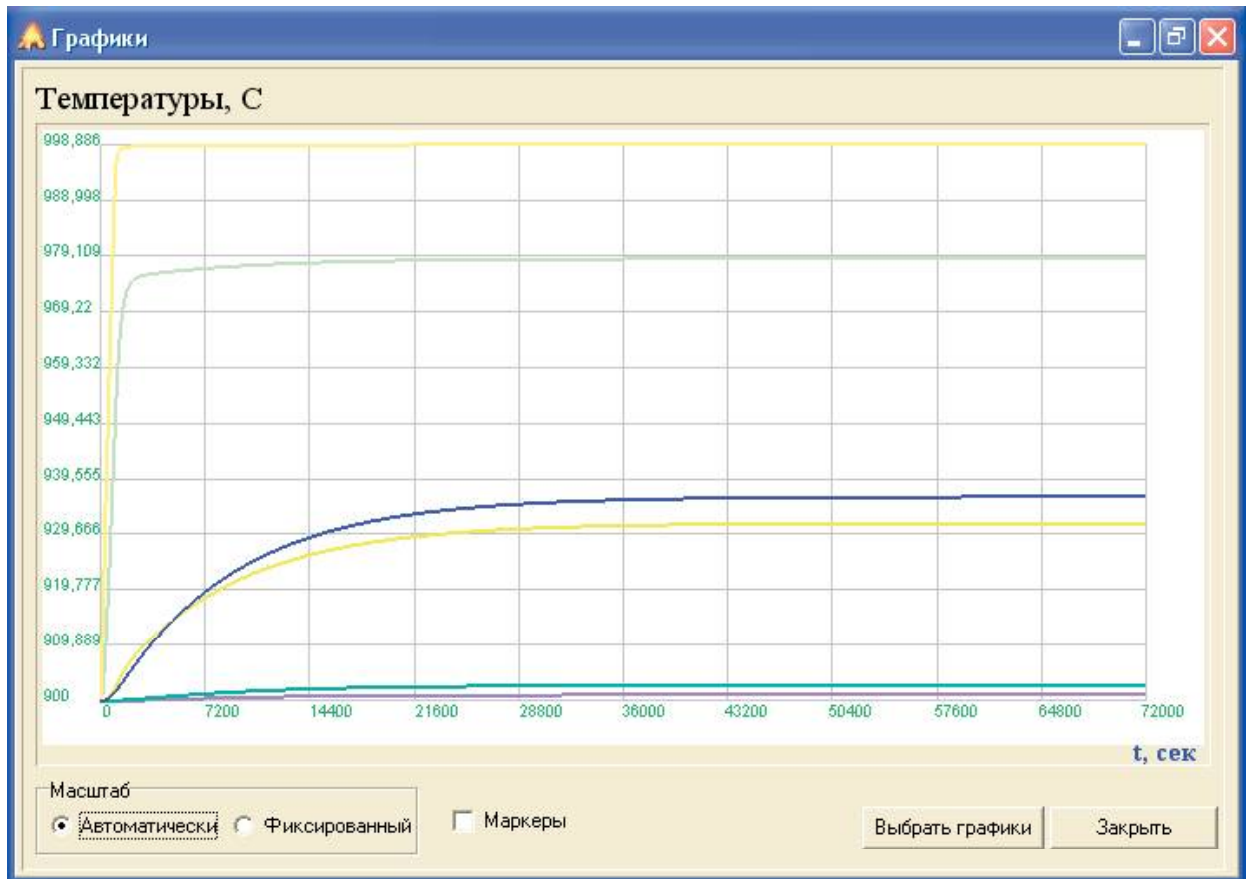
Продолжение приложения Е

Программные комплексы и файлы баз исходных данных снабжены встроенными комментариями для обеспечения наиболее дружелюбного интерфейса с Пользователем.

Примеры вывода визуализированной информации по расчету температурных полей и конвективных потоков сплошной среды в электродной печи

**Визуализированная информация
по расчету температурных полей и конвективных потоков сплошной среды**





массы дна, бок стенок, крышки, распл сплошной среды кг
 28.0167 110.4074 21.2819 484.9048
 эффективные теплоемк дна ванны печи кдж/^с
 4.8489 4.8489 4.8489
 эффект теплоемк бок стенок и крышки кдж/^с
 28.6137 9.8323 28.6137
 эффект теплоемк распл сплошной среды кдж/^с
 27.4779 27.4779 27.4779
 теплопроводности q1s2 q2s3 квт/^с
 0.0009 0.0009
 теплопроводности q7s8 q8s9 квт/^с
 0.0008 0.0008
 теплопроводности q1s7 q2s8 q3s9 квт/^с
 0.0112 0.0112 0.0112
 теплопроводности q1s4 q3s6 квт/^с
 0.0012 0.0012
 теплопроводности q4s5 q5s6 квт/^с
 0.0022 0.0022
 теплопроводим в среду qc1 qc2 qc3 qc4 qc5 qc6 квт/^с
 0.0019 0.0019 0.0019 0.0108 0.0070 0.0108
 Время, ч 0.0000
 температуры боковых стенок и крышки
 900.0000 900.0000 900.0000
 температуры дна
 900.0000 900.0000 900.0000
 температуры в придонном слое сплошной среды
 900.0000 900.0000 900.0000
 температуры окружающей среды
 900.0000 900.0000 900.0000 900.0000 900.0000 900.0000
 мощности источников стр квт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^с
 100.0000
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0000 PS1S1=-0.0000 м^2/с
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=0.1885 м/час w0z=-0.3770 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=-0.1885 м/час w0z=0.3770 м/час
 Время, ч 0.0000
 Время, ч 0.0139
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 900.0000 900.0000 900.0000
 температуры дна 1 2 3
 900.0010 900.2981 900.0010
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 900.0041 905.3974 900.0041
 заданная температура
 1000.0000
 мощности источников стр квт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^с
 94.6026
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0000 PS1S1=-0.0000 м^2/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=0.0000 tets1=-0.0000 ^с
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=0.0000 tets2=0.0000 ^с
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-0.7611 м/час w0z=0.7611 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2) 1.0764 м/час

0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^c
 74.0344
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0001 PSIS1=-0.0001 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=0.4721 tets1=-0.4721 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=0.0069 tets2=0.0069 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-5.5293 м/час w0z=7.4085 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=9.2444 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=5.5293 м/час w0z=-7.4085 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=9.2444 м/час
 912.7 912.8 912.8 912.9 913.0 913.1 913.2 913.2 913.3 913.3
 912.6 912.6 912.7 912.8 913.0 913.1 913.3 913.4 913.5 913.5
 912.6 912.6 912.7 912.8 913.0 913.1 913.3 913.4 913.5 913.5
 912.8 912.8 912.8 912.9 913.0 913.1 913.2 913.3 913.3 913.3
 913.3 913.3 913.2 913.2 913.1 913.0 912.9 912.8 912.8 912.7
 913.5 913.5 913.4 913.3 913.1 913.0 912.8 912.7 912.6 912.6
 913.5 913.5 913.4 913.3 913.1 913.0 912.8 912.7 912.6 912.6
 913.3 913.3 913.3 913.2 913.1 913.0 912.9 912.8 912.8 912.8
 Время, ч 0.0694
 Время, ч 0.0833
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 900.0005 900.0000 900.0005
 температуры дна 1 2 3
 900.1530 908.2057 900.1530
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 900.1430 930.9018 900.1430
 заданная температура
 1000.0000
 мощности источников стр кВт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^c
 69.0982
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0017 PSIS1=-0.0017 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=7.4958 tets1=-7.4958 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=17.0890 tets2=17.0890 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-36.2463 м/час w0z=68.1519 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=77.1912 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=36.2463 м/час w0z=-68.1519 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=77.1912 м/час
 894.9 895.1 895.9 897.1 898.5 900.0 901.5 902.6 903.4 903.7
 898.3 898.8 900.0 901.9 904.2 906.7 909.0 910.9 912.2 912.6
 918.4 918.9 920.1 922.0 924.3 926.8 929.1 931.0 932.3 932.7
 927.4 927.6 928.4 929.6 931.0 932.5 934.0 935.2 935.9 936.2
 903.7 903.4 902.6 901.5 900.0 898.5 897.1 895.9 895.1 894.9
 912.6 912.2 910.9 909.0 906.7 904.2 901.9 900.0 898.8 898.3
 932.7 932.3 931.0 929.1 926.8 924.3 922.0 920.1 918.9 918.4
 936.2 935.9 935.2 934.0 932.5 931.0 929.6 928.4 927.6 927.4
 Время, ч 0.0833
 Время, ч 0.0972
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 900.0009 900.0000 900.0009
 температуры дна 1 2 3
 900.2269 910.6292 900.2269
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 900.1941 935.7703 900.1941
 заданная температура
 1000.0000

мощности источников стр кВт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^c
 64.2297
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0000 PS1S1=-0.0000 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=0.0527 tets1=-0.0527 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=18.4976 tets2=18.4976 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-5.2449 м/час w0z=5.4693 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=7.5778 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=5.2449 м/час w0z=-5.4693 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=7.5778 м/час
 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4
 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.2 907.2
 928.8 928.8 928.8 928.8 928.8 928.9 928.9 928.9 928.9 928.9
 935.5 935.5 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6
 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4 900.4
 907.2 907.2 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1 907.1
 928.9 928.9 928.9 928.9 928.9 928.8 928.8 928.8 928.8 928.8
 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.6 935.5 935.5
 Время, ч 0.0972
 Время, ч 0.1111
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 900.0014 900.0000 900.0014
 температуры дна 1 2 3
 900.3169 913.2292 900.3169
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 900.2531 940.5769 900.2531
 заданная температура
 1000.0000
 мощности источников стр кВт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 3.0000 0.0000
 tzad-tdat ^c
 59.4231
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0000 PS1S1=-0.0000 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=0.0011 tets1=-0.0011 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=18.1599 tets2=18.1599 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-5.6951 м/час w0z=5.6997 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=8.0574 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=5.6951 м/час w0z=-5.6997 м/час
 Vmax=SQRT(V0y^2+W0z^2)=8.0574 м/час
 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1
 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7
 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1
 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7
 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1 903.1
 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7 909.7
 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1 931.1
 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7 937.7
 Время, ч 0.1111
 Время, ч 0.1250
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 900.0021 900.0001 900.0021

Время, ч 10.0000
 Время, ч 10.0139
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 902.6991 901.0324 902.6991
 температуры дна 1 2 3
 931.2331 978.4232 931.2331
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 935.7934 998.8813 935.7934
 заданная температура
 1000.0000
 мощности источников стр кВт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 0.3356 0.0000
 tzad-tdat ^c
 1.1187
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0002 PS1S1=-0.0002 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=1.1108 tets1=-1.1108 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=20.0264 tets2=20.0264 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-13.4768 м/час w0z=18.0507 м/час
 Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.5267 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=13.4768 м/час w0z=-18.0507 м/час
 Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.5267 м/час
 947.6 947.7 947.8 948.0 948.2 948.4 948.6 948.8 948.9 948.9
 954.5 954.6 954.8 955.0 955.4 955.7 956.1 956.4 956.6 956.6
 978.1 978.1 978.3 978.6 978.9 979.3 979.6 979.9 980.1 980.2
 985.7 985.8 985.9 986.1 986.3 986.5 986.7 986.9 987.0 987.0
 948.9 948.9 948.8 948.6 948.4 948.2 948.0 947.8 947.7 947.6
 956.6 956.6 956.4 956.1 955.7 955.4 955.0 954.8 954.6 954.5
 980.2 980.1 979.9 979.6 979.3 978.9 978.6 978.3 978.1 978.1
 987.0 987.0 986.9 986.7 986.5 986.3 986.1 985.9 985.8 985.7
 Время, ч 10.0139
 Время, ч 10.0278
 температуры боковых стенок и крышки 4 5 6
 902.6994 901.0326 902.6994
 температуры дна 1 2 3
 931.2357 978.4235 931.2357
 температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9
 935.7967 998.8813 935.7967
 заданная температура
 1000.0000
 мощности источников стр кВт
 qq1 qq2 qq3
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq4 qq5 qq6
 0.0000 0.0000 0.0000
 qq7 qq8 qq9
 0.0000 0.3356 0.0000
 tzad-tdat ^c
 1.1187
 функции тока в левой и правой зонах
 PS11=0.0002 PS1S1=-0.0002 м²/с
 температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки
 tet1=1.1206 tets1=-1.1206 ^c
 температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки
 tet2=20.0302 tets2=20.0302 ^c
 скорость течения сплошной среды в лев зоне
 v0y=-13.5170 м/час w0z=18.1314 м/час
 Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.6154 м/час
 скорость течения сплошной среды в прав зоне
 v0y=13.5170 м/час w0z=-18.1314 м/час
 Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.6154 м/час
 947.6 947.7 947.8 948.0 948.2 948.4 948.6 948.8 948.9 948.9
 954.5 954.6 954.7 955.0 955.4 955.8 956.1 956.4 956.6 956.6

978.0 978.1 978.3 978.6 978.9 979.3 979.6 979.9 980.1 980.2
 985.7 985.8 985.9 986.1 986.3 986.5 986.7 986.9 987.0 987.0
 948.9 948.9 948.8 948.6 948.4 948.2 948.0 947.8 947.7 947.6
 956.6 956.6 956.4 956.1 955.8 955.4 955.0 954.7 954.6 954.5
 980.2 980.1 979.9 979.6 979.3 978.9 978.6 978.3 978.1 978.0
 987.0 987.0 986.9 986.7 986.5 986.3 986.1 985.9 985.8 985.7

Время, ч 10.0278

Время, ч 10.0417

температуры боковых стенок и крышки 4 5 6

902.6997 901.0327 902.6997

температуры дна 1 2 3

931.2382 978.4239 931.2382

температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9

935.7999 998.8813 935.7999

заданная температура

1000.0000

мощности источников стр кВт

qq1 qq2 qq3

0.0000 0.0000 0.0000

qq4 qq5 qq6

0.0000 0.0000 0.0000

qq7 qq8 qq9

0.0000 0.3356 0.0000

tzad-tdat ^c

1.1187

функции тока в левой и правой зонах

PSI1=0.0002 PSIS1=-0.0002 м²/с

температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки

tet1=1.1254 tets1=-1.1254 ^c

температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки

tet2=20.0390 tets2=20.0390 ^c

скорость течения сплошной среды в лев зоне

v0y=-13.5364 м/час w0z=18.1707 м/час

Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.6585 м/час

скорость течения сплошной среды в прав зоне

v0y=13.5364 м/час w0z=-18.1707 м/час

Vmax=SQRT(V0y²+W0z²) 22.6585 м/час

947.6 947.7 947.8 948.0 948.2 948.4 948.6 948.8 948.9 948.9
 954.5 954.6 954.7 955.0 955.4 955.7 956.1 956.4 956.6 956.6
 978.0 978.1 978.3 978.6 978.9 979.3 979.7 979.9 980.1 980.2
 985.7 985.8 985.9 986.1 986.3 986.5 986.7 986.9 987.0 987.1
 948.9 948.9 948.8 948.6 948.4 948.2 948.0 947.8 947.7 947.6
 956.6 956.6 956.4 956.1 955.7 955.4 955.0 954.7 954.6 954.5
 980.2 980.1 979.9 979.7 979.3 978.9 978.6 978.3 978.1 978.0
 987.1 987.0 986.9 986.7 986.5 986.3 986.1 985.9 985.8 985.7

Время, ч 10.0417

Время, ч 10.0556

температуры боковых стенок и крышки 4 5 6

902.7000 901.0328 902.7000

температуры дна 1 2 3

931.2408 978.4242 931.2408

температуры в придонном слое сплошной среды 7 8 9

935.8032 998.8813 935.8032

заданная температура

1000.0000

мощности источников стр кВт

qq1 qq2 qq3

0.0000 0.0000 0.0000

qq4 qq5 qq6

0.0000 0.0000 0.0000

qq7 qq8 qq9

0.0000 0.3356 0.0000

tzad-tdat ^c

1.1187

функции тока в левой и правой зонах

PSI1=0.0002 PSIS1=-0.0002 м²/с

температ перепад tet1 tets1 в лев и прав зонах варки

tet1=1.1231 tets1=-1.1231 ^c

температ перепад tet2 tets2 в лев и прав зонах варки

tet2=20.0485 tets2=20.0485 ^c

скорость течения сплошной среды в лев зоне

v0y=-13.5265 м/час w0z=18.1514 м/час

**Определение закономерности распределения величин износа крыль-
ев лап культиватора восстановленных наплавкой**

Таблица 3.1 - Сводная ведомость величин износа крыльев лап культиватора
восстановленных наплавкой

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 13,88 | 9 | 14,55 | 17 | 14,8 | 25 | 14,97 |
| 2 | 13,98 | 10 | 14,58 | 18 | 14,83 | 26 | 15,05 |
| 3 | 14,03 | 11 | 14,64 | 19 | 14,88 | 27 | 15,08 |
| 4 | 14,18 | 12 | 14,65 | 20 | 14,88 | 28 | 15,15 |
| 5 | 14,28 | 13 | 14,69 | 21 | 14,89 | 29 | 15,27 |
| 6 | 14,36 | 14 | 14,71 | 22 | 14,92 | 30 | 15,41 |
| 7 | 14,38 | 15 | 14,72 | 23 | 14,92 | 31 | 15,42 |
| 8 | 14,38 | 16 | 14,78 | 24 | 14,92 | 32 | 15,69 |

Таблица 3.2 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими
законами распределения

| | | | | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 13,73 | 14,03 | 14,33 | 14,63 | 14,93 | 15,23 | 15,53 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 14,03 | 14,33 | 14,63 | 14,93 | 15,23 | 15,53 | 15,83 | |
| Середина интервала, мм | | 13,88 | 14,18 | 14,48 | 14,78 | 15,08 | 15,38 | 15,68 | |
| Опытная частота, m_i | | 2 | 3 | 5 | 14 | 4 | 3 | 1 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0,094 | 0,156 | 0,438 | 0,125 | 0,094 | 0,031 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,029 | 0,11 | 0,234 | 0,293 | 0,212 | 0,095 | 0,022 |
| | | ЗРВ | 0,025 | 0,097 | 0,222 | 0,264 | 0,217 | 0,099 | 0,046 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0,157 | 0,313 | 0,751 | 0,876 | 0,97 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,04 | 0,15 | 0,37 | 0,66 | 0,88 | 0,97 | 1 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,08 | 0,24 | 0,63 | 0,85 | 0,99 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | | НЗР | 1 | 4 | 7 | 9 | 7 | 3 | 1 |
| | | ЗРВ | 1 | 2 | 5 | 12 | 7 | 4 | 0 |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует опреде-
лить критерий согласия Пирсона

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (3-4)^2/4 + (5-7)^2/7 + (14-9)^2/9 + (4-7)^2/7 + (3-3)^2/3 + (1-1)^2/1 = 5,88.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (3-2)^2/2 + (5-5)^2/5 + (14-12)^2/12 + (4-7)^2/7 + (3-4)^2/4 + (1-0)^2/0 = 3,37.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 20,8%; для ЗРВ – Р% = 49,8%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 14,76 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,612 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 14,76 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,908 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 14,2 до 15,4 мм.

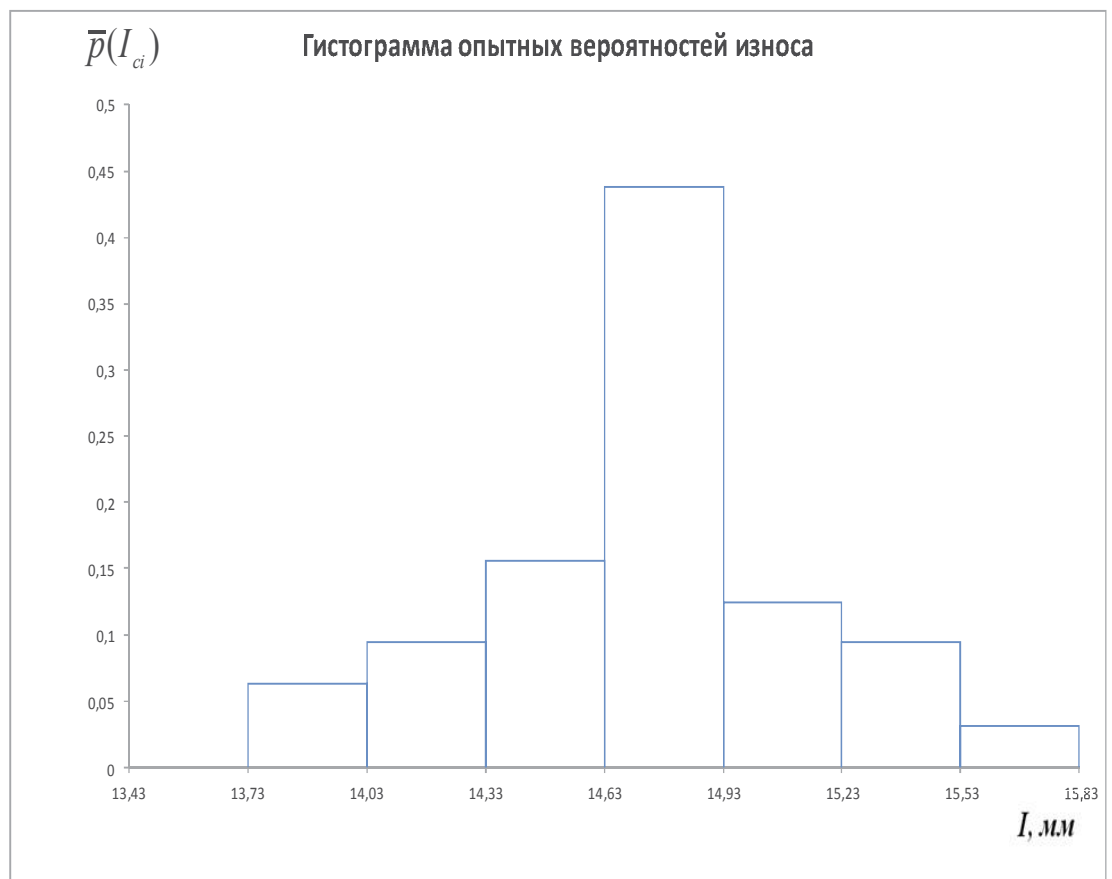
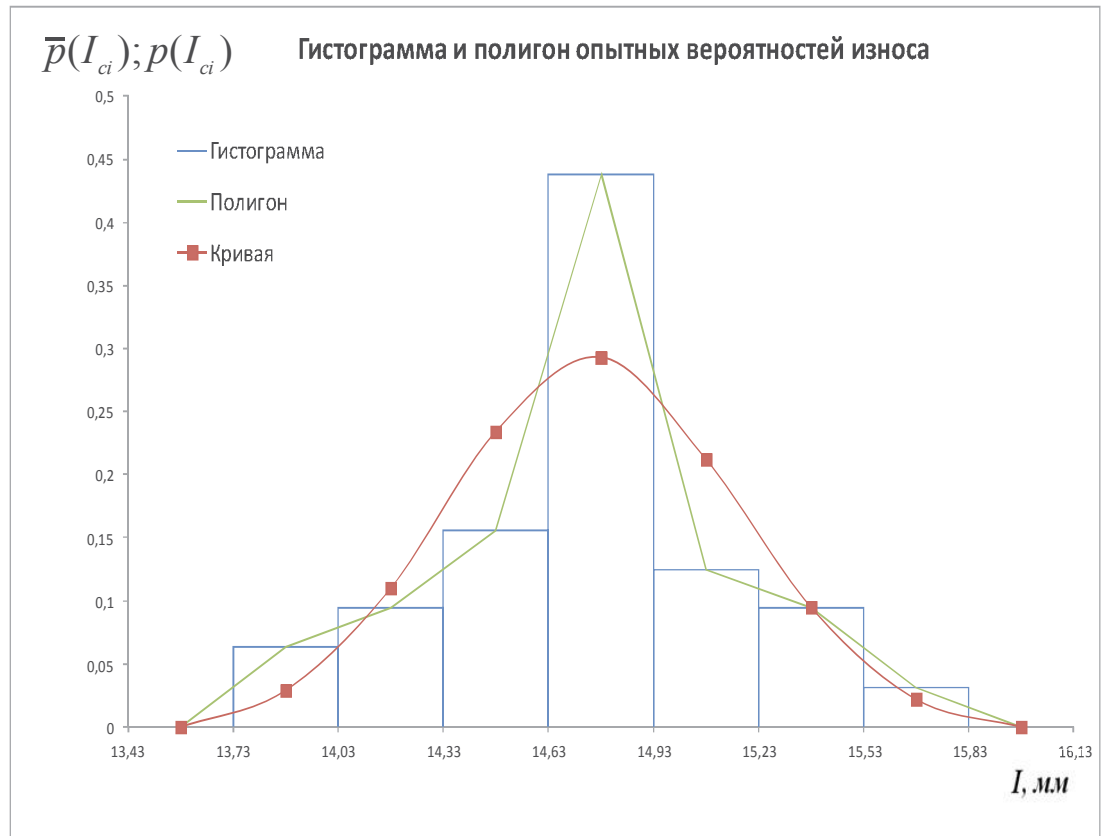
Определение статистической ошибки

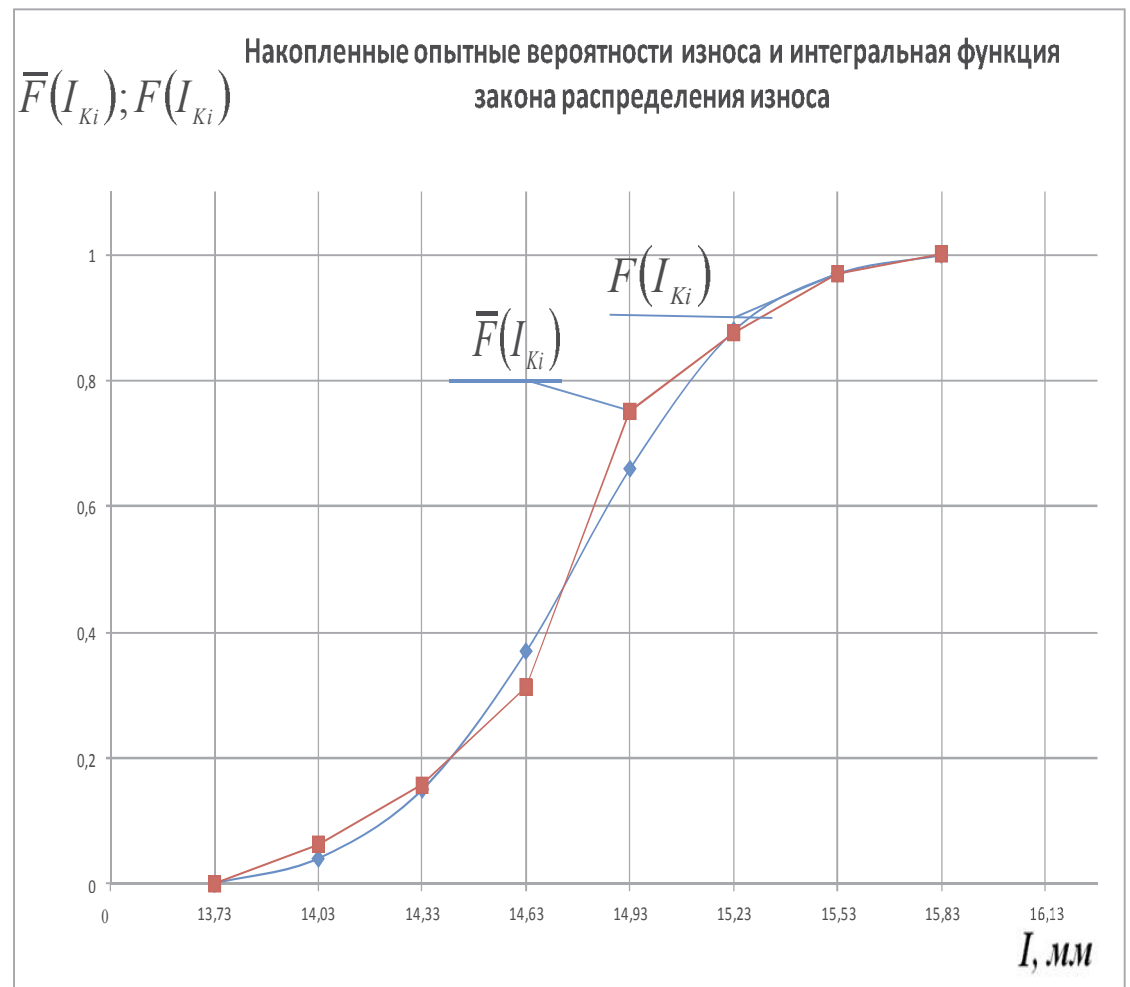
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{cm}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (14,612 - 14,76) / (14,76 - 13,73) \cdot 100 = 14,4 \text{ \%}.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Результаты определения распределения величин износа крыльев лоп культиватора восстановленных наплавкой





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных двусторонним борированием
 Таблица 3.3 - Сводная ведомость величин износа крыльев лап культиватора восстановленных двусторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 13,25 | 9 | 13,83 | 17 | 14,46 | 25 | 14,78 |
| 2 | 13,4 | 10 | 13,88 | 18 | 14,49 | 26 | 14,89 |
| 3 | 13,47 | 11 | 14,19 | 19 | 14,5 | 27 | 14,93 |
| 4 | 13,51 | 12 | 14,28 | 20 | 14,57 | 28 | 14,97 |
| 5 | 13,64 | 13 | 14,29 | 21 | 14,62 | 29 | 15,03 |
| 6 | 13,7 | 14 | 14,34 | 22 | 14,72 | 30 | 15,31 |
| 7 | 13,77 | 15 | 14,36 | 23 | 14,75 | 31 | 15,33 |
| 8 | 13,81 | 16 | 14,37 | 24 | 14,77 | 32 | 15,54 |

Таблица 3.4 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| Граница интервала, мм | | 13,06 | 13,44 | 13,82 | 14,2 | 14,58 | 14,96 | 15,34 | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 13,44 | 13,82 | 14,2 | 14,58 | 14,96 | 15,34 | 15,72 | |
| Опытная частота, m_i | | 2 | 6 | 3 | 9 | 7 | 4 | 1 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0,188 | 0,094 | 0,281 | 0,219 | 0,125 | 0,031 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,045 | 0,116 | 0,213 | 0,258 | 0,206 | 0,11 | 0,039 |
| | | ЗРВ | 0,034 | 0,112 | 0,22 | 0,245 | 0,202 | 0,1 | 0,052 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0,251 | 0,345 | 0,626 | 0,845 | 0,97 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,06 | 0,18 | 0,39 | 0,64 | 0,84 | 0,95 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,1 | 0,27 | 0,63 | 0,84 | 0,98 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 2 | 4 | 7 | 8 | 6 | 4 | 1 | |
| | ЗРВ | 1 | 3 | 5 | 12 | 7 | 4 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{m_{oni} - m_{Ti}}{m_{Ti}} \right)^2$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-2)^2/2 + (6-4)^2/4 + (3-7)^2/7 + (9-8)^2/8 + (7-6)^2/6 + (4-4)^2/4 + (1-1)^2/1 = 3,58.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (6-3)^2/3 + (3-5)^2/5 + (9-12)^2/12 + (7-7)^2/7 + (4-4)^2/4 + (1-1)^2/1 = 5,55.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 46,6%; для ЗРВ – Р% = 23,5%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_{\beta}^H = \bar{I} - t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = \bar{I} + t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^H = 14,37 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,158 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = 14,37 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,582 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 13,6 до 15,5 мм.

Определение статистической ошибки

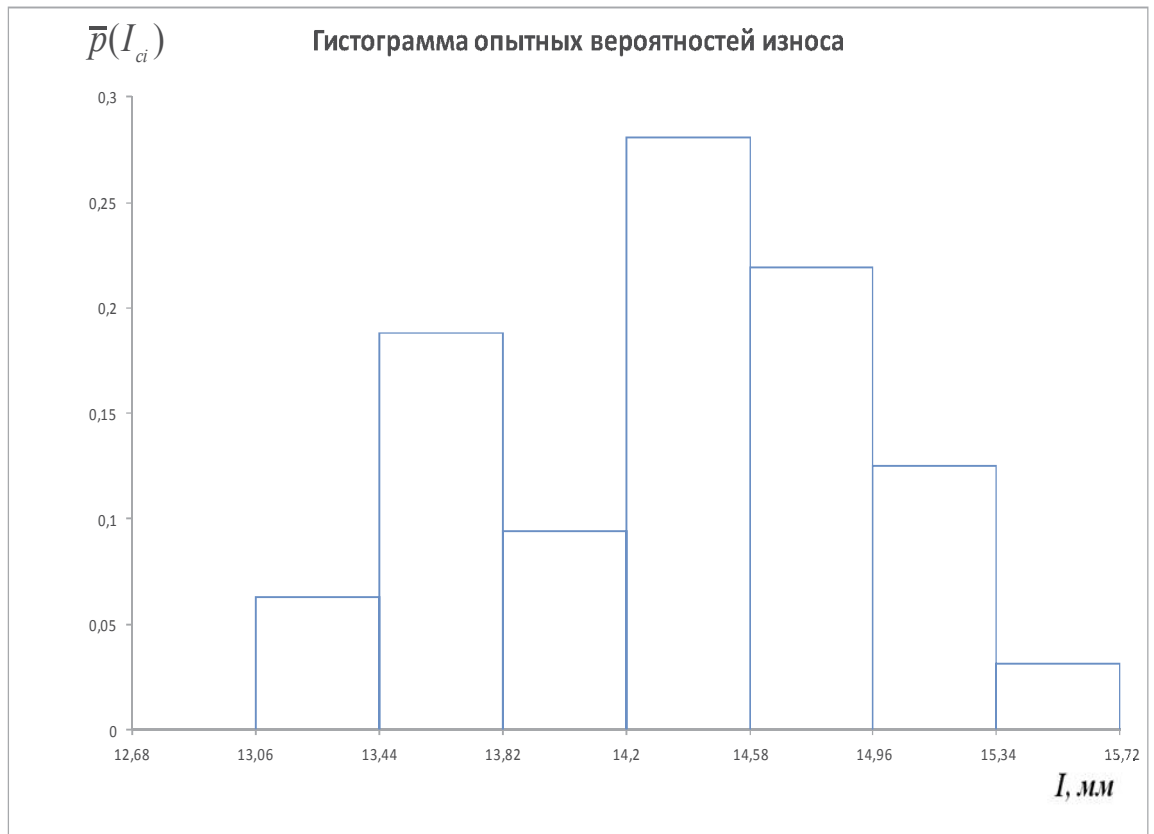
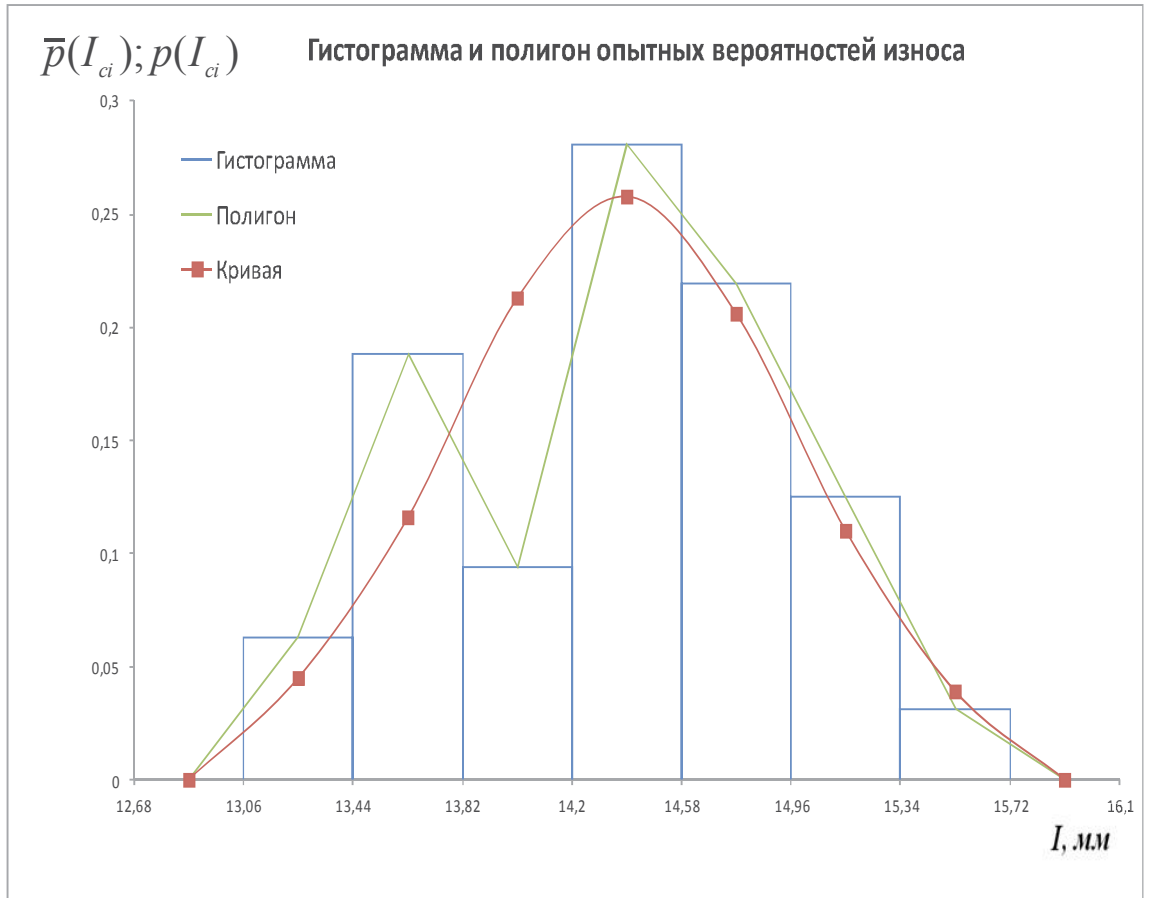
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

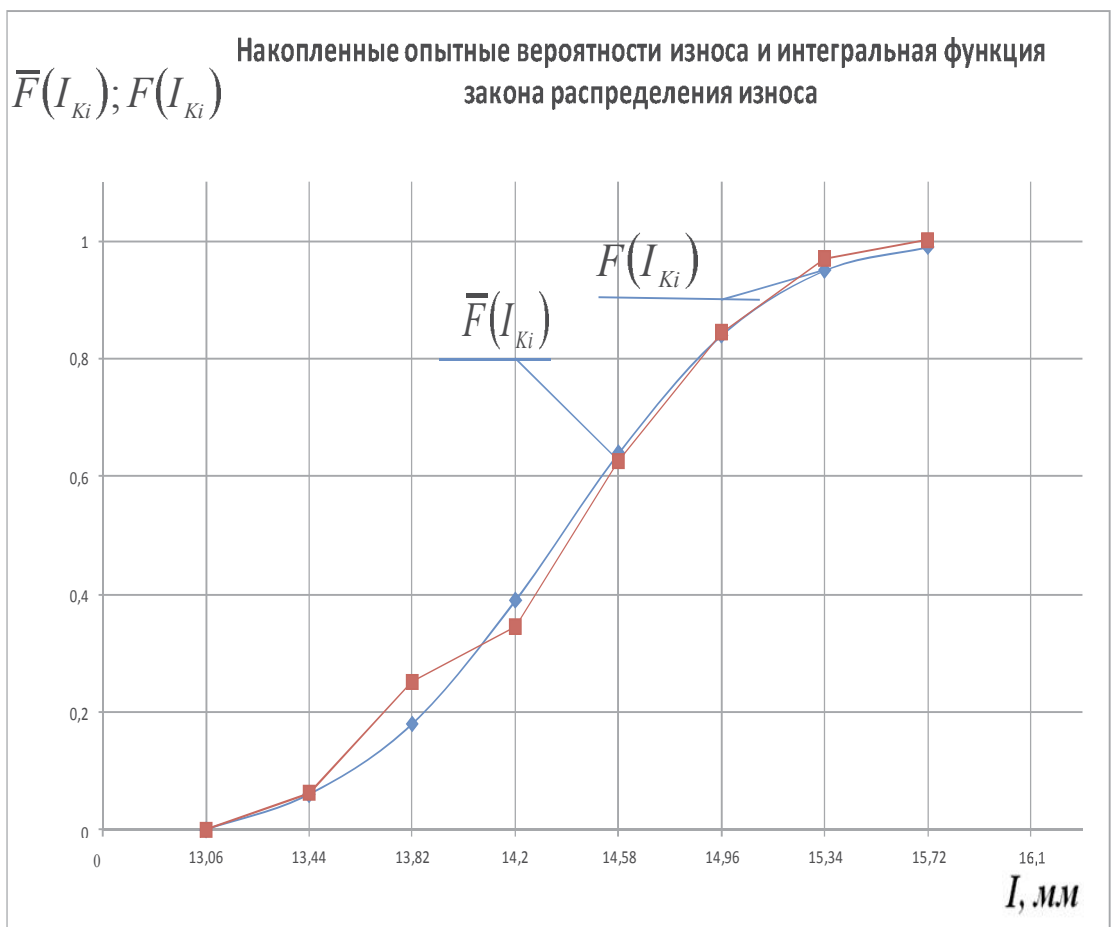
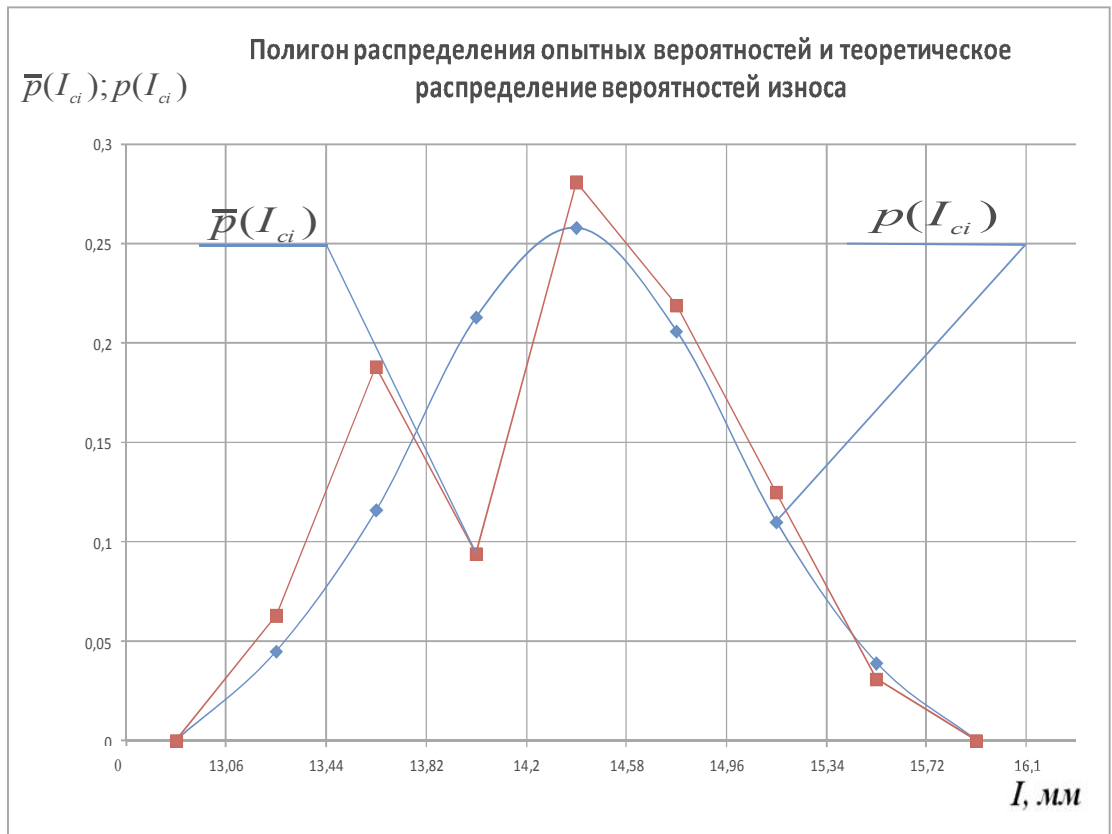
$$\varepsilon_{\alpha} = (14,158 - 14,37) / (14,37 - 13,06) \cdot 100 = 16,2 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

Результаты определения распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных двусторонним борированием





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных односторонним борированием

Таблица 3.5 - Сводная ведомость величин износа крыльев лап культиватора восстановленных односторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 12,9 | 9 | 14,01 | 17 | 14,28 | 25 | 14,46 |
| 2 | 13,38 | 10 | 14,05 | 18 | 14,29 | 26 | 14,5 |
| 3 | 13,48 | 11 | 14,12 | 19 | 14,36 | 27 | 14,51 |
| 4 | 13,54 | 12 | 14,15 | 20 | 14,36 | 28 | 14,69 |
| 5 | 13,66 | 13 | 14,18 | 21 | 14,37 | 29 | 14,91 |
| 6 | 13,67 | 14 | 14,2 | 22 | 14,39 | 30 | 14,97 |
| 7 | 13,74 | 15 | 14,22 | 23 | 14,41 | 31 | 15,03 |
| 8 | 13,9 | 16 | 14,22 | 24 | 14,41 | 32 | 15,18 |

Таблица 3.6 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 12,71 | 13,09 | 13,47 | 13,85 | 14,23 | 14,61 | 14,99 |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| Середина интервала, мм | | 13,09 | 13,47 | 13,85 | 14,23 | 14,61 | 14,99 | 15,37 |
| Опытная частота, m_i | | 1 | 1 | 5 | 9 | 11 | 3 | 2 |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,031 | 0,156 | 0,281 | 0,344 | 0,094 | 0,063 |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | 0,008 | 0,054 | 0,17 | 0,293 | 0,278 | 0,147 | 0,046 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,062 | 0,218 | 0,499 | 0,843 | 0,937 | 1 |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | 0,01 | 0,07 | 0,24 | 0,52 | 0,8 | 0,95 | 0,99 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | | 1 | 2 | 5 | 9 | 9 | 5 | 1 |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (1-0)^2/0 + (1-2)^2/2 + (5-5)^2/5 + (9-9)^2/9 + (11-9)^2/9 + (3-5)^2/5 + (2-1)^2/1 = 2,74$$

Определяем процент совпадений (P%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – P% = 60,2%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_{\beta}^H = \bar{I} - t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = \bar{I} + t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^H = 14,2 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,023 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = 14,2 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,377 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 13,5 до 15,1 мм.

