

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего  
образования

«Воронежский государственный аграрный университет  
имени императора Петра I»

*На правах рукописи*



Емцев Виталий Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ  
САМОТЕЧНЫХ ЗЕРНОПРОВОДОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ  
ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность: 05.20.03 – Технологии и средства технического обслуживания в  
сельском хозяйстве

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, доцент  
Астанин Владимир Константинович

**Воронеж – 2019**

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

Введение.....	4
Глава 1. Анализ литературных источников.....	10
1.1 Виды и устройства самотечных труб.....	10
1.2 Анализ износов. Виды износов труб.....	14
1.3 Анализ методов восстановления самотечных труб.....	25
1.4 Оборудование, применяемое для железнения и хромирования.....	32
1.5 Особенности электрокристаллизации железа и сплавов на его основе.....	42
1.6 Задачи исследования.....	48
Выводы по 1 главе.....	48
Глава 2 Анализ износов и теоретическое обоснование режимов электролитического восстановления зернопроводов.....	52
2.1 Исследование динамики изнашивания самотечных зернопроводов.....	52
2.2 Исследование динамики изнашивания восстановленных и упрочненных зернопроводов.....	57
2.3 Теоретические предпосылки к обоснованию режимов нанесения электролитических покрытий.....	61
Выводы по 2 главе.....	65
Глава 3 Программа и методики экспериментальных исследований.....	66
3.1 Методика нанесения покрытий.....	66
3.2 Приборы и оборудование.....	69
3.3 Анализ элементного состава покрытий.....	71
3.4 Методика определения износостойкости покрытий.....	73
Выводы по 3 главе.....	75

Глава 4	Результаты и анализ экспериментальных исследований.....	76
4.1	Исследование микротвердости Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытий...	76
4.2	Исследование влияния параметров процесса на содержание основных компонентов в покрытии.....	79
4.3	Исследование микроструктуры железо–никелевых (Fe-Ni) и железо-никель-фосфорных покрытий (Fe-Ni-P).....	81
4.4	Исследование выхода Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов по току.....	87
4.5	Исследование хромовых покрытий.....	91
4.6	Исследование износостойкости восстановленных Fe-Ni, Fe-Ni-P и хромовых покрытий.....	94
4.7	Производственные испытания восстановленных и упрочненных самотечных зернопроводов.....	96
	Выводы по 4 главе.....	99
Глава 5	Рекомендации производству и технико-экономическое обоснование эффективности восстановления зернопроводов.....	102
5.1	Технология восстановления зернопроводов Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями и упрочнение хромированием.....	102
5.2	Результаты внедрения и рекомендации производству.....	111
5.3	Экономическая эффективность восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов гальваническими покрытиями.....	113
	Выводы по 5 главе.....	120
	Заключение.....	122
	Список литературы.....	124
	Приложения.....	148

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** В агропромышленном комплексе Российской Федерации уделяется значительное внимание продовольственной безопасности страны. Важную роль в обеспечении сохранности зерна выполняют зернохранилища. Бесперебойная работа зернохранилищ обеспечивается множеством факторов. К их числу относятся процессы транспортировки зерна по самотечным системам зернопроводов. Так в Воронежской области эксплуатируется 43 элеватора и зернохранилища, 6 пивоваренных и мукомольных заводов и 10 зерносушилок. Суммарная протяженность самотечных транспортных систем составляет более 30 км. Местами, наиболее подверженными возникновению очагов истирания деталей зернопроводов, являются поворотные колена и прямые участки набора скорости и торможения зернового потока. Долговечность таких элементов самотеков едва достигает нескольких месяцев, а порой и нескольких недель. Остановка оборудования зерноперерабатывающего комплекса приводит к повышению трудоемкости, себестоимости обработки, к потерям зерна из-за повреждения его острыми кромками внутренней поверхности изношенного зернопровода и замедлению цикла переработки: очистки, сушки.

В настоящее время широко применяются различные способы восстановления и упрочнения деталей зернопроводов: такие как электроконтактная приварка стальных заплат, использование полимерных вставок и другие способы. Известно, что восстановление изношенных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин и оборудования железнением с последующим их упрочнением хромированием позволяет повысить долговечность деталей в 2-8 раз, а трудоемкость и стоимость восстановления изношенных деталей снизить на 30-40% [90, 91, 92, 95].