Определение статистической ошибки

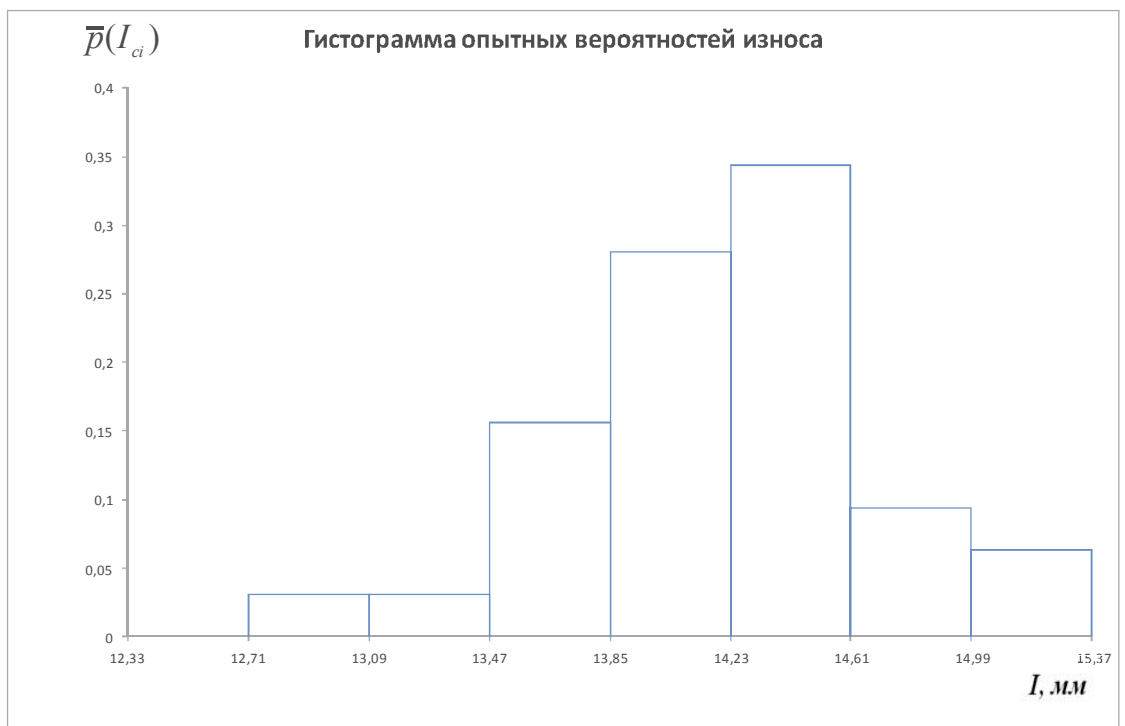
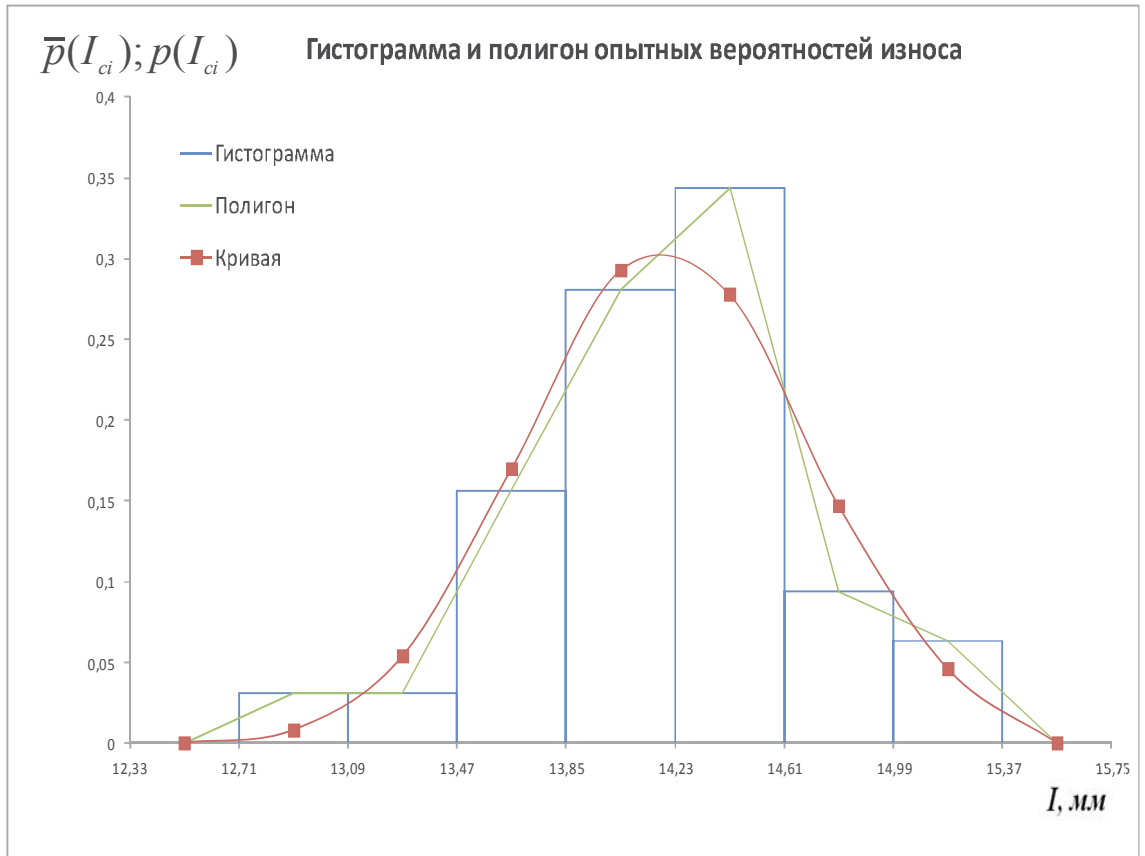
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

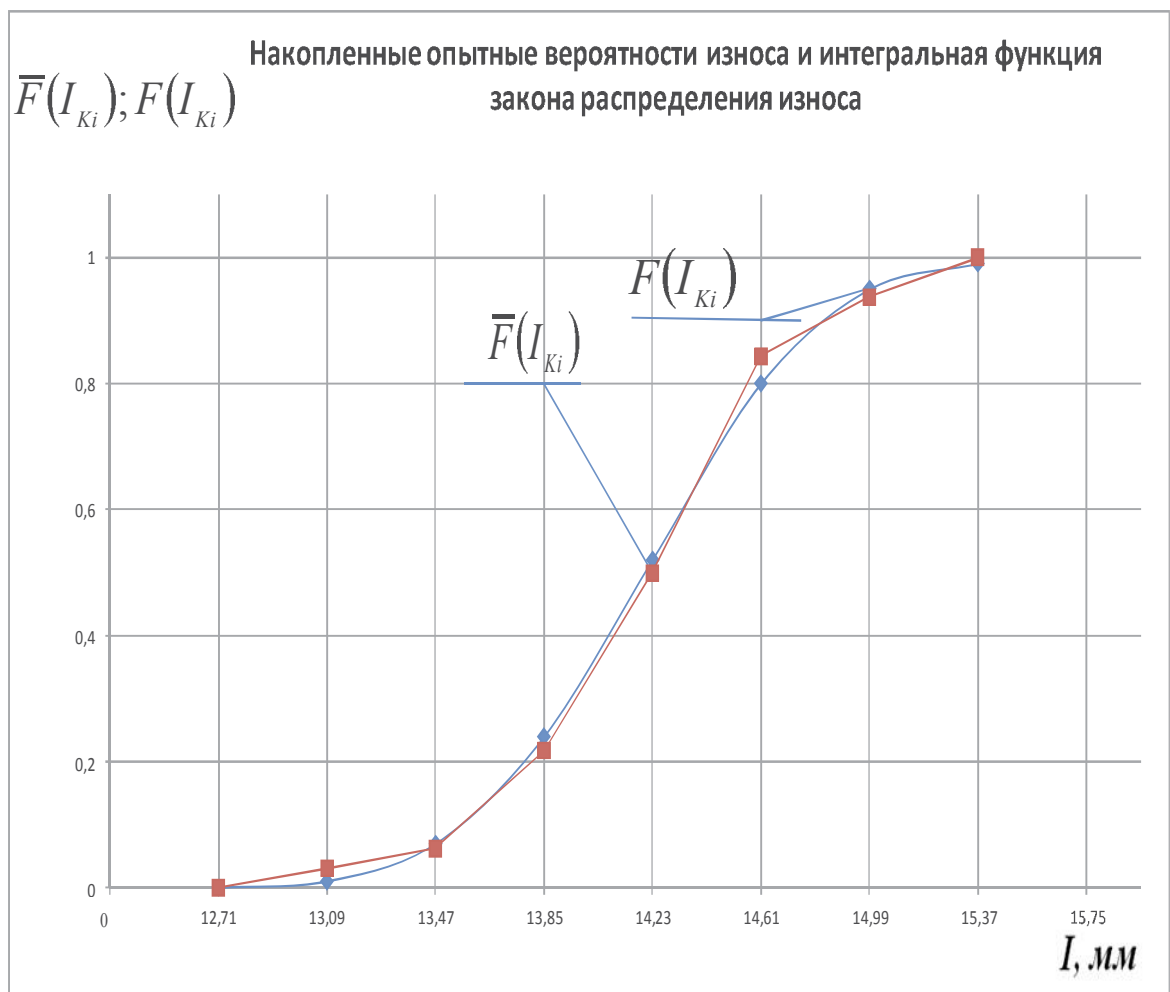
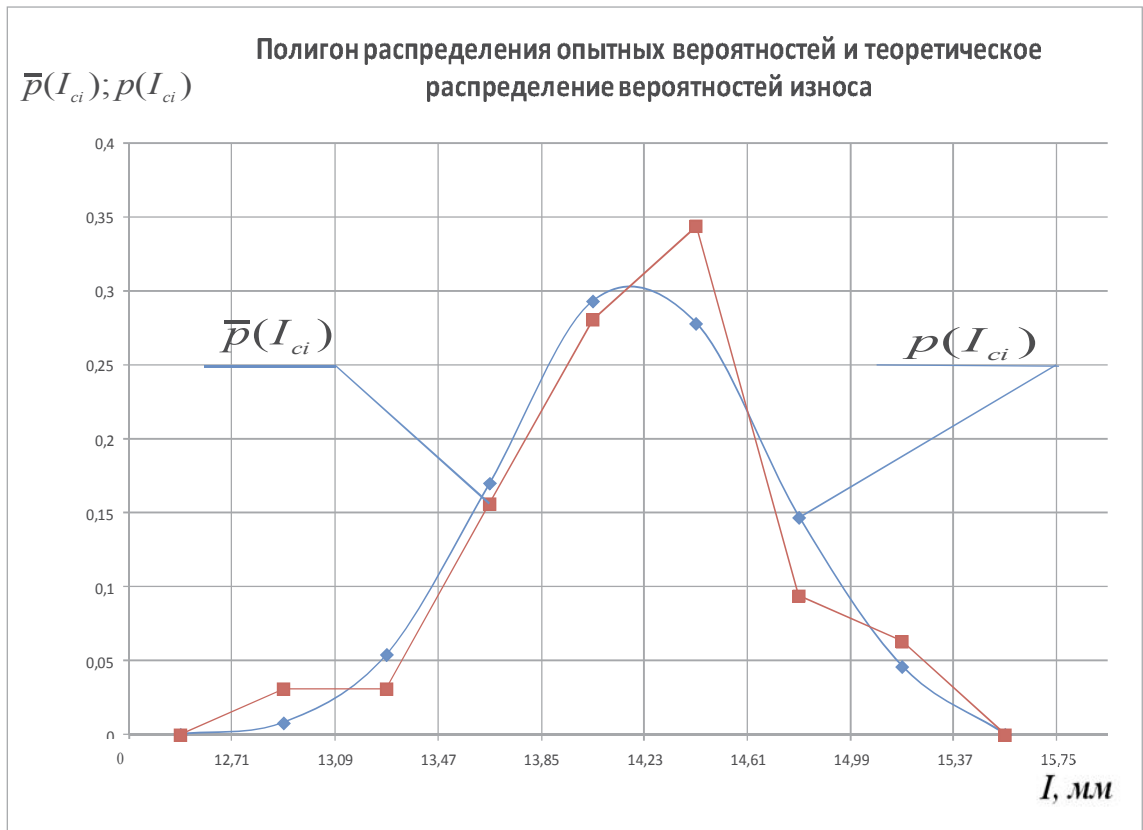
$$\varepsilon_{\alpha} = (14,023 - 14,2) / (14,2 - 12,71) \cdot 100 = 11,9 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

Результаты определения распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных односторонним борированием





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных по существующей технологии
 Таблица 3.7 - Сводная ведомость величин износа крыльев лап культиватора восстановленных по существующей технологии

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 13,95 | 9 | 14,48 | 17 | 14,62 | 25 | 14,94 |
| 2 | 13,97 | 10 | 14,5 | 18 | 14,65 | 26 | 15,05 |
| 3 | 14,32 | 11 | 14,51 | 19 | 14,69 | 27 | 15,09 |
| 4 | 14,38 | 12 | 14,51 | 20 | 14,82 | 28 | 15,09 |
| 5 | 14,39 | 13 | 14,55 | 21 | 14,82 | 29 | 15,2 |
| 6 | 14,45 | 14 | 14,57 | 22 | 14,84 | 30 | 15,33 |
| 7 | 14,47 | 15 | 14,59 | 23 | 14,84 | 31 | 15,36 |
| 8 | 14,47 | 16 | 14,59 | 24 | 14,86 | 32 | 15,38 |

Таблица 3.8 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 13,83 | 14,07 | 14,31 | 14,55 | 14,79 | 15,03 | 15,27 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | | 14,07 | 14,31 | 14,55 | 14,79 | 15,03 | 15,27 | 15,51 | |
| Середина интервала, мм | | 13,95 | 14,19 | 14,43 | 14,67 | 14,91 | 15,15 | 15,39 | |
| Опытная частота, m_i | | 2 | 0 | 10 | 7 | 6 | 4 | 3 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0 | 0,313 | 0,219 | 0,188 | 0,125 | 0,094 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,026 | 0,084 | 0,175 | 0,253 | 0,24 | 0,143 | 0,058 |
| | | ЗРВ | 0,023 | 0,088 | 0,165 | 0,239 | 0,223 | 0,161 | 0,062 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,063 | 0,063 | 0,376 | 0,595 | 0,783 | 0,908 | 1,002 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{\kappa i})$ | НЗР | 0,03 | 0,12 | 0,29 | 0,55 | 0,78 | 0,92 | 0,98 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,04 | 0,24 | 0,5 | 0,76 | 0,92 | 0,99 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 3 | 5 | 8 | 7 | 4 | 2 | |
| | ЗРВ | 1 | 1 | 6 | 8 | 8 | 5 | 2 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (0-3)^2/3 + (10-5)^2/5 + (7-8)^2/8 + (6-7)^2/7 + (4-4)^2/4 + (3-2)^2/2 = 9,77.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (0-1)^2/1 + (10-6)^2/6 + (7-8)^2/8 + (6-8)^2/8 + (4-5)^2/5 + (3-2)^2/2 = 5,99.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 4,4%; для ЗРВ – Р% = 20%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 14,75 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,617 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 14,75 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 14,883 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 14,4 до 15,2 мм.

Определение статистической ошибки

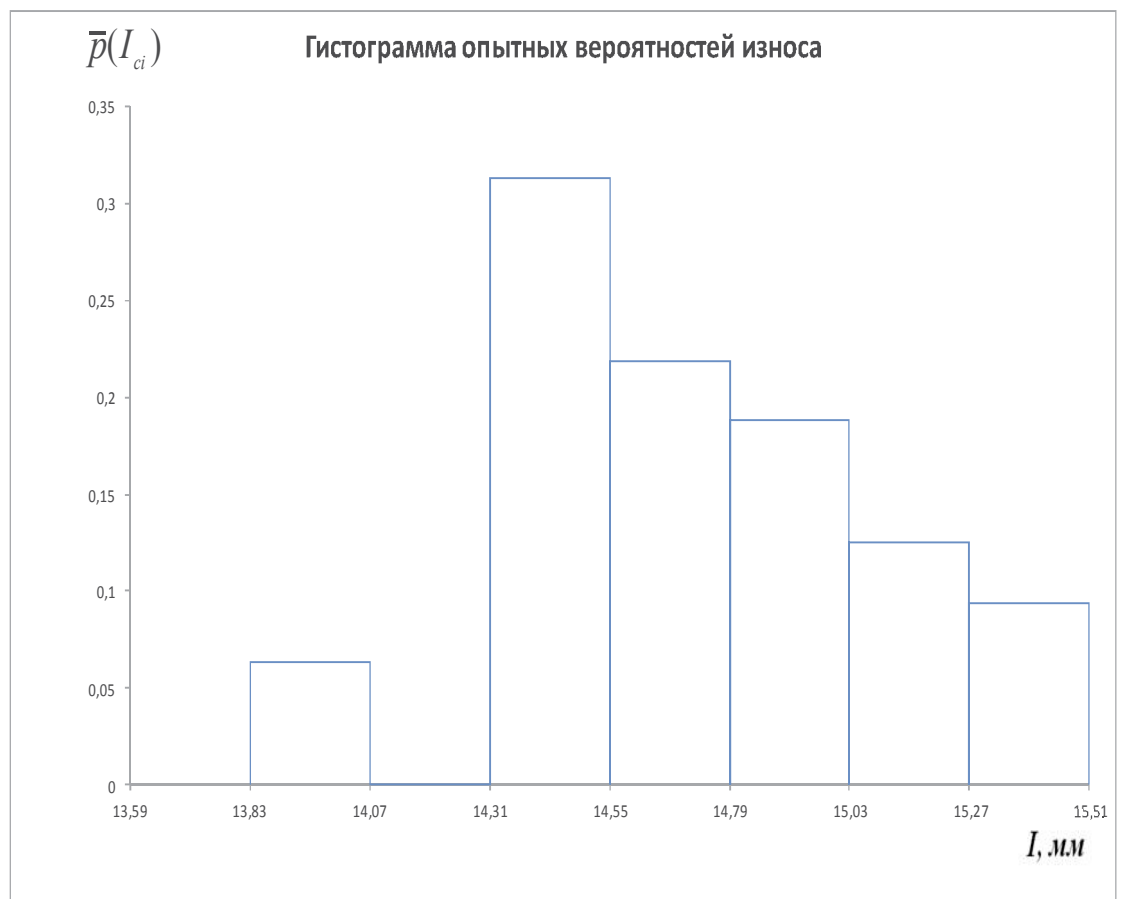
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%$$

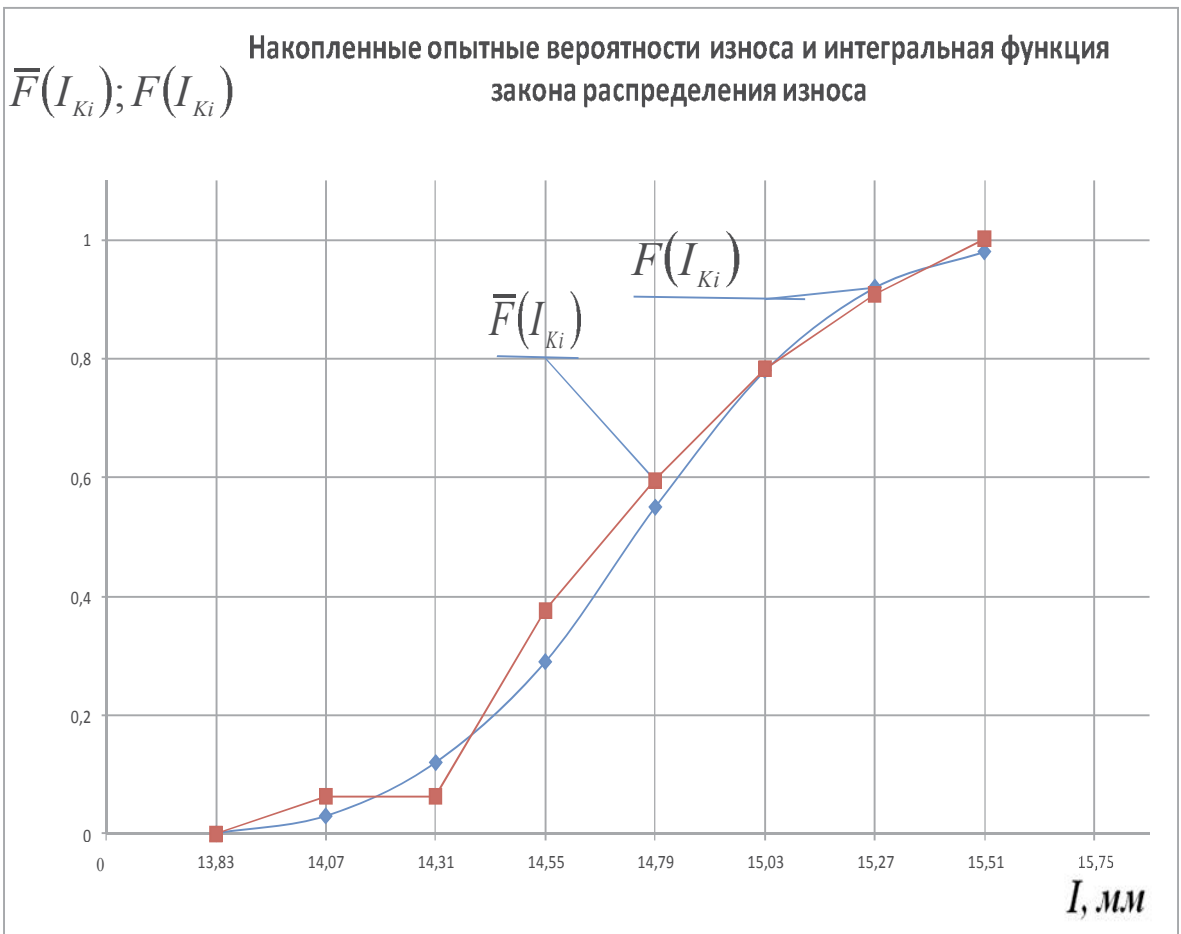
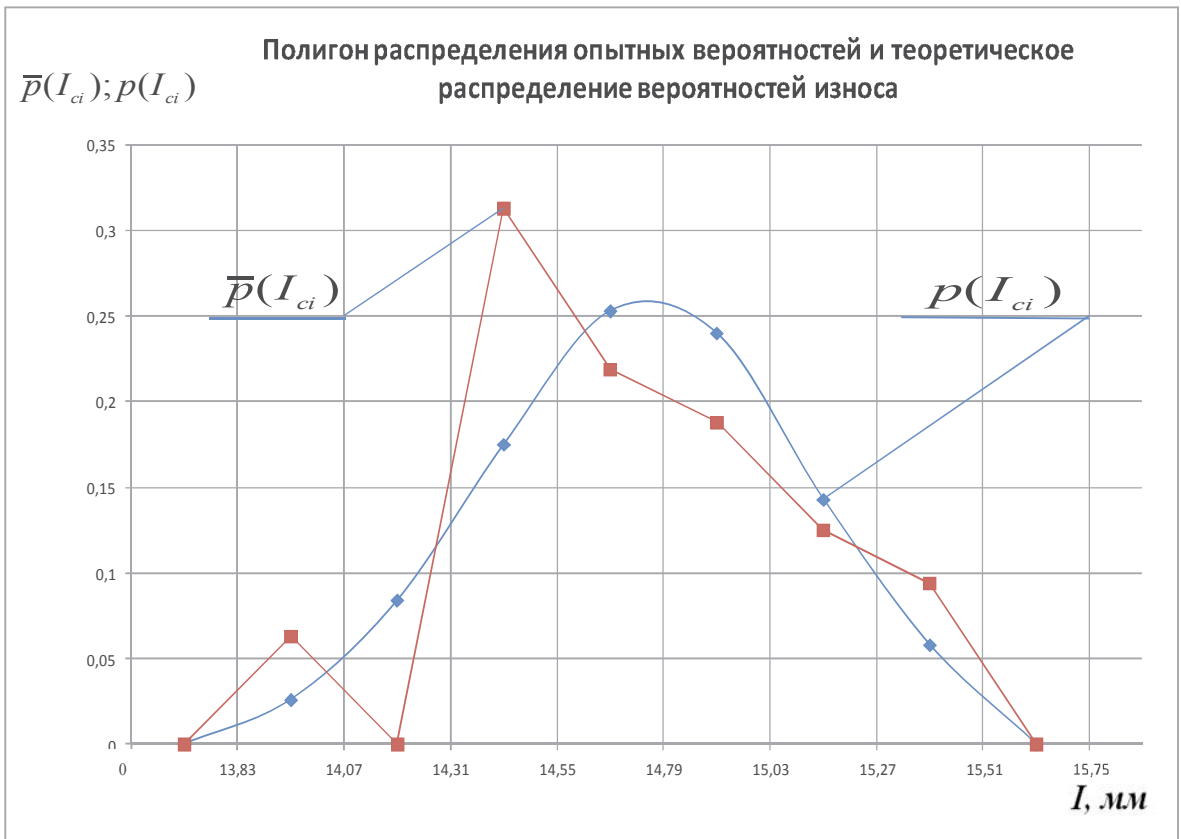
$$\varepsilon_\alpha = (14,617 - 14,75) / (14,75 - 13,83) \cdot 100 = 14,5 \%$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

Результаты определения распределения величин износа крыльев лап культиватора восстановленных по существующей технологии





Продолжение приложения 3

**Определение закономерности распределения величин износа крыль-
ев серийных лап культиватора**

Таблица 3.9 - Сводная ведомость величин износа радиуса крыльев серий-
ных лап культиватора

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 14,71 | 9 | 15,49 | 17 | 15,85 | 25 | 16,07 |
| 2 | 14,99 | 10 | 15,5 | 18 | 15,85 | 26 | 16,09 |
| 3 | 15,05 | 11 | 15,5 | 19 | 15,87 | 27 | 16,3 |
| 4 | 15,13 | 12 | 15,55 | 20 | 15,91 | 28 | 16,32 |
| 5 | 15,25 | 13 | 15,55 | 21 | 16 | 29 | 16,33 |
| 6 | 15,35 | 14 | 15,66 | 22 | 16,03 | 30 | 16,53 |
| 7 | 15,41 | 15 | 15,79 | 23 | 16,04 | 31 | 16,65 |
| 8 | 15,47 | 16 | 15,81 | 24 | 16,05 | 32 | 17,22 |

Таблица 3.10 - Результаты выравнивания опытных данных теоретиче-
скими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|---|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 14,5 | 14,92 | 15,34 | 15,76 | 16,18 | 16,6 | 17,02 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 14,92 | 15,34 | 15,76 | 16,18 | 16,6 | 17,02 | 17,44 | |
| Опытная частота, m_i | | 1 | 4 | 9 | 12 | 4 | 1 | 1 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,125 | 0,281 | 0,375 | 0,125 | 0,031 | 0,031 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,033 | 0,132 | 0,289 | 0,314 | 0,173 | 0,05 | 0,008 |
| | | ЗРВ | 0,018 | 0,142 | 0,287 | 0,294 | 0,209 | 0,071 | 0,015 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,156 | 0,437 | 0,812 | 0,937 | 0,968 | 0,999 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ci})$ | НЗР | 0,04 | 0,18 | 0,46 | 0,77 | 0,94 | 0,99 | 1 |
| | | ЗРВ | 0,01 | 0,07 | 0,35 | 0,76 | 0,97 | 1 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 4 | 9 | 10 | 5 | 2 | 0 | |
| | ЗРВ | 0 | 2 | 9 | 13 | 7 | 1 | 0 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует опре-
делить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (1-1)^2/1 + (4-4)^2/4 + (9-9)^2/9 + (12-10)^2/10 + (4-5)^2/5 + (1-2)^2/2 + (1-0)^2/0 = 1,1.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (1-0)^2/0 + (4-2)^2/2 + (9-9)^2/9 + (12-13)^2/13 + (4-7)^2/7 + (1-1)^2/1 + (1-0)^2/0 = 3,37.$$

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 15,81 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 15,626 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 15,81 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 15,994 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 15,1 до 16,4 мм.

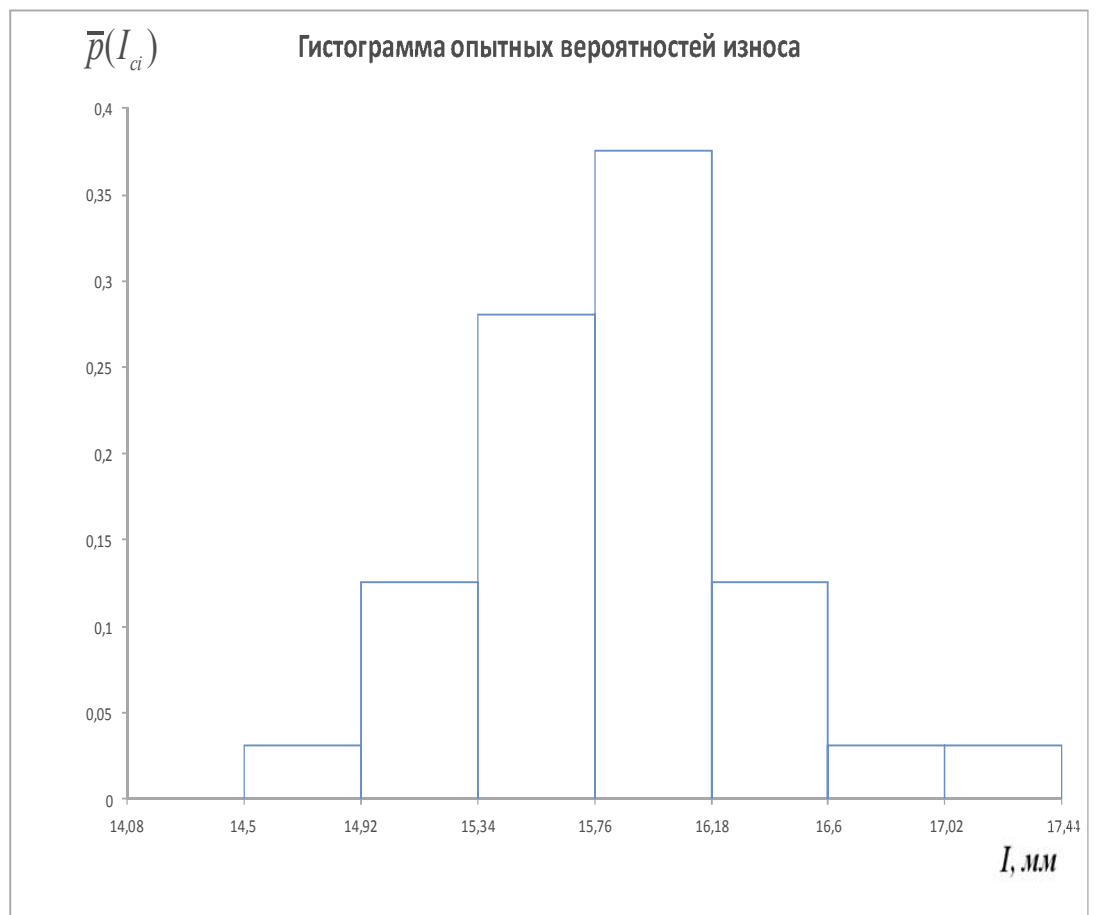
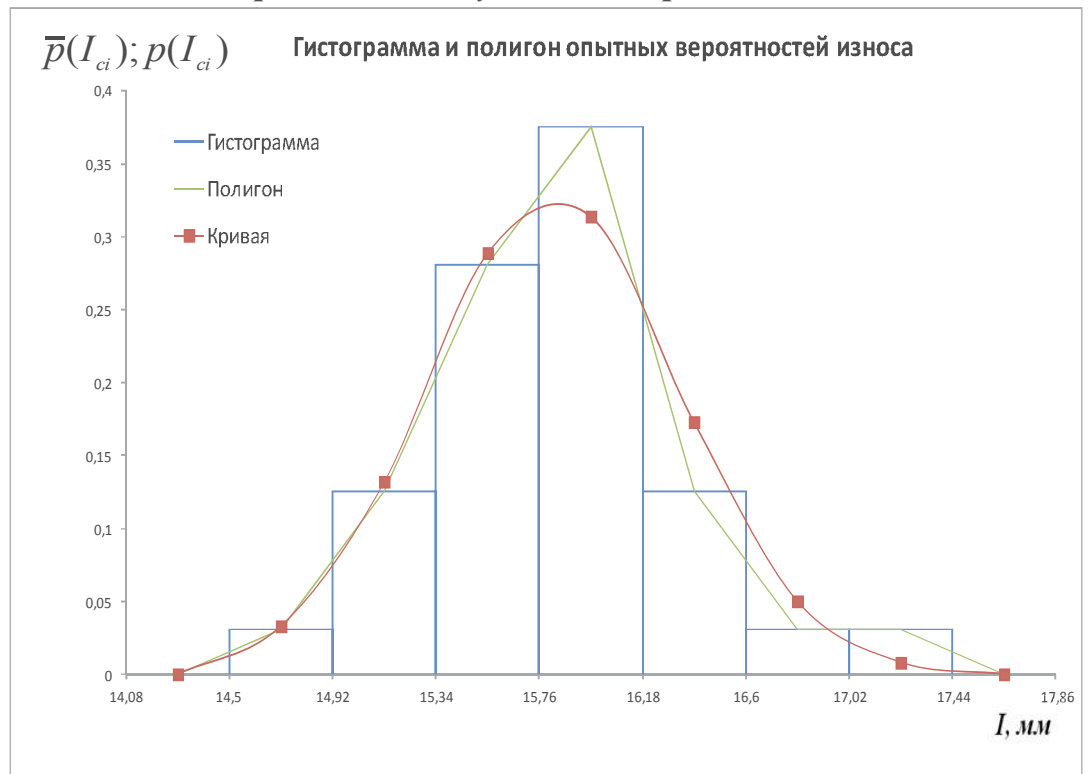
Определение статистической ошибки

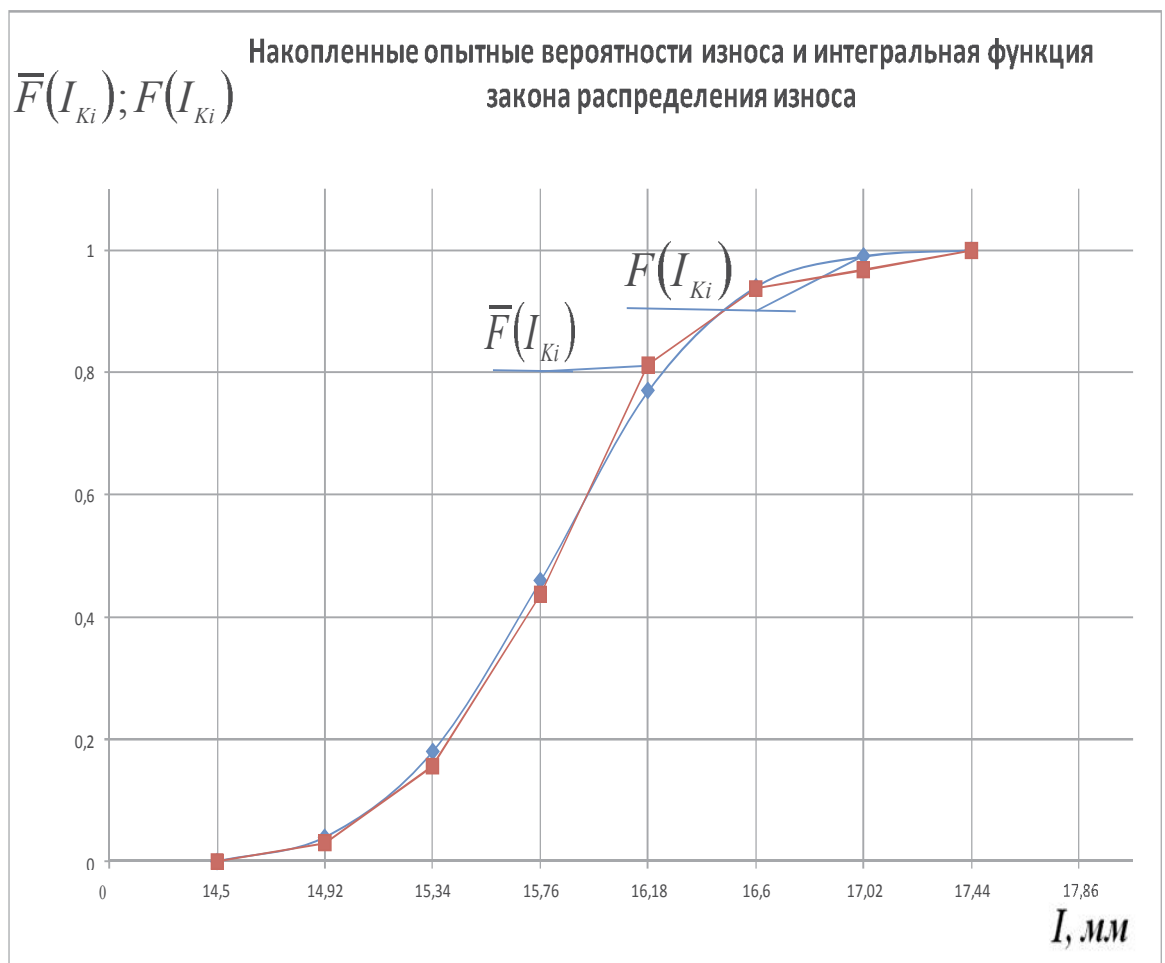
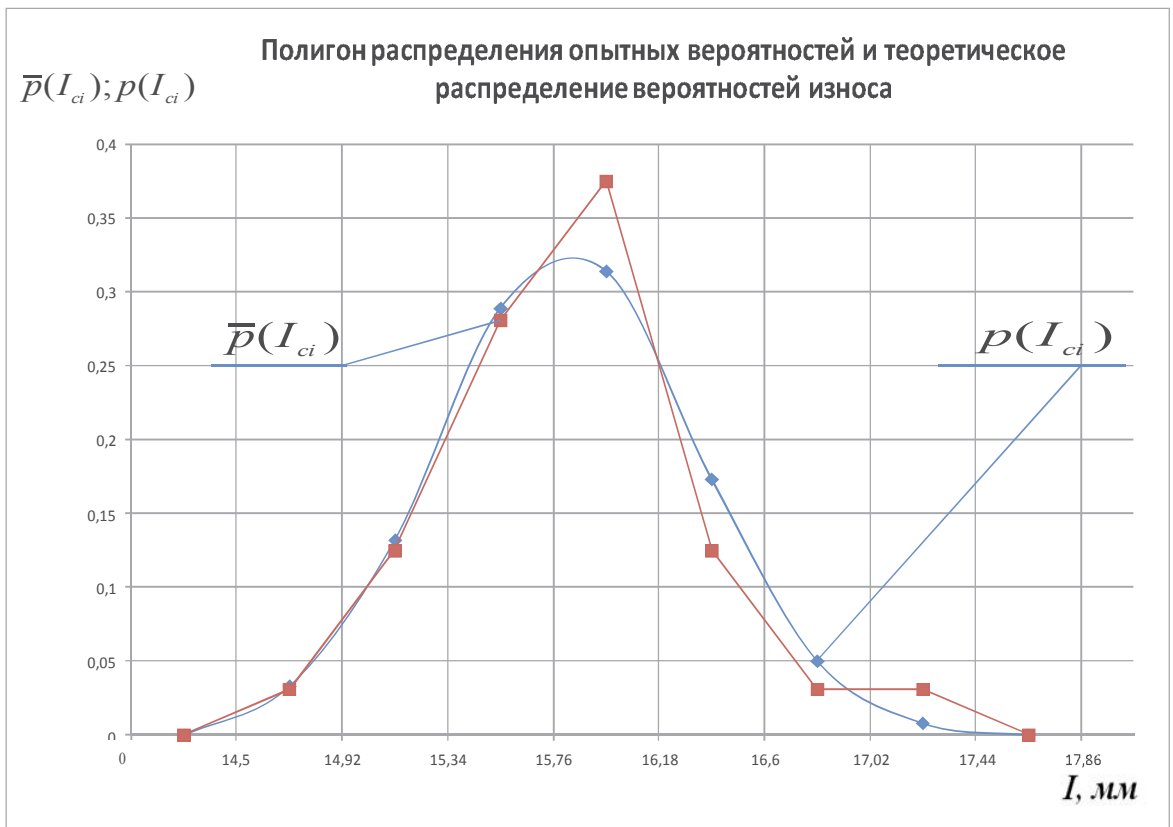
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (15,626 - 15,81) / (15,81 - 14,5) \cdot 100 = 14 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Результаты определения распределения величин износа крыльев серийных лап культиватора





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа радиуса режущей кромки серийных лап культиватора

Таблица 3.11 - Сводная ведомость величин износа радиуса режущей кромки серийных лап культиватора

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 1,59 | 9 | 2,36 | 17 | 2,81 | 25 | 3,3 |
| 2 | 1,66 | 10 | 2,37 | 18 | 2,9 | 26 | 3,35 |
| 3 | 2,11 | 11 | 2,47 | 19 | 2,94 | 27 | 3,42 |
| 4 | 2,2 | 12 | 2,52 | 20 | 2,98 | 28 | 3,49 |
| 5 | 2,22 | 13 | 2,57 | 21 | 2,98 | 29 | 3,57 |
| 6 | 2,27 | 14 | 2,6 | 22 | 3,1 | 30 | 3,59 |
| 7 | 2,3 | 15 | 2,66 | 23 | 3,23 | 31 | 3,65 |
| 8 | 2,3 | 16 | 2,71 | 24 | 3,25 | 32 | 3,84 |

Таблица 3.12 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 1,4 | 1,78 | 2,16 | 2,54 | 2,92 | 3,3 | 3,68 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | | 1,78 | 2,16 | 2,54 | 2,92 | 3,3 | 3,68 | 4,06 | |
| Середина интервала, мм | | 1,59 | 1,97 | 2,35 | 2,73 | 3,11 | 3,49 | 3,87 | |
| Опытная частота, m_i | | 2 | 1 | 9 | 6 | 6 | 7 | 1 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,031 | 0,281 | 0,188 | 0,188 | 0,219 | 0,031 |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,026 | 0,093 | 0,192 | 0,265 | 0,232 | 0,126 | 0,046 |
| | | ЗРВ | 0,024 | 0,091 | 0,208 | 0,248 | 0,231 | 0,128 | 0,064 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,094 | 0,375 | 0,563 | 0,751 | 0,97 | 1,001 |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,04 | 0,13 | 0,33 | 0,58 | 0,81 | 0,94 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,04 | 0,25 | 0,5 | 0,85 | 0,96 | 0,99 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | | НЗР | 1 | 3 | 6 | 8 | 7 | 4 | 2 |
| | | ЗРВ | 1 | 1 | 7 | 8 | 11 | 4 | 1 |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{0ni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (1-3)^2/3 + (9-6)^2/6 + (6-8)^2/8 + (6-7)^2/7 + (7-4)^2/4 + (1-2)^2/2 = 7,23.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (1-1)^2/1 + (9-7)^2/7 + (6-8)^2/8 + (6-11)^2/11 + (7-4)^2/4 + (1-1)^2/1 = 6,59.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 12,4%; для ЗРВ – Р% = 15,9%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_{\beta}^H = \bar{I} - t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = \bar{I} + t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^H = 2,8 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 2,593 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = 2,8 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 3,007 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 2,3 до 3,5 мм.

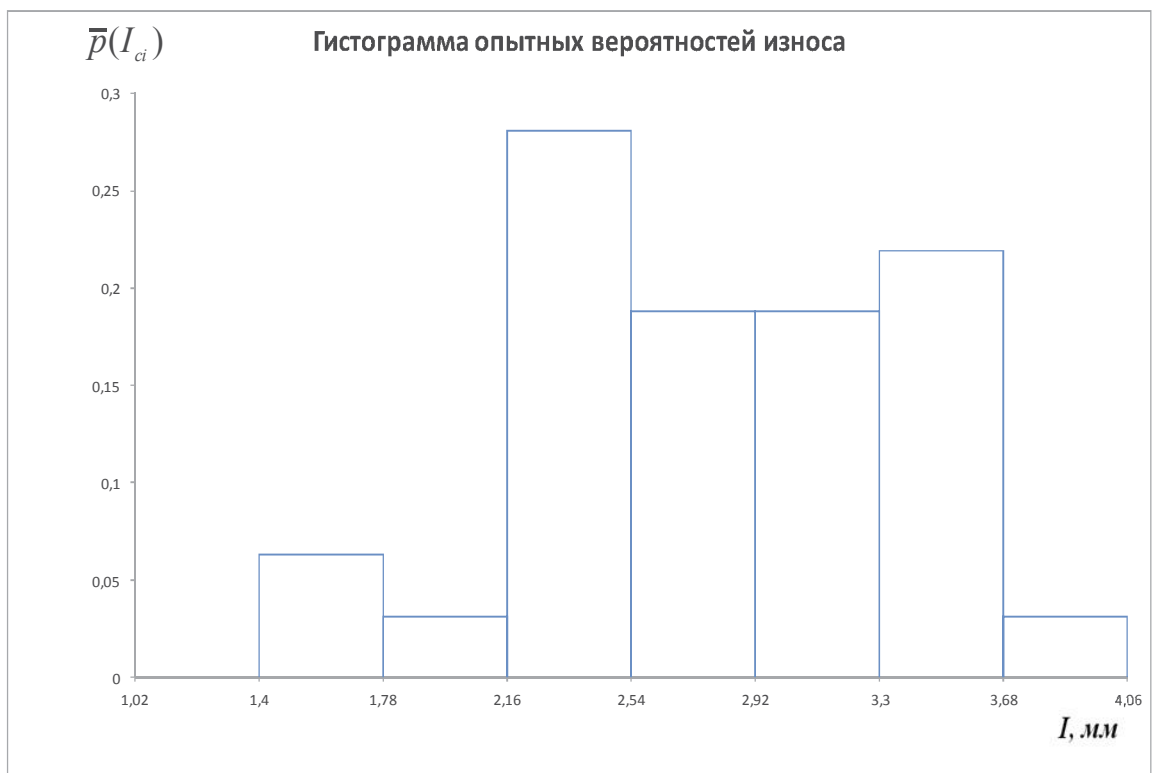
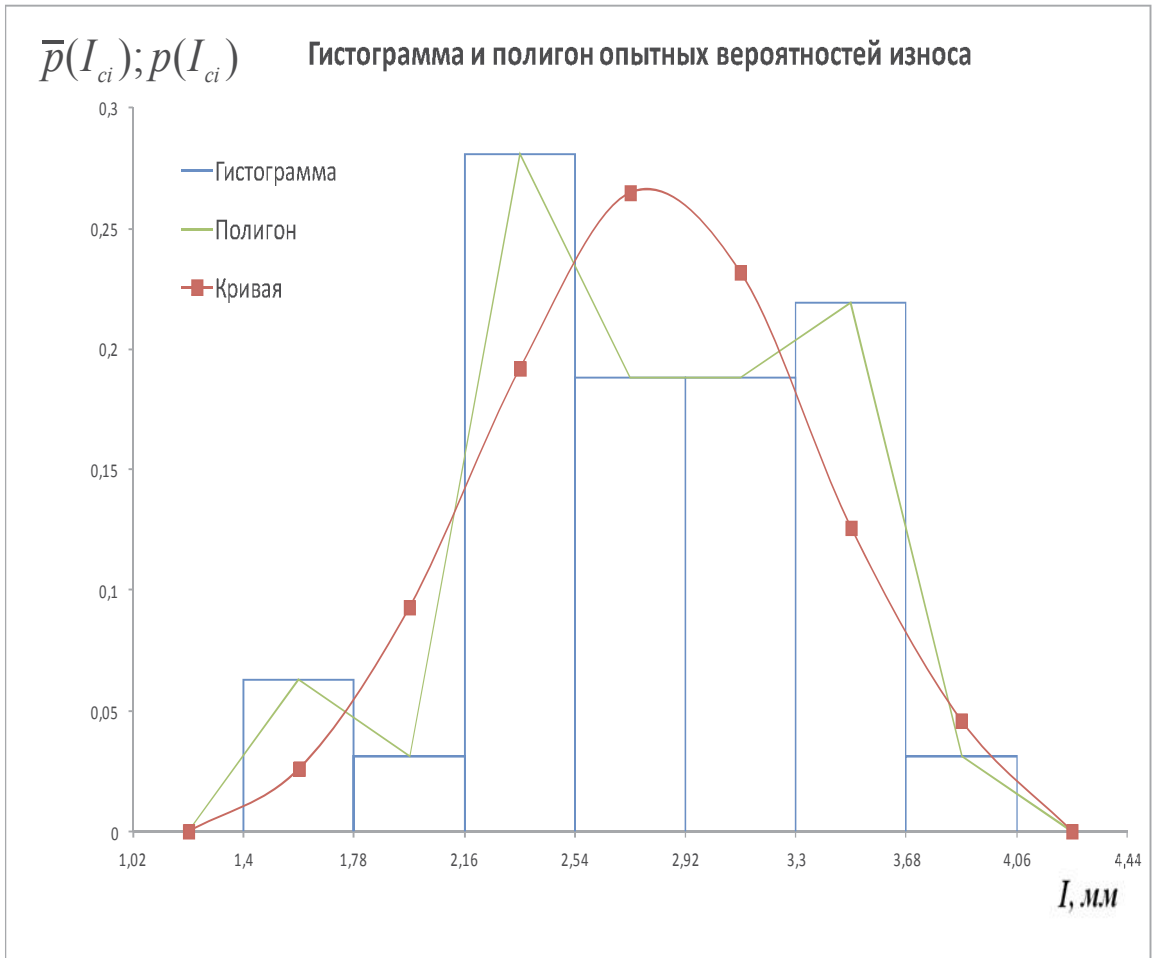
Определение статистической ошибки

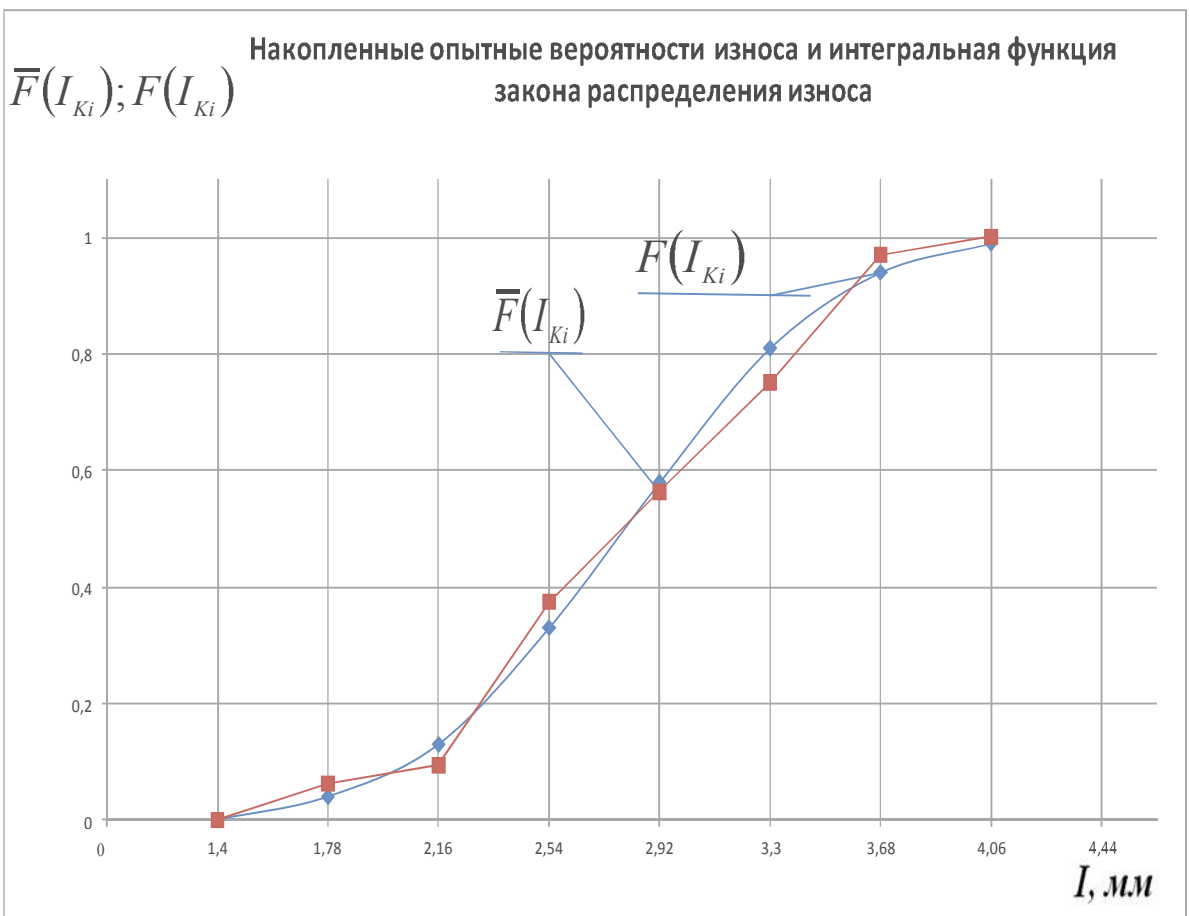
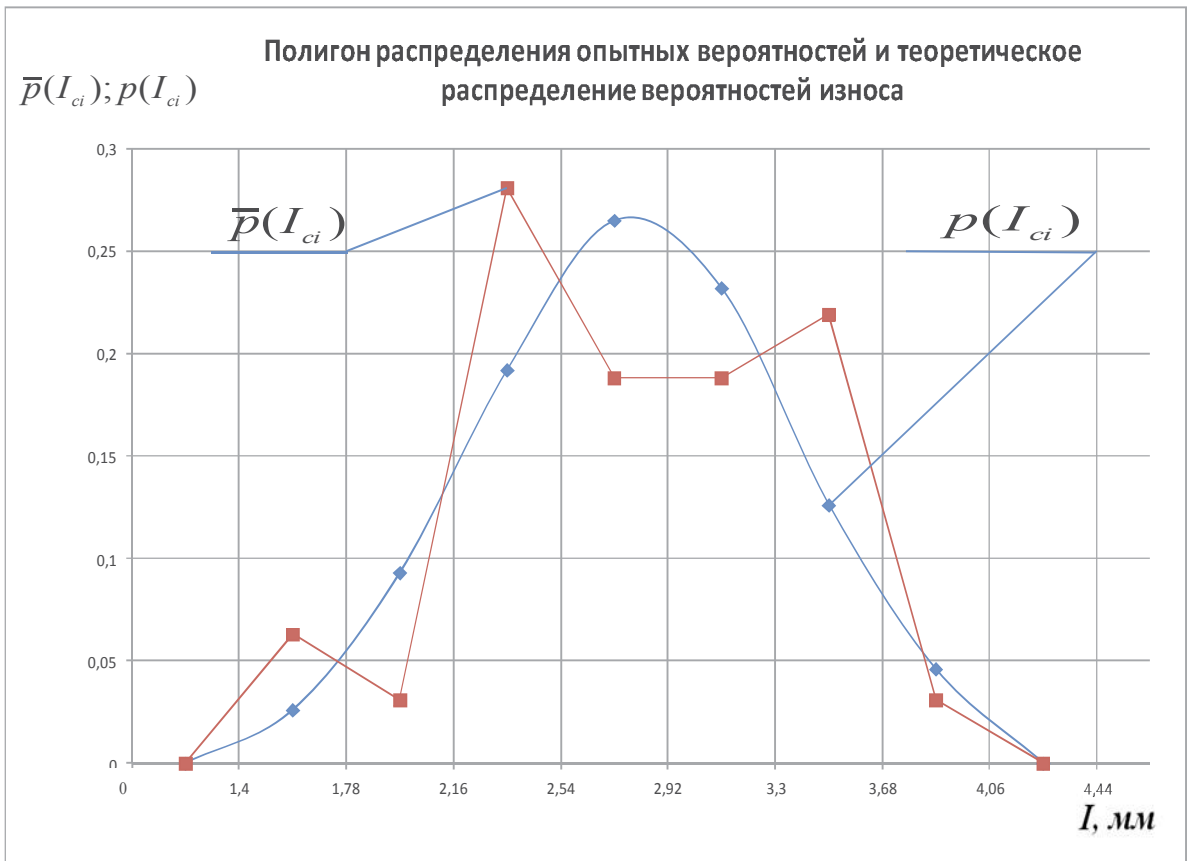
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_{\alpha} = (2,593 - 2,8) / (2,8 - 1,4) \cdot 100 = 14,8 \text{ \%}.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Результаты определения распределения величин износа радиуса режущей кромки серийных лоп культиватора





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных двусторонним борированием

Таблица 3.13 - Сводная ведомость величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных двусторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 0,61 | 9 | 1,44 | 17 | 1,74 | 25 | 2,12 |
| 2 | 0,63 | 10 | 1,45 | 18 | 1,81 | 26 | 2,13 |
| 3 | 0,74 | 11 | 1,51 | 19 | 1,83 | 27 | 2,23 |
| 4 | 1,3 | 12 | 1,58 | 20 | 1,88 | 28 | 2,3 |
| 5 | 1,35 | 13 | 1,62 | 21 | 1,96 | 29 | 2,41 |
| 6 | 1,36 | 14 | 1,64 | 22 | 1,96 | 30 | 2,46 |
| 7 | 1,36 | 15 | 1,64 | 23 | 1,96 | 31 | 2,67 |
| 8 | 1,37 | 16 | 1,71 | 24 | 2,05 | 32 | 2,81 |

Таблица 3.14 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 0,43 | 0,8 | 1,17 | 1,54 | 1,91 | 2,28 | 2,65 | |
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| 0,8 | | 1,17 | 1,54 | 1,91 | 2,28 | 2,65 | 3,02 | | |
| Середина интервала, мм | | 0,615 | 0,985 | 1,355 | 1,725 | 2,095 | 2,465 | 2,835 | |
| Опытная частота, m_i | | 3 | 0 | 8 | 9 | 7 | 3 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0 | 0,25 | 0,281 | 0,219 | 0,094 | 0,063 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,033 | 0,1 | 0,207 | 0,267 | 0,22 | 0,113 | 0,04 |
| | | ЗРВ | 0,025 | 0,094 | 0,215 | 0,257 | 0,21 | 0,132 | 0,045 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,094 | 0,344 | 0,625 | 0,844 | 0,938 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,04 | 0,15 | 0,35 | 0,61 | 0,83 | 0,95 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,09 | 0,25 | 0,63 | 0,85 | 0,96 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 4 | 6 | 8 | 7 | 4 | 1 | |
| | ЗРВ | 1 | 2 | 5 | 12 | 7 | 4 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{0ni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (0-4)^2/4 + (8-6)^2/6 + (9-8)^2/8 + (7-7)^2/7 + (3-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 10,04.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (0-2)^2/2 + (8-5)^2/5 + (9-12)^2/12 + (7-7)^2/7 + (3-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 9,8.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 4%; для ЗРВ – Р% = 4,4%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 1,75 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 1,5499 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 1,75 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 1,9501 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 1,35 до 2,45 мм.

Определение статистической ошибки

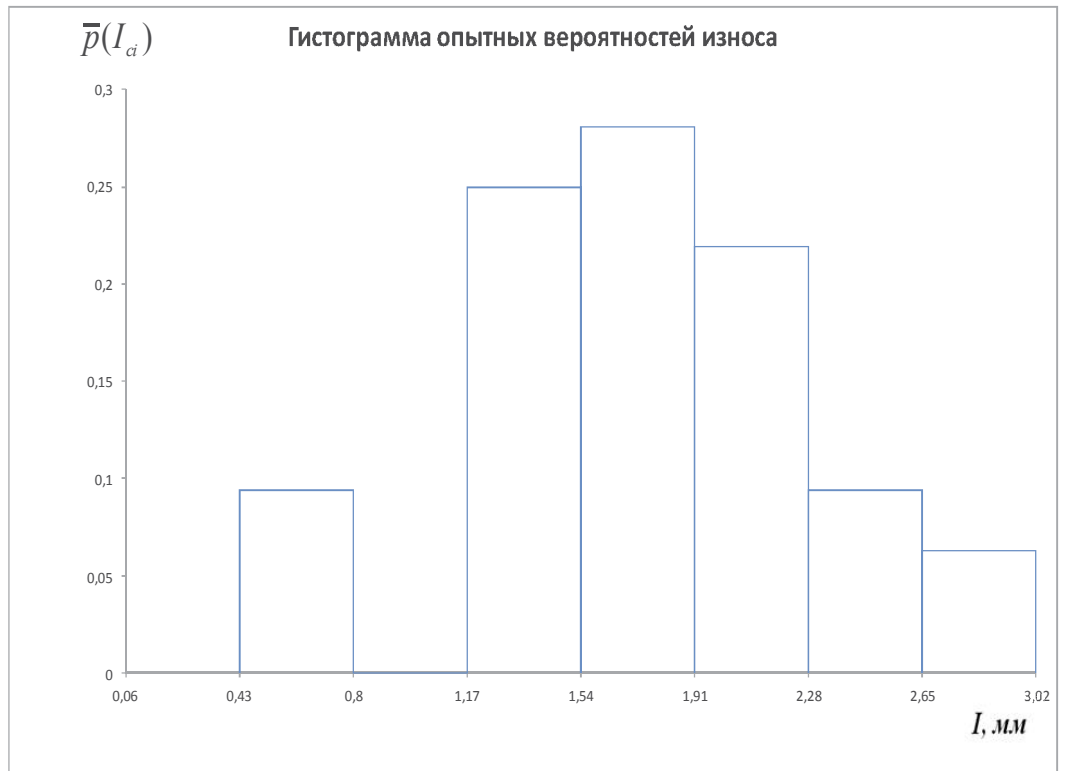
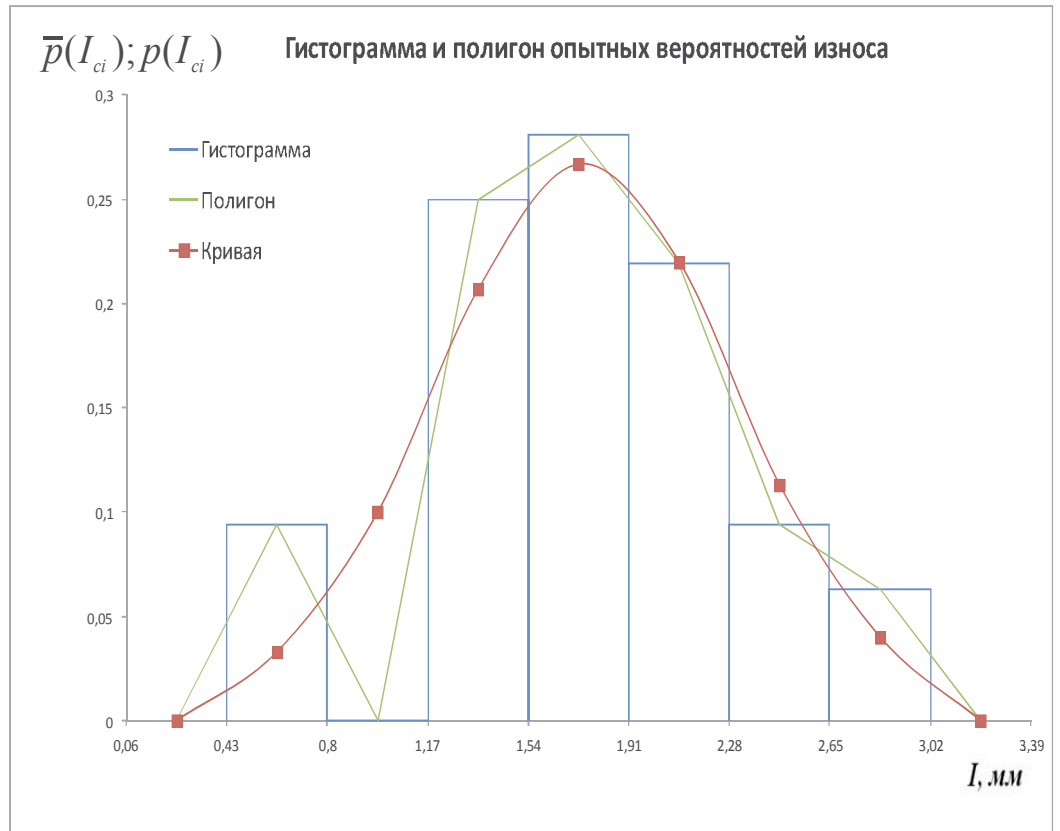
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{cm}} \cdot 100\%.$$

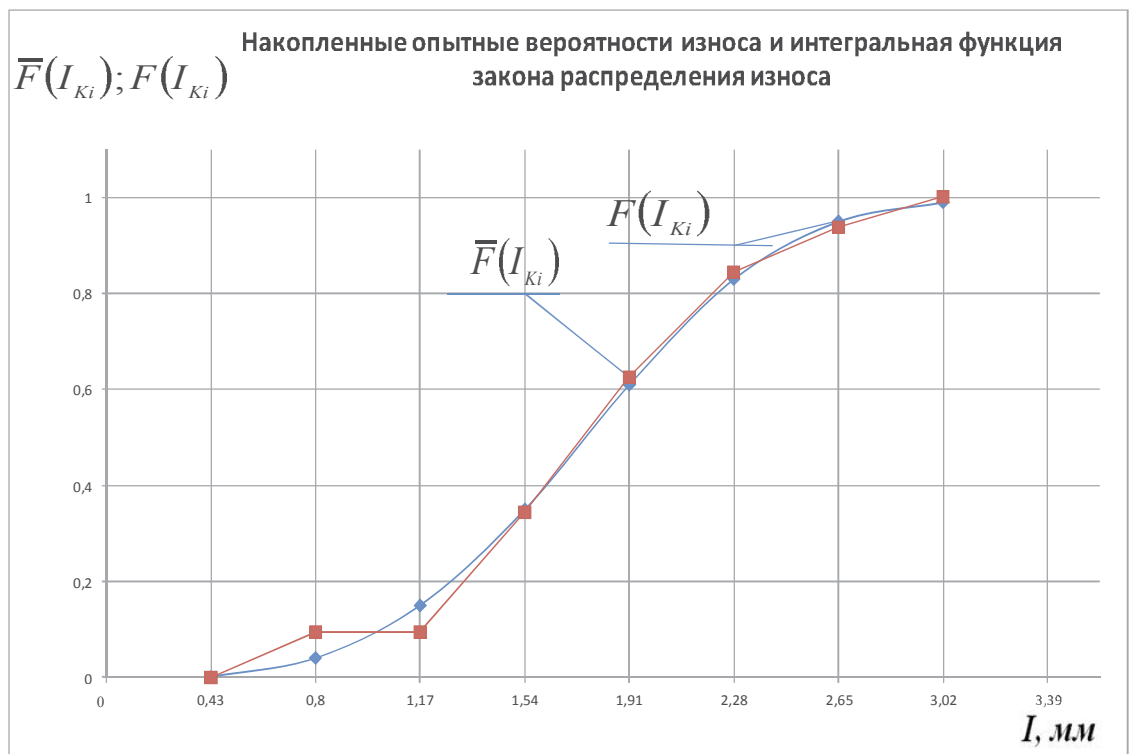
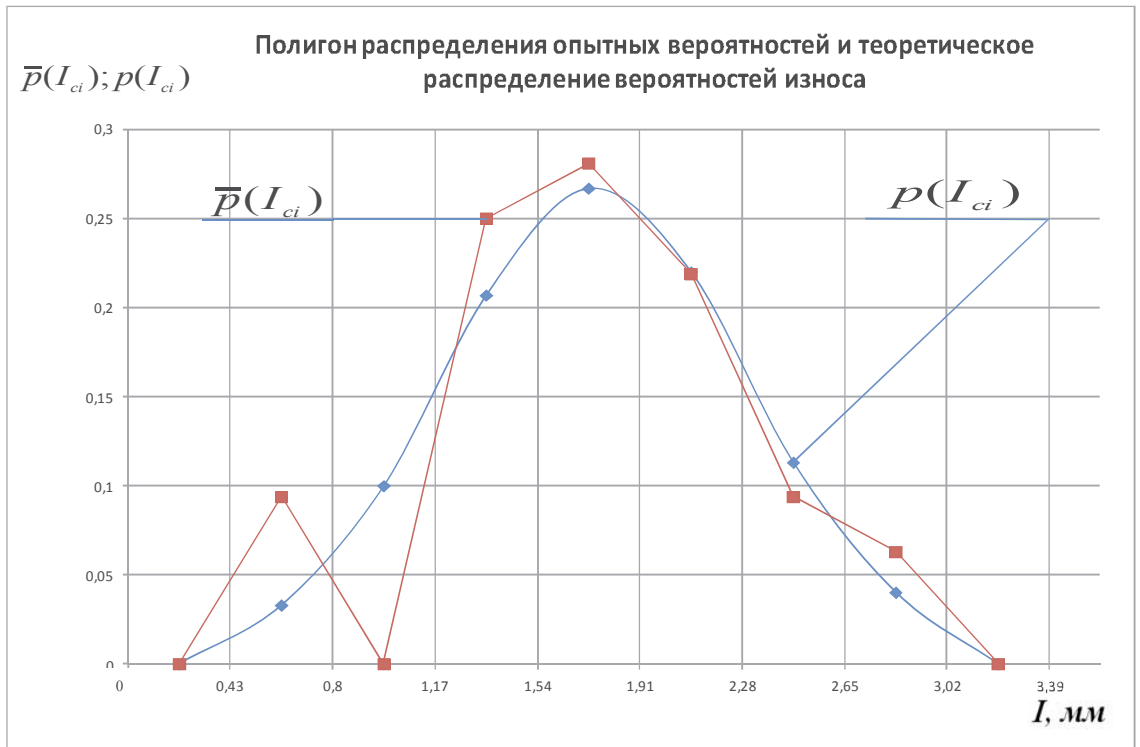
$$\varepsilon_\alpha = (1,5499 - 1,75) / (1,75 - 0,43) \cdot 100 = 15,2 \text{ \%}.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа радиуса
режущей кромки лоп культиватора восстановленных
двусторонним борированием*





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных наплавкой

Таблица 3.15 - Сводная ведомость величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных наплавкой

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 0,22 | 9 | 1,12 | 17 | 1,98 | 25 | 2,9 |
| 2 | 0,41 | 10 | 1,42 | 18 | 1,99 | 26 | 2,93 |
| 3 | 0,46 | 11 | 1,65 | 19 | 2 | 27 | 3,03 |
| 4 | 0,8 | 12 | 1,7 | 20 | 2,39 | 28 | 3,2 |
| 5 | 0,81 | 13 | 1,81 | 21 | 2,44 | 29 | 3,24 |
| 6 | 0,86 | 14 | 1,82 | 22 | 2,45 | 30 | 3,3 |
| 7 | 0,98 | 15 | 1,85 | 23 | 2,7 | 31 | 3,55 |
| 8 | 1,07 | 16 | 1,96 | 24 | 2,78 | 32 | 4,01 |

Таблица 3.16 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| l граница интервала, мм | | -0,1 | 0,53 | 1,16 | 1,79 | 2,42 | 3,05 | 3,68 | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 0,53 | 1,16 | 1,79 | 2,42 | 3,05 | 3,68 | 4,31 | |
| Опытная частота, m _i | | 3 | 6 | 3 | 8 | 7 | 4 | 1 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,188 | 0,094 | 0,25 | 0,219 | 0,125 | 0,031 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,055 | 0,129 | 0,215 | 0,246 | 0,19 | 0,098 | 0,037 |
| | | ЗРВ | 0,045 | 0,17 | 0,227 | 0,234 | 0,164 | 0,104 | 0,044 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,282 | 0,376 | 0,626 | 0,845 | 0,97 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,08 | 0,21 | 0,42 | 0,66 | 0,85 | 0,95 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,03 | 0,11 | 0,39 | 0,63 | 0,9 | 0,99 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 2 | 4 | 7 | 8 | 6 | 3 | 1 | |
| | ЗРВ | 1 | 3 | 9 | 8 | 9 | 3 | 0 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{0ni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (3-2)^2/2 + (6-4)^2/4 + (3-7)^2/7 + (8-8)^2/8 + (7-6)^2/6 + (4-3)^2/3 + (1-1)^2/1 = 4,29.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (6-3)^2/3 + (3-9)^2/9 + (8-8)^2/8 + (7-9)^2/9 + (4-3)^2/3 + (1-0)^2/0 = 11,78.$$

Определяем процент совпадений (P%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – P% = 36,8%; для ЗРВ – P% = 1,9%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 1,99 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 1,62 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 1,99 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 2,36 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 1,62 до 1,77 мм.

Определение статистической ошибки

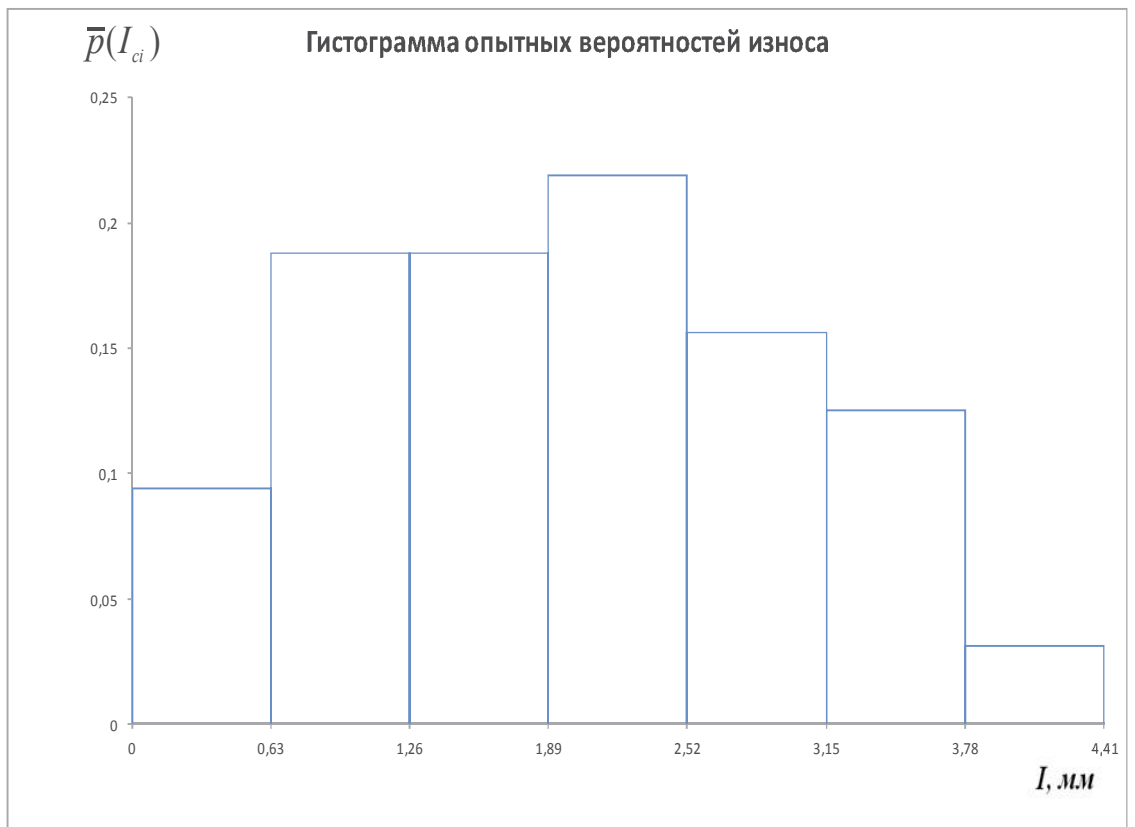
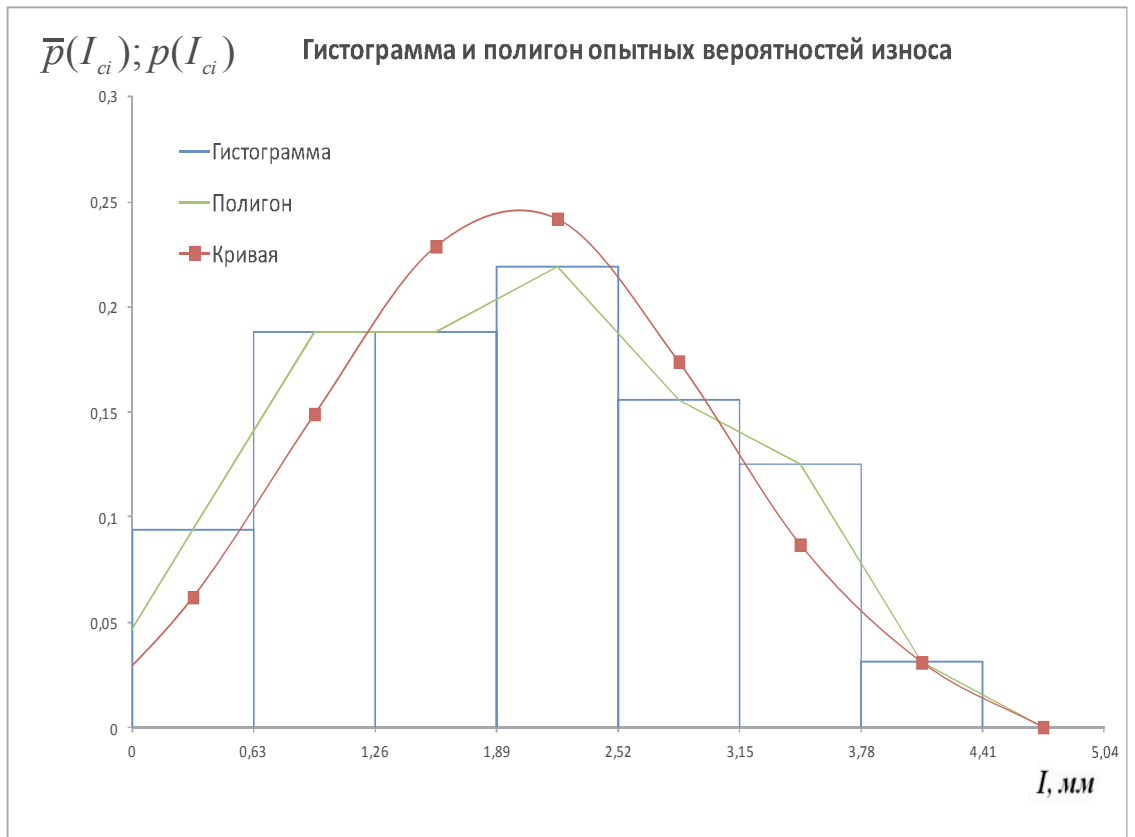
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (1,62 - 1,99) / (1,99 - -0,1) \cdot 100 = 17,7 \%.$$

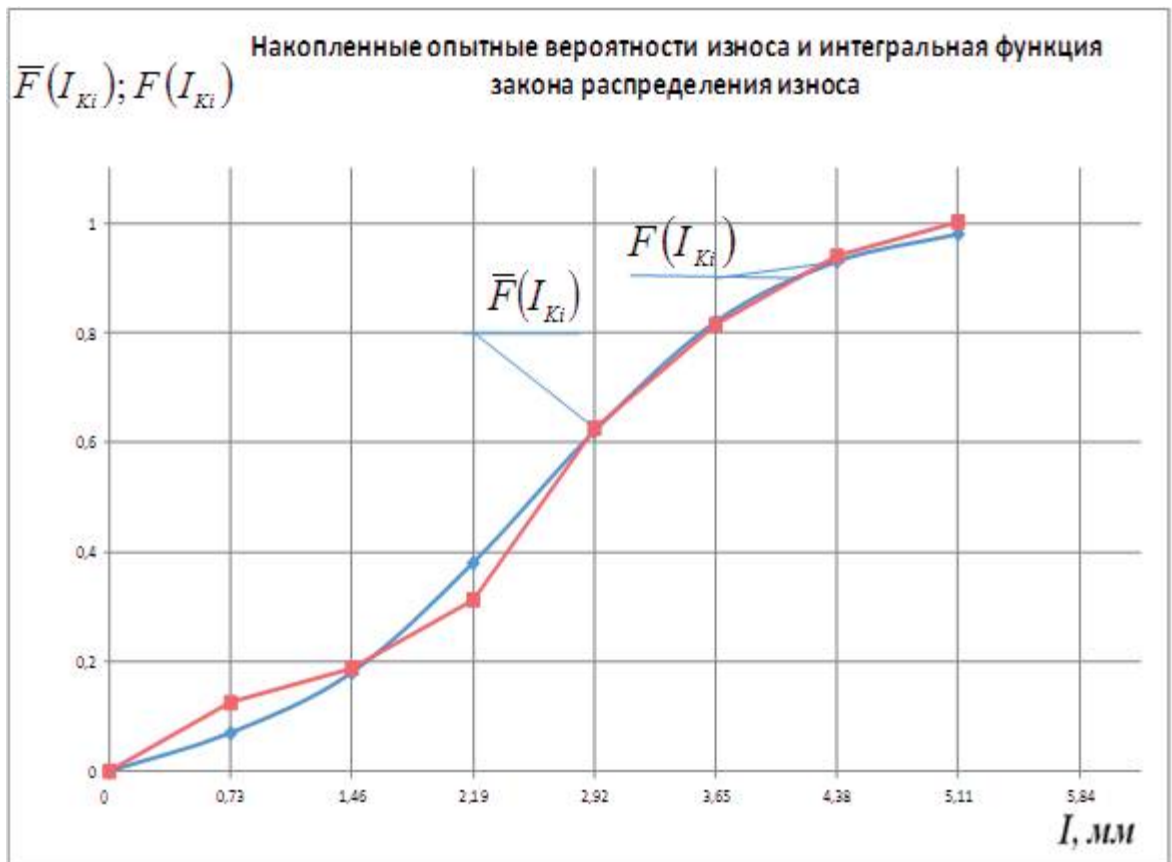
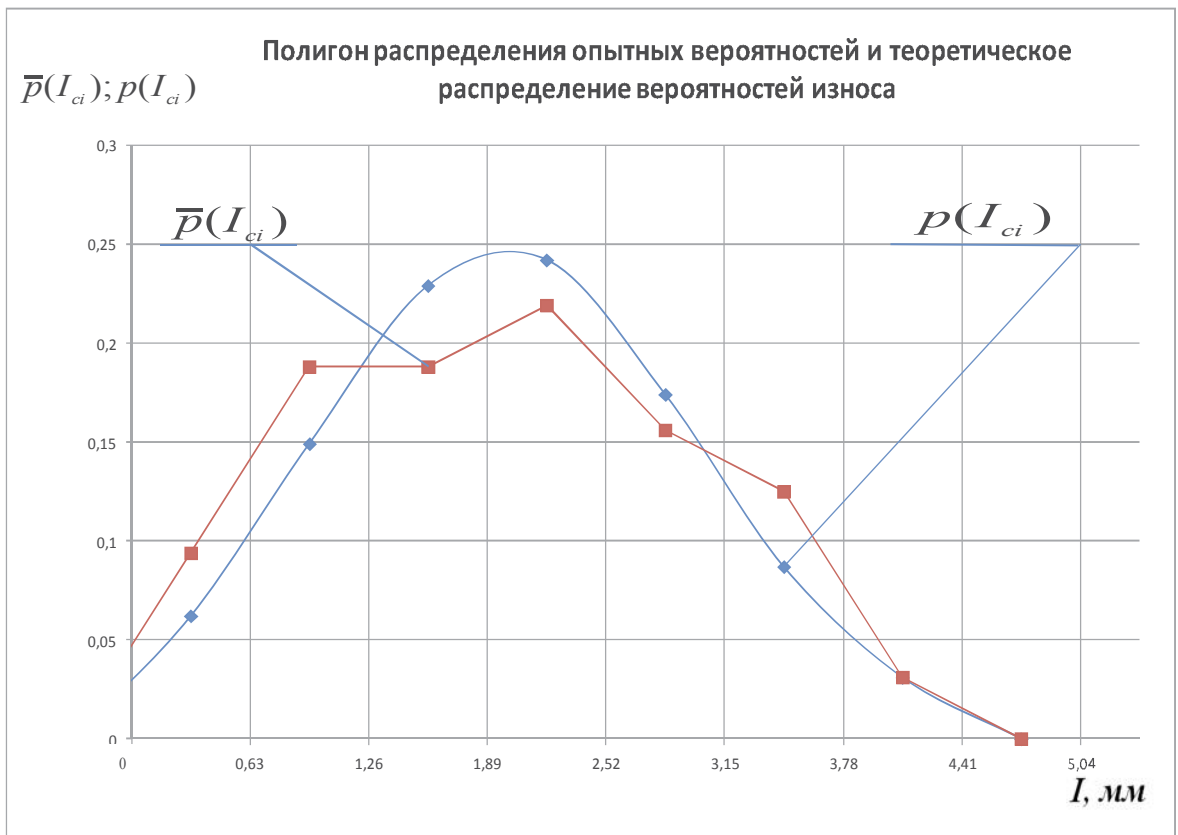
Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа
радиуса режущей кромки лоп культиватора
восстановленных наплавкой*



Продолжение приложения 3



Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных односторонним борированием

Таблица 3.17 - Сводная ведомость величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных односторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 0,83 | 9 | 1,3 | 17 | 1,72 | 25 | 2,27 |
| 2 | 0,85 | 10 | 1,53 | 18 | 1,72 | 26 | 2,31 |
| 3 | 0,92 | 11 | 1,56 | 19 | 1,78 | 27 | 2,32 |
| 4 | 1,03 | 12 | 1,6 | 20 | 1,79 | 28 | 2,33 |
| 5 | 1,1 | 13 | 1,64 | 21 | 1,85 | 29 | 2,4 |
| 6 | 1,18 | 14 | 1,65 | 22 | 2,13 | 30 | 2,4 |
| 7 | 1,27 | 15 | 1,69 | 23 | 2,14 | 31 | 2,43 |
| 8 | 1,28 | 16 | 1,71 | 24 | 2,15 | 32 | 2,58 |

Таблица 3.18 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 0,69 | 0,98 | 1,27 | 1,56 | 1,85 | 2,14 | 2,43 | |
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 0,98 | 1,27 | 1,56 | 1,85 | 2,14 | 2,43 | 2,72 | |
| Опытная частота, m_i | | 3 | 3 | 4 | 10 | 2 | 8 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,094 | 0,125 | 0,313 | 0,063 | 0,25 | 0,063 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,041 | 0,105 | 0,186 | 0,233 | 0,204 | 0,134 | 0,058 |
| | | ЗРВ | 0,04 | 0,12 | 0,206 | 0,22 | 0,198 | 0,121 | 0,074 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,188 | 0,313 | 0,626 | 0,689 | 0,939 | 1,002 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ci})$ | НЗР | 0,06 | 0,17 | 0,35 | 0,58 | 0,78 | 0,92 | 0,97 |
| | | ЗРВ | 0,03 | 0,06 | 0,28 | 0,51 | 0,83 | 0,94 | 0,99 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 4 | 6 | 7 | 6 | 4 | 2 | |
| | ЗРВ | 1 | 1 | 7 | 7 | 10 | 4 | 2 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (3-4)^2/4 + (4-6)^2/6 + (10-7)^2/7 + (2-6)^2/6 + (8-4)^2/4 + (2-2)^2/2 = 12,87.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (3-1)^2/1 + (4-7)^2/7 + (10-7)^2/7 + (2-10)^2/10 + (8-4)^2/4 + (2-2)^2/2 = 20,97.$$

Определяем процент совпадений (P%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – P% = 1,2%; для ЗРВ – P% = 0%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 1,75 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 1,5704 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 1,75 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 1,9296 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 1,13 до 2,29 мм.