Таким образом, совершенствование технологии восстановления самотечных зернопроводов нанесением электролитических покрытий сплавами на основе железа и хрома с заданными физико-механическими свойствами на наиболее

изнашиваемых участках зернопроводов, посвященное повышению долговечности зернопроводов является актуальной задачей, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

**Степень разработанности темы исследования.** Изучению изнашивания рабочих органов сельскохозяйственных машин и оборудования потоками абразивных частиц посвящено большое количество работ ученых: А.И. Селиванова, Ю.А. Конкина, И.И. Трепененкова, И.В. Крагельского, Б.И. Костецкого, М.М. Тененбаума, С.П. Козырева, В.В. Кузнецова, Г.М. Сорокина и многих других [80, 98, 167, 168].

Вопросами восстановления деталей машин и оборудования функциональными покрытиями занимались С.Н. Вялых, В.А. Денисов, И.Г. Голубев, М.Н. Ерохин, В.П. Лялякин, В.Я. Микотин, А.Э. Северный, В.И. Черноиванов, Н.Н. Чупятов и другие [40, 47, 86, 93, 94, 178, 179, 180, 181, 182].

В источниках отечественной литературы современной теории электролитического нанесения покрытий на основе железа и хрома посвящены работы В.И. Серебровского, В.В. Серебровского, С.Ю. Жачкина, В.М. Юдина, Ю.А. Стекольников, А.И. Фаличевой, Ю.Р. Копылова, Ю.Е. Кисель, В.В. Сафонова, С.Д. Полищук, Ю.Н. Шалимова, И.А. Спицына, Ю.А. Захарова, Ю.П. Перелыгина, Г.В. Гурьянова и других [36, 56, 58, 67, 75, 126, 142, 151]. Отмечается, что легирование восстанавливаемого слоя фосфором повышает его износостойкость. В то же время применение электролитических технологий для восстановления и упрочнения зернопроводов недостаточно представлено в литературе. А так же недостаточно изучены способы нанесения электролитических покрытий в виде сплавов металлов и неметаллов на основе железа и хрома на внутренние поверхности тонкостенных цилиндрических деталей.

**Цель работы.** Повышение ресурса самотечных зернопроводов восстановлением изношенных поверхностей электролитическими железо-никелевыми и железо-никель-фосфорными сплавами и упрочнением хромом.

**Объект исследования.** Электролитические покрытия на основе железа и хрома восстанавливаемых поверхностей самотечных зернопроводов.

**Предмет исследования.** Закономерности формирования гальванических покрытий в зависимости от параметров и режимов процесса осаждения электролитических сплавов.

**Научная новизна:**

1. Аналитические зависимости динамики изнашивания стенки восстановленных зернопроводов сплавами на основе Fe-Ni-P и упрочненным хромированием, отличающиеся описанием периода притирания квадратичной функцией, износа восстанавливающего и упрочняющего слоев линейными функциями и объединенных в одну непрерывную функцию с помощью функции Хейвисайда.

2. Закономерности влияния условий осаждения электролитических Fe-Ni-P сплавов на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленных поверхностей зернопроводов.

3. Экспериментально подтвержденные результаты определения износостойкости и прочностных характеристик электролитических покрытий на основе Fe-Ni-P сплавов изношенных и восстановленных участков зернопроводов в сульфатных электролитах на нестационарных режимах осаждения.

**Методология исследований.** Применялся системный анализ комплекса известных теоретических и экспериментальных результатов по восстановлению и упрочнению деталей. Использовались физико-математические методы обработки исследований в производственных условиях эксплуатационных свойств поверхностных слоев из гальванических покрытий на основе Fe-Ni-P сплавов в сульфатных электролитах на нестационарных режимах осаждения. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных методик, приборов и оборудования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Аналитические зависимости динамики изнашивания зерновым

потоком стенок самотечных зернопроводов, покрытых слоем восстанавливающего и упрочняющего материала;

2. Практические закономерности формирования структуры и эксплуатационных свойств электролитических покрытий на основе железа и хрома;

3. Технологический процесс восстановления самотечных зернопроводов нанесением электролитических покрытий Fe-Ni, Fe-Ni-P с последующим упрочнением хромированием.