Определение статистической ошибки

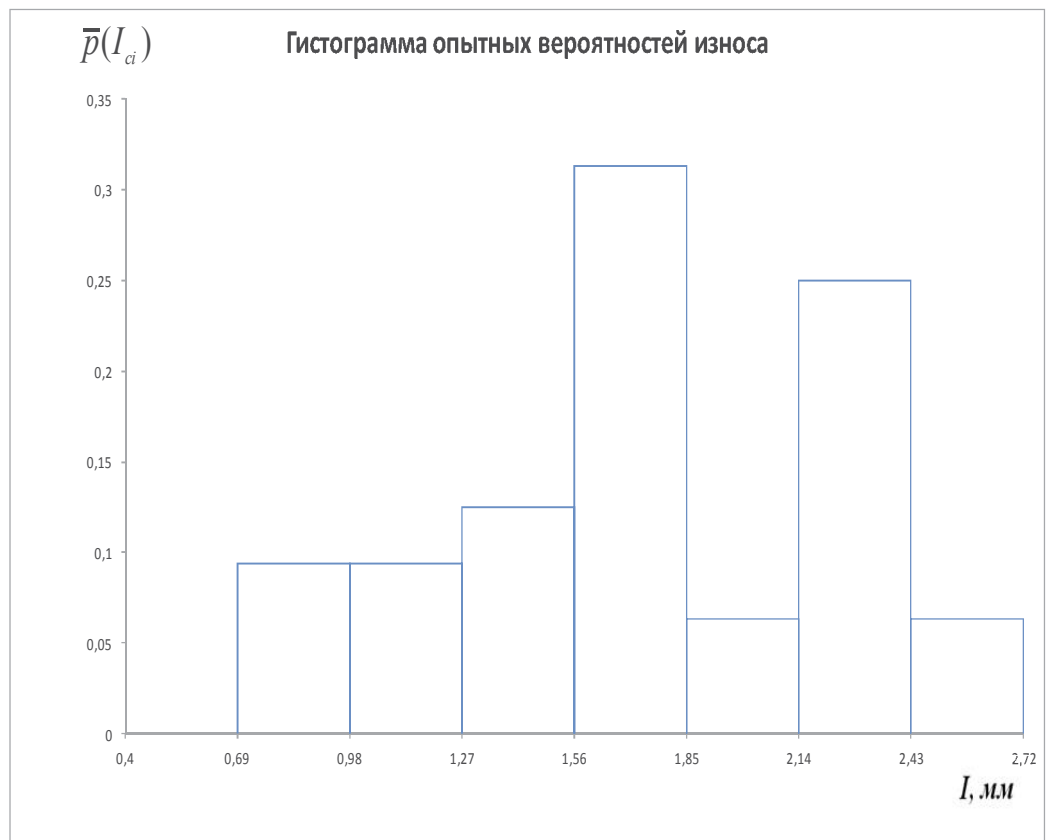
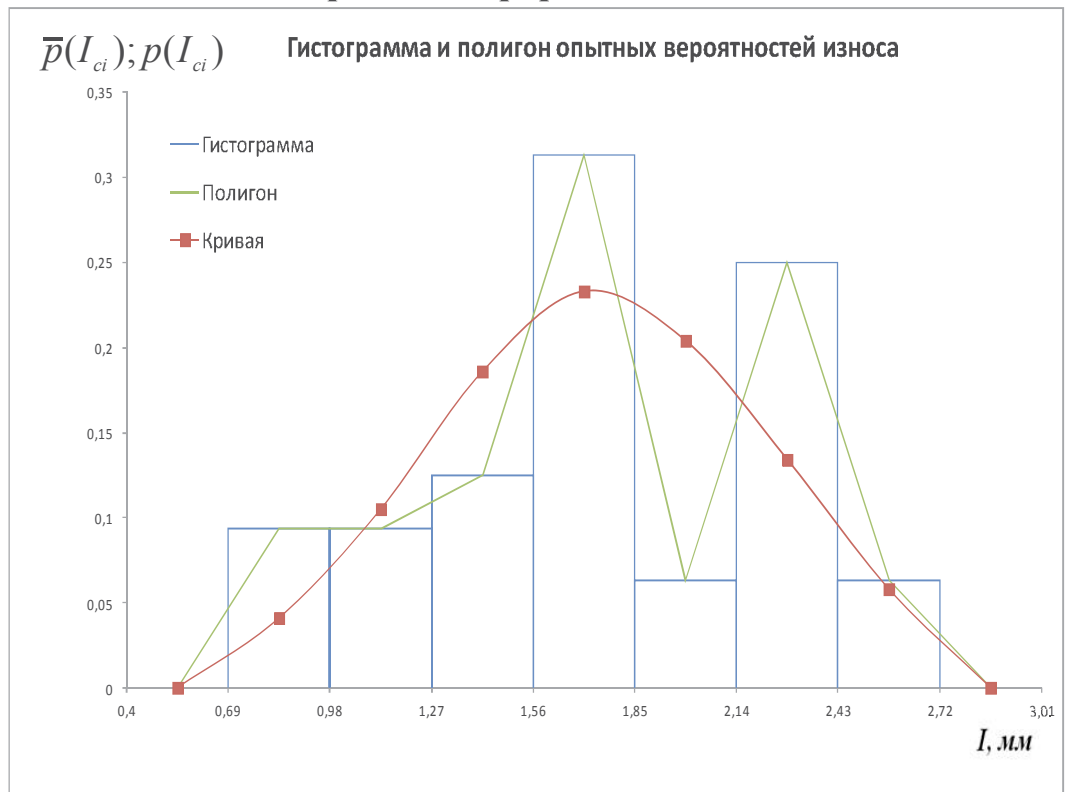
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (1,5704 - 1,75) / (1,75 - 0,69) \cdot 100 = 16,9 \%.$$

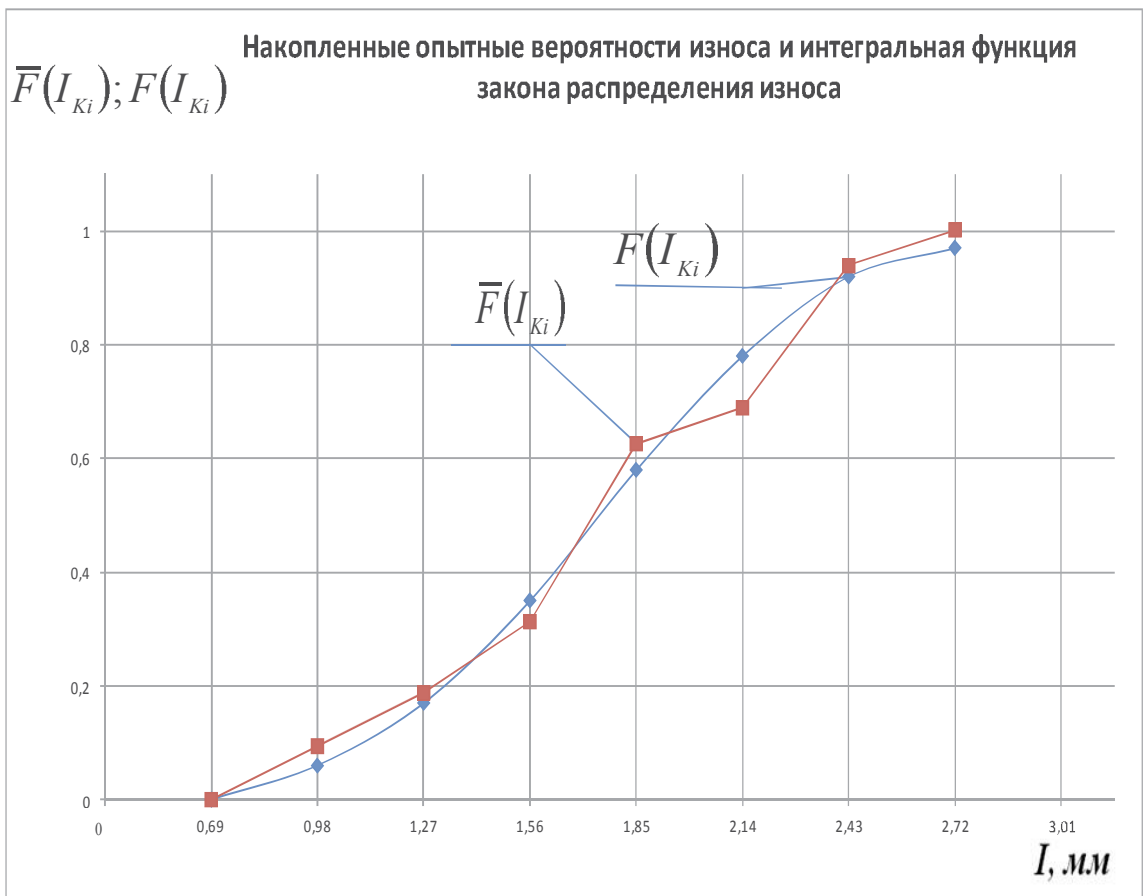
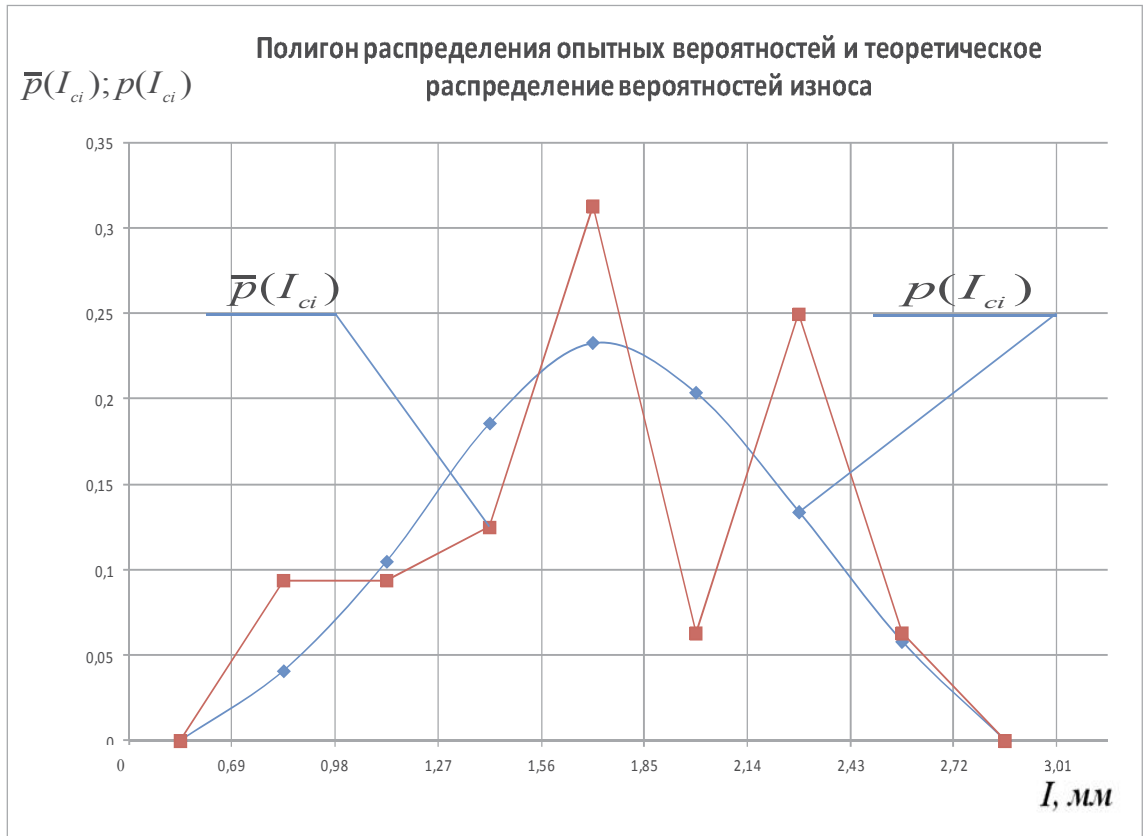
Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа
радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных
односторонним борированием*



Продолжение приложения 3



Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных по существующей технологии

Таблица 3.19 - Сводная ведомость величин износа радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных по существующей технологии

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 0,32 | 9 | 1,9 | 17 | 2,48 | 25 | 3,33 |
| 2 | 0,47 | 10 | 1,95 | 18 | 2,58 | 26 | 3,51 |
| 3 | 0,61 | 11 | 2,19 | 19 | 2,61 | 27 | 3,66 |
| 4 | 0,69 | 12 | 2,19 | 20 | 2,69 | 28 | 3,89 |
| 5 | 0,95 | 13 | 2,22 | 21 | 2,95 | 29 | 4,16 |
| 6 | 1,03 | 14 | 2,27 | 22 | 3,04 | 30 | 4,3 |
| 7 | 1,66 | 15 | 2,42 | 23 | 3,24 | 31 | 4,4 |
| 8 | 1,84 | 16 | 2,44 | 24 | 3,26 | 32 | 4,67 |

Таблица 3.20 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| Граница интервала, мм | | -0,05 | 0,68 | 1,41 | 2,14 | 2,87 | 3,6 | 4,33 | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Середина интервала, мм | | 0,68 | 1,41 | 2,14 | 2,87 | 3,6 | 4,33 | 5,06 | |
| Опытная частота, m_i | | 3 | 3 | 4 | 10 | 6 | 4 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,094 | 0,125 | 0,313 | 0,188 | 0,125 | 0,063 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,043 | 0,112 | 0,205 | 0,248 | 0,205 | 0,118 | 0,043 |
| | | ЗРВ | 0,042 | 0,124 | 0,213 | 0,227 | 0,181 | 0,125 | 0,057 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,188 | 0,313 | 0,626 | 0,814 | 0,939 | 1,002 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,06 | 0,17 | 0,37 | 0,61 | 0,82 | 0,94 | 0,98 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,1 | 0,27 | 0,63 | 0,83 | 0,97 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 2 | 4 | 6 | 8 | 7 | 4 | 1 | |
| | ЗРВ | 1 | 3 | 5 | 12 | 6 | 4 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{0ni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (3-2)^2/2 + (3-4)^2/4 + (4-6)^2/6 + (10-8)^2/8 + (6-7)^2/7 + (4-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 3,06.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (3-3)^2/3 + (4-5)^2/5 + (10-12)^2/12 + (6-6)^2/6 + (4-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 5,53.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 54,8%; для ЗРВ – Р% = 23,7%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_{\beta}^H = \bar{I} - t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = \bar{I} + t_{\beta} \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_{\beta}^H = 2,53 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 2,1055 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_{\beta}^B = 2,53 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 2,9545 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 1,04 до 4,0 мм.

Определение статистической ошибки

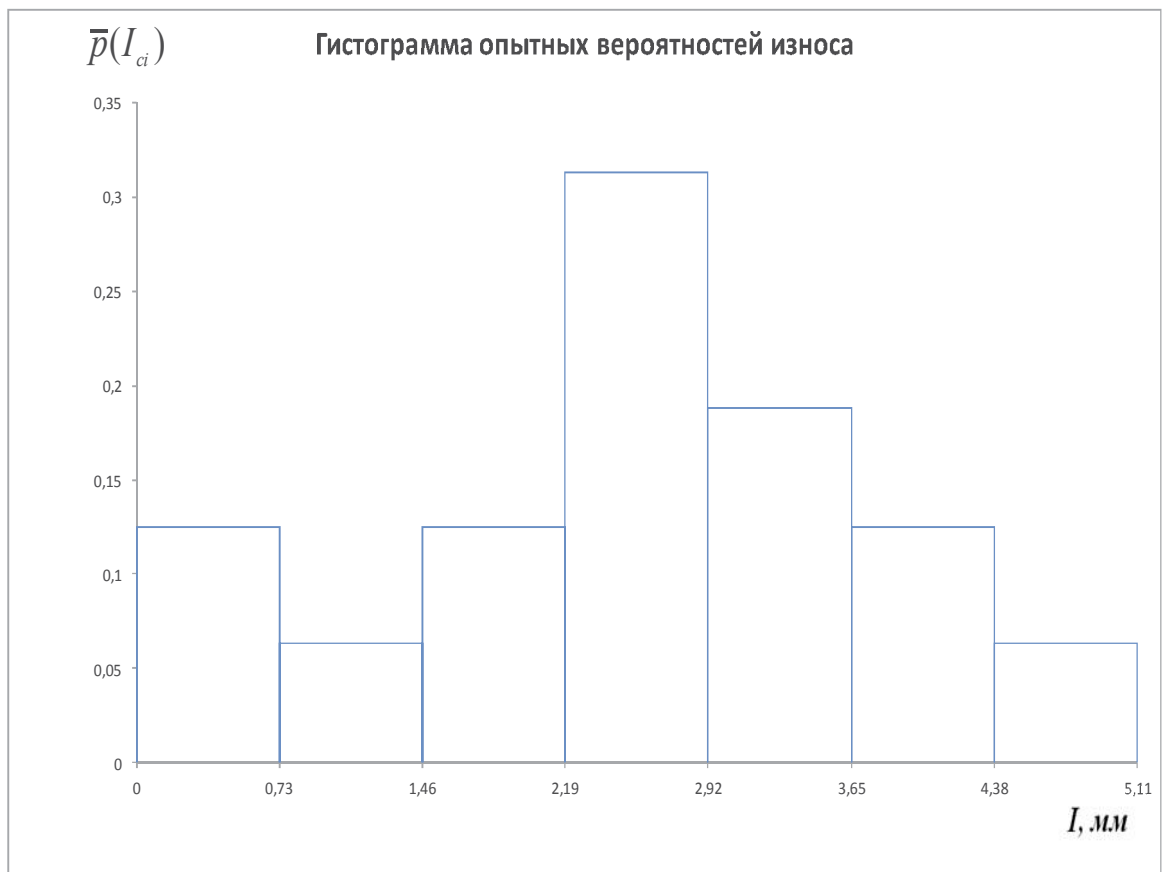
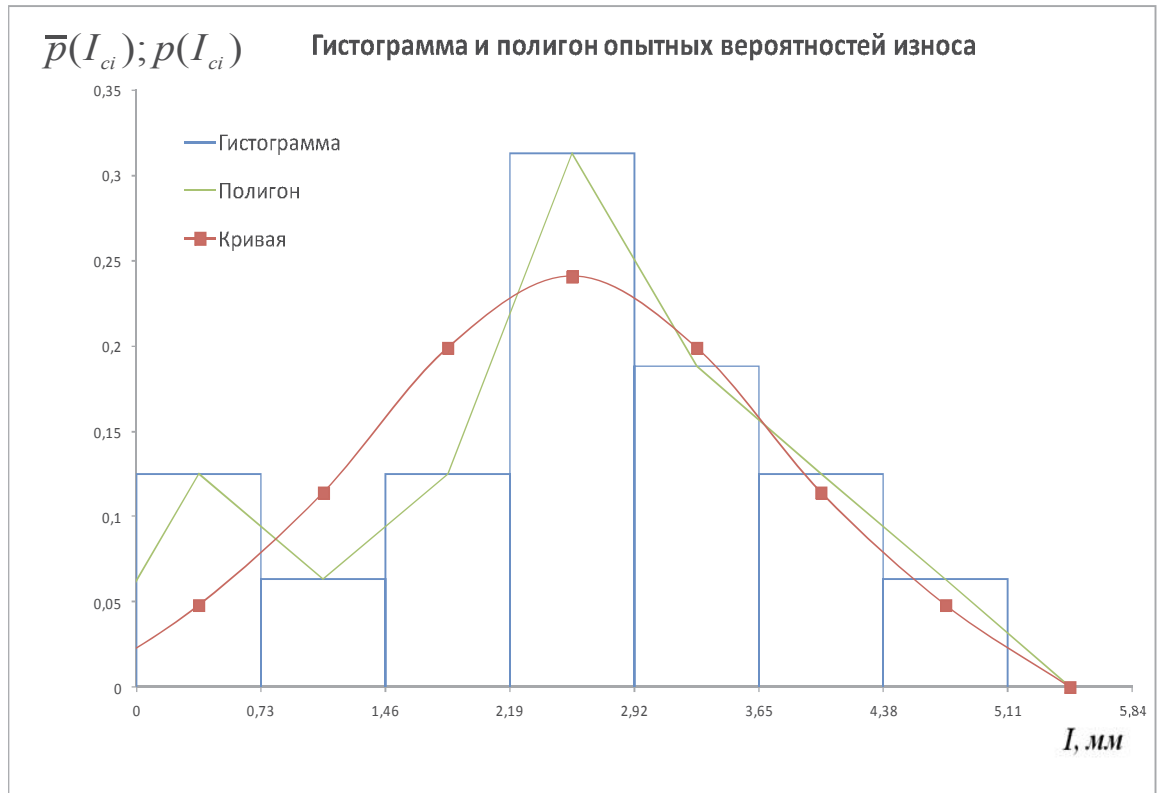
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

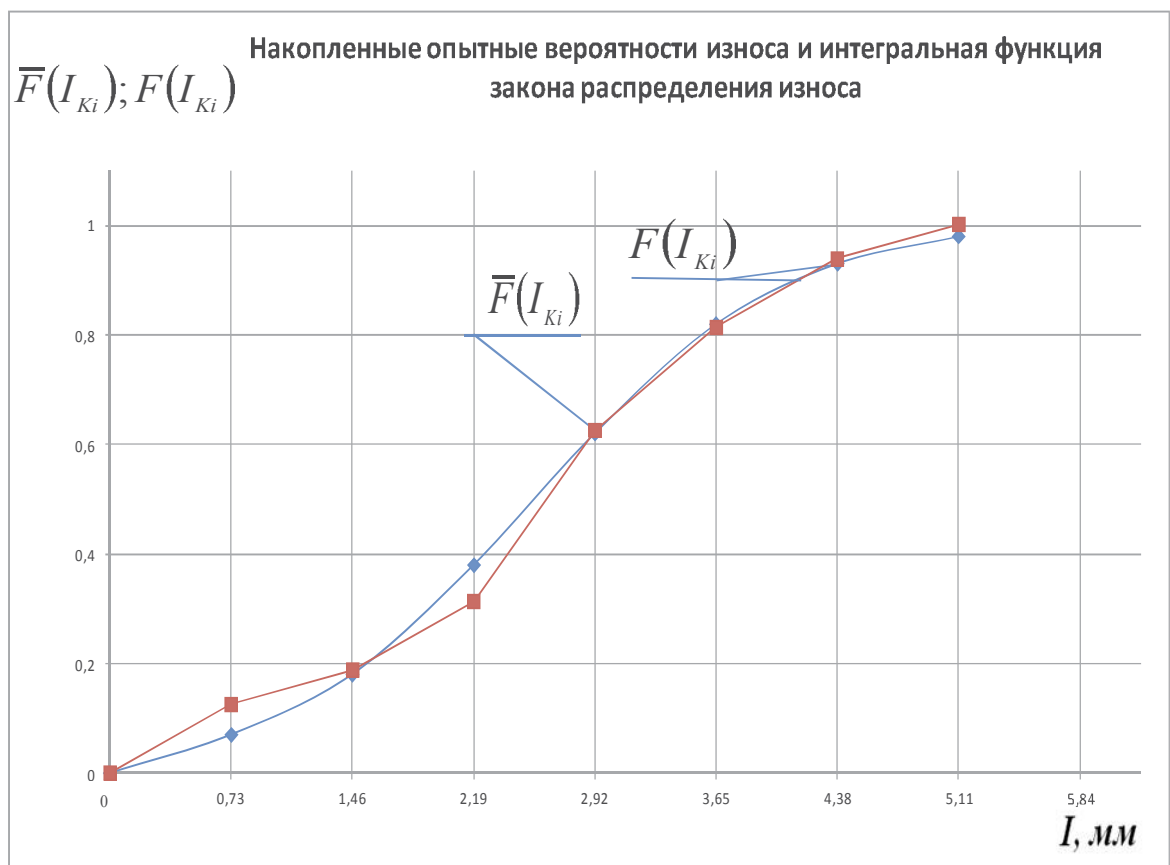
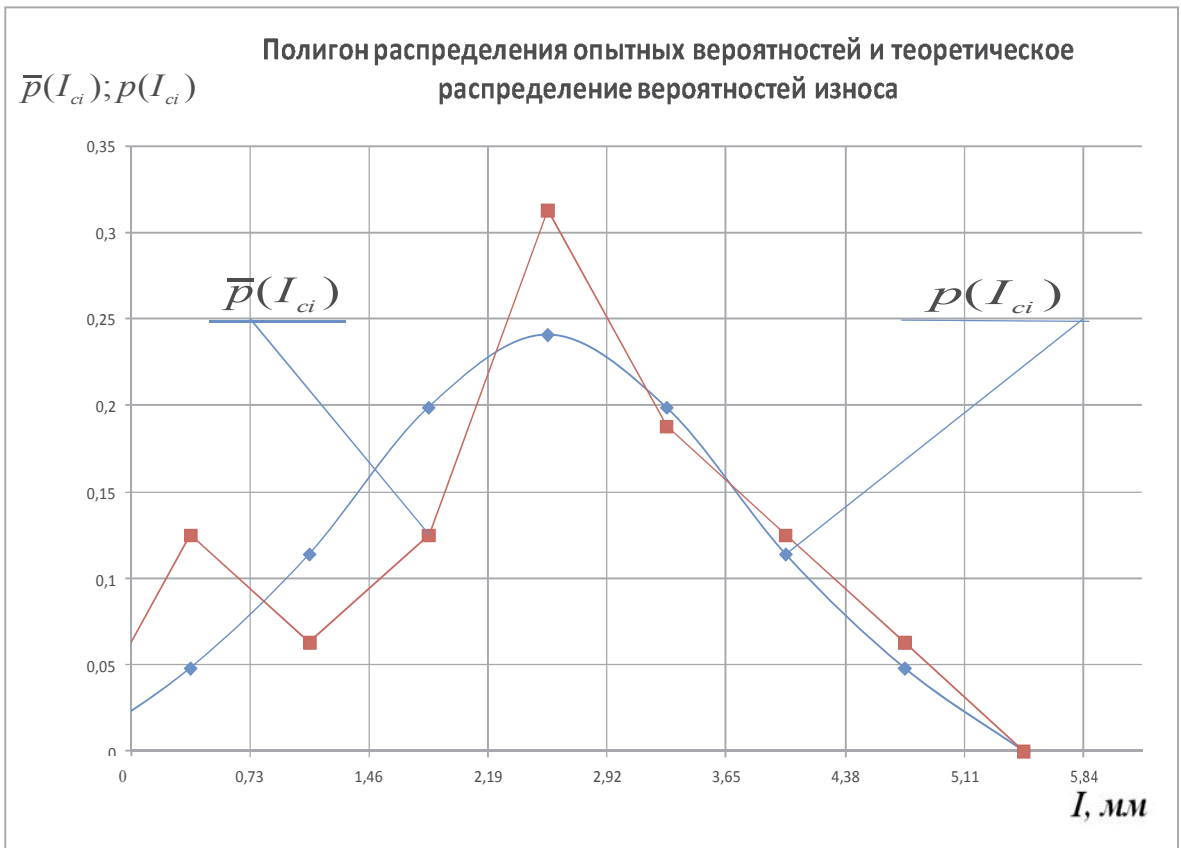
$$\varepsilon_{\alpha} = (2,1055 - 2,53) / (2,53 - -0,05) \cdot 100 = 16,5 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_{\alpha} \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа
радиуса режущей кромки лап культиватора восстановленных
по существующей технологии*





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа носка лап культиватора восстановленных двусторонним борированием
 Таблица 3.21 - Сводная ведомость величин износа носка лап культиватора восстановленных двусторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 27,78 | 9 | 28,4 | 17 | 28,79 | 25 | 29,14 |
| 2 | 28,01 | 10 | 28,43 | 18 | 28,8 | 26 | 29,2 |
| 3 | 28,12 | 11 | 28,46 | 19 | 28,92 | 27 | 29,21 |
| 4 | 28,3 | 12 | 28,5 | 20 | 28,96 | 28 | 29,36 |
| 5 | 28,31 | 13 | 28,56 | 21 | 28,97 | 29 | 29,52 |
| 6 | 28,37 | 14 | 28,57 | 22 | 28,97 | 30 | 29,6 |
| 7 | 28,39 | 15 | 28,63 | 23 | 29,04 | 31 | 29,9 |
| 8 | 28,4 | 16 | 28,66 | 24 | 29,12 | 32 | 29,99 |

Таблица 3.22 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| Граница интервала, мм | | 27,6 | 27,97 | 28,34 | 28,71 | 29,08 | 29,45 | 29,82 | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 27,97 | 28,34 | 28,71 | 29,08 | 29,45 | 29,82 | 30,19 | |
| Опытная частота, m_i | | 1 | 4 | 11 | 7 | 5 | 2 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,125 | 0,344 | 0,219 | 0,156 | 0,063 | 0,063 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,042 | 0,118 | 0,237 | 0,279 | 0,202 | 0,091 | 0,028 |
| | | ЗРВ | 0,035 | 0,116 | 0,227 | 0,252 | 0,208 | 0,103 | 0,037 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,156 | 0,5 | 0,719 | 0,875 | 0,938 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,05 | 0,17 | 0,4 | 0,67 | 0,88 | 0,97 | 1 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,09 | 0,37 | 0,63 | 0,91 | 0,98 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 4 | 7 | 9 | 7 | 3 | 1 | |
| | ЗРВ | 1 | 2 | 9 | 8 | 9 | 2 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{ny} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (1-1)^2/1 + (4-4)^2/4 + (11-7)^2/7 + (7-9)^2/9 + (5-7)^2/7 + (2-3)^2/3 + (2-1)^2/1 = 4,63.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (1-1)^2/1 + (4-2)^2/2 + (11-9)^2/9 + (7-8)^2/8 + (5-9)^2/9 + (2-2)^2/2 + (2-1)^2/1 = 5,35.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Тогда: для ЗНР – Р% = 32,7%; для ЗРВ – Р% = 25,3%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 28,84 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 28,649 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 28,84 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 29,031 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 28,1 до 29,6 мм.

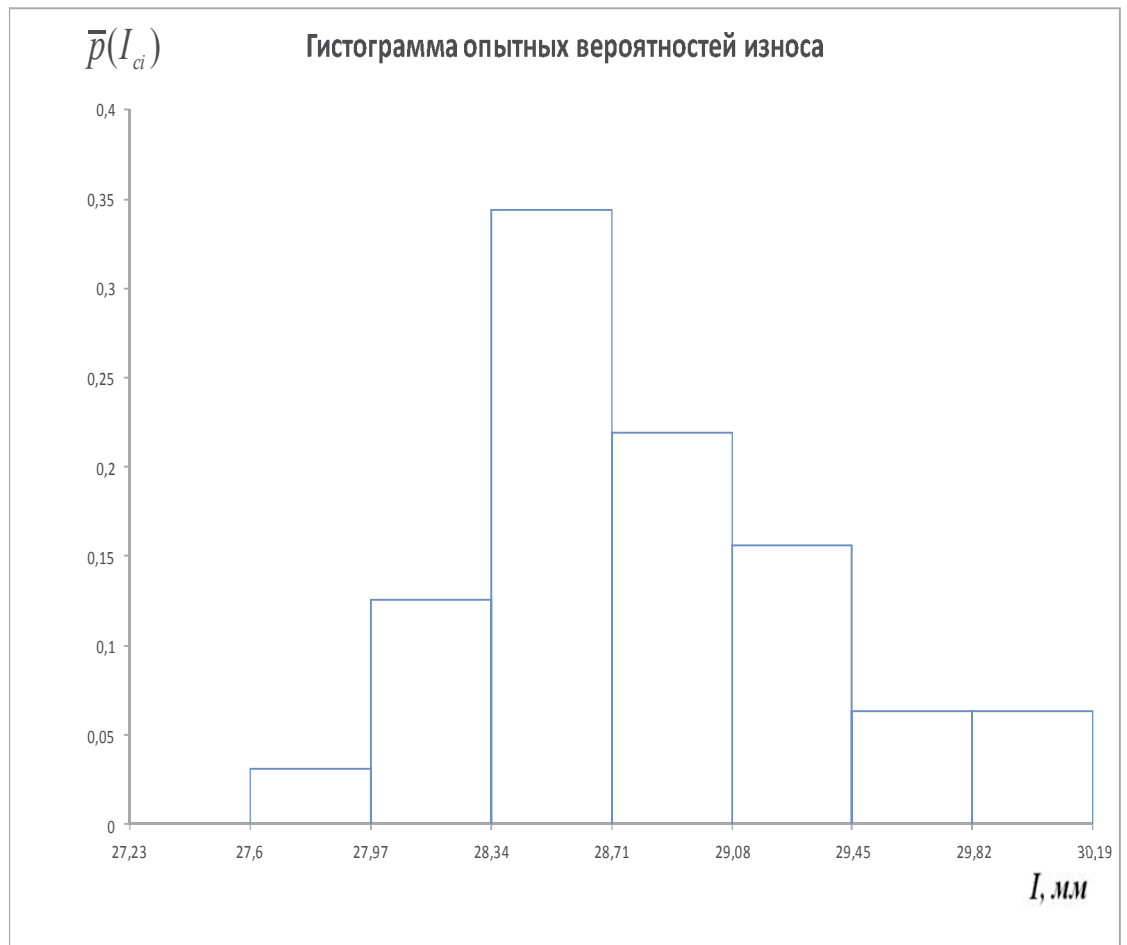
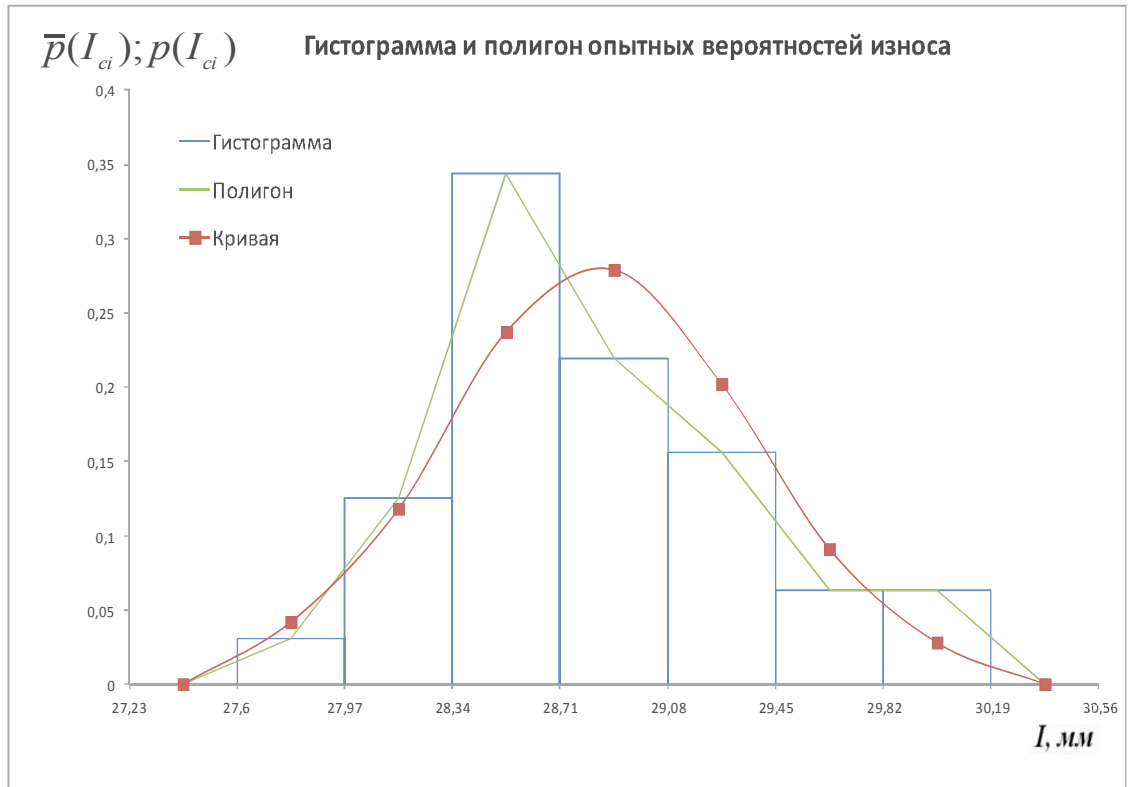
Определение статистической ошибки

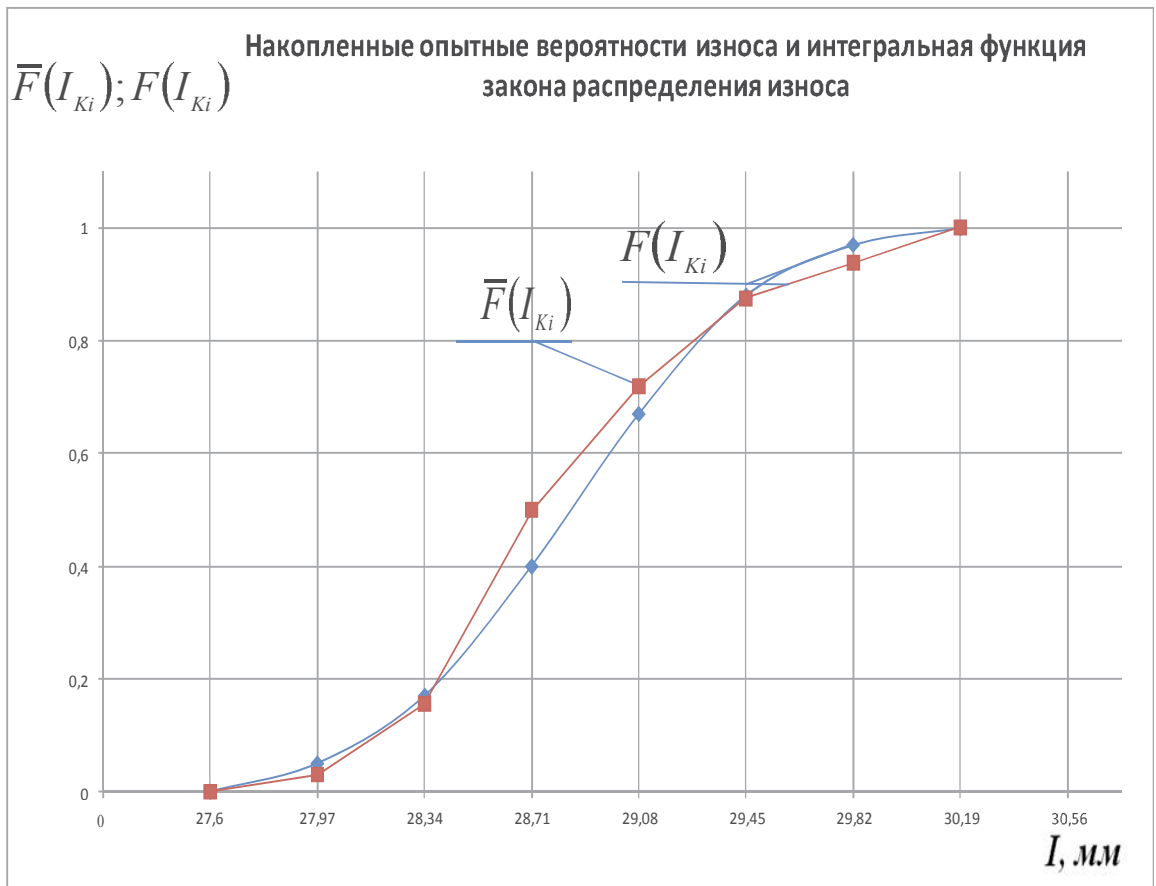
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (28,649 - 28,84) / (28,84 - 27,6) \cdot 100 = 15,4 \text{ \%}.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

**Результаты определения распределения величин износа носка лап
культиватора восстановленных двусторонним борированием**





Продолжение приложения 3

**Определение закономерности распределения величин износа носка
лап культиватора восстановленных наплавкой**

Таблица 3.23 - Сводная ведомость величин износа носка лап культиватора
восстановленных наплавкой

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 27,62 | 9 | 28,33 | 17 | 28,79 | 25 | 29,19 |
| 2 | 27,96 | 10 | 28,37 | 18 | 28,81 | 26 | 29,26 |
| 3 | 28 | 11 | 28,43 | 19 | 28,83 | 27 | 29,28 |
| 4 | 28,01 | 12 | 28,45 | 20 | 28,89 | 28 | 29,29 |
| 5 | 28,09 | 13 | 28,57 | 21 | 28,95 | 29 | 29,36 |
| 6 | 28,09 | 14 | 28,72 | 22 | 29,01 | 30 | 29,39 |
| 7 | 28,31 | 15 | 28,77 | 23 | 29,06 | 31 | 29,59 |
| 8 | 28,33 | 16 | 28,79 | 24 | 29,07 | 32 | 29,69 |

Таблица 3.24 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими
законами распределения

| | | | | | | | | | |
|---|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Граница интервала, мм | | 27,45 | 27,8 | 28,15 | 28,5 | 28,85 | 29,2 | 29,55 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | | 27,8 | 28,15 | 28,5 | 28,85 | 29,2 | 29,55 | 29,9 | |
| Середина интервала, мм | | 27,625 | 27,975 | 28,325 | 28,675 | 29,025 | 29,375 | 29,725 | |
| Опытная частота, m_i | | 1 | 5 | 6 | 7 | 6 | 5 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,156 | 0,188 | 0,219 | 0,188 | 0,156 | 0,063 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,032 | 0,095 | 0,191 | 0,254 | 0,223 | 0,127 | 0,051 |
| | | ЗРВ | 0,032 | 0,105 | 0,206 | 0,233 | 0,213 | 0,124 | 0,069 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,031 | 0,187 | 0,375 | 0,594 | 0,782 | 0,938 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{\kappa_i})$ | НЗР | 0,04 | 0,14 | 0,33 | 0,58 | 0,8 | 0,93 | 0,98 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,04 | 0,26 | 0,5 | 0,84 | 0,96 | 0,99 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 1 | 3 | 6 | 8 | 7 | 4 | 2 | |
| | ЗРВ | 1 | 1 | 7 | 8 | 11 | 4 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (1-1)^2/1 + (5-3)^2/3 + (6-6)^2/6 + (7-8)^2/8 + (6-7)^2/7 + (5-4)^2/4 + (2-2)^2/2 = 1,85.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (1-1)^2/1 + (5-1)^2/1 + (6-7)^2/7 + (7-8)^2/8 + (6-11)^2/11 + (5-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 19,79.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 76,3%; для ЗРВ – Р% = 0,1%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 28,74 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 28,542 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 28,74 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 28,938 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 28,0 до 29,4 мм.

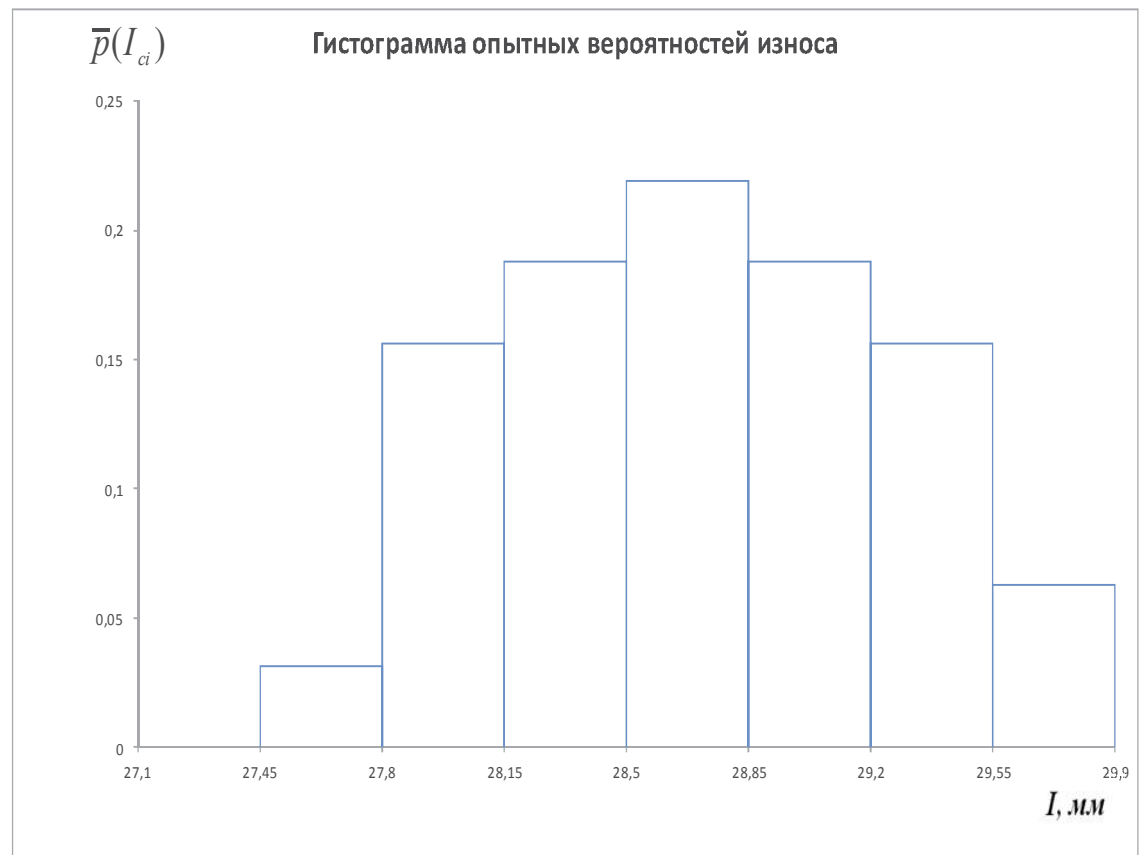
Определение статистической ошибки

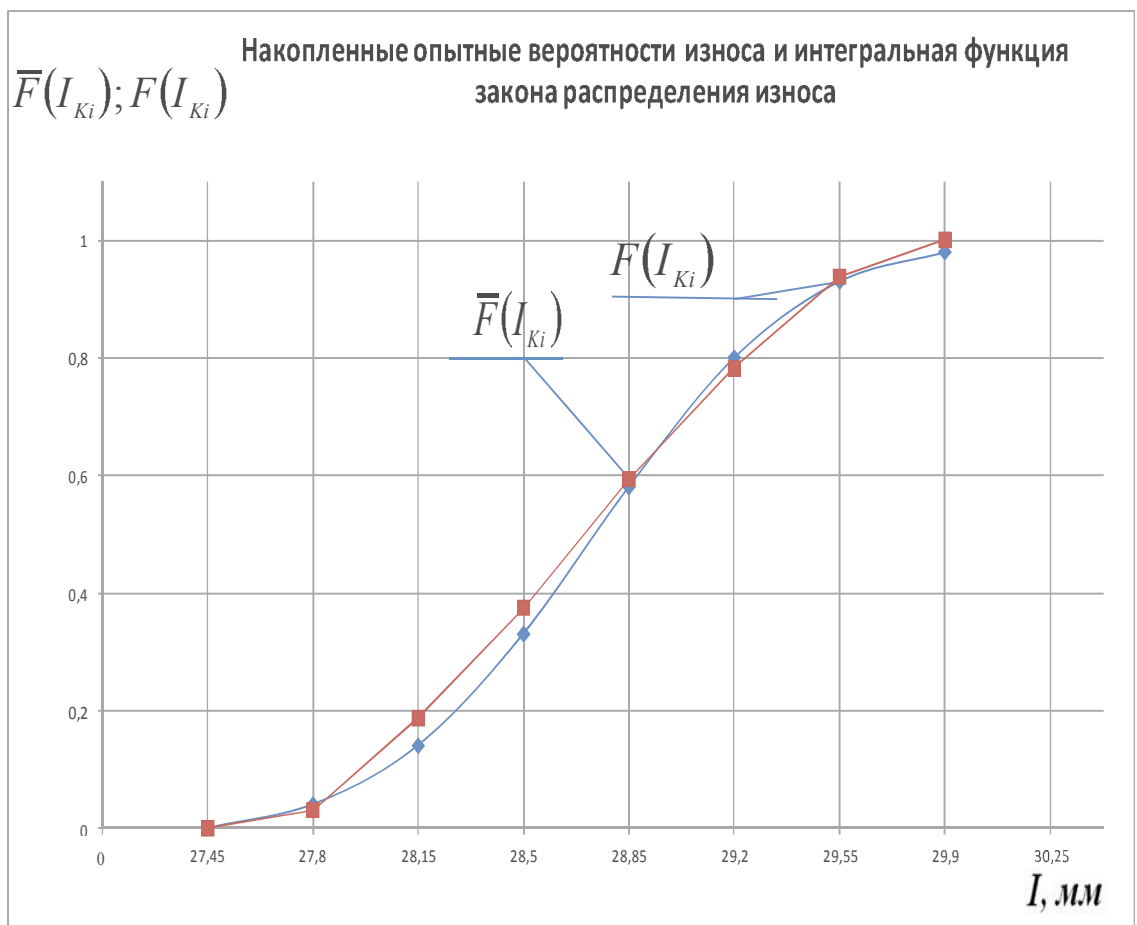
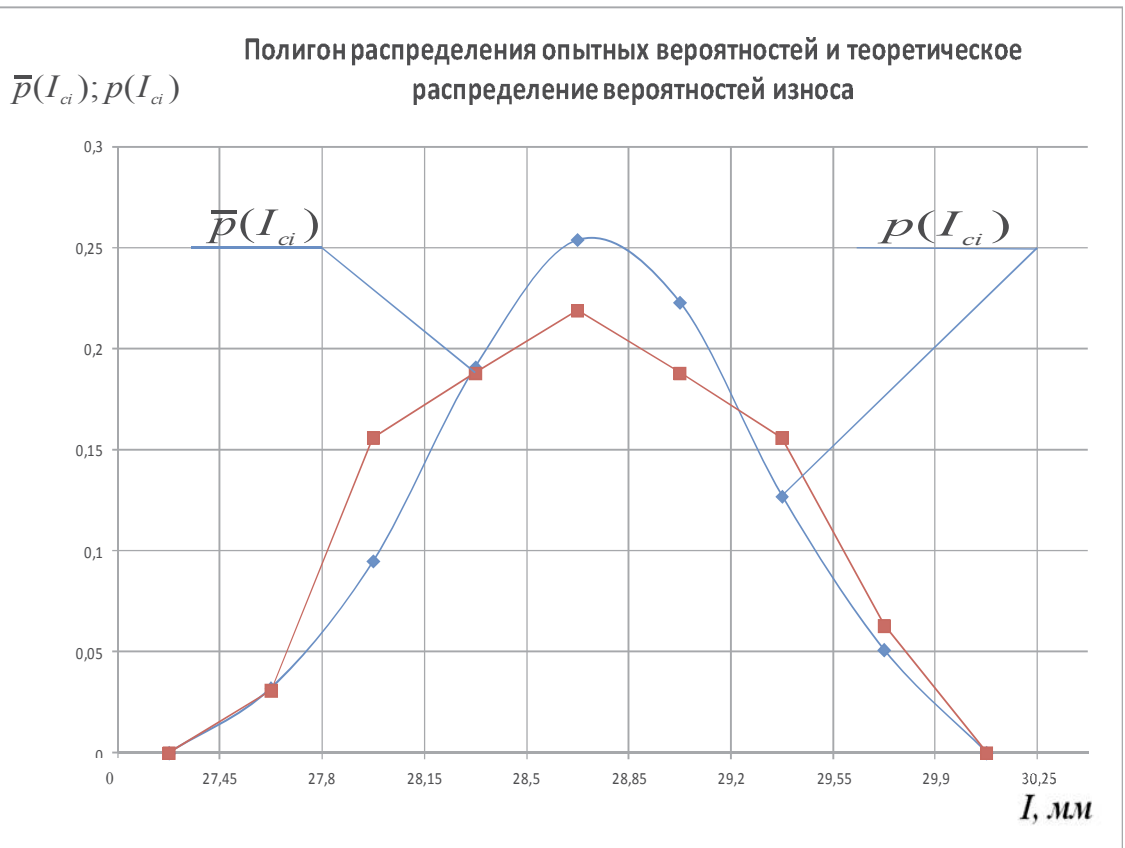
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{cm}} \cdot 100\%.$$

$$\varepsilon_\alpha = (28,542 - 28,74) / (28,74 - 27,45) \cdot 100 = 15,4 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

*Результаты определения распределения величин износа
носки лап культиватора восстановленных наплавкой*





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа носка лап культиватора восстановленных односторонним борированием
 Таблица 3.25 - Сводная ведомость величин износа носка лап культиватора восстановленных односторонним борированием

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 27,94 | 9 | 28,83 | 17 | 29,08 | 25 | 29,24 |
| 2 | 28,11 | 10 | 28,94 | 18 | 29,15 | 26 | 29,4 |
| 3 | 28,4 | 11 | 28,94 | 19 | 29,17 | 27 | 29,4 |
| 4 | 28,43 | 12 | 28,98 | 20 | 29,18 | 28 | 29,42 |
| 5 | 28,56 | 13 | 29,02 | 21 | 29,19 | 29 | 29,56 |
| 6 | 28,64 | 14 | 29,03 | 22 | 29,21 | 30 | 29,78 |
| 7 | 28,71 | 15 | 29,05 | 23 | 29,23 | 31 | 30,02 |
| 8 | 28,82 | 16 | 29,08 | 24 | 29,23 | 32 | 30,09 |

Таблица 3.26 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 27,76 | 28,12 | 28,48 | 28,84 | 29,2 | 29,56 | 29,92 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | | 28,12 | 28,48 | 28,84 | 29,2 | 29,56 | 29,92 | 30,28 | |
| Середина интервала, мм | | 27,94 | 28,3 | 28,66 | 29,02 | 29,38 | 29,74 | 30,1 | |
| Опытная частота, mi | | 2 | 2 | 5 | 12 | 7 | 2 | 2 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,063 | 0,156 | 0,375 | 0,219 | 0,063 | 0,063 |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,021 | 0,084 | 0,197 | 0,274 | 0,239 | 0,126 | 0,042 |
| | | ЗРВ | 0,015 | 0,076 | 0,163 | 0,259 | 0,245 | 0,13 | 0,059 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,126 | 0,282 | 0,657 | 0,876 | 0,939 | 1,002 |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,03 | 0,11 | 0,3 | 0,58 | 0,82 | 0,95 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,01 | 0,03 | 0,23 | 0,49 | 0,76 | 0,97 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | | НЗР | 1 | 3 | 6 | 9 | 8 | 4 | 1 |
| | | ЗРВ | 0 | 1 | 6 | 8 | 9 | 7 | 1 |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (2-3)^2/3 + (5-6)^2/6 + (12-9)^2/9 + (7-8)^2/8 + (2-4)^2/4 + (2-1)^2/1 = 4,63.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-0)^2/0 + (2-1)^2/1 + (5-6)^2/6 + (12-8)^2/8 + (7-9)^2/9 + (2-7)^2/7 + (2-1)^2/1 = 8,18.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 32,7%; для ЗРВ – Р% = 17,4%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 29,1 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 28,915 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 29,1 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 29,285 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 28,29 до 29,82 мм.

Определение статистической ошибки

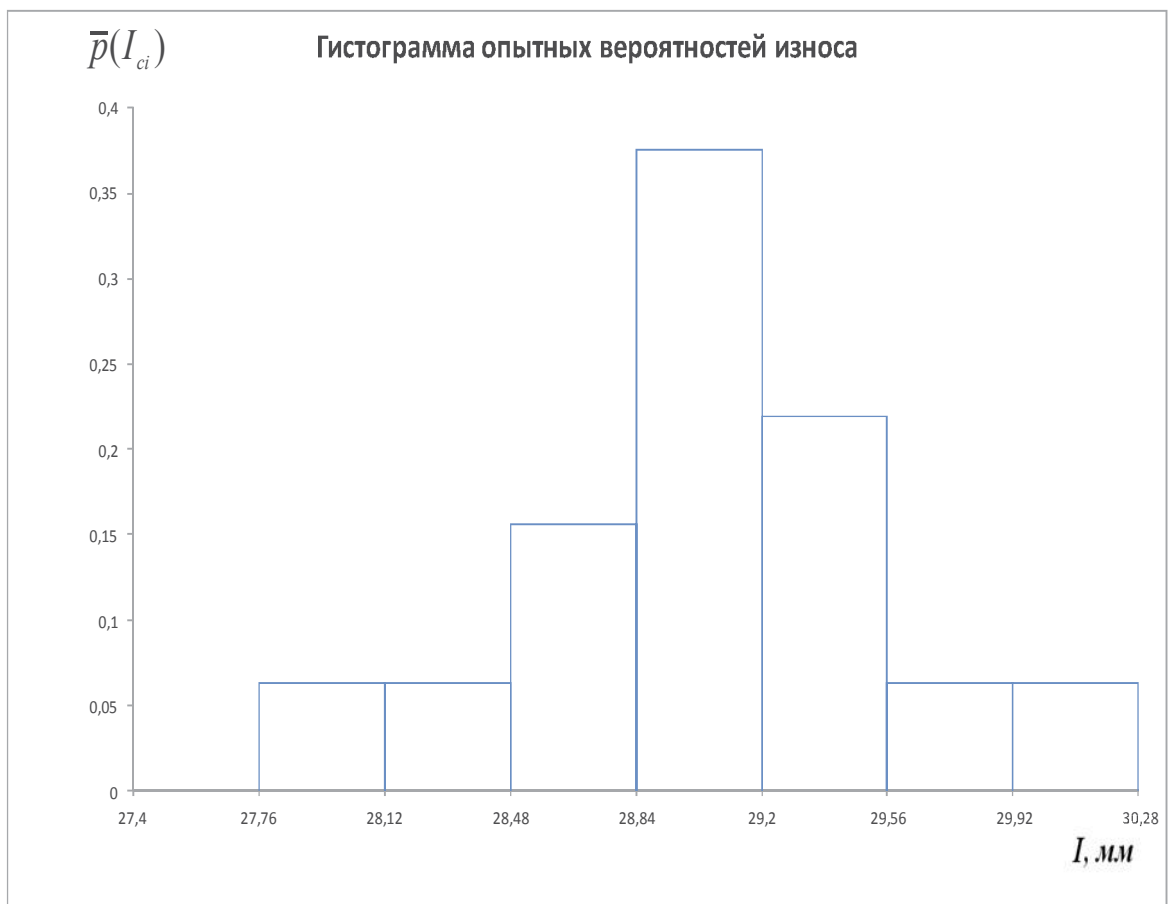
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{\text{см}}} \cdot 100\%.$$

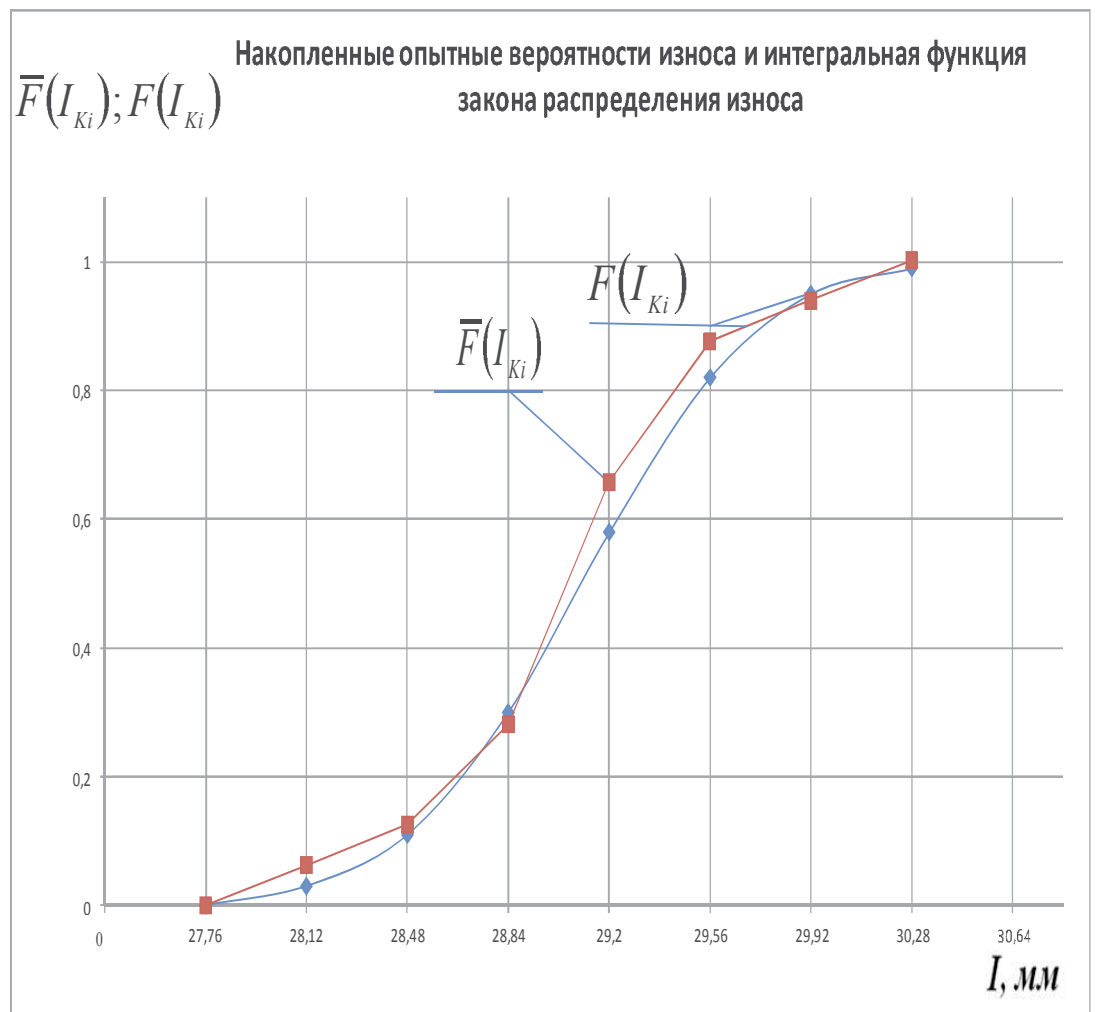
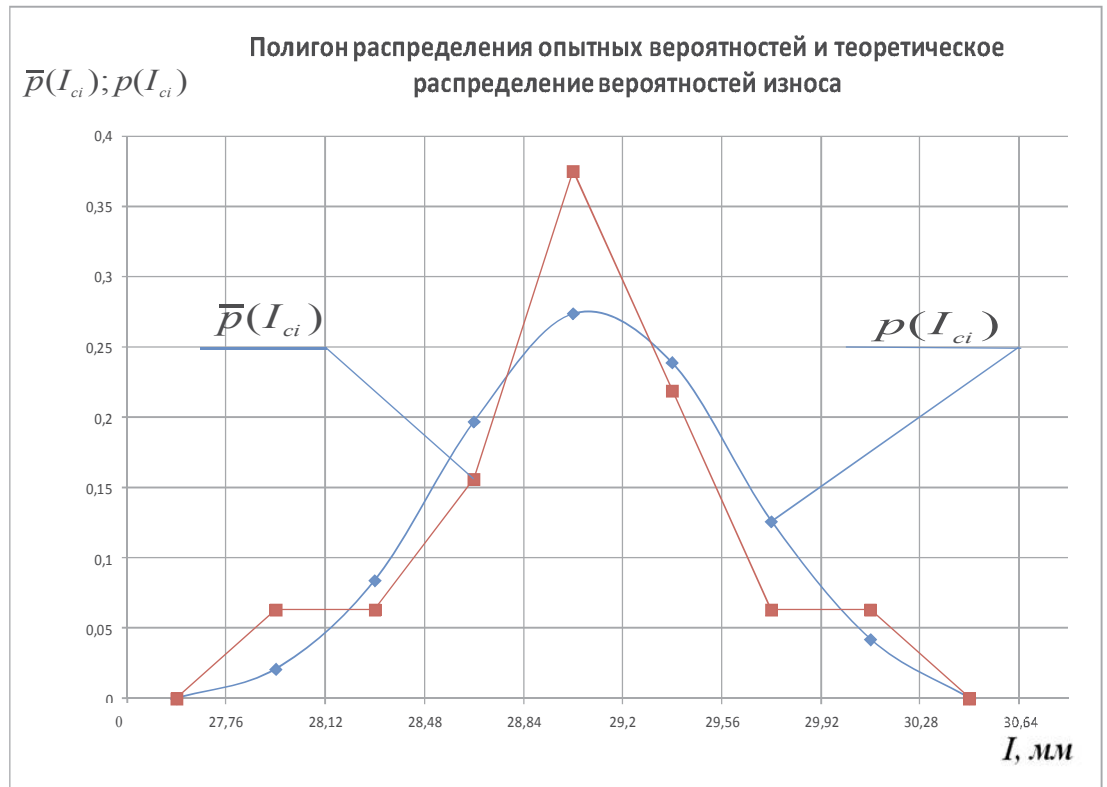
$$\varepsilon_\alpha = (28,915 - 29,1) / (29,1 - 27,76) \cdot 100 = 13,8 \text{ \%}.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа носка лап
культиватора восстановленных односторонним борированием*





Продолжение приложения 3

Определение закономерности распределения величин износа носка лап культиватора восстановленных по существующей технологии
 Таблица 3.27 - Сводная ведомость величин износа носка лап культиватора восстановленных по существующей технологии

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 29,49 | 9 | 29,92 | 17 | 30,3 | 25 | 30,59 |
| 2 | 29,51 | 10 | 29,99 | 18 | 30,31 | 26 | 30,61 |
| 3 | 29,58 | 11 | 30,04 | 19 | 30,37 | 27 | 30,63 |
| 4 | 29,69 | 12 | 30,11 | 20 | 30,37 | 28 | 30,77 |
| 5 | 29,78 | 13 | 30,16 | 21 | 30,39 | 29 | 31,01 |
| 6 | 29,81 | 14 | 30,23 | 22 | 30,41 | 30 | 31,08 |
| 7 | 29,81 | 15 | 30,27 | 23 | 30,42 | 31 | 31,12 |
| 8 | 29,86 | 16 | 30,28 | 24 | 30,46 | 32 | 31,18 |

Таблица 3.28 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Граница интервала, мм | | 29,35 | 29,63 | 29,91 | 30,19 | 30,47 | 30,75 | 31,03 | |
| ... | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| Середина интервала, мм | | 29,63 | 29,91 | 30,19 | 30,47 | 30,75 | 31,03 | 31,31 | |
| Опытная частота, m_i | | 3 | 5 | 5 | 11 | 3 | 2 | 3 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,156 | 0,156 | 0,344 | 0,094 | 0,063 | 0,094 | |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,054 | 0,126 | 0,21 | 0,24 | 0,186 | 0,102 | 0,042 |
| | | ЗРВ | 0,053 | 0,145 | 0,222 | 0,211 | 0,174 | 0,103 | 0,05 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | 0,094 | 0,25 | 0,406 | 0,75 | 0,844 | 0,907 | 1,001 | |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,08 | 0,21 | 0,41 | 0,65 | 0,84 | 0,94 | 0,99 |
| | | ЗРВ | 0,03 | 0,12 | 0,29 | 0,63 | 0,89 | 0,97 | 1 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | НЗР | 2 | 4 | 6 | 8 | 6 | 3 | 2 | |
| | ЗРВ | 1 | 3 | 5 | 11 | 8 | 3 | 1 | |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{n_y} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (3-2)^2/2 + (5-4)^2/4 + (5-6)^2/6 + (11-8)^2/8 + (3-6)^2/6 + (2-3)^2/3 + (3-2)^2/2 = 4,38.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (3-1)^2/1 + (5-3)^2/3 + (5-5)^2/5 + (11-11)^2/11 + (3-8)^2/8 + (2-3)^2/3 + (3-1)^2/1 = 12,79.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 35,7%; для ЗРВ – Р% = 1,2%.

Следовательно, теоретический закон ЗНР подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 30,29 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 30,122 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 30,29 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 30,458 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 29,7 до 30,9 мм.

Определение статистической ошибки

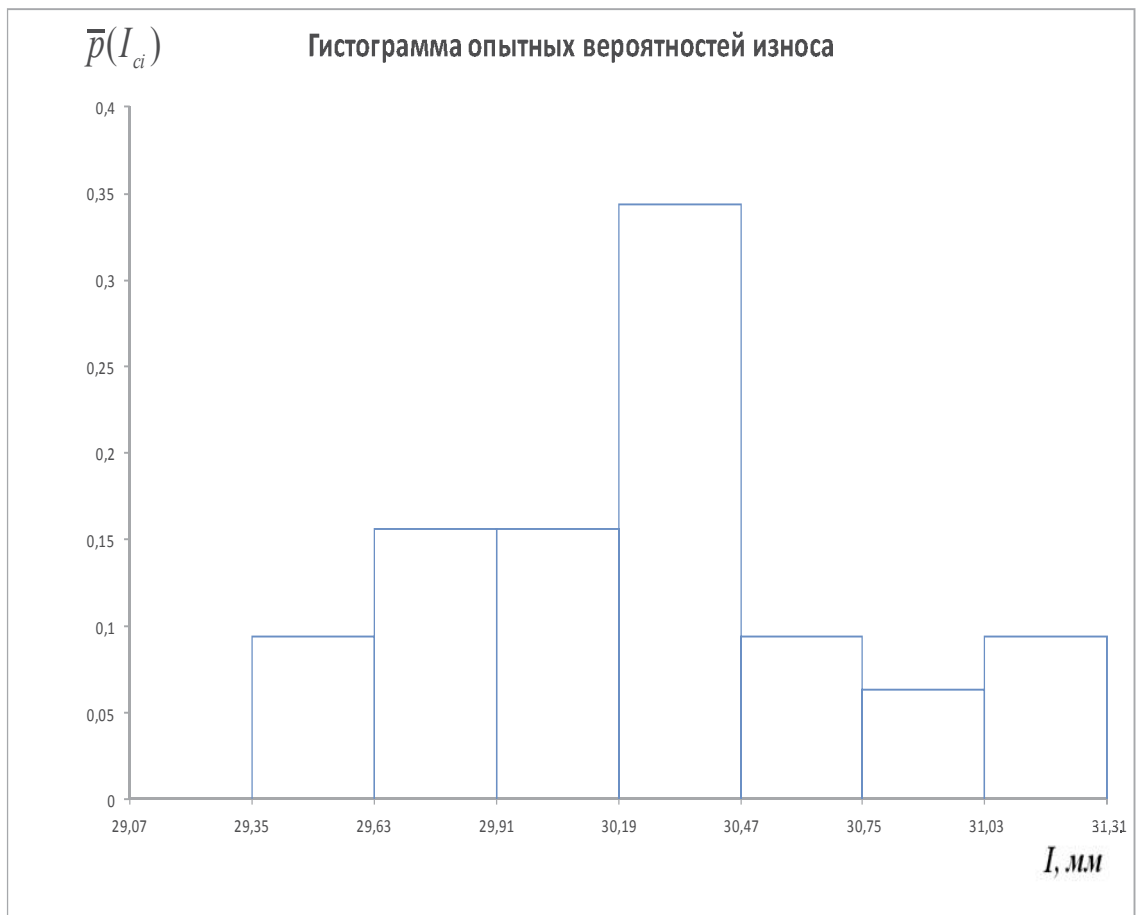
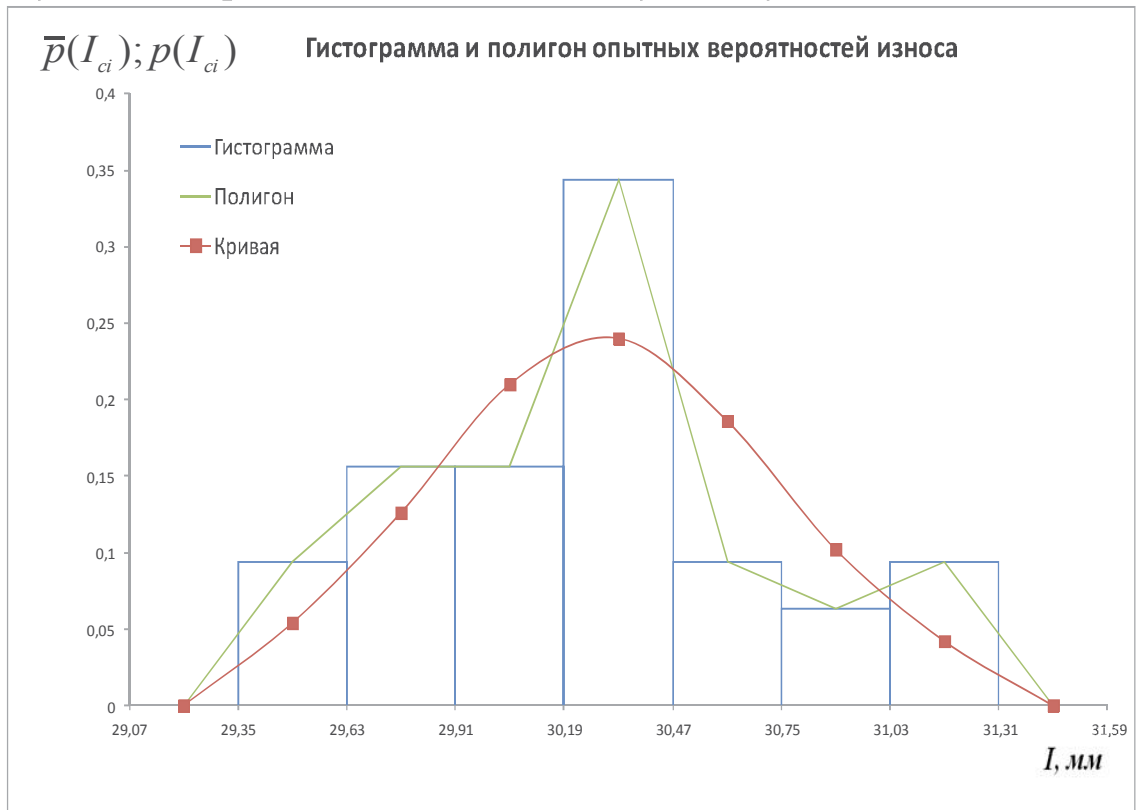
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{cm}} \cdot 100\%.$$

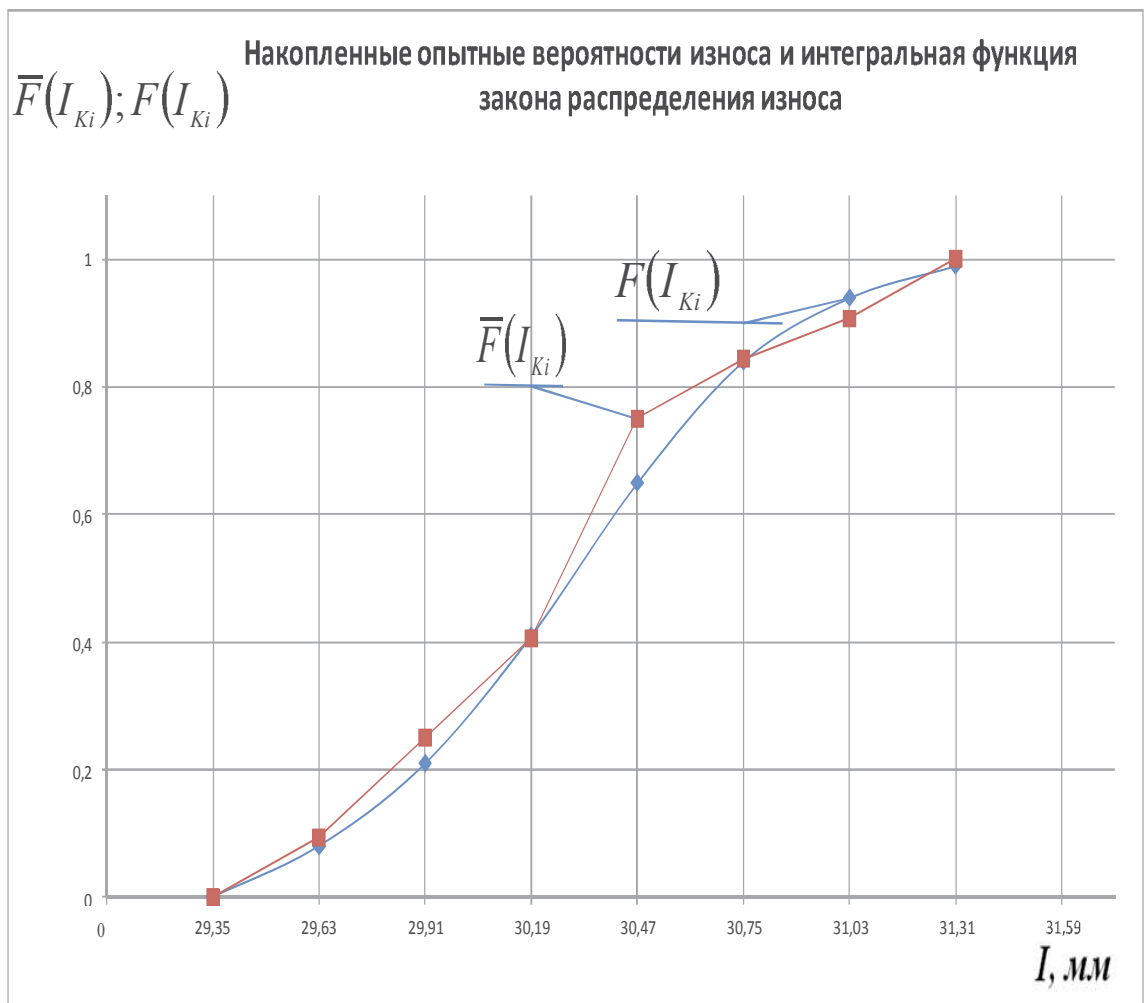
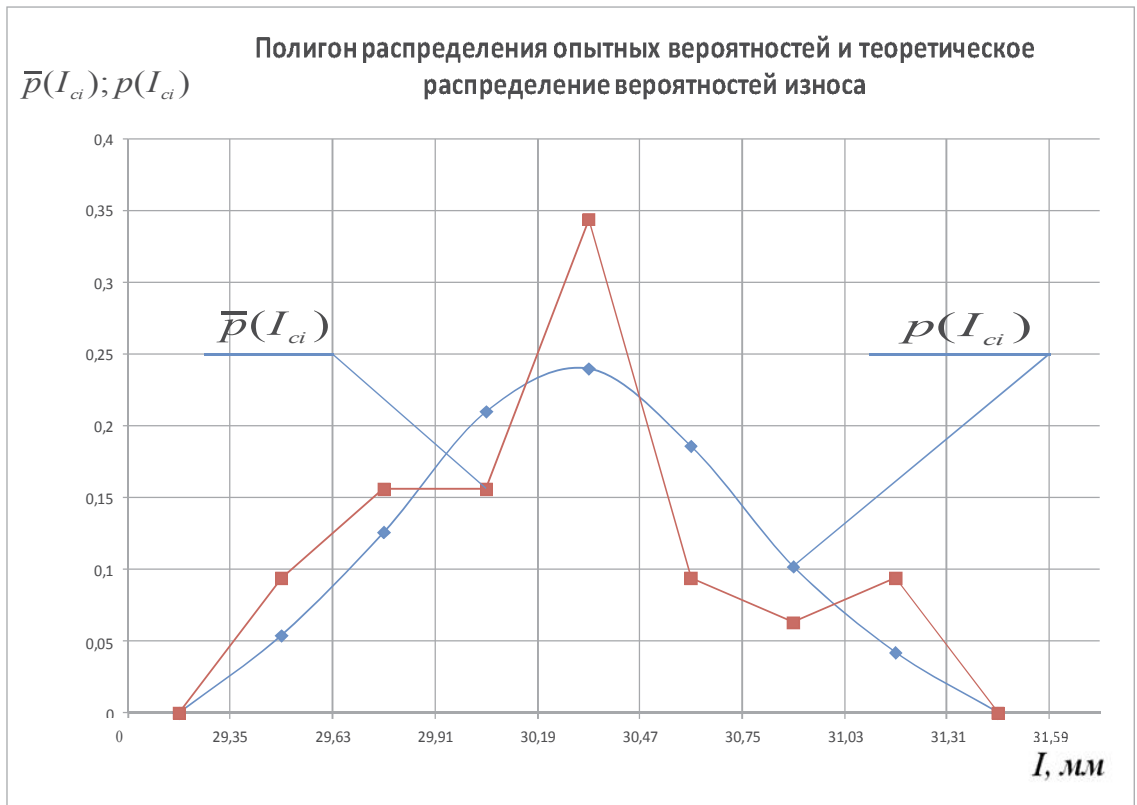
$$\varepsilon_\alpha = (30,122 - 30,29) / (30,29 - 29,35) \cdot 100 = 17,9 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

*Результаты определения распределения величин износа носка лап
культиватора восстановленных по существующей технологии*





Определение закономерности распределения величин износа носка серийных лап культиватора

Таблица 3.29 - Сводная ведомость величин износа радиуса носка серийных лап культиватора

| № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм | № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 29,37 | 9 | 30,59 | 17 | 31,26 | 25 | 32,03 |
| 2 | 29,48 | 10 | 30,75 | 18 | 31,41 | 26 | 32,08 |
| 3 | 29,8 | 11 | 30,85 | 19 | 31,56 | 27 | 32,09 |
| 4 | 30,1 | 12 | 30,85 | 20 | 31,61 | 28 | 32,17 |
| 5 | 30,24 | 13 | 30,87 | 21 | 31,68 | 29 | 32,24 |
| 6 | 30,44 | 14 | 30,95 | 22 | 31,69 | 30 | 32,28 |
| 7 | 30,54 | 15 | 31,18 | 23 | 31,71 | 31 | 32,42 |
| 8 | 30,59 | 16 | 31,24 | 24 | 31,94 | 32 | 32,44 |

Таблица 3.30 - Результаты выравнивания опытных данных теоретическими законами распределения

| | | | | | | | | | |
|--------------------------------------|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Граница интервала, мм | | 29,12 | 29,63 | 30,14 | 30,65 | 31,16 | 31,67 | 32,18 | |
| | | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | |
| | | 29,63 | 30,14 | 30,65 | 31,16 | 31,67 | 32,18 | 32,69 | |
| Середина интервала, мм | | 29,375 | 29,885 | 30,395 | 30,905 | 31,415 | 31,925 | 32,435 | |
| Опытная частота, mi | | 2 | 2 | 5 | 5 | 6 | 8 | 4 | |
| Дифференциальный закон распределения | Опытная вероятность $\bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,063 | 0,156 | 0,156 | 0,188 | 0,25 | 0,125 |
| | Теоретическая вероятность $p(I_{ci})$ | НЗР | 0,023 | 0,07 | 0,146 | 0,216 | 0,227 | 0,169 | 0,093 |
| | | ЗРВ | 0,021 | 0,081 | 0,152 | 0,207 | 0,219 | 0,18 | 0,113 |
| Интегральный закон распределения | Накопленная опытная вероятность $\bar{F}(I) = \sum_1^i \bar{p}(I_{ci})$ | | 0,063 | 0,126 | 0,282 | 0,438 | 0,626 | 0,876 | 1,001 |
| | Функция распределения $F_i = F(I_{ki})$ | НЗР | 0,03 | 0,1 | 0,25 | 0,46 | 0,69 | 0,86 | 0,95 |
| | | ЗРВ | 0,02 | 0,04 | 0,15 | 0,37 | 0,63 | 0,85 | 0,96 |
| Теоретическая частота m_{Ti} | | НЗР | 1 | 2 | 5 | 7 | 7 | 5 | 3 |
| | | ЗРВ | 1 | 1 | 4 | 7 | 8 | 7 | 4 |

Для выбора теоретического закона распределения (ТЗР) следует определить критерий согласия Пирсона:

$$\chi^2 = \sum_i^{ny} \left(\frac{(m_{oni} - m_{Ti})^2}{m_{Ti}} \right).$$

Продолжение приложения 3

Определим χ^2 для закона нормального распределения (ЗНР)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (2-2)^2/2 + (5-5)^2/5 + (5-7)^2/7 + (6-7)^2/7 + (8-5)^2/5 + (4-3)^2/3 = 3,85.$$

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ)

$$\chi^2 = (2-1)^2/1 + (2-1)^2/1 + (5-4)^2/4 + (5-7)^2/7 + (6-8)^2/8 + (8-7)^2/7 + (4-4)^2/4 = 3,46.$$

Определяем процент совпадений (Р%) в соответствии с полученными χ^2 .

Для ЗНР – Р% = 42,7%; для ЗРВ – Р% = 48,4%.

Следовательно, теоретический закон ЗРВ подходит лучше для определения средней величины износа, характеристики рассеивания и других показателей.

Определив ТЗР, получаем дифференциальную и интегральную теоретические функции распределения величин износа.

Определение доверительных границ рассеивания значений величин износа

Доверительные границы рассеивания среднего значения износа определяются по формуле:

$$\bar{I}_\beta^H = \bar{I} - t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^B = \bar{I} + t_\beta \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

$$\bar{I}_\beta^H = 31,24 - 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 30,924 \text{ мм};$$

$$\bar{I}_\beta^B = 31,24 + 1,98 \cdot 2,04/\sqrt{32} = 31,556 \text{ мм}.$$

С вероятностью $\beta = 0,95$ можно утверждать, что истинное неизвестное нам среднее значение исследуемого показателя надежности находится в пределах от 29,8 до 31,7 мм.