4. Рекомендации использования предложенного преобразователя токов катодного и анодного полупериодов, технологической оснастки для восстановления изношенных участков зернопроводов.

**Достоверность результатов**, полученных в ходе исследований, подтверждена применением современных методов исследования, поверенных приборов и оборудования, стандартных методик физико-механических исследований и статистических методов обработки результатов.

**Теоретическая значимость работы** состоит в получении аналитических зависимостей динамики изнашивания зерновым потоком стенок самотечных зернопроводов, покрытых слоем восстанавливающего и упрочняющего материала, новых закономерностей влияния условий осаждения электролитических сплавов Fe-Ni, Fe-Ni-P на структуру, физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленной поверхности участков зернопроводов.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке экономичного, экологичного технологического процесса, преобразователя токов катодного и анодного полупериодов, технологической оснастки и рекомендаций по восстановлению железо-никелевыми, железо-никель-фосфорными сплавами и упрочнением хромированием самотечных зернопроводов в условиях сельскохозяйственного предприятия.

**Личный вклад автора** состоит в определении направления научных исследований, участии на всех этапах процесса проведения теоретических и экспериментальных исследований, получении исходных данных, разработке плана экспериментальных исследований, проведении научных экспериментов, обработке и интерпретации экспериментальных данных, разработке и модернизации установок для нанесения электролитических покрытий с использованием асимметричного переменного тока, модернизации установки для испытаний деталей на изнашивание, апробации результатов исследования, подготовке публикаций по выполненной работе.

**Апробация работы.** Основные материалы исследований по диссертационной работе доложены и одобрены на международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича «Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения» в 2017 г., г. Воронеж; проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе: материалы международной научно-практической конференции в 2017 г., г. Воронеж; международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования в области естественных и технических наук» в 2018 г., г. Белгород; 33 международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы науки 21 века» в 2018 г., г. Москва; международной научно-практической конференции «Роль естественных и технических наук в современном обществе» в 2018 г., г. Белгород, IV международной научно-практической конференции «Информационные технологии и инновации на транспорте» в 2018 г., г. Орел, а также на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ в 2015–2018 годах.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 работы в журналах, указанных в «Перечне ВАК», и 1 статья в журнале,

входящем в базу данных Scopus.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения (общих выводов), списка литературы, включающего 196 отечественных и зарубежных публикаций, 3 приложений. Работа изложена на 155 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков и 8 таблиц.

## ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

### 1.1 Виды и устройства самотечных труб

Для производителей сельскохозяйственной продукции, для многих других предприятий, занимающихся переработкой, сушкой, хранением, очисткой, измельчением зерна, и предприятий, занимающихся транспортировкой и погрузкой (разгрузкой) собранного урожая, сыпучих продуктов и материалов, важно сохранить высокое качество собранной продукции. Многие предприятия предпочитают не продавать убранный урожай сразу переработчикам и потребителям. Во-первых, это связано с тем, что часть урожая оставляют до весны на семенной фонд. Во-вторых, фуражное зерно оставляют для кормления животных. В-третьих, зерно требует при хранении просушивания и очистки от примесей. В-четвертых, цены на зерно, что не маловажно для предприятий, в весенний период выше, чем во время уборки [60].

Сегодня элеваторы, зернохранилища и комбикормовые заводы оснащены техникой для санитарной обработки зерна, сортировки, загрузки (разгрузки) и сушки. Существует поэтапное разделение урожая: продукция подается через технологическую систему трубопроводов, для локального перемещения и транспортировки сыпучих грузов (зернопровода).

#### Принцип работы зернопроводов

Самотечное оборудование это гравитационный транспорт, который осуществляет подачу и транспортировку сырья под действием его массы. Зернопроводы состоят из: самотечных труб с секторами и задвижками, фланцевых соединителей, колен и вводов, регуляторов с клапанами, которые транспортируют сыпучий груз без внешней помощи [60].