Определение статистической ошибки

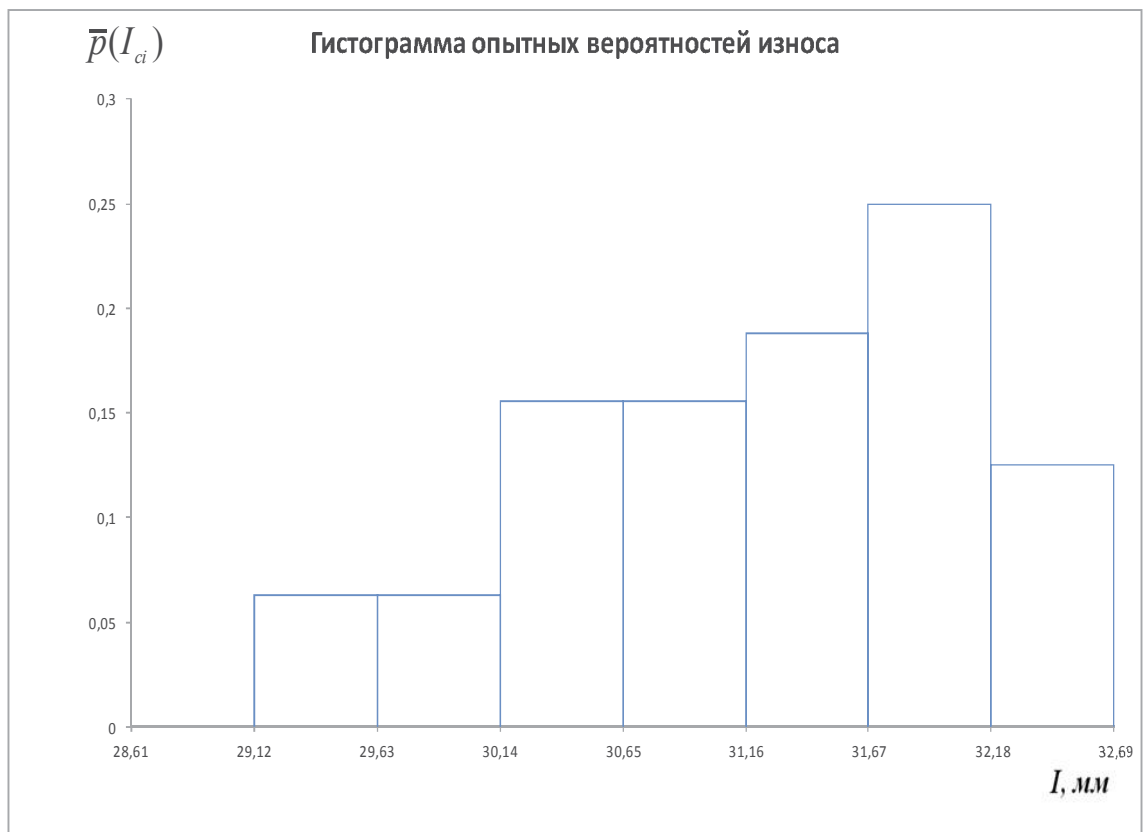
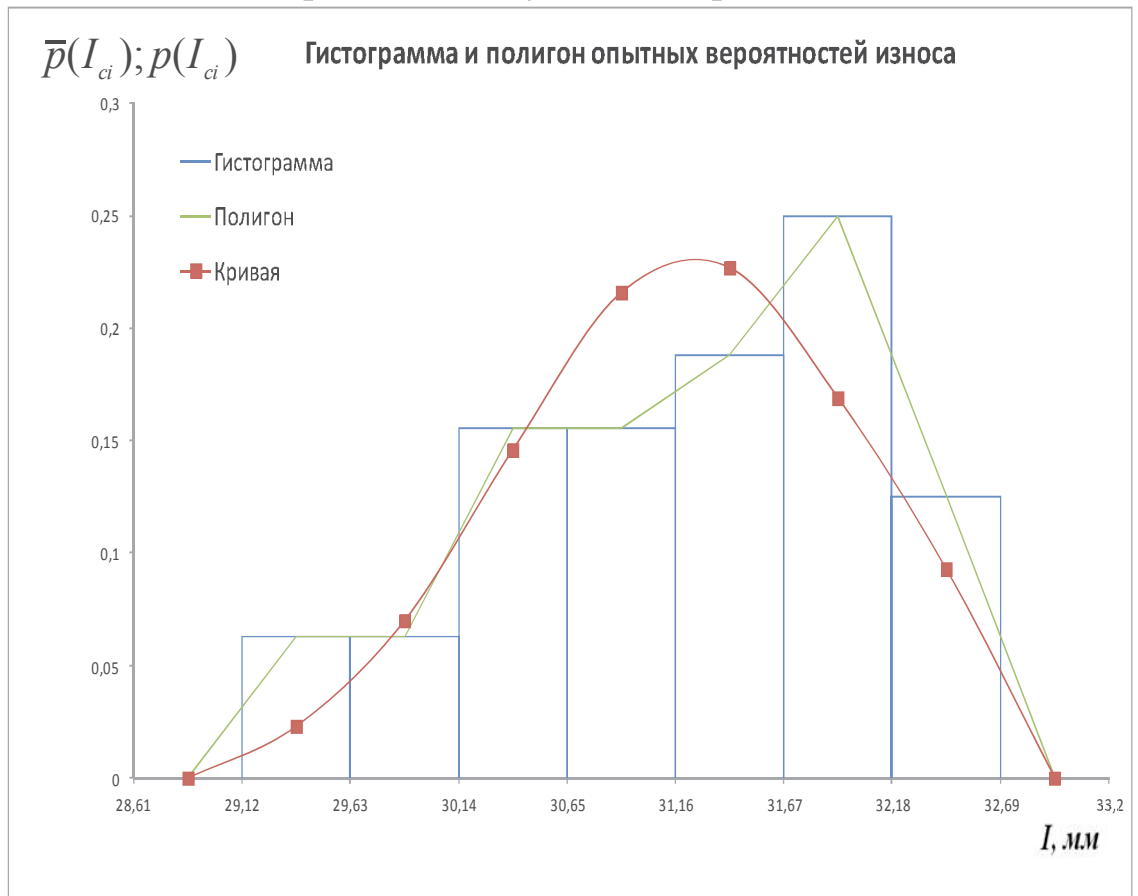
$$\varepsilon = \frac{I_{\beta_0} - \bar{I}}{\bar{I} - I_{cm}} \cdot 100\%.$$

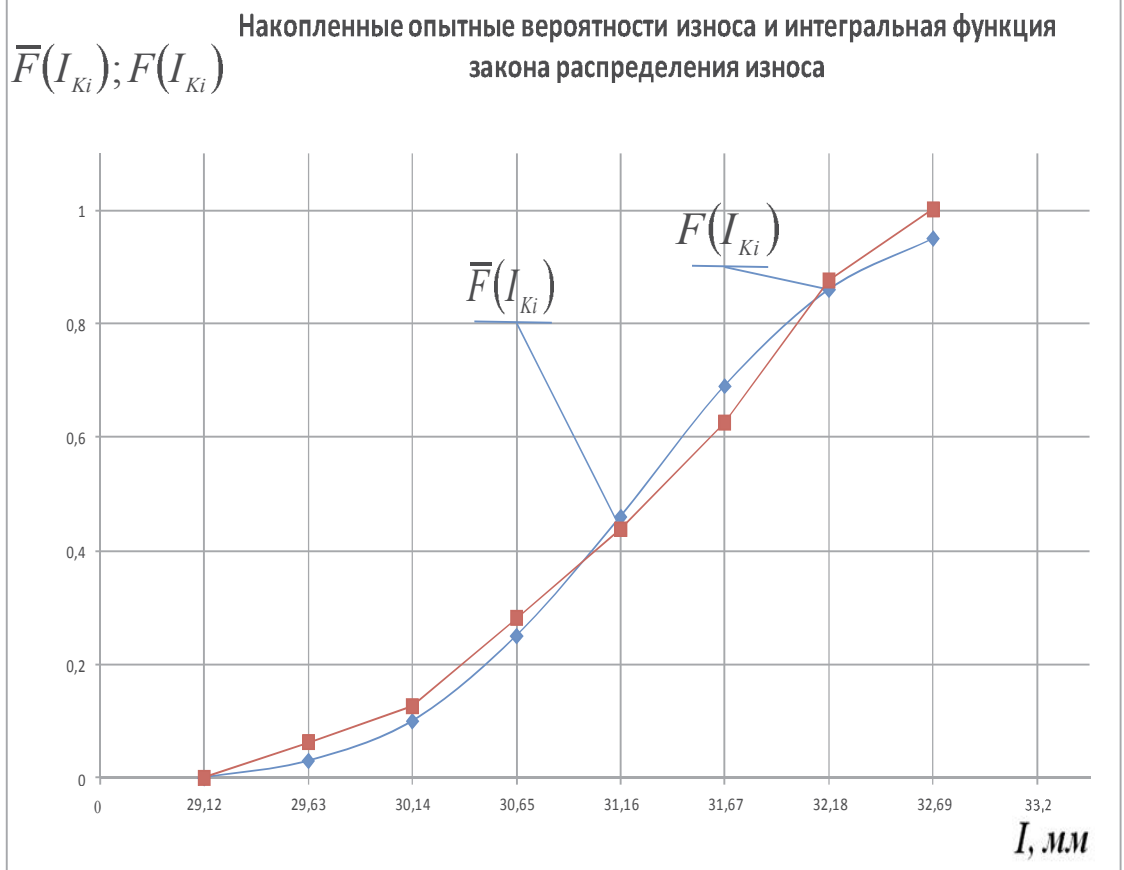
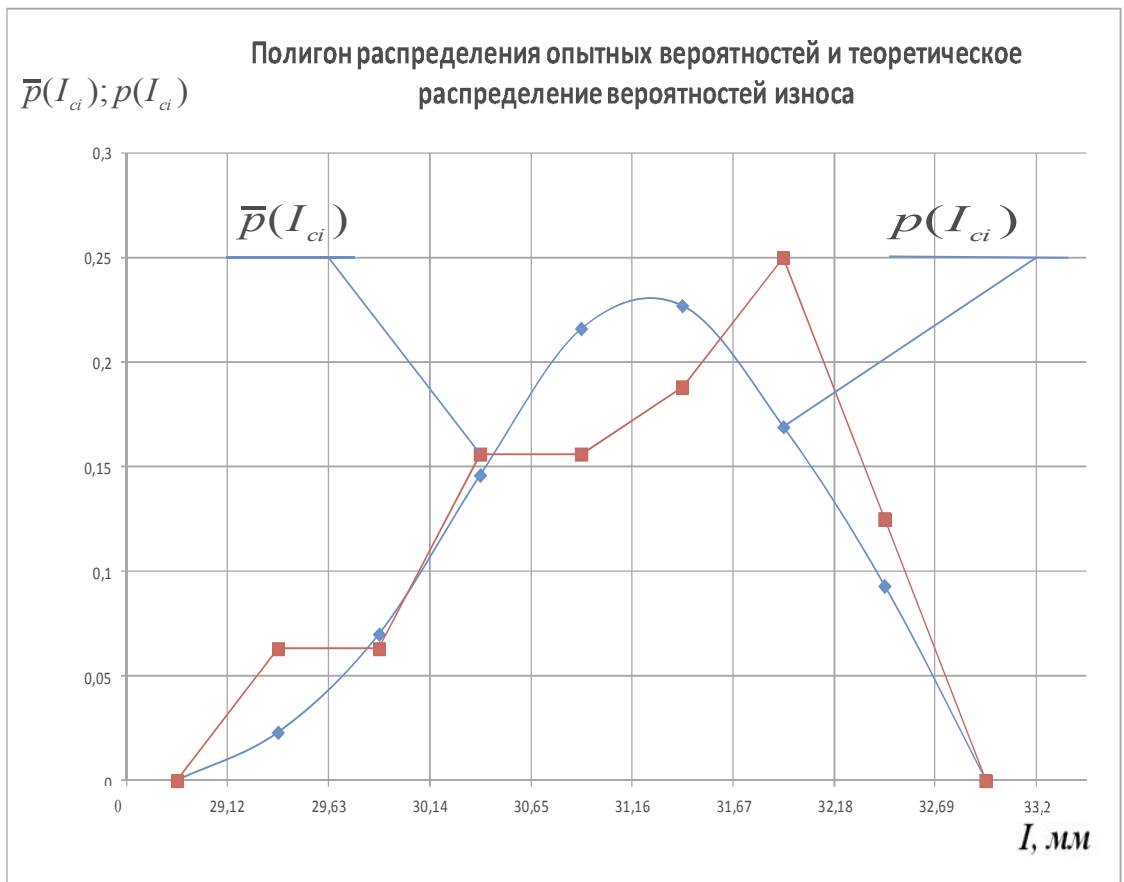
$$\varepsilon_\alpha = (30,924 - 31,24) / (31,24 - 29,12) \cdot 100 = 14,9 \%.$$

Точность расчётов вполне достаточна, так как допустимо $\varepsilon_\alpha \leq 20\%$.

Продолжение приложения 3

Результаты определения распределения величин износа носка серийных лоп культиватора





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2241586

**СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Патентообладатель(ли): **Буйлов Валерий Николаевич (RU),
Люляков Иван Викторович (RU)**

Автор(ы): **Буйлов Валерий Николаевич (RU),
Люляков Иван Викторович (RU)**

Заявка № 2003127933

Приоритет изобретения **16 сентября 2003 г.**Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **10 декабря 2004 г.**Срок действия патента истекает **16 сентября 2023 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам



Б.И. Симонов



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU (11) 2241586 (13) C1
(51) 7 B 23 P 6/00

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
к патенту Российской Федерации

1

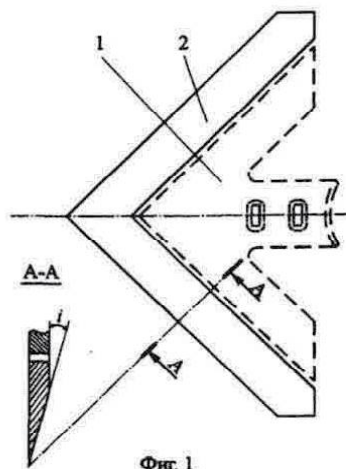
(21) 2003127933/02 (22) 16.09.2003
(24) 16.09.2003
(45) 10.12.2004 Бюл. № 34
(72) Буйлов В.Н. (RU), Люляков И.В. (RU)
(73) Буйлов Валерий Николаевич (RU), Люляков Иван Викторович (RU)
(56) ТЕХНИКА В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ, 1986, №8, с.51 и 52. RU 96105099 A, 27.02.1998. RU 2192949 C2, 20.11.2002. DE 2704605 A, 19.01.1978. SU 1463417 A1, 07.03.1989.
Адрес для переписки: 410600, г.Саратов, АНО УНПЦ "Волгоагротехника", ул.Советская, 60, Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, патентная группа
(54) СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

2

(57) Изобретение относится к способам восстановления и упрочнения изношенных деталей с применением сварки и может быть использовано главным образом при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин, преимущественно лап культиваторов. В способе восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин перед сваркой угловую пластину затачивают, изношенную часть детали удаляют шлифовальным отрезным кругом, угловую пластину изготавливают из низкоуглеродистой стали, а перед свариванием с восстанавливаемой деталью проводят упрочнение угловой пластины электролизным борированием. Обеспечивается повышение технических характеристик детали, а именно, повышение ее износостойкости. 2 ил.

RU 2241586 C1

RU 2241586 C1



3

2241586

4

Предлагаемое изобретение относится к способам восстановления и упрочнения изношенных деталей с применением сварки и может быть использовано главным образом при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин, преимущественно лап культиваторов.

Известен способ восстановления дисковых рабочих органов почвообрабатывающих машин (а.с. 1301605 МКИ В 23 К 9/04, В 22 Р 6/00), включающий удаление изношенной рабочей части детали проточкой, изготовление новой рабочей части в виде кольцевого элемента из стали марки 65Г с разрезом, внутренний диаметр которого больше наружного диаметра проточенного диска. Готовый кольцевой элемент приваривают к диску и производят заточку рабочей части восстановленной детали на заданной ширине.

Недостатками этого способа является использование для восстановления элементов из дорогостоящей марганцовистой стали марки 65Г, высокая трудоемкость и нетехнологичность процесса. Применение этого способа не обеспечивает повышения износостойкости рабочего органа.

Наиболее близким к предлагаемому способу является способ, по которому у выбракованных лап изношенную часть лезвия срезают газопламенным резаком. Вместо отрезанной части лезвия изготавливают стальную профильную пластину из стали марки 65Г. Ее предварительно прихватывают к лапе в трех точках ручной электродуговой сваркой. Затем пластину приваривают сплошным швом на установке для автоматической электродуговой сварки под слоем флюса. Лапы с приваренными пластинами подвергают газопламенному напылению износостойкими металлическими порошками. Порошок ПГ-12Н-3 напыляют на пластину с нижней стороны, что обеспечивает получение самозатачивающего лезвия (Журнал «Техника в сельском хозяйстве» 1986, № 8, с.51-52 - прототип).

Однако процесс удаления изношенной части лезвия газопламенной резкой влечет за собой выгорание легирующих элементов и углерода, вызывая тем самым изменение структуры стали, изменение формы и деформацию детали, усложняется операция сварки угловой пластины с лапой, требуется последующая механическая и термическая обработка, что увеличивает трудоемкость и стоимость восстановления. Так же одним из недостатков является то, что не дости-

гается повышение износостойкости восстанавливаемой детали.

Технической задачей предполагаемого изобретения является повышение технических характеристик детали, а именно повышение ее износостойкости за счет улучшения структуры стали восстанавливаемой детали.

Поставленная задача достигается в способе восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин, включающем удаление изношенной рабочей части, изготовление новой рабочей части в виде угловой пластины и сварку с восстанавливаемой деталью, где согласно изобретению перед сваркой угловую пластину зачищают, изношенную часть детали удаляют шлифовальным отрезным кругом, угловую пластину изготавливают из низкоуглеродистой стали, а перед свариванием с восстанавливаемой деталью проводят упрочнение угловой пластины электролизным борированием.

В отличие от прототипа в предлагаемом способе удаление изношенной рабочей части детали осуществляется шлифовальным отрезным кругом. При этом не допускается перегрев, деформация детали, не происходит изменение структуры стали, что в последующем обеспечивает высокое качество сварного шва при соединении угловой пластины с деталью.

Наличие в предлагаемом способе «новизны» доказывает тот, что существующие способы ремонта являются трудоемкими и нетехнологичными и предназначены лишь для восстановления первоначальных технических и служебных характеристик. Предлагаемый способ восстановления технологичен, благодаря применению недефицитной, дешевой, с хорошей свариваемостью низкоуглеродистой стали, а благодаря операции электролизного борирования позволяет повысить служебные характеристики (технические) за счет упрочнения рабочей поверхности, увеличения ее износостойкости, ресурса и долговечности.

На фиг.1 представлена угловая пластина, изогнутая по форме детали подготовленной лапы; на фиг.2 - угловая пластина после сварки с деталью.

Способ осуществляется следующим образом. У выбракованных лап изношенную часть лезвия срезают шлифовальным отрезным кругом при помощи угловой шлифовальной машины. Для восстановления лап культиваторов используют угловые пластины 2, изготовленные из низкоуглеродистой стали. После предварительной изоляции приварочной кромки пласти-

5

2241586

6

ну 2 подвергают электролизному борированию. После химико-термического упрочнения угловую пластину приваривают к восстанавливаемой лапе 1 ручной электродуговой сваркой.

Пример. Изношенную часть лезвия лапы культиватора КП-4 удаляют шлифовальным отрезным кругом А24SBF по ГОСТ 23182-78 при помощи угловой шлифовальной машины МШУ-2-230. Угловую пластину изготавливают путем изгиба под углом 65° полосовой стали марки Ст 3 шириной 20 мм и толщиной 5 мм при помощи кривошипно-механического пресса КД 2128 К. Режущую кромку пластины затачивают под углом $\alpha=12^\circ$ на универсально-заточном станке 3Д642Е. После предварительной изоляции приварочной кромки путем покрытия гальванической медью угловую пластину подвергают электролизному борированию. В качестве боросодержащего расплава используют шлак, содержащий следующие компоненты, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ -56; B_2O_3 -16; K_2CO_3 -16; Na_2SiO_3 -7; K_2ZrF_6 -5.

Режимы борирования:

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Температура расплава, °С | 850-950 |
| Плотность тока, А/см ² | 0,2-0,3 |
| Время выдержки, ч | 2-2,5 |
| Глубина слоя, мм | 0,3-0,35 |
| Твердость HRC | 58-62 |

После завершения борирования поверхность пластины покрыта слоем застывшего

шлака, для его отделения угловую пластину опускают в ванну с водой. Упрочненную заготовку приваривают к восстанавливаемой детали сплошным швом ручной электродуговой сваркой электродами марки Э-42А Ø 4 мм при силе сварочного тока 180 А.

Эксплуатационные испытания восстановленных и одновременно упрочненных лап культиваторов показали, что их износостойкость возросла в 2-3 раза по сравнению с серийными деталями, подвергающимся закалке и отпуску.

Таким образом, применение способа восстановления позволяет не только восстановить форму и размеры изношенной детали, но и упрочнить рабочую поверхность за счет введения в технологический процесс операции электролизного борирования, а так же значительно снизить себестоимость ремонта детали, благодаря использованию более дешевой, недефицитной, не склонной к трещинообразованию и с хорошей свариваемостью низкоуглеродистой стали. Кроме того, удаление изношенной части лапы шлифовальным отрезным кругом позволяет создать более благоприятные условия при сварке угловой пластины с восстанавливаемой деталью, что повышает технологичность процесса восстановления.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

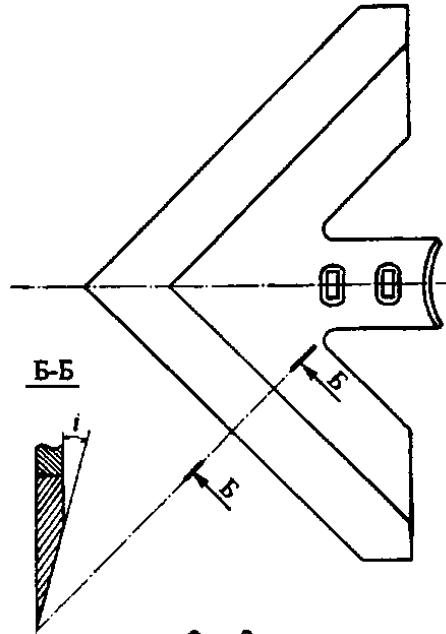
Способ восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин, включающий удаление изношенной рабочей части, изготовление новой рабочей части в виде угловой пластины и сварку с восстанавливаемой деталью, **отличающийся** тем, что перед сваркой угловую

пластину затачивают, изношенную часть детали удаляют шлифовальным отрезным кругом, угловую пластину изготавливают из низкоуглеродистой стали, а перед свариванием с восстанавливаемой деталью проводят упрочнение угловой пластины электролизным борированием.

7

2241586

8



Фиг. 2

Продолжение приложения И





РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) RU (11) 2164963 (13) C1
(51) 7 C 23 C 8/02, 8/42

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ
к патенту Российской Федерации

1
(21) 2000109616/02 (22) 14.04.2000
(24) 14.04.2000
(43) 10.04.2001, бюл. № 10
(46) 10.04.2001 Бюл. № 10
(72) Буйлов В.Н., Богатырев С.А.
(71) (73) Буйлов Валерий Николаевич, Богатырев Сергей Аркадьевич
(56) ШАРВИВКЕР С.Ю. и др. Борирование аустенитных нержавеющей сталей с предварительным железнением. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Машиностроение, 1974, № 7, с.59-61. SU 1206335 А, 23.01.1986. JP 01219153 А, 01.09.1989. GB 1378478, 20.06.1972. EP 0132602 А, 13.02.1985.

2
Адрес для переписки: 410600, г.Саратов, ул. Советская 60, ИМЭСХ, УНПЦ, патентная группа
(54) СПОСОБ БОРИРОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ
(57) Способ борирования деталей преимущественно при их восстановлении включает наплавку изношенной поверхности и последующее электролизное борирование в расплаве, содержащем, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 52-58; V_2O_5 - 14-18; K_2Co_3 - 15-17; Na_2SiO_3 - 5-7; K_2ZrF_6 - 4-5. Способ позволяет повысить уровень качества поверхностного слоя.

RU 2164963 C1

RU 2164963 C1

3

2164963

4

Изобретение относится к химико-термической обработке стальных изделий и может быть использовано для упрочнения деталей, восстановленных наплавкой.

Известен способ борирования деталей, включающий предварительную подготовку поверхности путем отжига в вакууме и последующее диффузионное борирование (авт. св. 823456, МКИ С 23 С 9/10, опубл. 23.04.81, бюл. N 15).

Однако применение этого способа не обеспечивает увеличения поверхностного слоя, достаточного для компенсации износа даже при восстановлении прецизионных деталей.

Известен также скоростной метод борирования стальных деталей в насыщенном расплаве, содержащем хлористый калий, буру, бор и хлористый натрий, обладающем низкой разъедающей способностью (авт. св. 996515, МКИ С 23 С 9/10, опубл. 15.02.83, бюл. N 6). Однако присутствие в расплаве значительного количества хлористых соединений делает его токсичным, что требует введения в помещение дополнительных устройств - пылеуловителей.

Существует метод химико-термической обработки, при котором перед сульфоборированием на изношенную поверхность наносят суспензию из металлического порошка и жидкого стекла (авт. св. 1721103, МКИ С 21 D 1/78, С 23 С 8/70, опубл. 23.03.92, бюл. N 11). Данный способ имеет ограниченное применение, так как может быть использован только для восстановления и упрочнения прецизионных деталей, имеющих незначительный износ, преимущественно плунжеров топливных насосов.

Наиболее близким к предлагаемому способу является способ, по которому с целью повышения толщины и прочности боридного слоя поверхность детали перед борированием подвергают предварительной подготовке, выражающейся в диффузионном железнении (Ж-л "Металловедение и термическая обработка металлов", М., 1974, N 7, с. 59-61 - прототип).

Однако процесс предварительного железнения из-за высокой длительности (до 15 ч) малопроизводителен, а детали, подготовленные этим способом, обладают низкой износостойкостью.

Технической задачей изобретения является расширение технологических возможностей и повышение качества борирования.

Задача достигается тем, что перед электролизным борированием изношенную поверхность восстанавливаемой детали под-

вергают наплавке, а в качестве боросодержащего расплава используют шлак, содержащий следующие компоненты, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 52-58; B_2O_3 - 14-18; K_2CO_3 - 15-17; Na_2SiO_3 - 5-7; K_2ZrF_6 - 4-5.

Наличие в предлагаемом способе "новизны" доказывается тем, что существующие способы борирования предназначены лишь для упрочнения поверхностного слоя деталей при их изготовлении, а предварительная подготовка поверхности перед химико-термической обработкой проводится с целью увеличения глубины боридного слоя.

Предлагаемый способ борирования в сочетании с наплавкой позволяет не только упрочнить наплавленный слой, но и создать припуски на обработку резанием, а также компенсировать износ деталей при их восстановлении.

Оригинальность предлагаемого способа заключается в том, что боросодержащий расплав дополнительно содержит жидкое натриевое стекло, обеспечивающее устойчивую когезию, а также фторцирконат калия, уменьшающий вязкость расплава и адгезию шлаковой пленки, что улучшает качество восстановленной поверхности. Наличие борного ангидрида способствует некоторому увеличению скорости проникновения бора на заданную глубину.

Способ осуществляется следующим образом.

На изношенную рабочую поверхность восстанавливаемой детали, например, диска или турбобура ЗТСШ, изготовленного из стали 25Х1МФ ГОСТ20072-74, наплавляют в среде углекислого газа слой металла толщиной до 2 мм. Наплавку осуществляют проволокой Нп-30ХГСА \varnothing 2 мм при напряжении дуги 18...22 В и силе сварочного тока 125...180 А. После наплавки поверхность шлифуют в номинальный размер и подвергают электролизному борированию в расплаве шлака, имеющего следующий химический состав, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 56; B_2O_3 - 16; K_2CO_3 - 16; Na_2SiO_3 - 7; K_2ZrF_6 - 6.

Режимы борирования:

| | |
|-----------------------------------|------------|
| Температура расплава, °С | 850 - 950 |
| Плотность тока, А/см ² | 0,2 - 0,3 |
| Время выдержки, ч | 2 - 2,5 |
| Глубина слоя, мм | 0,3 - 0,35 |
| Твердость HRC | 58 |

Эксплуатационные испытания восстановленных совмещенным с наплавкой борированием дисков турбобуров показали, что их износостойкость возросла в 2-3 раза по сравнению с серийными деталями, подвергавшимися традиционной цементации и

5

2164963

6

закалке с низким отпуском. Повышение износостойкости боридного слоя объясняется созданием под ним промежуточной твердой наплавленной "подкладки", исключающей продавливание и выкрашивание боридного слоя в процессе изнашивания.

Таким образом, использование изобретения позволяет достичь следующих результатов.

1. Способ борирования деталей благодаря введению в технологический процесс операции наплавки металла на борлируемую поверхность обеспечивает одновременное упрочнение и восстановление размеров изношенной поверхности, что делает его актуальным в ремонтном производстве.

2. Способ обеспечивает увеличение износостойкости рабочей поверхности за счет введения более твердого по сравнению с основным металлом промежуточного подслоя в виде наплавленного металла.

3. Введение операции борирования позволяет исключить из технологического процесса трудоемкую операцию поверхностной закалки, облегчает обработку резанием наплавленной поверхности детали, способствует созданию более равномерных припусков на финишную операцию.

4. Благодаря использованию в качестве борсодержащего расплава нового синтетического шлага стабилизируется поверхностная твердость, исключается обезуглероживание, обеспечивается экологическая безопасность, сохраняется наружный микрорельеф, уменьшается вероятность образования микротрещин, что в конечном итоге повышает качество борирования.

Реализация потенций предлагаемого изобретения позволяет проводить химико-термическую обработку и восстановление формы и размеров изношенных деталей с повышением исходного уровня качества поверхностного слоя.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Способ борирования деталей преимущественно при их восстановлении, включающий предварительную подготовку поверхности и последующее электролизное борирование, отличающийся тем, что изношенную поверхность перед борированием подвергают наплавке, а в качестве борсодержащего

расплава используют шлаг при следующем соотношении компонентов, мас. %:

| | |
|-----------------------------------|---------|
| $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ | 52 - 58 |
| V_2O_3 | 14 - 18 |
| K_2CO_3 | 15 - 17 |
| Na_2SiO_3 | 5 - 7 |
| K_2ZrF_6 | 4 - 5 |



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ
РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО ПО ПАТЕНТАМ
И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ
(РОСПАТЕНТ)

ПАТЕНТ

№ 2107601

на **ИЗОБРЕТЕНИЕ**
"Флюс для электродуговой сварки"

Патентообладатель (ли): Научно-производственный центр
"Волгоагротехника"

Автор (авторы): Деев Виктор Александрович, Петряков
Владимир Константинович, Богатырев Сергей Аркадьевич и Буйлов
Валерий Николаевич

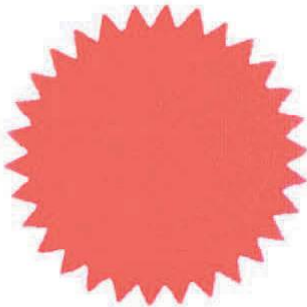
Приоритет изобретения 11 июня 1996г.

Дата поступления заявки в Роспатент 11 июня 1996г.

Заявка № 96111652

**Зарегистрирован в Государственном
реестре изобретений** 27 марта 1998г.

ГЕНЕРАЛЬНЫЙ ДИРЕКТОР



(19) RU (11) 2107601 (13) C1(51) 6 В 23 К 35/362

Комитет Российской Федерации
по патентам и товарным знакам

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
к патенту Российской Федерации

1

(21) 96111652/02 (22) 11.06.96

(46) 27.03.98 Бюл. № 9

(72) Деев В.А., Петряков В.К., Богатырев С.А., Буйлов В.Н.

(71) (73) Научно-производственный центр "Волгоагротехника"

(56) 1. SU, авторское свидетельство, 353804, кл. В 23 К 35/362, 1972.

(54) **ФЛЮС ДЛЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СВАРКИ**

(57) Изобретение относится к сварке, в частности к составам флюсов, используемых для механизированной сварки с повышенной скоростью, применяемых для

2

восстановления изношенных деталей, работающих в условиях абразивного износа, в том числе колчатых валов. Задачей изобретения является повышение сварочно-технологических свойств флюса и обеспечение более высоких качественных характеристик направленного металла. Флюс содержит следующие компоненты, мас%: SiO₂ 29 - 33; MnO 30 - 33; MgO 24 - 26; CaO 4 - 6; CaF₂ 4 - 6; Al₂O₃ - до 2,5, Fe₂O₃ - до 1,5, S - до 0,2 и P - до 0,2, при этом отношение содержания основных и кислых окислов составляет 1,30 - 1,34. 1 табл.

RU
2107601
C1

RU
2107601
C1

3

2107601

4

Изобретение относится к сварке, в частности к составам флюсов, используемых для механизированной сварки с повышенной скоростью, применяемых для восстановления изношенных деталей, работающих в условиях абразивного износа, в том числе коленчатых валов.

Известен флюс для электродуговой сварки (А.с. N 1230779, 15.05.86), содержащий следующие компоненты, мас. %: двуокись кремния 37,0-41,5; окись кальция 33,2-37,7; двуокись титана 12,8-18,0; закись железа 8,0-11,8. Данный флюс используется для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, не устраняя наличие в наплавленном металле шлаковых включений, при этом частично присутствуют поры, кристаллизационные трещины и наблюдается эффект "побитости" металла шва.

Известен сварочный флюс (А.с. 461818, 28.02.75), компоненты которого взяты в следующем соотношении, мас. %: феррованадий 2-3; жидкое стекло 2,5-3,5; графит 2-3; феррохром 2-3; высококремнистый марганцевый плавленый флюс - остальное, используемый на ремонтных предприятиях при восстановлении коленчатых валов. Данный флюс обладает высокой гигроскопичностью, имеет в своем составе дорогие и дефицитные ферросплавы и не устраняет в наплавленном металле кристаллизационные трещины.

Известен сварочный флюс (прототип), применяемый для наплавки конструкционных сталей и чугунов, в том числе коленчатых валов, содержащий следующие компоненты, мас. %: SiO₂ 28,5-33; MnO 28,5-35; CaO 29-31; CaF₂ 5-7; Al₂O₃ до 3,5; MgO до 2; Fe₂O₃ до 1,5; S и P не более 0,2 [1].

Данный флюс из-за значительного содержания MnO и CaO имеет повышенную основность, вызывающую нестабильность состава из-за снижения перехода кремния и повышения перехода марганца в металл наплавленного слоя.

Кроме того, известный сварочный флюс допускает непостоянство нахождения в своем составе, причем в незначительном количестве MgO, отсутствие которого способствует появлению наплывов на поверхности наплавленного слоя и ухудшает шлакоотделимость.

Применение известного флюса для наплавки стандартными проволоками, не содержащими легирующих элементов (ГОСТ 2246-79, ГОСТ 10543-82), обеспечивает получение в наплавленном слое закалочных структур при естественном охлаждении на воздухе. Наплавленные под указанными

материалами коленчатые валы из высокопрочного чугуна имели твердость поверхностного слоя 48-50 HRC и высокую относительную износостойкость, 115-136% от уровня новых.

Однако этот флюс имеет существенные недостатки: высокую гигроскопичность и наличие в наплавленном металле неметаллических включений, пор и кристаллизационных трещин. Флюс является "коротким", т. е. с узким температурным интервалом кристаллизации, при наплавке под ним наблюдается эффект "побитости" поверхности наплавленного слоя.

Технической задачей изобретения является повышение сварочно-технологических свойств флюса и обеспечение более высоких качественных характеристик наплавленного металла.

Задача достигается тем, что флюс для электродуговой сварки, содержащий SiO₂, MnO, CaO, CaF₂, MgO, Al₂O₃, Fe₂O₃, S и P, содержит компоненты при следующем соотношении, мас. % :

| | |
|--------------------------------|--------|
| SiO ₂ | 29-33 |
| MnO | 30-33 |
| MgO | 24-26 |
| CaO | 4-6 |
| CaF ₂ | 4-6 |
| Al ₂ O ₃ | до 2,5 |
| Fe ₂ O ₃ | до 1,5 |
| S | до 0,2 |
| P | до 0,2 |

при этом отношение содержания основных и кислых окислов составляет 1,30-1,34.

Наличие в предлагаемом веществе изобретения доказывается тем, что замещение оксида кальция оксидом магния, а также изменение соотношения между основными компонентами способствует образованию в наплавленном металле закалочных структур при естественном охлаждении на воздухе и благоприятных по форме и расположению оксисульфидных неметаллических включений, за счет чего повышается стойкость наплавленного слоя против образования кристаллизационных трещин.

Оригинальность предлагаемого флюса заключается в том, что оксид магния входит в состав флюса на постоянной основе, почти полностью замещая собой оксид кальция, что способствует устранению неравномерности наплывов на поверхности наплавленного слоя (эффект "побитости") и лучшей отделимости шлаковой корки.

Опытно-экспериментальным путем установлено, что для наплавки на высоких скоростях (70-80 м/ч) деталей диаметром до

5

2107601

6

100 мм в составе флюса содержание SiO_2 должно быть 28-35 мас.%, так как при большем или меньшем содержании происходит ухудшение формирующих свойств флюса.

Но такое содержание SiO_2 , хотя и улучшает технологические характеристики флюса, ведет к повышению содержания кремния в наплавленном слое и засорению металла нежелательными силикатными включениями. Устранение указанного противоречия решается с помощью подбора оптимального соотношения между SiO_2 и MnO , MgO , CaO , которые снижают термодинамическую активность SiO_2 .

Данное соотношение определяется основностью флюса, являющейся характеристикой, обеспечивающей качественное формирование наплавленного слоя. Основность также влияет на реакционную способность флюса в зоне плавления и позволяет дифференцированно изменять влияние отдельных компонентов и их соотношений на процесс изменения содержания кремния и марганца в наплавленном металле. Увеличение основности флюса способствует переходу марганца в наплавляемый металл и оказывает обратное воздействие на переход кремния. Содержание MnO должно обеспечивать протекание марганцевосстановительного процесса, при условии, что содержание марганца в наплавленном слое превышает содержание кремния в 3-4 раза. Исходя из этого, содержание MnO должно быть в пределах 29-33 мас.%, но при этом возрастает опасность образования кристаллизационных трещин, которая может быть устранена путем введения в состав флюса MgO и CaO . Процентное соотношение между MgO и CaO во флюсе обуславливается основностью флюса $B = 1,3-1,34$, что также обеспечивает оптимальное соотношение кремния и марганца в наплавленном металле и позволяет снизить критическую скорость закалки, получить эффект самозакаливания наплавленного металла при естественном охлаждении на воздухе.

Для определения численного значения основности использовалась формула

$$B = \frac{0,018\text{CaO} + 0,015\text{MgO} + 0,008(\text{MnO} + \text{FeO}) + 0,006\text{CaF}_2}{0,0175\text{SiO}_2 + 0,005(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)}$$

где CaO , MgO , MnO , FeO , CaF_2 - концентрация основных оксидов и фторида, мас.%;

SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 - концентрация кислых оксидов, мас.%;

Содержание основных оксидов должно быть, мас.%; MgO , 24-26; CaO - 4-6. Замена оксида кальция на оксид магния позволяет

улучшить сварочно-технологические свойства флюса при высоком качестве наплавленного металла.

Введение 4-6 мас.% CaF_2 обеспечивает достаточную стойкость наплавленного слоя против образования пор при сварке без ухудшения технологических и металлургических характеристик флюса.

Окислы Al_2O_3 - до 2,5 мас.%, Fe_2O_3 - до 1,5 мас.% являются примесями в составе флюса и выбранные их количественные пределы не снижают технологических и металлургических показателей флюса.

Ограниченное содержание серы и фосфора до 0,2 мас.% в составе флюса позволяет свести к минимуму вероятность попадания их в наплавленный слой при наплавке, и тем самым уменьшается опасность возникновения кристаллизационных трещин в наплавленном слое.

Пример. Для экспериментальной проверки заявляемого состава были приготовлены пять смесей ингредиентов, один из которых показал оптимальные результаты (см. таблицу).

При выплавке опытной партии флюса применяли следующие сырьевые материалы: марганцевая руда, песок кварцевый по ГОСТ 2238-76, магнезит каустический по ГОСТ 1216-71, плавиковый шпат.

Указанные сырьевые материалы переплавляли в дуговой печи до получения гомогенного расплава, который затем гранулировали путем слива в подогретую до 50°C воду. При этом образовывались однородные частицы флюса стекловидного строения, темного цвета, с размером зерна 0,25-1,60 мм.

Готовый флюс имеет следующий химический состав, мас.%; SiO_2 , 31,2; MnO , 31,5; MgO , 24,3; CaO , 4,8; CaF_2 , 4,56; Al_2O_3 , 2,3; Fe_2O_3 , 1,3; S, 0,02; P, 0,02.

Результаты испытания предлагаемого флюса в сравнении с прототипом, аналогами и предлагаемым составом с другим соотношением ингредиентов представлены в таблице.

Приведенные в таблице данные подтверждают актом испытаний заявляемого флюса.

Таким образом, использование изобретения позволяет достичь следующих результатов.

1. Включение в состав предлагаемого флюса на постоянной основе дополнительного количества оксида магния, частично замещающего оксид кальция, при условии соблюдения отношения содержания основных и кислых окислов на уровне 1,3- 1,34,

Продолжение приложения И

7
2107601

обеспечивает более качественное формирование наплавленного слоя, например, при восстановлении чугуновых коленчатых валов.

2. Незначительное уменьшение процентного содержания в предлагаемом флюсе примесей в виде кислых оксидов алюминия и железа, а также серы и фосфора ведет к уменьшению количества кристаллизационных трещин в наплавленном металле.

3. Применение предлагаемого флюса, благодаря увеличению активности перехода составляющих его элементов в наплавленный слой, позволяет вести наплавку цилиндрических поверхностей на более высоких скоро-

8

стных режимах, что сокращает время наплавки в 1,5-2 раза и свидетельствует о повышении его сварочно-технологических возможностей по сравнению с известными флюсами аналогичного назначения.

Реализация потенциалов изобретения позволяет восстанавливать механизированной наплавкой под слоем нового флюса с повышенной скоростью коленчатые валы, изготовленные из высокопрочного чугуна, традиционно обладающего низкой свариваемостью, с одновременным повышением показателей качества наплавленного слоя.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Флюс для электродуговой сварки, содержащий SiO_2 , MnO , CaO , CaF_2 , MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , S и P, отличающийся тем, что флюс содержит компоненты при следующем соотношении, мас. %:

| | |
|----------------|---------|
| SiO_2 | 29 - 33 |
| MnO | 30 - 33 |
| MgO | 24 - 26 |
| CaO | 4 - 6 |

| | |
|-------------------------|--------|
| CaF_2 | 4 - 6 |
| Al_2O_3 | До 2,5 |
| Fe_2O_3 | До 1,5 |
| S | До 0,2 |
| P | До 0,2 |

при этом отношение содержания основных и кислых окислов составляет 1,30 - 1,34.

Таблица

Результаты сравнительных испытаний сварочно-технологических свойств флюсов

| № п/п | Состав флюса | Соотношение компонентов, вес. % | Наличие пор | Наличие шлаковых включений | Наличие "побитости" металла наплавленного слоя | Наличие кристаллизационных трещин | Отделимость шлаковой корки | Гигроскопичность флюса | Максимальная скорость наплавки | Отношение содержания основных и кислотных окислов |
|-------|----------------------|--|-------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------------|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| 1 | Известный (аналог) | SiO ₂ - 38,2; TiO ₂ - 16,4; CaO - 34,4; CaO:SiO ₂ - 0,901 | 1 | 1 | 0 | 1 | хорошая | высокая | 25...35 | 0,94...0,97 |
| 2 | Известный (аналог) | Феррованадий - 2; жидкое стекло - 3; феррохром - 2,5; высококремнистый марганцевый плавленый флюс АН-348А-89,5 | 1 | 1 | 1 | 2 | удовлетворительная | высокая | 20...30 | 0,67...0,70 |
| 3 | Известный (прототип) | SiO ₂ - 29,0; MnO - 31,5; CaO - 30,0; CaF ₂ - 6,0; Al ₂ O ₃ - 1,5; MgO - 1,0; Fe ₂ O ₃ - 0,6; S - 0,2; P - 0,2 | 1 | 0 | 2 | 1 | удовлетворительная | высокая | 45...60 | 1,66...1,70 |

9

2107601

10

Продолжение таблицы

11

2107601

12

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|---|--------------------------|---|---|---|---|---|---------|--------|---------|-------------|
| 4 | Опытно-экспериментальные | SiO ₂ - 33,0; MnO - 29,0; MgO - 25,8; CaO - 4,2; Al ₂ O ₃ - 1,3; Fe ₂ O ₃ - 0,45; S - 0,2; P - 0,2 | 1 | 0 | 0 | 1 | хорошая | низкая | 65...75 | 1,20...1,23 |
| 5 | Предлагаемый | SiO ₂ - 31,2; MnO - 31,5; MgO - 24,3; CaO - 4,8; CaF ₂ - 4,56; Al ₂ O ₃ - 2,3; Fe ₂ O ₃ - 1,3; S - 0,2; P - 0,2 | 1 | 0 | 0 | 1 | хорошая | низкая | 70...80 | 1,30...1,34 |

Условная обозначение: 0 - отсутствуют; 1 - незначительное количество; 2 - присутствуют.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2325256

**СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Патентообладатель(ли): **ФГОУ ВПО "Саратовский
государственный аграрный университет им.
Н.И.Вавилова" (RU)**

Автор(ы): **см. на обороте**

Заявка № **2006109888**

Приоритет изобретения **27 марта 2006 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации **27 мая 2008 г.**

Срок действия патента истекает **27 марта 2026 г.**

*Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной
собственности, патентам и товарным знакам*



Б.Л. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 325 256** ⁽¹³⁾ **C2**
(51) МПК
B23P 6/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2006109888/02, 27.03.2006

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.03.2006

(43) Дата публикации заявки: 10.10.2007

(45) Опубликовано: 27.05.2008 Бюл. № 15

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2241586 C1, 10.12.2004. RU 2259267
C2, 27.08.2005. RU 2255452 C2, 10.07.2005. SU
1722668 A1, 30.03.1992. RU 2221684 C2,
20.01.2004. DE 2704605 B1, 19.01.1978. EP
0846780 A2, 10.06.1998.

Адрес для переписки:
410012, г.Саратов, пл. Театральная, 1, ФГОУ
ВПО "СГАУ им. Н.И. Вавилова", патентный отдел

(72) Автор(ы):

Буйлов Валерий Николаевич (RU),
Люляков Иван Викторович (RU),
Волосевич Николай Петрович (RU),
Бойков Василий Михайлович (RU),
Пронин Сергей Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

ФГОУ ВПО "Саратовский государственный
аграрный университет им. Н.И. Вавилова" (RU)

(54) СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН

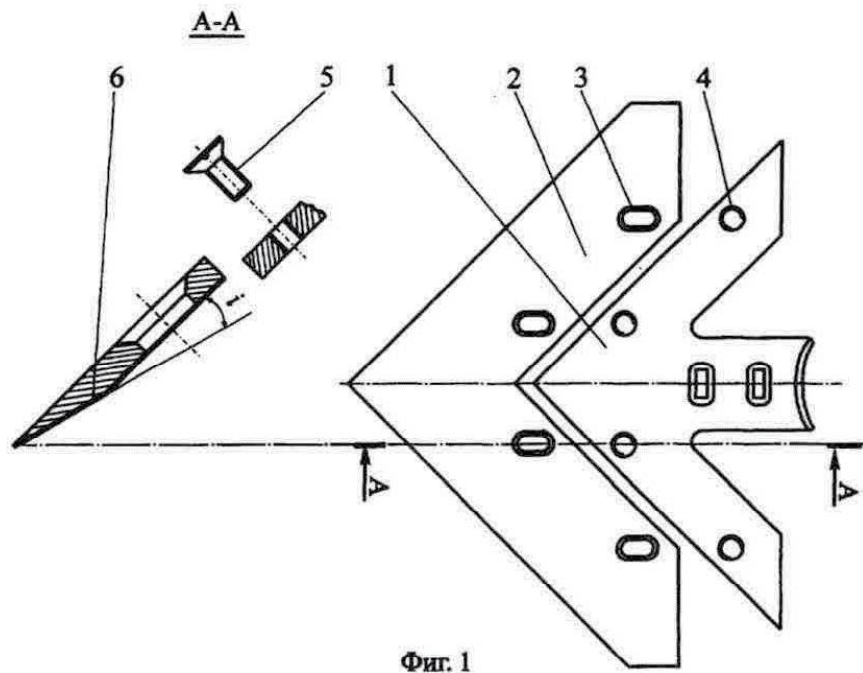
(57) Реферат:

Изобретение относится к области
восстановления изношенных деталей и может быть
использовано для восстановления лап
культиваторов почвообрабатывающих машин.
Удаляют изношенную рабочую часть лапы
шлифовальным отрезным кругом. Изготавливают
новую рабочую часть из среднеуглеродистой стали
в виде угловой пластины. Затачивают указанную
угловую пластину с образованием лезвия и

упрочняют ее электролизным борированием с
тыльной стороны. Перед борированием в угловой
пластине выполняют сквозные продолговатые
отверстия для ее перемещения по мере износа.
Выполняют резьбовые отверстия на
восстанавливаемой лапе для крепления угловой
пластины посредством винтов. Прикрепляют
угловую пластину к восстанавливаемой лапе. В
результате обеспечивается повышение срока
службы восстанавливаемой лапы. 2 ил.

RU 2 3 2 5 2 5 6 C 2

RU 2 3 2 5 2 5 6 C 2



Фиг. 1

RU 2325256 C2

RU 2325256 C2

RU 2 325 256 C2

Предлагаемое изобретение относится к способам восстановления и упрочнения изношенных деталей и может быть использовано главным образом при восстановлении лап культиваторов почвообрабатывающих машин.

Известен способ (Техника в сельском хозяйстве, 1986, №8, с.51-52), по которому у выбракованных лап изношенную часть лезвия срезают газопламенным резаком. Вместо отрезанной части лезвия изготавливают стальную профильную пластину из стали марки 65Г. Ее предварительно прихватывают к лапе в трех точках ручной электродуговой сваркой. Затем пластину приваривают сплошным швом на установке для автоматической электродуговой сварки под слоем флюса. Лапы с приваренными пластинами подвергают газопламенному напылению износостойкими металлическими порошками. Порошок ПГ-12Н-3 напыляют на пластину с нижней стороны, что обеспечивает получение самозатачивающего лезвия.

Недостатками этого способа является то, что процесс удаления изношенной части лезвия газопламенной резкой влечет за собой выгорание легирующих элементов и углерода, вызывая тем самым изменение структуры стали, изменение формы и деформацию детали, усложняется операция сварки угловой пластины с лапой, требуется последующая механическая и термическая обработка, что увеличивает трудоемкость и стоимость восстановления. Также одним из недостатков является то, что не достигается повышение износостойкости восстанавливаемой детали.

Наиболее близким к предлагаемому способу является способ, по которому у выбракованных лап изношенную часть лезвия срезают шлифовальным отрезным кругом при помощи угловой шлифовальной машины. Для восстановления лап культиваторов используют угловые пластины, изготовленные из низкоуглеродистой стали. После предварительной изоляции приварочной кромки пластину подвергают электролизному борированию. После химико-термического упрочнения угловую пластину приваривают к восстанавливаемой лапе ручной электродуговой сваркой (патент №2241586, МКИ В22Р 6/00 - прототип).

Однако процесс приваривания упрочненной угловой пластины к восстанавливаемой лапе, изготовленной из стали 65Г, обладающей плохой свариваемостью, влечет за собой изменение формы и деформацию детали, требует проведения предварительной термической обработки, что увеличивает трудоемкость и стоимость восстановления. Также недостатком является отсутствие эффекта самозатачивания лезвия, что способствует продлению срока службы рабочих органов при эксплуатации.

Технической задачей предлагаемого изобретения является повышение служебных характеристик детали, а именно повышение ее срока службы за счет усовершенствования схемы крепления ремонтной детали с восстанавливаемой лапой и обеспечения эффекта самозатачивания лезвия.

Поставленная задача достигается в способе восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин, включающем удаление изношенной рабочей части лапы шлифовальным отрезным кругом, изготовление новой рабочей части из стали в виде угловой пластины, затачивание угловой пластины с образованием лезвия и ее упрочнение электролизным борированием, крепление угловой пластины к восстанавливаемой лапе, где согласно изобретению угловую пластину изготавливают из среднеуглеродистой стали, упрочнение ее электролизным борированием осуществляют с тыльной стороны, перед борированием в угловой пластине выполняют сквозные продолговатые отверстия для ее перемещения по мере износа, а на восстанавливаемой лапе выполняют резьбовые отверстия для крепления угловой пластины посредством винтов.

В отличие от прототипа в предлагаемом способе угловую пластину изготавливают из среднеуглеродистой стали и для обеспечения эффекта самозатачивания упрочняют ее электролизным борированием с тыльной стороны. Перед борированием в угловой пластине выполняют сквозные продолговатые отверстия для ее перемещения по мере износа, а на восстанавливаемой лапе выполняют резьбовые отверстия для крепления угловой пластины посредством винтов.

RU 2 325 256 C2

Наличие в предлагаемом способе «новизны» доказывается тем, что существующий способ ремонта не обеспечивает получение эффекта самозатачивания лезвия с возможностью компенсации износа. При осуществлении способа по предлагаемому изобретению достигается технический результат, заключающийся в обеспечении эффекта самозатачивания благодаря упрочнению угловой пластины из среднеуглеродистой стали с тыльной стороны электролизным борированием. В результате чего твердость тыльной стороны лезвия пластины становится в 2,6-3 раза выше, чем у лицевой стороны. В процессе работы культиваторной лапы под действием абразивных частиц почвы менее твердая лицевая сторона лезвия изнашивается быстрее, чем тыльная, которая упрочнена электролизным борированием, в результате этого поддерживается острота режущей кромки (эффект самозатачивания) на протяжении всего срока службы культиваторной лапы. Эффект самозатачивания совместно с наличием на угловой пластине сквозных продолговатых отверстий и резьбовым соединением ее с восстанавливаемой деталью позволяет повысить служебные характеристики за счет перемещения рабочей части лапы и компенсации износа рабочего органа в процессе эксплуатации.

На фиг.1 представлена угловая пластина со сквозными продолговатыми отверстиями, изогнутая по форме детали подготовленной лапы, содержащей резьбовые отверстия; на фиг.2 - угловая пластина после соединения с деталью посредством винтов.

Способ осуществляется следующим образом. У выбракованных лап изношенную часть лезвия срезают шлифовальным отрезным кругом при помощи угловой шлифовальной машины. Для восстановления лап культиваторов используют угловые пластины 2, изготовленные из среднеуглеродистой стали, на которых изготавливают сквозные продолговатые отверстия 3, и подвергают электролизному борированию с тыльной стороны лезвия, получая упрочненный слой 6. На восстанавливаемой лапе 1 изготавливают резьбовые отверстия 4. После химико-термического упрочнения угловую пластину и восстанавливаемую лапу соединяют винтами 5. В процессе эксплуатации, по мере износа рабочей части лапы, винты 5 ослабляют и компенсируют износ за счет перемещения угловой пластины, вдоль продолговатых отверстий 3.

Пример. Изношенную часть лезвия лапы культиватора КП-4 удаляют шлифовальным отрезным кругом А24SBF по ГОСТ 23182-78 при помощи угловой шлифовальной машины МШУ-2-230. Угловую пластину изготавливают путем изгиба под углом 65° полосовой стали марки 30 шириной 40 мм и толщиной 5 мм при помощи кривошипно-механического пресса КД 2128 К. Режущую кромку пластины затачивают под углом $i=12^\circ$ на универсально-заточном станке ЗД642Е. На угловой пластине при помощи фрезерного станка 675П изготавливают сквозные продолговатые отверстия шириной 10 мм и длиной 18 мм. После предварительной изоляции поверхности, не подлежащей упрочнению, путем покрытия гальванической медью угловую пластину подвергают электролизному борированию. В качестве борсодержащего расплава используют шлак, содержащий следующие компоненты, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ - 56; B_2O_3 - 16; K_2CO_3 - 16; Na_2SiO_3 - 7; K_2ZrF_6 - 5.

Режимы борирования:

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Температура расплава, °С | 850-950 |
| Плотность тока, А/см ² | 0,2-0,3 |
| Время выдержки, ч | 2-2,5 |
| Глубина слоя, мм | 0,3-0,35 |
| Твердость HRC | 58-62 |

После завершения борирования поверхность пластины покрыта слоем застывшего шлака, для его отделения угловую пластину опускают в ванну с водой. На восстанавливаемой лапе при помощи вертикального сверлильного станка 2Н118 изготавливают отверстия диаметром $\varnothing 7,52$ мм и нарезают резьбу диаметром $\varnothing 8$ мм с шагом 0,5 мм. Упрочненную заготовку и восстанавливаемую деталь соединяют между собой при помощи винтов с потайной головкой, с диаметром резьбы $\varnothing 8$ мм, с мелким шагом резьбы 0,5 мм, длиной 12 мм, из стали 40Х.

Эксплуатационные испытания показали, что обеспечение эффекта самозатачивания

Продолжение приложения И

RU 2 325 256 C2

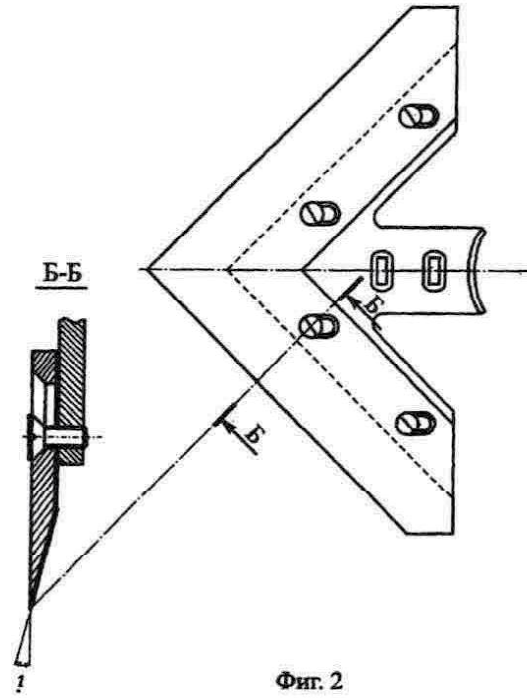
лезвия и компенсирование износа рабочей части лапы за счет перемещения ее вдоль продолговатых отверстий позволили повысить срок службы рабочих органов в 2-3 раза.

Таким образом, применение способа восстановления позволяет снизить себестоимость ремонта детали за счет усовершенствования схемы крепления угловой пластины с восстанавливаемой лапой. Кроме того, обеспечение эффекта самозатачивания лезвия и наличие на угловой пластине сквозных продолговатых отверстий позволяют повысить служебные характеристики за счет компенсации износа рабочего органа в процессе эксплуатации перемещением рабочей части лапы.

Формула изобретения

Способ восстановления лап культиваторов почвообрабатывающих машин, включающий удаление изношенной рабочей части лапы шлифовальным отрезным кругом, изготовление новой рабочей части из стали в виде угловой пластины, затачивание угловой пластины с образованием лезвия и ее упрочнение электролизным борированием, крепление угловой пластины к восстанавливаемой лапе, отличающийся тем, что угловую пластину изготавливают из среднеуглеродистой стали, упрочнение ее электролизным борированием осуществляют с тыльной стороны, перед борированием в угловой пластине выполняют сквозные продолговатые отверстия для ее перемещения по мере износа, а на восстанавливаемой лапе выполняют резьбовые отверстия для крепления угловой пластины посредством винтов.

RU 2 325 256 C2



Фиг. 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2392102

**СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ
ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ МАШИН**

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2008142690

Приоритет изобретения **27 октября 2008 г.**

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации **20 июня 2010 г.**

Срок действия патента истекает **27 октября 2028 г.**

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) **RU** (11) **2 392 102** (13) **C1**

(51) МПК
B23P 6/00 (2006.01)
B23H 9/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21), (22) Заявка: 2008142690/02, 27.10.2008

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.10.2008

(45) Опубликовано: 20.06.2010 Бюл. № 17

(56) Список документов, цитированных в отчете о
поиске: RU 2325256 C2, 27.05.2008. RU 2279337 C2,
10.07.2006. RU 2333087 C2, 10.09.2008. SU
96861 A1, 01.01.1954. RU 2221684 C2,
20.01.2004. DE 2704605 B1, 19.01.1978. DE
10237324 A, 28.08.2003.

Адрес для переписки:
410012, г.Саратов, Театральная пл., 1,
Саратовский государственный аграрный
университет имени Н.И. Вавилова,
патентный отдел

(72) Автор(ы):

Буйлов Валерий Николаевич (RU),
Люляков Иван Викторович (RU),
Еременко Виктор Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
"Саратовский государственный аграрный
университет имени Н.И. Вавилова" (RU)

**(54) СПОСОБ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛАП КУЛЬТИВАТОРОВ ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ
МАШИН**

(57) Реферат:

Изобретение относится к способам
восстановления и упрочнения изношенных
деталей и может быть использовано для
ремонта рабочих органов
почвообрабатывающих машин,
преимущественно лап культиваторов. Способ
включает удаление изношенной рабочей части
лапы шлифовальным отрезным кругом,
изготовление новой рабочей части из
среднеуглеродистой стали в виде угловой
пластины, которую затачивают с образованием
лезвия и упрочняют с тыльной стороны, причем
перед упрочнением в ней выполняют сквозные
продолговатые отверстия для ее перемещения
по мере износа, а на восстанавливаемой папе

выполняют резьбовые отверстия для крепления
угловой пластины посредством винтов.
Угловую пластину упрочняют с тыльной
стороны электроискровым нанесением
покрытия в два слоя твердыми сплавами с
высокой износостойкостью, причем первым
слоем наносят сплав, имеющий твердость,
меньшую твердости сплава, наносимого
вторым слоем, причем с верхней стороны на
поверхность угловой пластины наносят один
слой того же сплава, что и первый слой с
тыльной стороны. Изобретение позволяет
повысить качество упрочняемой поверхности
деталей почвообрабатывающих машин,
работающих в абразивной среде с возможными
ударными нагрузками. 1 ил.

RU 2 392 102 C1

RU 2 392 102 C1



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2139356

На основании Патентного закона Российской Федерации, введенного в действие 14 октября 1992 года, Российским агентством по патентам и товарным знакам выдан настоящий патент на изобретение

ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРОДНАЯ ПЕЧЬ-ВАННА

Патентообладатель(ли):

см. на обороте

по заявке № 98122490, дата поступления: 15.12.98

Приоритет от 15.12.98

Автор(ы) изобретения:

см. на обороте

Патент действует на всей территории Российской Федерации в течение 20 лет с **15 декабря 1998 г.** при условии своевременной уплаты пошлины за поддержание патента в силе

Зарегистрирован в Государственном реестре изобретений Российской Федерации

г. Москва, 10 октября 1999 г.



Генеральный директор

А.Д. Короткий

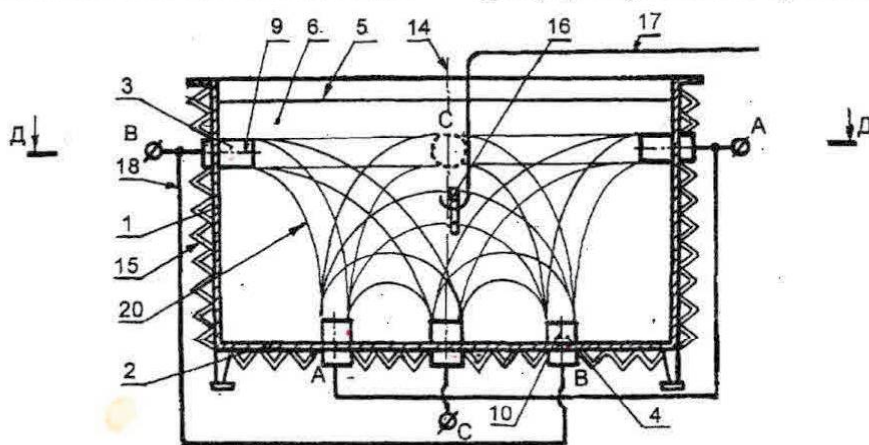
(19) RU (11) 2139356 (13) C1(51) 6 C 21 D 1/44РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
к патенту Российской Федерации

1

(21) 98122490/02 (22) 15.12.98
(24) 15.12.98
(46) 10.10.99 Бюл. № 28
(72) Буйлов В.Н., Богатырев С.А., Петряков В.К., Сафонов В.В., Морозов А.А.
(71) (73) Буйлов Валерий Николаевич, Богатырев Сергей Аркадьевич, Петряков Владимир Константинович, Сафонов Валентин Владимирович, Морозов Алексей Алексеевич
(56) SU 411754, 05.12.77. Патон Б.Е. и др. Электрошлаковая технология за рубежом. - Киев: Наукова думка, 1982, с. 264 и 265. US 4222554 А, 16.09.80. DE 2628541 А, 05.01.78. EP 0072525 А1, 23.02.83.
(98) 410740, Саратов, ул.Советская 60, ИМЭСХ, УНПЦ патентная группа
(54) ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРОДНАЯ ПЕЧЬ-ВАННА
(57) Изобретение относится к термической обработке металлов и сплавов и может быть

2

использовано при закалке деталей, наплавке в жидких теплоносителях и преддеформационном нагреве. Технической задачей изобретения является повышение эффективности использования рабочего пространства печи за счет обеспечения циркуляцией равномерности температуры расплава. Трехфазная электродная печь-ванна содержит водоохлаждающий корпус 1, расположенный на внешней стороне корпуса 1 змеевик 15 и электроды 3 и 4; корпус 1 выполнен цилиндрическим, а электроды 3 и 4 соединены с фазами А, В и С попарно и расположены равномерно по concentрическим окружностям на стенке корпуса 1 ниже уровня 5 расплава шлака 6 и в днище 2 ванны, при этом оси симметрии 9 и 10 парных электродов 3 и 4, соединенных с одноименной фазой, перпендикулярны друг другу и находятся в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии 14 ванны,



Фиг. 1

RU 2139356 C1

RU 2139356 C1

Продолжение приложения И

| 3 | 2139356 | 4 |
|--|---|---|
| по разные стороны от центра окружностей, а эмсевик 15 в поперечном сечении имеет треугольную форму. Устройство может быть использовано для термообработки деталей, | для наплавки изношенных поверхностей в жидких теплоносителях, преддеформационного нагрева при восстановлении давлением. 3 ил. | |

5

2139356

Изобретение относится к термической обработке металлов и сплавов и может быть использовано при закалке деталей, наплавке в жидких теплоносителях и преддеформационном нагреве.

Известна электродная печь-ванна с электродами в виде параллельных пластин с отверстиями, расположенными ниже уровня расплава и водоохлаждаемыми элементами конструкции электродов, расположенными выше зеркала расплава (а.с. N 411755, МКИ С 21 D 1/44, С 21 D 9/00, опубл. 5.12.77, бюл. N 45).

Однако такая конструкция печи-ванны из-за одностороннего расположения электродов не обеспечивает равномерной температуры нагрева расплава по всему объему рабочего пространства.

Известная трехфазная соляная ванна, состоящая из трех основных электродов и одного дополнительного, размещенных в ряд вдоль ее длины (а.с. N 1164286, МКИ С 21 D 1/46, опубл. 30.06.85, бюл. N 24), имеет низкий срок службы электродов из-за быстрого разрушения в месте соприкосновения с зеркалом расплава, а также из-за разности электрических сопротивлений в зонах нагрева.

Наиболее близкой к предлагаемому изобретению является электродная печь-ванна, включающая водоохлаждаемый металлический корпус и тигель (а.с. N 411754, МКИ С 21 D 1/44, С 21 D 9/00, опубл. 5.12.77, бюл. N 45 - прототип). Однако из-за громоздкости конструкции, малого полезного рабочего пространства и низкой стойкости электродов из-за их неудачного расположения известная электродная печь-ванна не нашла промышленного применения.

Технической задачей предлагаемого изобретения является повышение эффективности использования рабочего пространства печи за счет обеспечения циркуляцией равномерности температуры расплава.

Поставленная задача достигается тем, что в трехфазной электродной печи-ванне, содержащей водоохлаждаемый корпус, расположенный на внешней стенке корпуса змеевик и электроды, корпус выполнен цилиндрическим, а электроды соединены с фазами попарно и расположены равномерно по концентрическим окружностям на стенке корпуса ниже уровня расплава шлака и в днище ванны, при этом оси симметрии парных электродов, соединенных с одноименной фазой, перпендикулярны друг к другу и находятся в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии ванны, по

6

разные стороны от центра окружностей, а змеевик в поперечном сечении имеет треугольную форму.

Наличие в предлагаемом устройстве изобретения доказывается тем, что отсутствуют подобные высокопроизводительные и надежные электродные печи-ванны, обеспечивающие безокислительный сквозной нагрев деталей до температуры выше 1000°C в расплавах шлака или соли с равномерным распределением температурных полей по всему рабочему объему ванны.

Оригинальность предлагаемого технического решения заключается в том, что электроды, расположенные на стенках цилиндрического корпуса и днище ванны, соединены с фазами попарно, создавая при этом линии тока, равномерно пронизывающие рабочее пространство ванны в зоне нагрева детали.

Устройство поясняется чертежами. На фиг. 1 изображен общий вид печи-ванны, на фиг. 2 - разрез Д-Д фиг. 1, на фиг. 3 - принципиальная схема соединений трехфазной электродной печи-ванны. Тонкими линиями показано распределение линий тока между электродами, полученное в процессе моделирования электрических процессов в шлаковом расплаве ванны.

Трехфазная электродная печь-ванна содержит цилиндрический корпус 1 (фиг. 1) диаметром 450 мм, днище 2 и электроды 3, 4, выполненные из жаропрочной стали Х18Н9Т. Электроды 3 введены в рабочее пространство ванны через стенки корпуса 1 ниже уровня 5 расплава шлака 6, а электроды 4 установлены в днище 2, образуя концентрические окружности 7 и 8 (фиг. 2). При этом оси симметрии 9, 10 электродов 3, 4, соединенных с одной из фаз А, В или С, находятся в плоскостях 11, 12 или 13, проходящих через ось симметрии 14 корпуса 1 ванны. На наружной поверхности корпуса 1 (фиг. 1) и днища 2 размещен охладитель, представляющий собой спиральный змеевик 15 треугольной формы в поперечном сечении. Нагреваемая деталь 16 крепится на державке 17. Электроды 3, 4 шинами 18 присоединены к трансформатору Т1 мощностью 100 кВт согласно электросхеме (фиг. 3). Регулировка температуры в рабочем пространстве ванны осуществляется термопарой 19 и прибором КСП, который через выключатель К1 осуществляет включение и выключение трансформатора Т1 при достижении заданных нижнего и верхнего температурных уровней. Распределение линий тока 20 (фиг. 2) между электродами 3, 4 позволяет

7

2139356

8

разделить весь объем ванны на 12 зон интенсивного нагрева с электрическими сопротивлениями R1...R12 и зону Q13, в которую теплота передается за счет циркуляции расплава шлака 6.

Устройство работает следующим образом.

В рабочее пространство, образуемое корпусом 1 и днищем 2, опускается подключенная во вторичную цепь трансформатора Т1 нихромовая спираль 21 (фиг. 3), и засыпается измельченный синтетический шлак следующего состава: 56% $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, 16% B_2O_3 , 16% K_2CO_3 , 7% Na_2SiO_3 , 5% K_2Zr . Предлагаемый шлак невзрывоопасен, нетоксичен, исключает обезуглероживание детали, способствует быстрому и равномерному нагреву "садки".

При прохождении переменного тока по спирали выделяется тепло и происходит плавление шлака. Расплавленный шлак электропроводен и обладает большим омическим сопротивлением. В результате между электродами 3 и 4 возникает электрический ток с большим выделением теплоты, и шлак достаточно быстро плавится, заполняя весь рабочий объем. При достижении температуры шлака 650...700°C спираль 21 отключается от электрической цепи и удаляется из рабочего пространства, а процесс плавления шлака продолжается.

Соприкосновение расплава шлака 6 между парами электродов 2 и 3 (фазами А и В, В и С, А и С) практически одинаково, нагрузка между фазами распределяется равномерно благодаря симметричному расположению электродов 2, 3, что обеспечивает равную интенсивность их выгорания. Напряжение электродной печи-ванны составляет 20...30 В. Выравнивание температуры расплава шлака по объему ванны достигается за счет циркуляции расплава. Рабочий интервал температуры нагрева при термообработке составляет 860...1150°C, при наплавке - 990...1100°C, преддеформационном нагреве - 900...1200°C.

Деталь 16, закрепленная на державке 17, опускается в зону активного нагрева, выдерживается в течение заданного времени и подвергается дальнейшей обработке согласно требованиям технологического процесса изготовления или восстановления. В качестве исследуемых образцов использовались изношенные золотники гидрораспределителей Р-80 и диски пяты турбобуров ЗТСШ, восстанавливаемые наплавкой в жидких теплоносителях, а также прецизионные автотракторные детали, восстанавливаемые методом давления.

Эффект "намораживания" затвердевшей пленки шлака на внутренней поверхности корпуса 1, предохраняющей его стенки от разрушения, достигается без применения тигеля за счет интенсификации процесса водоохлаждения. Для этого используется змеевик 15, имеющий треугольное поперечное сечение, что при одинаковой пропускной способности с известным полукруглым сечением змеевика из-за большей площади наружной поверхности в 1,2 раза улучшает конвективный теплообмен с окружающей средой.

Как показали результаты испытаний опытного образца трехфазной электродной печи-ванны, скорость нагрева цилиндрической детали до температуры $1000 \pm 50^\circ\text{C}$ составила 1 мм/мин, количество одновременно нагреваемых деталей составило 3...5 штук в зависимости от их габаритов.

Таким образом, использование изобретения позволяет достичь следующих результатов.

1. Трехфазная электродная печь-ванна благодаря оригинальному расположению электродов как на стенках корпуса, так и на днище, а также попарному соединению электродов с фазами трансформаторов, обеспечивает быстрое расплавление, разогрев и равномерное распределение температуры в расплаве шлака с допуском $\pm 10^\circ\text{C}$.

2. Равномерное распределение нагрузки между фазами увеличивает срок службы электродов.

3. Интенсификация процесса охлаждения стенок корпуса днища позволила увеличить полезный объем рабочего пространства печи за счет исключения тигеля.

4. Расположение электродов исключает их разведение на границе раздела расплава-воздух.

5. Предлагаемая конструкция электродной печи-ванны позволила с большей эффективностью использовать стабилизирующие характеристики синтетического шлака, разработанного специально для нагрева и наплавки металлов и сплавов (патент N 2114184. МКИ С 21 D 1/34, В 23 К 35/362, опубл. 27.06.98, бюл. N 18).

Реализация потенциалов предлагаемого изобретения благодаря обоснованному моделированию электрических процессов, протекающих в шлаковом расплаве, расположению электродов и конструкции корпуса, позволит использовать трехфазную электродную печь-ванну не только для термообработки деталей, но и для наплавки изношенных поверхностей в жидких тепло-

9

2139356

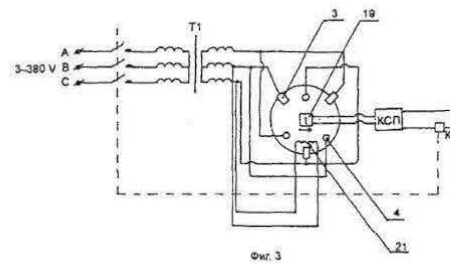
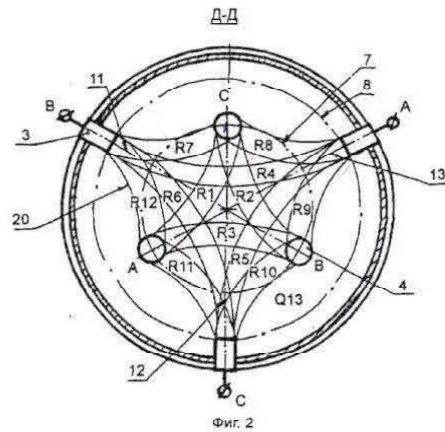
10

носителях и преддеформационного нагрева при восстановлении давлением.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Трехфазная электродная печь-ванна, содержащая водоохлаждаемый корпус, расположенный на внешней стенке корпуса змеевик и электроды, отличающаяся тем, что корпус выполнен цилиндрическим, а электроды соединены с фазами попарно и расположены равномерно по концентрическим окружностям на стенке корпуса ниже уровня расплава шлака и в днище ванны,

при этом оси симметрии парных электродов, соединенных с одноименной фазой, перпендикулярны друг другу и находятся в вертикальной плоскости, проходящей через ось симметрии ванны, по разные стороны от центра окружности, а змеевик в поперечном сечении имеет треугольную форму.







РОССИЙСКОЕ АГЕНТСТВО
ПО ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(12) **ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ**
к патенту Российской Федерации

(19) RU (11) 2114184 (13) C1
(51) 6 C 21 D 1/34, B 23 K 35/362

1

(21) 97115191/02 (22) 12.09.97
(46) 27.06.98 Бюл. № 18
(76) Буйлов Валерий Николаевич, Загородских Борис Павлович, Синичкин Василий Павлович, Петряков Владимир Константинович, Сафонов Валентин Владимирович, Богатырев Сергей Аркадьевич, Нестеров Алексей Леонидович
(56) SU, авторское свидетельство, 380724, С 21 D 1/72, 1973. SU, авторское свидетельство, 259102, С 21 D 1/34, 1970. ТУ 21 УССР 57-77 АНШТ 1 ИЭС им. Е.О. Патона. SU, авторское свидетельство, 294863, С 21 D 1/74, 1971.
(54) ШЛАК ДЛЯ НАГРЕВА И НАПЛАВКИ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ
(57) Изобретение относится к веществам, используемым для термической обработки металлов и сплавов, и может быть использовано в качестве теплоносителя при восстановлении деталей наплавкой

2

металлических порошков. Технической задачей изобретения является расширение технологических возможностей шлака и повышение стабильности свойств шлака. Для этого шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов, включающий $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, B_2O_3 , K_2CO_3 , K_2ZrF_6 , дополнительно содержит Na_2SiO_3 при следующем соотношении компонентов, мас. %: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ 52 - 58; B_2O_3 14-18; K_2CO_3 15-17; Na_2SiO_3 5-7; K_2ZrF_6 4-5, при этом отношение содержания жидкого натриевого стекла и борного ангидрида составляет не менее 0,4. Шлак может быть использован для нагрева под закалку металлорежущего инструмента, например сверл из быстрорежущей стали, в качестве теплоносителя при наплавке металлического порошка на изношенные пояски золотников гидрораспределителя Р80, а также для преддеформационного нагрева деталей при обработке давлением. 2 табл.

RU 2114184 C1

RU 2114184 C1

3

2114184

4

Изобретение относится к веществам, используемым для термической обработки металлов и сплавов, и может быть использовано в качестве теплоносителя при восстановлении деталей наплавкой металлических порошков.

Известен синтетический шлак для высокотемпературной термической обработки металлов и сплавов [1], содержащий следующие компоненты, мас. %: силикокальций 8-20; бура 16-28; борная кислота остальное. Однако данный шлак имеет повышенное содержание силикокальция, который увеличивает вязкость и уменьшает конвекцию раствора.

Известно стекло для химико-термической обработки металлических поверхностей (Авт. св. 1198123, 1985), содержащее компоненты при следующем соотношении, мас. %: PbO 69,5-72; B₂O₃ 11,5-14; SiO₂ 0,5-2; SnO₂ 7-9,5; ZnF₂ 5-9. Однако присутствие в расплаве стекла значительного количества окиси свинца делает его токсичным, что требует введения в помещение дополнительных устройств - пылеуловителей, кроме того, из-за меньшей плотности стальные детали могут всплывать на поверхность такой ванны.

Известен синтетический шлак [2], содержащий следующие компоненты, мас. %: фторцирконат калия 1-5; борный ангидрид 18-30; бура остальное. Однако производственная проверка предложенного шлака показала, что при высоких температурах (1000-1250°C) вязкость этого состава резко уменьшается, вследствие чего образуется тонкая пленка (менее 0,1 мм), плохо защищающая стальную деталь при нагреве от окисления.

Известный шлак АН-ШТ1 ТУ21 УССР 57-77, разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона [3], содержащий, мас. %: B₂O₃ 50-70; Na₂O 23,5-27,5; Fe₂O₃ до 0,5; Cr₂O₃ до 0,5; K₂O 1-2,8; ZrO₂ 1,2-2,8; Li₂O до 0,12; F₂ 0,8-2,8, имеет в своем составе окислы железа и хрома, которые засоряют расплав и ухудшают отделимость шлаковой корки от поверхности детали. Кроме того, данный шлак, выпускаемый Донецким комбинатом камнетитых и керамических изделий, отличается дороговизной и необходимостью проведения пассивации деталей после термообработки.

Наиболее близкой к изобретению является среда для нагрева металлов и сплавов [4] (прототип), имеющая следующее соотношение компонентов, мас. %: углекислый литий 7-9; углекислый калий 15-17; фтор-

цирконат калия 4-5; борный ангидрид 14-18; бура остальное. Однако наличие в составе среды редкого металла лития увеличивает стоимость шлака. Кроме того, среда такого состава пригодна только для термической обработки металлов и сплавов в ограниченном интервале температур от 780 до 880°C, что делает невозможным ее использование для наплавки деталей металлическим порошком в жидком теплоносителе.

Технической задачей изобретения является расширение технологических возможностей шлака и повышение стабильности свойств шлака.

Задача достигается тем, что шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов, включающий Na₂B₄O₇, B₂O₃, K₂CO₃, K₂ZrF₆, дополнительно содержит Na₂SiO₃ при следующем соотношении компонентов, мас. %:

| | |
|---|-------|
| Na ₂ B ₄ O ₇ | 52-58 |
| B ₂ O ₃ | 14-18 |
| K ₂ CO ₃ | |
| Na ₂ SiO ₃ | 5-7 |
| K ₂ ZrF ₆ | 4-5 |

при этом отношение содержания жидкого натриевого стекла и борного ангидрида не менее 0,4.

Замещение углекислого лития жидким натриевым стеклом, а также изменение соотношения между основными компонентами способствует образованию в расплаве шлака в результате распада жидкого натриевого стекла оксидов натрия Na₂O и кремния SiO₂, уменьшающих обезуглероживание и растворяющих окалину. Кроме того, при использовании предлагаемого шлака в качестве теплоносителя при наплавке металлического порошка наличие в расплаве жидкого натриевого стекла обеспечивает устойчивую когезию и необходимую прочность сцепления покрытия с подложкой.

Оригинальность предлагаемого шлака заключается в том, что отношение содержания Na₂SiO₃ к B₂O₃ гарантировано превышает 0,4, что обеспечивает высокий уровень растворимости в шлаке железной окалины без увеличения вязкости расплава.

Опытно-экспериментальным путем установлен оптимальный химический состав шлака, мас. %:

| | |
|---|----|
| Na ₂ B ₄ O ₇ | 56 |
| B ₂ O ₃ | 16 |
| K ₂ CO ₃ | 16 |
| Na ₂ SiO ₃ | 7 |
| K ₂ ZrF ₆ | 5 |

Шлак готовят из перечисленных компонентов путем предварительного сплавления.

5

2114184

6

Расплав буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ в чистом виде разъедает деталь, имеет низкую электропроводность, образует плохоотделимый толстый слой шлаковой корки, имеет "размытый" интервал температуры плавления.

Добавление борного ангидрида B_2O_3 уменьшает вязкость, улучшает делимость, делает состав легкоплавким. Превышение содержания B_2O_3 в расплаве 18% уровня уменьшает скорость нагрева из-за невысокой конвекции, а образование толстого слоя стекла на поверхности детали замедляет ее охлаждение в закалочной среде. Повышается также поверхностное натяжение.

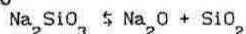
Поташ (K_2CO_3) вводится в расплав с целью предотвращения обезуглероживания и защиты поверхности детали от кислорода.

Фторцирконат калия K_2ZrF_6 улучшает смачивание поверхности металла, предотвращает окисление, уменьшает адгезию шлаковой пленки, образует легкоплавкую эвтектику, делает расплав жидкоподвижным, снижает поверхностное натяжение на 6%, уменьшает вязкость, улучшает делимость шлаковой корки. Шлак при охлаждении до температуры ниже температуры начала окисления самопроизвольно отделяется от обрабатываемой детали. Делимость обеспечивается разностью коэффициентов термического расширения стали и шлака.

Из-за возникновения напряжения сжатия пленка самопроизвольно осыпается.

Введение до 7% Na_2SiO_3 повышает стабильность свойств шлака в процессе эксплуатации. При большем количестве метасиликата увеличивается вязкость расплава.

Диссоциация жидкого натриевого стекла при нагреве свыше 900°C протекает по уравнению



Жидкое стекло распадается на оксид натрия и оксид кремния.

Оксид кремния SiO_2 способствует образованию на поверхности стальной детали шлаковой пленки с более высокой вязкостью и устойчивой когезией, плотностью и малой кислородопроницаемостью. При этом не испаряется, т.к. упругость пара SiO_2 вплоть до 1250°C практически равна нулю.

Оксид натрия Na_2O обладает кристаллизационной и ректификационной способностями в узком интервале температур, уменьшает обезуглероживание, растворяет окислы железа, препятствуя насыщению ими расплава, тем самым обуславливая повышенную текучесть шлака. Причем на растворимость железной окалины влияет отношение

$\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$. Чем больше это значение, тем выше растворимость. Экспериментально установлено, что отношение $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ должно быть не менее 0,4.

Пример конкретного использования шлака. Для экспериментальной проверки предлагаемого состава были приготовлены семь смесей ингредиентов, один из которых показал оптимальные результаты (см. табл. 1).

При выплавке опытной партии шлака применяли следующие сырьевые материалы: бура ГОСТ 8429-67; борный ангидрид ГОСТ 10068-72; поташ (углекислый калий); жидкое натриево-стекло ГОСТ 13078-81; фторцирконат калия.

Указанные сырьевые материалы переплавляли в дуговой печи до получения гомогенного расплава, который затем гранулировали путем слива в подогретую до 50°C воду. При этом образовывались однородные частицы шлака стекловидного строения.

Предлагаемый шлак применялся для термообработки металлов и сплавов при рабочих температурах и интервале $860 - 1150^\circ\text{C}$, например, для предварительного подогрева при закалке быстрорежущих сталей. Благодаря достаточной вязкости и отличной смачивающей способности расплавленный шлак надежно защищает нагреваемую деталь от окисления и обезуглероживания в процессе переноса из ванны нагрева в закалочную ванну. Пленка стекла, состоящая в основном из B_2O_3 , надежно предохраняет поверхность быстрорежущей стали от обезуглероживания и разъедания.

Результаты сравнительной проверки методом фольги обезуглероживающей способности существующих и предлагаемого составов шлака при нагреве быстрорежущей стали Р9, а также влияние отношений $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{B}_2\text{O}_3$ и $\text{Na}_2\text{O}/\text{B}_2\text{O}_3$ на время непрерывного использования шлака, в течение которого он сохраняет стабильность химического состава, приведены в табл. 1.

Как видно из данных табл. 1, наилучшими показателями обладает предлагаемый шлак.

В табл. 2 приведены оптимальные пределы измерений физико-механических характеристик расплава предлагаемого состава шлака.

Наплавка слоя металлического порошка на стальную подложку в расплаве синтетического боратного шлака осуществлялась на золотник гидрораспределителя Р80 ТУ 23.01.20-80 из стали 20Х ГОСТ 4543-75 диаметром 25-0,05 мм, изношенного на 0,05 - 0,1 мм. В качестве металлических

7

2114184

8

порошков использовались самофлюсующиеся на никелевой основе типа ПР-Н67Х18С5Р5 ТУ 48-19-383-84 и ПГ-10Н-01 ТУ 14-1-3795-84 с температурой плавления 1050°C.

Для фиксации порошка на восстанавливаемой поверхности использовалось в качестве связующего стекло натриевое жидкое ГОСТ 13078-81. Состав суспензии - 2,5 - 7% стекла; 93 - 97,5% порошка. Поверхность наплавляемого изделия покрывалась предлагаемой суспензией вместо традиционно используемой клеевой связующей, деталь на подвеске помещалась в печь-ванну с нижним расположением электродов, исключая их разведение на границе раздела расплава-воздух, при нагреве теплоноситель не засорялся вредными примесями и способствовал лучшей взаимодиффузии элементов слоя и подложки.

При наплавке золотников в расплаве предлагаемого шлака обеспечивалось прочное сцепление покрытия с подложкой (основным металлом), происходило рафинирование наплавленного металла, очищение его от окислов, раскисляемость поверхности подложки и порошка проходила без их разведения, расплавленная суспензия хорошо смачивала основной металл и в результате достигалось надежное сплавление с основой. После направленной кристаллизации были получены детали с плотным, износостойким, равномерным по толщине слоем.

Таким образом в Саратовском государственном агроинженерном университете была наплавлена партия изношенных золотников гидрораспределителей Р-80. Испытания в производственных условиях показали хорошие результаты.

Режимы наплавки следующие.

| | |
|--|--|
| Толщина слоя присадочного порошка и жидкого стекла | До 10^{-4} м |
| Скорость нагрева | $5^{\circ}\text{C}/\text{с}$ |
| Интервал температур для ПР-Р67Х18С5Р5 | 990 - 1000°C |
| для ПГ-10Н-01 | 1040 - 1050°C |
| Время нагрева в шлаковом расплаве | 420 с |
| Пористость | 3 - 5% |
| Деформация детали в процессе наплавки | 4 - 5 мкм |
| Коэффициент смачивания суспензии | 0,7 - 0,8 |
| Глубина погружения от "зеркала" расплава | 0,05 м |
| Плотность присадочного материала до наплавки | $2,8...2,9 \cdot 10^3$ кг/м ³ |

после наплавки

$7,6...7,7 \cdot 10^3$ кг/м³;

Ресурс восстановленного золотника на 40% выше серийного и на 50% выше, чем у остального.

Предлагаемый шлак может также использоваться для преддеформированного нагрева ответственных деталей при восстановлении давлением.

Таким образом, использование изобретения позволяет достичь следующих результатов:

нагрев в предлагаемом составе шлаковой ванны позволяет исключить обезуглероживание, получить светлую чистую поверхность и уменьшить рассеяние твердости, исключить "пятнистость" закаленных деталей;

уменьшить припуски на механическую обработку за счет ликвидации окисления и обезуглероживания;

достичь высокой скорости и равномерности нагрева "садки" до требуемой температуры 1050°C;

обеспечить постоянство температуры шлаковой ванны ($\pm 10^{\circ}\text{C}$);

защитить изделие от воздействия атмосферных газов на открытом воздухе;

уменьшить пористость на 3 - 5%;

добиться отсутствия порообразования и коробления, минимальной кислородопроницаемости расплава;

обеспечить экологическую безопасность благодаря отсутствию токсичности и образования вредных химических соединений;

устранить разъедающее действие шлака на поверхность детали, сохранить наружный микрорельеф;

обеспечить стабильность химического состава теплоносителя при непрерывном использовании;

уменьшить расход теплоносителя за счет уменьшения уноса шлака при вынимании из ванны путем обычного встряхивания;

добиться минимальной толщины и легкоотделимости затвердевшей пленки;

обеспечить полное смачивание за счет рационального сочетания вязкости и поверхностного натяжения;

уменьшить вероятность образования микротрещин в местах концентрации напряжений;

остаточные деформации незначительны, коробление и прогиб находятся в пределах значений припуска на финишную обработку.

Реализация изобретения позволяет проводить термообработку и восстановление прецизионных деталей с сохранением исходного уровня качества поверхностного слоя и

9

2114184

10

стабильных характеристик шлака, используемого в качестве теплоносителя.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Шлак для нагрева и наплавки металлов и сплавов, включающий $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$, B_2O_3 , K_2CO_3 , K_2ZrF_6 , отличающийся тем, что шлак дополнительно содержит Na_2SiO_3 при следующем соотношении компонентов, мас. %:

| | |
|-----------------------------------|---------|
| $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ | 52 - 58 |
| B_2O_3 | 14 - 18 |

| | |
|---------------------------|---------|
| K_2CO_3 | 15 - 17 |
| Na_2SiO_3 | 5 - 7 |
| K_2ZrF_6 | 4 - 5 |

при этом отношение содержания жидкого натриевого стекла и борного ангидрида составляет не менее 0,4.