Параметры транспортировки определяются рядом факторов, которые напрямую зависят от объема перемещаемой продукции: угла наклона (при меньшем угле уклона - меньшая скорость), размера зернопровода. На одном и том

же самотеке с одинаковым углом уклона при различных по структурам, объемных весах, сыпучести и влажности продукта, скорость движения массы может быть разной, вплоть до возникновения затора. Большая высота зданий элеваторов или зерносушильных комплексов, позволяет использовать большие углы наклона и скорости перемещения. В самотечном транспорте предусматриваются технологические резервы варьирования производительности и эксплуатационной надежности.

### Габаритные размеры устройств

Стандартные диаметры труб промышленных зернопроводов находятся в пределах от 125 до 300 мм, с максимальной длиной трубы - 2000 мм. Материал труб и деталей зернопроводов - это листовая сталь, нержавеющая сталь, оцинкованная сталь и другие сплавы при толщине от 1,5 до 3 мм, на фасонных частях используется чугун. В конструкции присутствуют соединительные элементы (переходники) и фасонные части. Максимальные углы искривлений секторов – 30 градусов [43, 169].

В трассах зернопроводов расположены на определенных расстояниях друг от друга делители, для перераспределения зерна на фракции при помощи сит с ячейками разных размеров. Таким образом разделяют фуражные фракции, самое крупное семенное зерно, зерно первого сорта и отходы (измельченное и мелкое зерно, различные примеси).

В зернопроводах не только разделяются потоки зерновой массы, но возможно объединение двух и более нисходящих потоков с помощью конических переходников бункерного типа, в которые подаются сыпучие массы из нескольких труб.

Различные заводы и комплексы используют зернопроводы, в которых обрабатываются злаковые культуры (рожь, пшеница, ячмень, овёс), а так же другие сельскохозяйственные растения, такие как гречиха, кукуруза, а так же различные масленичные растения (лён, подсолнечник, конопля и т.д.), семена трав и других продуктов.

### Особенности перемещения продуктов самотечным транспортированием

Поток сыпучих продуктов при перемещении самотеком имеет типичные явления, исследованные и описанные в работах Виллиса и Хода, а также Арнольда, Мак-Лина и Робертса [169].

Гравитационное транспортирование гранулированных сыпучих продуктов по трубам и желобам сопровождается образованием двух видов потоков — ускоренного и замедленного [169].

В режиме оптимально ускоренного потока продукты контактируют с дном желобов и боковыми стенками, без касания верхних частей желобов [169].

В режиме замедленного потока происходит полное заполнение желобов, и продукты находятся в контакте со всеми стенками желобов [169].

В ускоренных потоках продукты, входящие в желоб, приобретают ускорение, увеличивающее начальную скорость, которая в результате наличия кривизны желобов и уменьшений наклонов снижается. При этом, толщина слоя продукта изменяется по всей протяженности желоба. В момент входа продукта из бункера в желоб, до контакта с дном желоба при ускоренном потоке, наблюдается начальный период свободного падения. Типичная форма свободно падающих продуктов соответствует эффекту сужающейся струи. В идеальных случаях в условиях стационарного ускоренного потока желоб заканчивается при углах отсечек, соответствующих точкам максимальных скоростей и минимальных толщин слоев. Однако при увеличенной толщине слоя возникает неустойчивое состояние, так как наличие второстепенных мгновенных препятствий потоку может способствовать быстрому падению его скорости с переходами в замедленные потоки и последующим заполнением желоба без дальнейших разгрузок [43, 139, 169].

Замедленные потоки возникают при увеличении его толщины вблизи окончания желоба в контакте с верхней частью желоба. В этом случае наблюдается заполнение желоба при существенном уменьшении скорости потока,

т.е. возникает закупорка, с движением потока сплошным слоем при возникновении контакта со всеми четырьмя поверхностями желоба. И так поддержание ускоренного потока возможно для случая, когда углы отсечек не превышают предельный угол, величину которого определяет трение транспортируемых продуктов по поверхности желоба [43, 60, 138, 139, 169].

Нормальными считаются углы наклонов примерно от 38 до 45°, т.к. меньше 36° их делать нет смысла.