Таблица 1

Результаты сравнительных испытаний шлаков

| № п/п | Состав шлака | Содержание углерода в ленте, % | | Время непрерывного использования шлака (величина вредных примесей превышает 10 %) с добавлением | |
|-------|---|--------------------------------|------------|---|---------------|
| | | исходное | остаточное | Без добавления | с добавлением |
| 1 | 10% CaSiO ₃ +20,5% Na ₂ B ₄ O ₇ +64,5% H ₃ BO ₃ | 1,44 | 1,1 | 400 | 200 |
| 2 | 69,5% PbO+14% B ₂ O ₃ +2% SiO ₂ +9,5% SnO ₂ +5% ZnF ₂ | 1,44 | 0,7 | 50 | 250 |
| 3 | 4% K ₂ ZrF ₆ +25% B ₂ O ₃ +71% Na ₂ B ₄ O ₇ | 1,44 | 1,2 | 60 | 300 |
| 4 | 65% B ₂ O ₃ +27% Na ₂ O+0,4% [Cr ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃]+2,5% K ₂ O+2,5% ZrO ₂ +0,1% Li ₂ O+2,5% F ₂ | 1,44 | 1,35 | 60 | 400 |
| 5 | 8% Li ₂ CO ₃ +16% K ₂ CO ₃ +5% K ₂ ZrF ₆ +16% B ₂ O ₃ +55% Na ₂ B ₄ O ₇ | 1,44 | 1,3 | 70 | 500 |
| 6 | 62% Na ₂ B ₄ O ₇ +14% B ₂ O ₃ +15% K ₂ CO ₃ +5% Na ₂ SiO ₃ +4% K ₂ ZrF ₆ | 1,44 | 1,35 | 70 | 500 |
| 7 | 56% Na ₂ B ₄ O ₇ +16% B ₂ O ₃ +16% K ₂ CO ₃ +7% Na ₂ SiO ₃ +5% K ₂ ZrF ₆ | 1,44 | 1,35 | 80 | 500 |

2114184

12

13

2114184

14

Таблица 2

Характеристика расплава

| Поверхностное натяжение, МДж/м ² | Плотность, кг/м ³ | Толщина пленки, мм | Вязкость, пуаз | Напряжение электродной печи-ванны, В |
|--|---------------------------------|-------------------------------|-------------------|---|
| (20...25)10 ³ | (2...2,2)10 ³ | 0,2...1 | 0,5...8 | 20...30 |
| Рабочий интервал температур, °С | | | | |
| при термообработке | при наплавке | преддеформационном нагреве | | Кристаллизационная способность |
| 860...1150 | 990...1100 | 900...1200 | | Слабо выраженная |



СОЮЗ СОВЕТСКИХ СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ РЕСПУБЛИК
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
 ПРИ ГОСУДАРСТВЕННОМ КОМИТЕТЕ СССР ПО НАУКЕ И ТЕХНИКЕ
 (ГОСКОМИЗОБРЕТЕНИЙ)

АВТОРСКОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО
 № 1688981

На основании полномочий, предоставленных Правительством СССР, Госкомизобретений выдал настоящее авторское свидетельство на изобретение:

"Способ получения износостойкого покрытия"

Автор (авторы): Буилов Валерий Николаевич и другие, указанные в описании

Заявитель: САРАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИЗАЦИИ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА ИМ. М. И. КАЛИНИНА

Заявка № **4731647** Приоритет изобретения **16 августа 1989 г.**
 Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР
8 июля 1991 г.

Действие авторского свидетельства распространяется на всю территорию Союза ССР.

Председатель Комитета  
 Начальник отдела 



СОЮЗ СОВЕТСКИХ
СОЦИАЛИСТИЧЕСКИХ
РЕСПУБЛИК

(19) SU (11) 1688981 A1

(51)5 В 22 F 7/04

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ
ПО ИЗОБРЕТЕНИЯМ И ОТКРЫТИЯМ
ПРИ ГКНТ СССР

ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

1

(21) 4731647/02
(22) 16.08.89
(46) 07.11.91. Бюл. № 41
(71) Саратовский институт механизации
сельского хозяйства им. М.И.Калинина
(72) В.А.Деев, В.Н.Буйлов, В.К.Петряков,
Е.И.Сафонов, Н.К.Бизик, В.Г.Медяник и
В.А.Ткаченко
(53) 621.769(088.8)
(56) Авторское свидетельство СССР
№ 221945, кл. В 22 F 7/04, 1972.
Патент США № 45966922,
кл. В 22 F 7/04, 1986.
(54) СПОСОБ ПОЛУЧЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙ-
КОГО ПОКРЫТИЯ

Изобретение относится к машиностроению и может быть использовано для восстановления и упрочнения различных изделий.

Известен способ получения износостойкого покрытия детали нанесением рабочего слоя на его поверхность с использованием промежуточного слоя, заключающийся в том, что на поверхность рабочего слоя наносят слой цементирующего материала и нагревают в нейтральной атмосфере до температуры выше температуры плавления цементирующего металла, а в качестве рабочего слоя используют порошок карбида вольфрама, а в качестве цементирующего материала и материала промежуточного слоя — медь [1].

Недостатками известного способа являются сложность и нетехнологичность процесса, не позволяющие получить прочный с хорошим сцеплением слой.

2

(57) Изобретение относится к порошковой металлургии, в частности к способам получения износостойкого покрытия. Цель — повышение износостойкости покрытия за счет снижения пористости и увеличения прочности сцепления с основой. Смешивают металлический порошок с жидким натриевым стеклом, взятым в количестве 4,5–7% от объема металлического порошка, наносят смесь на металлическую основу и нагревают в среде расплава синтетического боратного шлака с основностью 0,25–0,45 до температуры, превышающей температуру солидуса смеси, и ниже температуры солидуса материала основы. 1 табл.

Наиболее близким к изобретению является способ образования износостойчивого спеченного слоя на металлической подложке, заключающийся в том, что поверхность металлической подложки наносят порошковый сплав, состоящий из первого и второго слоев. В состав первого слоя входит 94–99% порошка сплава Fe–Cr и 1–6% акрилового связующего, второй слой содержит 94–96% порошка эвтектического сплава и 1–6% акрилового связующего. Подложку с нанесенными порошками нагревают в инертной атмосфере до температуры, превышающей температуру солидуса эвтектического сплава, но лежащей ниже температуры солидуса сплава Fe–Cr [2].

Недостатками известного способа являются пористость и недостаточная прочность сцепления получаемого слоя с подложкой. При нагреве акриловое связующее разлага-

(19) SU (11) 1688981 A1

ется, активно вступая во взаимодействие с порошками и подложкой. Получаемые при этом соединения не успевают выделяться из слоя, что затрудняет получение беспористого соединения. Прочность сцепления порошкового сплава с подложкой недостаточна из-за того, что нанесенный первый слой порошка сплава Fe-Cr, покрывающая поверхность подложки и имея температуру солидуса выше температуры нагрева, препятствует проникновению эвтектического сплава и ограничивает его площадь контакта с подложкой. Кроме того, способ не позволяет с большой точностью регулировать температуру процесса, что затрудняет получение слоя с заданными свойствами.

Цель изобретения – повышение износостойкости покрытия за счет снижения пористости и повышения прочности сцепления с основой.

Поставленная цель достигается за счет того, что на металлическую подложку наносят суспензию частиц металлического порошка в неорганическом связующем – стекле натриево-жидком, слой суспензии наносят заданной толщины. Нагревание ведут в среде расплава синтетического боратного шлака с основностью $B = 0,25-0,45$ до температуры, превышающей температуру солидуса наносимого слоя и ниже температуры солидуса материала подложки.

Использование в качестве неорганического связующего стекла натриево-жидкого обусловлено сходством по составу с применяемыми синтетическими боратными шлаками, необходимостью обеспечения сцепления частиц порошка между собой и подложкой и для локального раскисления поверхности частиц металлического порошка и подложки в начальный момент времени.

Количество применяемого стекла натриево-жидкого выбирается исходя из обеспечения следующих свойств: связывание всех частиц между собой; сцепление полученной суспензии с подложкой по всей поверхности; получение суспензии такой консистенции, при нанесении которой образуется равномерный по толщине слой; получение фиксированного слоя необходимой толщины, и составляет 4,5–7% от объема используемого порошка.

При нагревании в расплаве синтетического боратного шлака подложки с нанесенным слоем стекло-натриево-жидкое разлагается на оксид натрия Na_2O и оксид кремния SiO_2 . Оксид натрия Na_2O выходит из слоя в шлак, не изменяя его свойств. Оксид кремния вступает во взаимодействие с оксидными пленками поверхностей час-

тиц порошка и подложки, частично разрушая, связывает их и выводит в шлак, тем самым обеспечивает локальное раскисление в первоначальный момент времени протекания процесса и не способствует образованию пор в слое. Количество окиси кремния SiO_2 , входящее в состав стекла натриево-жидкого, не обеспечивает полного очищения поверхности частиц порошка и подложки от окисных пленок. Последующее очищение поверхности осуществляет за счет использования синтетического боратного шлака. Входящий в состав шлака борный ангидрид вступает во взаимодействие с окисными пленками, полностью очищая поверхность от них.

При этом количественное содержание ангидрида в шлаке определяет его химическую активность и выражается через коэффициент основности B .

Используемый синтетический боратный шлак должен обладать следующими свойствами: высокая равномерность и быстрота нагрева; возможность получения температуры расплава с точностью $\pm 10^\circ\text{C}$; растворение и очистка от окислов поверхностей подложки и частиц порошка; защита подложки и частиц порошка от вредного воздействия кислорода воздуха как во время самого процесса, так и при переносе на открытом воздухе; стабильность химического состава нанесенного слоя; препятствие порообразованию; препятствие короблению и обезуглероживанию; практическое отсутствие деформаций.

Применение синтетического боратного шлака с основностью $B = 0,25-0,45$ обусловлено перечисленными свойствами. Использование шлака с основностью $B < 0,25$ приводит к взаимодействию шлака с металлом подложки и снижению прочности сцепления наносимого слоя и подложки. Применение шлака с основностью $B > 0,45$ приводит к неэффективной очистке поверхностей подложки и частиц порошка, что снижает прочность сцепления наносимого слоя и подложки. Влияние основности применяемого синтетического боратного шлака на качество наносимого слоя определено экспериментально.

Для получения слоя заданной толщины необходимо нанести слой суспензии определенной толщины.

На поверхность подложки наносят слой суспензии толщиной

$$H_1 = \frac{V_1}{S_0}, \quad (1)$$

5

1688981

6

где H_1 — толщина наносимого слоя, мм;
 V_1 — объем, занимаемый слоем, покрывающим подложку, мм³;
 S_0 — единичная площадь поверхности подложки, мм².
 По окончании процесса получают слой толщиной

$$H_0 = \frac{V_0}{S_0}, \quad (2)$$

где H_0 — толщина слоя, который необходимо получить, мм;
 V_0 — объем, занимаемый получаемым слоем, мм³.
 Выразим H_1 через H_0 , используя формулы (1) и (2):

$$S_0 = \frac{V_1}{H_1} = \frac{V_0}{H_0} \Rightarrow H_1 = \frac{V_1}{V_0} \cdot H_0 \quad (3)$$

Распишем подробно величины V_1 и V_0 и выразим их через объем взятого металлического порошка. При этом

$$V_1 = V_n + V_{ж.с.}, \quad (4)$$

где V_n — объем, занимаемый металлическим порошком, мм³;

$V_{ж.с.}$ — объем, занимаемый жидким стеклом, мм³.

Зная определенный экспериментально объем $V_{ж.с.}$, выраженный через V_n , запишем

$$V_{ж.с.} = \frac{(4,5 - 7)}{100} \cdot V_n, \quad (5)$$

Для проведения расчетов начальный объем металлического порошка примем равным 1, тогда

$$V_1 = [1 + (0,045 - 0,07)] V_n = (1,045 - 1,07) \times V_n,$$

при этом $V_0 = V_n$.

Подставляя значения V_1 и V_0 , выраженные через V_n , в формулу (3), получим зависимость между толщинами наносимого и получаемого слоев:

$$H_1 = \frac{V_1}{V_0} \cdot H_0 = (1,045 - 1,07) \cdot H_0. \quad (6)$$

Зная полученную зависимость, можно получить слой заданной толщины.

П р и м е р. Предлагаемый способ образования износостойчивого слоя на метал-

лической подложке реализован следующим образом.

Исходные данные: металлическая подложка из стали 45 ГОСТ 1050-74; суспензия состоящая из 70% порошка Fe-Cr (ФЧ456 ГОСТ 4757-70), 30% порошка бронзы (БрОФ10-1 ОСТ 1.90054-72) и 6% от объема металлического порошка стекла натриевого жидкого (ГОСТ 13078-81); расплав синтетического боратного шлака АН-Ш1 ТУ 21 УССР 57-77 основности В = 0,35.

На металлическую подложку, очищенную от грязи, наносят слой суспензии толщиной 1,15 мм. Затем подложку помещают в шкаф сушильный, где нагревают до 180°C и выдерживают в течение 1 ч. После этого подложку помещают в ванну с расплавом синтетического боратного шлака, имеющего температуру 960°C и выдерживают в течение 0,25 ч.

Извлеченная из ванны подложка покрывается слоем застывшего шлака, для его отделения подложку опускают в ванну с водой температурой 20°C. В результате получают слой толщиной 1,10 мм.

Проводили испытания на износ образцов. Износ образцов устанавливали путем взвешивания их до и после испытаний на аналитических весах типа ВЛА-200г-М с точностью до 0,1 мг.

Полученные результаты исследований образцов на износ представлены в таблице.

На основании полученных данных установлено, что массовый износ образца, обработанного по предлагаемому способу, на 14% меньше массового износа образца, обработанного по прототипу.

Ф о р м у л а и з о б р е т е н и я

Способ получения износостойкого покрытия, включающий приготовление смеси из металлического порошка и связующего, нанесение ее на металлическую основу, нагрев до температуры, превышающей температуру солидуса смеси, но ниже температуры солидуса материала основы, отличающийся тем, что, с целью повышения износостойкости покрытия за счет снижения его пористости и увеличения прочности сцепления с основой, при смешивании в качестве связующего берут жидкое натриево-стекло в количестве 4,5-7% от объема металлического порошка, а нагрев проводят в среде расплава синтетического боратного шлака с основностью 0,25-0,45.

Окончание приложения И

1688981

| Способ | Количество, % | Пористость, % | Предел прочности, МПа | Длительность испытаний, ч | Смазочная жидкость и ее подача | Частота вращения, rpm | Удельная нагрузка, МПа | Массовый износ, мг |
|--|---------------|---------------|-----------------------|---------------------------|--|-----------------------|------------------------|--------------------|
| Прототип: температура 960°C, среда нагрева - вакуум 10 ⁻⁴ , порошок (Фх650 ГОСТ 4757-79), порошок бронзы (БрОФ10-1 ОСТ.90954-72), азидное связующее (ТУ 7-09-4347-77) | 56 | | | | Масло моторное И-10Г ₂ (ГОСТ 17479, 1-85), 8-10 капель в минуту | 500 | 12 | 8,7 |
| Предлагаемый: температура 960°C, среда нагрева - синтетический богатый шлан основности П-0,35, порошок (Фх650 ГОСТ 4757-79), порошок бронзы (БрОФ10-1 ОСТ 1.90054-72), стекло натриевое жидкое (ГОСТ 13078-81) | 70 30 6 | 4 и 4 5 | 275 345 | 3 3 | Масло моторное И-10Г ₂ (ГОСТ 17479, 1-85), 8-10 капель в минуту | 500 | 12 | 7,5 |

Утверждаю

Генеральный директор

ОАО «Сельхозтехника»

В.Н. Азарнов

23 марта 2018г.



АКТ

ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ПОСЕВНЫХ АГ- РЕГАТОВ

Комиссия в составе: представителей ОАО «Сельхозтехника»: главного инженера Седова Александра Александровича, мастера сервисного цеха Савинова Павла Михайловича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента В.Н. Буйлова, доцента И.В. Люлякова составила настоящий акт внедрения технологий восстановления и упрочнения стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

Основанием для внедрения являлись положительные результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний, проведенных в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на сельскохозяйственных предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана и передана в ОАО «Сельхозтехника» техническая документация на технологические процессы восстановления и упрочнения стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

2. Подготовлена опытная партия восстановленных стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов в количестве 160 штук для прове-

Продолжение приложения К

дения эксплуатационных испытаний на предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

3. Разработаны и переданы в ОАО «Сельхозтехника» рекомендации по восстановлению и упрочнению стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудниками ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ актуальной и имеющей важное значение для предприятий технического сервиса АПК.

2. Рассмотренные технологии являются эффективными для восстановления работоспособности и увеличения ресурса стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

3. Рекомендовать данные технологии к внедрению на предприятиях, занимающихся техническим сервисом почвообрабатывающих агрегатов.

4. Ожидаемый годовой экономический эффект при программе восстановления 40000 деталей составит 2150 тыс. руб.

Представители

ОАО «Сельхозтехника»

 А.А. Седов

«23» марта 2018 г.

 П.М. Савинов

«23» марта 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

«23» марта 2018 г.

 В.Н. Буйлов

«23» марта 2018 г.

 И.В. Люляков

«23» марта 2018 г.

Продолжение приложения К


 Приложение
 УТВЕРЖДАЮ *Мель*
 Проректор СГУ по научной работе
 д.ф.-м.н., профессор Усанов Д.А.
 30.01.2005 г.

АКТ ОБ ИСПЫТАНИИ

В лаборатории анализа природных сред СГУ были проведены исследования распределения бора и углерода по толщине слоя на стальных образцах, упрочнение которых проводилось методом электролитного борирования. Исследования проводились методом вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на магнитном усовершенствованном масс-спектрометре МИ-1305, оснащенный универсальной приставкой для исследования твердых тел, включающей ионную пушку и камеру мишени. Диапазон исследуемых атомных масс составлял от 1 до 230 а.е.м. Подготовленные образцы устанавливали в держателе мишени. Мишень помещали в рабочую камеру установки, из которой откачивали воздух до получения вакуума на уровне давления $133,3 \cdot 10^{-6}$ Па. Бомбардировка мишени осуществлялась ионами аргона с энергией 2 кэВ при $i = 1$ мА/см²; диаметр пучка на образце 1 мм, интенсивность тока 5 мкА.

Глубинные профили концентраций веществ по толщине измеряли путем регистрации сигнала вторичных ионов исследуемого вещества как функции времени распыления (толщины анализируемого слоя). При этом принималось, что концентрация вещества пропорциональна интенсивности вторичных ионов.

В результате исследований установлено, что фазовые переходы в слоях толщиной от 110 до 180 мкм сопровождаются резким скачком концентрации бора: от 16 до 9 % на границе раздела фаз FeB и Fe₂B и от 7 до 0,7 % на границе раздела Fe₂B и αFe₂B. В пределах каждой из фаз концентрация бора плавно уменьшается от поверхности в глубину: для FeB – от 18 до 16 %; для Fe₂B – от 9 до 7 %; для αFe₂B – от 0,7 до 0 %. Концентрация углерода в начале переходной зоны достигает пикового значения (в 1,5...2 раза превышает среднее содержание его в сплаве) и плавно уменьшается до соответствующей его концентрации в сплаве.

Зав. лаб. анализа природных
сред СГУ, к.т.н.

к.т.н., доцент

инженер

А.Г. Жуков
Жуков А.Г.

В.Н. Буйлов
Буйлов В.Н.

И.В. Люляков
Люляков И.В.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ
 Директор НИИ Химии СГУ
 Севостьянов В.П.
 2003 г.



АКТ ОБ ИСПЫТАНИИ

В лаборатории химии твердого тела НИИ Химии СГУ были проведены исследования фазового состава боридных слоев на стальных образцах, упрочнение которых проводилось методом электролитного борирования. Количественный фазовый анализ осуществлялся рентгенографическим методом на дифрактометре ДРОН-3,0. Источником рентгеновского излучения была трубка с железным анодом. Сканирование образцов в интервале брэгговских углов 0–40 град. проводилось с различными скоростями: 2 град./мин для первичной оценки состава и 0,5 град./мин для прецизионного фазового количественного анализа. Идентификация фаз осуществлялась на основе данных, представленных в Международной картотеке Общества испытаний и материалов ASTM.

Исследованию подвергались четыре опытных образца, подготовленных в лабораториях ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И.Вавилова». Рентгенофазовый анализ проводился методом эталона. Последним служило железо марки АРМКО высокой степени чистоты.

Результаты рентгенофазового анализа

1. Установлено, что все четыре образца содержат три фазы: железо, борид железа FeB и борид железа Fe₂B.
2. Максимальное содержание железа после борирования не превышает 36 масс.%. Максимальное содержание фазы Fe₂B составляет 63 масс.%, фазы FeB 43 масс.%.
 3. Содержание оксидов железа не превышало 2–3 масс.%. Других фаз (в пределах чувствительности метода рентгенофазового анализа) не обнаружено.

Дифрактограммы образцов прилагаются.


Зав. лаб. химии твердого тела НИИ Химии СГУ
 профессор каф. общей и неорг. химии

 Дмитриенко А.О.

к.т.н., доцент

 Буйлов В.Н.

инженер

 Люляков И.В.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ
 Руководитель ПСЛ
 ОАО «Саратовстройстекло»
 _____ Давыдова С.Н.
 12 октября 2004 г.

АКТ ОБ ИСПЫТАНИИ

В промышленно-санитарной лаборатории ОАО «Саратовстройстекло» были проведены исследования хрупкости упрочненных поверхностей на стальных образцах, полученных электролизным борированием. Исследование проводилось с помощью микротвердомера ПМТ-3. Оценка хрупкости материала осуществлялась по числу и характеру трещин у отпечатка алмазной призмы, вдавливаемой при нагрузке 0,196; 0,49; и 0,98 Н в исследуемую поверхность, а также по темпу нарастания разрушения слоя с ростом нагрузки. По характеру трещин и сколов у отпечатка с помощью пятибалльной шкалы определялся бал хрупкости. Показатель хрупкости рассчитывался как произведение суммарного балла хрупкости на величину его производной по нагрузке. Длительность нагружения, выдержка под нагрузкой и ее снятие осуществлялись в течение 20, 15 и 5 секунд соответственно. Отпечатки изучались на электронном микроскопе МИМ-8 при 300-кратном увеличении.

Исследованию подвергались опытные образцы из сталей марок Ст3, 20, 30, 45 подготовленные в лабораториях ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова».

В результате исследований установлено, что максимальной хрупкостью обладает упрочненная поверхность на стали марки Ст3 (показатель хрупкости в соответствии с применяемыми нагрузками на призму составляет 9,1; 15,5; 23,6), а минимальной – упрочненные поверхности на сталях марок 30 и 45 (показатель хрупкости составляет соответственно 1,5; 7,2; 13,8 и 3,1; 7,5; 13,1).

инженер

к.т.н., доцент

инженер

 Исаев А.Г.

 Буйлов В.Н.


 Людяков И.В.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ

Председатель СХПК

«Борьба»

 Табак Г.И./

23 октября 2004 г.



АКТ

эксплуатационных испытаний восстановленных (опытных) стрельчатых лап культиватора типа КПС-4.

Комиссия в составе: главного инженера Пущева А.Н., механизатора Соколова Н.И., к. т. н. Буйлова В.Н., инженера Люлякова И.В. составила настоящий акт о результатах эксплуатационных испытаний указанных выше лап культиваторов.

В период с 15 апреля по 23 сентября 2004 года в СХПК «Борьба» Пугачевского района проводились испытания восстановленных (опытных) и серийных стрельчатых лап шириной захвата 270 и 330 мм.

Целью испытаний являлось определение интенсивности изнашивания сравниваемых рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Два культиватора КПС-4 с серийными и опытными лапами агрегатировались трактором Т-150К. Сравнимые лапы ставились на культиваторы вперемешку.

Испытания велись при обработке среднесуглинистых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 15 до 25%, а твердость – от 0,15 до 0,5 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,2 км/ч.

Характеристики сравниваемых лап и результаты испытаний приведены в таблице.

В результате испытаний ресурс восстановленных стрельчатых лап после наработки 45,2 га/лапу превышает в 1,2–1,5 раза ресурс серийных лап. Кроме того восстановленные лапы имеют значительный остаточный ресурс при удовлетворительной остроте.

Комиссия:

 /Пущев А.Н./
 /Соколов Н.И./
 /Буйлов В.Н./
 /Люляков И.В./

Продолжение приложения К



АКТ

Мы нижеподписавшиеся: главный инженер Лупенко Ч.А., главный агроном Мотина Г.В., к.т.н. Буйлов В.Н., инженер Люляков И.В. составили настоящий акт, в том, что в ООО "Искра" Воскресенского района проведены эксплуатационные испытания восстановленных (опытных) культиваторных лап и серийных. Испытания проводились в период с 10 апреля по 15 сентября 2004 года.

Целью испытаний являлось определение ресурса опытных стрельчатых лап.





Экспериментальные лапы были поставлены на два культиватора КТС – 4, которые агрегатировались трактором Т – 150К. Сравнительные лапы ставились на культиватор попеременно.

Испытания велись при обработке средне- и тяжелосуглинистых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний находилась в пределах 13...28%, твердость -- от 0,3 до 0,7 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,5 км/ч.

Характеристика сравниваемых лап и результаты испытаний изложены в таблице.

В результате проведенных испытаний установлено, что ресурс восстановленных стрельчатых лап превышает в 1,5-2 раза ресурс серийных.

Комиссия:

 Лупенко Ч.А./
 Мотина Г.В./
 Буйлов В.Н./
 Люляков И.В./

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ
ИП Глава К(Ф)Х
Чепелева Ольга Васильевна

/О.В. Чепелева /
30 сентября 2020 г.

АКТ

СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСНЫХ
ИСПЫТАНИЙ КУЛЬТИВАТОРОВ УКОМПЛЕКТОВАННЫХ
ЛАПАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ
И СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЯМ

Комиссия в составе представителей ИП Глава К(Ф)Х Чепелева Ольга Васильевна: механика Чепелева Романа Николаевича, механизатора Косова Валерия Владимировича, механизатора Деревянова Вячеслава Алексеевича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: доцента, кандидата технических наук Буйлова Валерия Николаевича, доцента, кандидата технических наук Люлякова Ивана Викторовича составила настоящий акт о результатах сравнительных эксплуатационных ресурсных испытаний культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

В период с 15 апреля по 30 сентября 2020 года в ИП Глава К(Ф)Х Чепелева Ольга Васильевна Сердобского района Пензенской области проводились сравнительные эксплуатационные ресурсные испытания культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

Целью испытаний являлось определение межремонтного ресурса сравниваемых культиваторов, а также их рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Культиваторный агрегат, состоящий из двух культиваторов комплектовался следующим образом: на один культиватор КПС-4 устанавливались рабочие органы, восстановленные по существующей технологии, а другой ком-



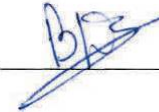
Продолжение приложения К

плектовался по следующей схеме: по следам движителей трактора и опорных колес агрегата на раме устанавливались лапы борированные с двух сторон, в первом ряду устанавливались лапы борированные с одной стороны и на втором ряду рамы крепились наплавленные рабочие органы. Укомплектованный таким образом культиваторный агрегат приводил в движение трактор ХТА-220В.

Испытания велись при обработке черноземной почвы на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 17 до 25%, а твердость – от 1,7 до 3,5 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,7 км/ч.

В результате сравнительных ресурсных испытаний культиваторов установлено следующее: рабочие органы (восстановленные по существующей технологии) перемещающиеся по следам движителей и опорных колес достигали предельного состояния при достижении наработки 29,6...31,4 га на одну лапу (при этом лапы в первом и втором ряду имеют запас остаточного ресурса), а у культиватора укомплектованного рабочими органами (по предлагаемой схеме) восстановленными, по разработанным технологиям, рабочими органами предельное состояние наступало при достижении наработки 50,4...52,6 га на одну лапу.

Представители ИП Глава К(Ф)Х
Бузунов В.А.

 Р.Н. Чепелев
30 сентября 2020 г.
 В.В. Косов
30 сентября 2020 г.
 В.А. Дервянов
30 сентября 2020 г.

Представители ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ

 В.Н. Буйлов
30 сентября 2020 г.
 И.В. Люляков
30 сентября 2020 г.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ

ИП Глава К(Ф)Х

Бузунов Виктор Андреевич



АКТ

**СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСНЫХ
ИСПЫТАНИЙ КУЛЬТИВАТОРОВ УКОМПЛЕКТОВАННЫХ
ЛАПАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ
И СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЯМ**

Комиссия в составе представителей ИП Глава К(Ф)Х Бузунов Виктор Андреевич: инженера Ефремова Виктора Ивановича, механика Старсенина Андрея Владимировича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: доцента, кандидата технических наук В.Н. Буйлова Валерия Николаевича, доцента, кандидата технических наук И.В. Люлякова Ивана Викторовича составила настоящий акт о результатах сравнительных эксплуатационных ресурсных испытаний культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

В период с 15 апреля по 24 сентября 2019 года в ИП Глава К(Ф)Х Бузунов Виктор Андреевич Еланского района Волгоградской области проводились сравнительные эксплуатационные ресурсных испытания культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

Целью испытаний являлось определение межремонтного ресурса сравниваемых культиваторов, а также их рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Культиваторный агрегат, состоящий из двух культиваторов комплектовался следующим образом: на один культиватор КПС-4 устанавливались ра-



Продолжение приложения К

бочие органы, восстановленные по существующей технологии, а другой комплектовался по следующей схеме: по следам движителей трактора и опорных колес агрегата на раме устанавливались лапы борированные с двух сторон, в первом ряду устанавливались лапы борированные с одной стороны и на втором ряду рамы крепились наплавленные рабочие органы. Укомплектованный таким образом культиваторный агрегат приводил в движение трактор Т-150К.



Испытания велись при обработке среднесуглинистых каштановых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 18 до 24%, а твердость – от 1,8 до 4,6 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,7 км/ч.

В результате сравнительных ресурсных испытаний культиваторов установлено следующее: рабочие органы (восстановленные по существующей технологии) перемещающиеся по следам движителей и опорных колес достигали предельного состояния при достижении наработки 25,6...27,4 га на одну лапу (при этом лапы в первом и втором ряду имеют запас остаточного ресурса), а у культиватора укомплектованного рабочими органами (по предлагаемой схеме) восстановленными, по разработанным технологиям, рабочими органами предельное состояние наступало при достижении наработки 45,4...47,6 га на одну лапу.

Представители ИП Глава К(Ф)Х
Бузунов В.А.


В.И. Ефремов
24 сентября 2019 г.

А.В. Старсенин
24 сентября 2019 г.

Представители ФГБОУ ВО
Саратовский ГАУ


В.Н. Буйлов
24 сентября 2019 г.

И.В. Люляков
24 сентября 2019 г.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Возрождение»

А.С. Мосолюгин /

27 сентября 2017 г.



АКТ

**СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСНЫХ
ИСПЫТАНИЙ КУЛЬТИВАТОРОВ УКОМПЛЕКТОВАННЫХ ЛАПАМИ,
ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ И СУЩЕСТВУЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИЯМ**

Комиссия в составе представителей ООО «Возрождение»: главного инженера Роточкова Александра Васильевича, механизатора Носачева Сергея Владимировича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента В.Н. Буйлова, доцента И.В. Люлякова составила настоящий акт о результатах сравнительных эксплуатационных ресурсных испытаний культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

В период с 17 апреля по 27 сентября 2017 года в ООО «Возрождение» Перелюбского района проводились сравнительные эксплуатационные ресурсных испытания культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

Целью испытаний являлось определение межремонтного ресурса сравниваемых культиваторов, а также их рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Культиваторный агрегат, состоящий из двух культиваторов комплектовался следующим образом: на один культиватор КПС-4 устанавливались рабочие органы восстановленные по существующей

Продолжение приложения К

технологии, а другой комплектовался по следующей схеме: по следам движителей трактора и опорных колес агрегата на раме устанавливались лапы борированные с двух сторон, в первом ряду устанавливались лапы борированные с одной стороны и на втором ряду рамы крепились наплавленные рабочие органы. Укомплектованный таким образом культиваторный агрегат приводил в движение трактор Т-150К.

Испытания велись при обработке среднесуглинистых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 14 до 25%, а твердость – от 0,17 до 0,51 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,8 км/ч.

В результате сравнительных ресурсных испытаний культиваторов установлено следующее: рабочие органы (восстановленные по существующей технологии) перемещающиеся по следам движителей и опорных колес достигали предельного состояния при достижении наработки 24,3...26,8 га на одну лапу (при этом лапы в первом и втором ряду имеют запас остаточного ресурса), а у культиватора укомплектованного рабочими органами (по предлагаемой схеме) восстановленными, по разработанным технологиям, рабочими органами предельное состояние наступало при достижении наработки 45,7...47,5 га на одну лапу.

Представители

ООО «Возрождение»

 А.В. Роточков

27 сентября 2017 г.

 С.В. Носачев

27 сентября 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

27 сентября 2017 г.

 В.Н. Буйлов

27 сентября 2017 г.

 И.В. Люляков

27 сентября 2017 г.

Продолжение приложения К

УТВЕРЖДАЮ

Директор

ООО «Степная Нива»

/С.В. Наточеев/

26 сентября 2017 г.



АКТ

**СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСНЫХ
ИСПЫТАНИЙ КУЛЬТИВАТОРОВ УКОМПЛЕКТОВАННЫХ ЛАПАМИ,
ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ И СУЩЕСТВУЮЩЕЙ
ТЕХНОЛОГИЯМ**

Комиссия в составе представителей ООО «Степная Нива»: главного инженера Роточкова Александра Васильевича, механизатора Весалиева Алексея Анатольевича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента В.Н. Буйлова, доцента И.В. Люлякова составила настоящий акт о результатах сравнительных эксплуатационных ресурсных испытаний культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

В период с 17 апреля по 26 сентября 2017 года в ООО «Степная Нива» Перелюбского района проводились сравнительные эксплуатационные ресурсных испытания культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

Целью испытаний являлось определение межремонтного ресурса сравниваемых культиваторов, а также их рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Культиваторный агрегат, состоящий из двух культиваторов комплектовался следующим образом: на один культиватор КПС-4 устанавливались рабочие органы восстановленные по существующей

Продолжение приложения К

технологии, а другой комплектовался по следующей схеме: по следам движителей трактора и опорных колес агрегата на раме устанавливались лапы борированные с двух сторон, в первом ряду устанавливались лапы борированные с одной стороны и на втором ряду рамы крепились наплавленные рабочие органы. Укомплектованный таким образом культиваторный агрегат приводил в движение трактор Т-150К.

Испытания велись при обработке среднесуглинистых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 17 до 23%, а твердость – от 0,16 до 0,52 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,6 км/ч.

В результате сравнительных ресурсных испытаний культиваторов установлено следующее: рабочие органы (восстановленные по существующей технологии) перемещающиеся по следам движителей и опорных колес достигали предельного состояния при достижении наработки 25,6...27,4 га на одну лапу (при этом лапы в первом и втором ряду имеют запас остаточного ресурса), а у культиватора укомплектованного рабочими органами (по предлагаемой схеме) восстановленными, по разработанным технологиям, рабочими органами предельное состояние наступало при достижении наработки 45,4...47,6 га на одну лапу.

Представители

ООО «Степная Нива»

 А.В. Роточков

26 сентября 2017 г.

 А.А. Весалиев

26 сентября 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО


Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

26 сентября 2017 г.

 В.Н. Буйлов

26 сентября 2017 г.

 И.В. Люляков

26 сентября 2017 г.

УТВЕРЖДАЮ
Директор ООО «Родина»
/В.Н. Аистов/
25 сентября 2017 г.

АКТ

СРАВНИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕСУРСНЫХ ИСПЫТАНИЙ КУЛЬТИВАТОРОВ УКОМПЛЕКТОВАННЫХ ЛАПАМИ, ВОССТАНОВЛЕННЫМИ ПО ПРЕДЛАГАЕМЫМ И СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИЯМ

Комиссия в составе представителей ООО «Родина»: главного инженера Бобрешева Олега Евгеньевича, механизатора Кулика Сергея Викторовича и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента В.Н. Буйлова, доцента И.В. Люлякова составила настоящий акт о результатах сравнительных эксплуатационных ресурсных испытаний культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

В период с 17 апреля по 25 сентября 2017 года в ООО «Родина» Перелюбского района проводились сравнительные эксплуатационные ресурсных испытания культиваторов укомплектованных лапами, восстановленными по предлагаемым и существующей технологиям.

Целью испытаний являлось определение межремонтного ресурса сравниваемых культиваторов, а также их рабочих органов в условиях рядовой эксплуатации.

Культиваторный агрегат, состоящий из двух культиваторов комплектовался следующим образом: на один культиватор КПС-4 устанавливались рабочие органы восстановленные по существующей технологии, а другой комплектовался по следующей схеме: по следам движителей трактора и опорных колес агрегата на раме устанавливались лапы борированные с двух сторон, в первом ряду устанавливались лапы борированные с одной стороны и на вто-

Продолжение приложения К

ром ряду рамы крепились наплавленные рабочие органы. Укомплектованный таким образом культиваторный агрегат приводил в движение трактор Т-150К.

Испытания велись при обработке среднесуглинистых почв на глубину 8...12 см. Влажность почвы за период испытаний менялась в пределах от 15 до 25%, а твердость – от 0,15 до 0,5 МПа. Скорость движения агрегата составляла в среднем 9,2 км/ч.

В результате сравнительных ресурсных испытаний культиваторов установлено следующее: рабочие органы (восстановленные по существующей технологии) перемещающиеся по следам движителей и опорных колес достигали предельного состояния при достижении наработки 25...27 га на одну лапу (при этом лапы в первом и втором ряду имеют запас остаточного ресурса), а у культиватора укомплектованного рабочими органами (по предлагаемой схеме) восстановленными, по разработанным технологиям, рабочими органами предельное состояние наступало при достижении наработки 45...47 га на одну лапу.

Представители ООО «Родина»

 О.Е. Бобрешев

28 сентября 2017 г.

 С.В. Кулик

25 сентября 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

25 сентября 2017 г.

 В.Н. Буйлов

25 сентября 2017 г.

 И.В. Люляков

25 сентября 2017 г.

Продолжение приложения К

Утверждаю
генеральный директор
ОАО «Алтаец»
И.Ю. Красикова
«02» марта 2018 г.

**АКТ****ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ПОСЕВНЫХ
АГРЕГАТОВ**

Комиссия в составе: представителей ОАО «Алтаец»: начальника цеха С.М. Хлебникова, инженера Н.И. Бажановой и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова, доцента В.Н. Буйлова, доцента И.В. Люлякова составила настоящий акт внедрения технологий восстановления и упрочнения стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

Основанием для внедрения являлись положительные результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний, проведенных в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана и передана в ОАО «Алтаец» техническая документация на технологические процессы восстановления и упрочнения стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

2. Подготовлена опытная партия восстановленных стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов в количестве 120 штук для проведения эксплуатационных испытаний на предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

Продолжение приложения К

3. Разработаны и переданы в ОАО «Алтаец» рекомендации по восстановлению и упрочнению стрельчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудниками ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ актуальной и имеющей важное значение для ремонтных предприятий АПК.

2. Рассмотренные технологии являются эффективными для восстановления работоспособности и увеличения ресурса стрельчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

3. Рекомендовать данные технологии к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом сельскохозяйственных агрегатов.

4. Ожидаемый годовой экономический эффект при программе восстановления 60000 деталей составит 3180 тыс. руб.

Представители

ОАО «Алтаец»

 С.М. Хлебников

«02» марта 2018 г.

 Н.И. Бажанова

«02» марта 2018 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

«02» марта 2018 г.

 В.Н. Буйлов

«02» марта 2018 г.

 И.В. Люляков

«02» марта 2018 г.

Продолжение приложения К

Утверждаю

Директор

ООО «Сельхозтехника»

В.П. Кузьмин

«15» февраля 2017 г.

**АКТ****ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ
СТРЕЛЬЧАТЫХ ЛАП ПОЧВООБРАБАТЫВАЮЩИХ И ПОСЕВНЫХ
АГРЕГАТОВ**

Комиссия в составе: представителей ООО «Сельхозтехника»: главного инженера А.А. Ефанова, начальника цеха Д.Н. Кудлаева, технолога А.В. Бубнова и представителей ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ: профессора, доктора технических наук В.В. Сафонова; доцента, кандидата технических наук В.Н. Буйлова; доцента, кандидата технических наук И.В. Люлякова составила настоящий акт внедрения технологий восстановления и упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

Основанием для внедрения являлись положительные результаты лабораторных и эксплуатационных испытаний, проведенных в ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ и на предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

В процессе внедрения выполнен следующий объем работ:

1. В ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ разработана и передана в ООО «Сельхозтехника» техническая документация на технологические процессы восстановления и упрочнения стрельчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

2. Подготовлена опытная партия восстановленных стрельчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов в количестве 100 штук для

Окончание приложения К

проведения эксплуатационных испытаний на предприятиях агропромышленного комплекса Саратовской области.

3. Разработаны и переданы в ООО «Сельхозтехника» рекомендации по восстановлению и упрочнению стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

На основании рассмотренных материалов комиссия установила:

1. Признать работу, проводимую сотрудниками ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ актуальной и имеющей важное значение для ремонтных предприятий АПК.

2. Рассмотренные технологии являются эффективными для восстановления работоспособности и увеличения ресурса стрелчатых лап почвообрабатывающих и посевных агрегатов.

3. Рекомендовать данные технологии к внедрению на предприятиях, занимающихся ремонтом сельскохозяйственных агрегатов.

4. Ожидаемый годовой экономический эффект при программе восстановления 50000 деталей составит 2650 тыс. руб.

Представители

ООО «Сельхозтехника»

 А.А. Ефанов

«15» февраля 2017 г.

 Д.Н. Кудлаев

«15» февраля 2017 г.

 А.В. Бубнов

«15» февраля 2017 г.

Представители ФГБОУ ВО

Саратовский ГАУ

 В.В. Сафонов

«15» февраля 2017 г.

 В.Н. Буйлов

«15» февраля 2017 г.

 И.В. Люляков

«15» февраля 2017 г.

«ВЕРНО»



Первый заместитель
министра сельского хозяйства
Саратовской области
Д.А. Уполовников
от «22» апреля 2022 года

Выписка

из протокола заседания секции по механизации сельского хозяйства научно-технического Совета министерства сельского хозяйства Саратовской области

ПОВЕСТКА ДНЯ:

Рассмотрение вопроса о возможности рекомендации к использованию результатов исследований по теме докторской диссертации «Повышение долговечности почвообрабатывающей техники восстановлением и упрочнением рабочих органов наплавкой и борированием», выполненной кандидатом технических наук, доцентом ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова Буйловым В.Н.

ВЫСТУПИЛ: Буйлов Валерий Николаевич - кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Математика, механика и инженерная графика» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова. В докладе были представлены научно-технические исследования по разработанным технологиям восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники и оборудованию для их осуществления, что подтверждено авторским свидетельством и патентами на изобретения РФ (А.С. №1688981, Пат. №2107601, Пат. №2114184, Пат. №2139356, Пат. №2164963, Пат. №2325256, Пат. №2241586, Пат. №2392102, Пат. № 2572116).

Заслушав и обсудив доклад Буйлова В.Н., секция по механизации сельского хозяйства отмечает, что тема исследования актуальна и направлена на решение практически значимой проблемы – повышение долговечности почвообрабатывающей техники восстановлением и упрочнением ее рабочих органов.

Представлены сравнительные ресурсные испытания почвообрабатывающей техники, укомплектованной восстановленными рабочими органами. Результаты исследований показывают увеличение ресурса на 80%.

Секция по механизации сельского хозяйства научно-технического Совета министерства сельского хозяйства Саратовской области одобряет и рекомендует предприятиям АПК Саратовской области к внедрению в производство разработанные технологии и оборудование для восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Заместитель председателя секции:

Член секции:

Демин Е.Е.

Старцев С.В.

ПРОТОКОЛ

совещания о возможности рекомендации к внедрению результатов исследований по повышению долговечности почвообрабатывающей техники

от 17 мая 2022 г. № Б/Н

ПРЕДСЕДАТЕЛЬСТВОВАЛ
ЗАМЕСТИТЕЛЬ МИНИСТРА СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И
ПРОДОВОЛЬСТВИЯ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ
Д.В.ГЕРАСЕНКОВ

Присутствовали:

| | |
|--|--------------|
| Руководитель управления растениеводства и земледелия министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области | С.А.Кирсанов |
| Руководитель управления технической политики и мелиорации министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области | Р.В.Сучков |
| Руководитель государственной инспекции гостехнадзора Самарской области министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области | С.А.Акимов |
| Профессор кафедры «Технический сервис» ФГБОУ ВО Самарский ГАУ | В.А.Милюткин |
| Докторант ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, к.т.н., доцент (в режиме ВКС) | В.Н.Буйлов |

- I. О возможности рекомендации к внедрению результатов исследований по повышению долговечности почвообрабатывающей техники восстановлением и упрочнением рабочих органов наплавкой и борированием
(Буйлов, Милюткин)

2

1. Принять к сведению информацию докторанта ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова Буйлова В.Н. о результатах научно-технических исследований по разработке технологий и оборудования для восстановления и упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники и их эксплуатационных испытаний.

2. Управлению технической политики и мелиорации департамента растениеводства, механизации и мелиорации министерства сельского хозяйства и продовольствия Самарской области (Сучкову) довести информацию предприятиям АПК Самарской области о возможности использования в производстве разработанных технологий и оборудования для восстановления рабочих органов почвообрабатывающей техники.

Заместитель министра
сельского хозяйства и
продовольствия
Самарской области



Д.В.Герасенков