В режиме ускоренного потока размер отверстия выпускной воронки определяет скорость разгрузки продукта, на которую не влияет желоб. В случае замедленного потока желоб является как бы продолжением выпускной воронки, и его геометрические размеры оказывают заметное влияние на скорость истечения продуктов [138, 139].

Гравитационные потоки в зерноперерабатывающих предприятиях, элеваторных комплексах, зернохранилищах применяются для перемещения сыпучих и гранулированных продуктов. Другие способы транспортировки продуктов от одной точки к другой невозможно применить для сыпучих продуктов. Из труб, находящихся в закрытом состоянии, образуют желоба, по которым и перемещают сыпучие продукты. Для небольших гравитационных потоков используют круглые трубы (до 50 т/ч). Для предприятий с высокой производительностью используют трубы прямоугольных или квадратных сечений со сменными защитными покрытиями и съемными крышками [138].

Конструкционно зернопроводы круглых типов содержат меньше стали, что обуславливает их меньшую стоимость (при одинаковом поперечном сечении прямоугольных и квадратных самотеков). Однако, квадратные и прямоугольные самотечные системы, практически имеют меньший износ боковых стенок, быстрее и проще монтируются, в связи с этим такие формы зернопроводов имеют предпочтительное использование на некоторых предприятиях [138, 139].

## 1.2 Анализ износов. Виды износов труб

Изнашивание зернопроводов и его составляющих является естественным процессом, который непрерывно сопровождает работу предприятий (по переработке, сушке, транспортировке зерна и др.) на протяжении всего времени их работы. Изнашивание труб сопровождается изменением форм, размеров, физико-механических свойств поверхностей, способствующих постепенному снижению качества внутренних стенок зернопровода, что приводит к повреждению зерна, а так же выходу из строя участка системы зернопроводов (образованию дыр, пробоин и потёртостей). Сопротивление изнашиванию является ключевым фактором определения общего срока службы самотека.

Для самотечных труб можно провести аналогию с деталями машин. Большая номенклатура деталей АПК подвержена воздействию абразивного изнашивания. В качестве абразивного материала могут выступать частицы естественного или искусственного происхождения, обладающие способностью царапания, резанья и имеющие достаточную твердость своей поверхности. В качестве данных частиц могут выступать частички грунта, микровыступы, песок, продукты износа, металлические стружки, зерно сельскохозяйственных культур, находящиеся в зоне сопряжения [1, 68, 80, 167].

Изучению изнашивания потоками абразивных частиц посвящено большое количество работ. Изучение данного вопроса одним из первых в 1923 году занимался американец Дж. С. Тейлор. В своих работах он уделял большее внимание определению оптимального срока службы машин по минимальным удельным затратам на производство продукции. В дальнейшем разрабатывались много графических и аналитических методов определения оптимального срока службы машин, такими учеными как: Г. Готеллинг, В.О. Васильев, А.И. Буянов, Н.Г. Кабенин, Р.Н. Коллегаев, А.И. Селиванов, Ю.А. Конкин, И.И. Трепененков и другие [26].

Большое количество работ как экспериментальных, так и теоретических по исследованию изнашивания потоками абразивных частиц посвятили: И.В.

Крагельский, М.М. Хрущов, В.Н. Кашеев, Б.И. Костецкий, И.Р. Клейс, М.М. Тененбаум, Н.С. Пенкин, Е.Ф. Непомнящий, Л.И. Погодаев, С.П. Козырев, Г.М. Сорокин [68, 80, 167, 168].

Исследованиям изнашивания рабочих органов частицами зерновых и зернобобовых культур посвящены работы: В.В. Кузнецова, М.М. Тухватулина, А.Э. Балакира, А.Е. Мартьяновой и др [98].

Изучение способов повышения износостойкости зернопроводов является перспективным направлением получения максимального экономического эффекта. Многие предприятия заинтересованы в обеспечении долговечности, надежности и бесперебойной работе, так как именно из-за износа самотеков (порядка 75-90%) приходится приостанавливать рабочие процессы. Способы повышения износостойкости самотечных систем постоянно совершенствуются с применением новых материалов и способов их нанесения, что позволяет повышать сроки их службы.

Основной причиной выхода из строя зернопроводов является истирание внутренних поверхностей самотека. Выделяют два вида износа самотеков: первый - это местный износ (колена, места ввода и вывода зерна), второй – износ по всей длине трубы. При перемещении неочищенного зерна ячменя, овса, кукурузы и им подобных продуктов возникают значительные износы из-за абразивных, ударных и весовых воздействий, способствующих выводу из строя самых прочных деталей самотечных трубопроводов.

Скорость истирания стенок самотеков зависит от угла наклона и места расположения самой трубы. Слабыми местами в самотеках из-за изнашивания являются поворотные колена (места изменений направлений транспортирования), места стыков труб, места замедления зернового потока, места соприкосновения зерна со стенками при свободном падении, места соединения нескольких потоков, а так же места входа и выхода зерна. Эти места в системе зернопроводов подвергаются наибольшему изнашиванию.

Износ самотечных труб может составлять от нескольких микрометров до

полного протирания и образования сквозных протертостей, а срок их службы от нескольких недель до нескольких лет.

Изнашивание стенок зернопроводов происходит в условиях ударного действия абразивных частиц (зерно, ячмень, кукуруза, рис и т.д.). Только при угле удара частицы о стенку, равном нулю, не происходит абразивного износа. Для ударно-абразивного изнашивания характерны те же виды разрушения, что и для всех других видов абразивного изнашивания, различия заключаются только во взаимодействии абразивных частиц с поверхностным слоем.

Поток зерна,двигающийся на вертикальных участках зернопроводов, набирает большую скорость, ударяется о стенки наклонных зернопроводов под определенным углом, что способствует возникновению местного нагрева в точках соприкосновения потока со стенками. Данные места подвержены наибольшему ударному и абразивному воздействию, что приводит к более быстрому изнашиванию нагруженных участков и выходу зернопровода из строя.

Угол падения потока зерна на вертикальных участках зависит от расположения предыдущих составных частей системы зернопроводов. Если перед вертикальным участком расположен поворот, то основной удар зерна будет приходиться на стенку, расположенную по ходу движения потока. В этом месте будет происходить наибольший износ стенки. После удара зерно отскакивает от стенки под определенным углом и может удариться о противоположную стенку зернопровода (рисунок 1.1б). Так же могут возникнуть повторные удары ниже первой точки, но с гораздо меньшей силой (рисунок 1.1а). Это происходит при отражении зерновых частичек от двигающегося потока, при этом часть зерна уносится самим потоком, а часть отскакивает с меньшей скоростью и бьется о зернопровод. Здесь так же наблюдается интенсивный местный износ стенки, хотя и меньший, чем в случае основного удара.

Если перед вертикальным участком расположены тройники или распределители - износ происходит так же, как и на участках с поворотами.

Наклонные прямые участки зернопроводов (участки разгона и торможения

потоков) составляют большую часть всей системы зернопроводов, и их износ происходит постепенно на протяжении всей длины. Зерновой поток, движущийся по таким участкам, стирает нижние и боковые стенки, а верхние стенки в некоторых случаях совсем не участвуют в работе. В связи с этим существуют зернопроводы, у которых отсутствуют верхние стенки или вместо них используют открывающиеся крышки для экономии металла и средств.

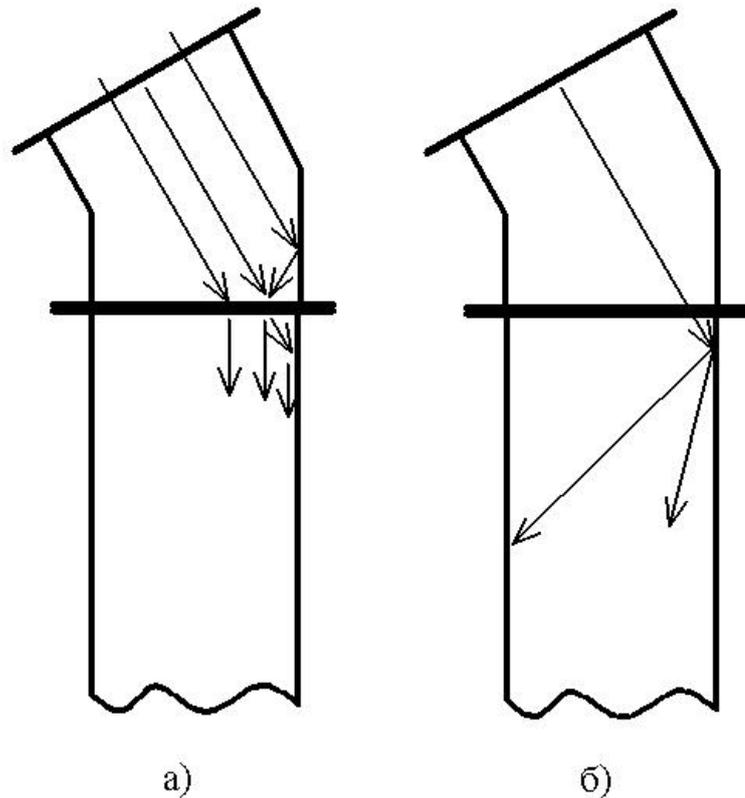


Рисунок 1.1 – Расположение векторов движения потока зерна в зернопроводе: а – с несколькими точками соприкосновения; б – с отскоком на противоположную стенку

На прямолинейных и на поворотных участках часто изнашиваются места возле стыковых соединений зернопроводов (рисунок 1.2). Это может быть обусловлено несколькими причинами. Одной из них является невозможность создания идеального болтового соединения без зазоров и выступов. Места с образовавшимися зазорами и выступами изнашиваются быстрее, чем вся остальная часть зернопровода. Другой причиной может быть неровность самотека

(вмятины, деформация и т.д.) или использование не одинаковых (разных) зернопроводов например, приобретенных у разных производителей, что так же может способствовать неравномерности соединения.



Рисунок 1.2 – Износ зернопровода в местах соединения участков

Поворотные колена наиболее сильно подвержены износу. Потоки зерна, идущие по прямолинейным участкам (вертикальным участкам разгона или торможения), врезаются в поворотные участки (поворотные колена) в результате чего возникает ударно-абразивное изнашивание. В зависимости от скорости потока и от количества зерна изнашивание поворотных колен может различаться. При маленьком потоке зерна и высокой скорости после первичного удара о стенку колена зерно отскакивает и ударяется немного ниже о противоположную стенку. При большом потоке продукции и такой же скорости после первичного удара зерно после удара так же отскакивает от поверхности и повторно ударяется ниже первого места соприкосновения, но с меньшей силой, так как отскок частиц гасится потоком.

На рисунке 1.3 схематично изображены варианты направления потока зерна при истирании поворотных колен.

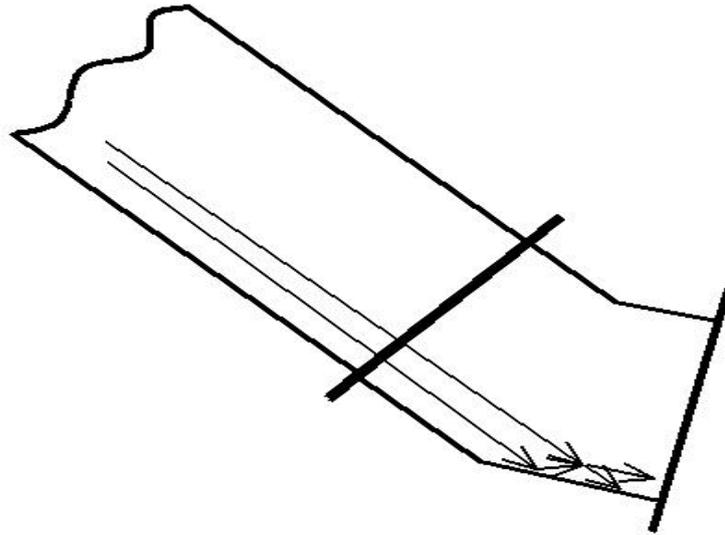


Рисунок 1.3 – Направление векторов движения потоков зерна на участках поворота

На рисунке 1.4 изображено поворотное колено со сквозным износом одной из стенок.



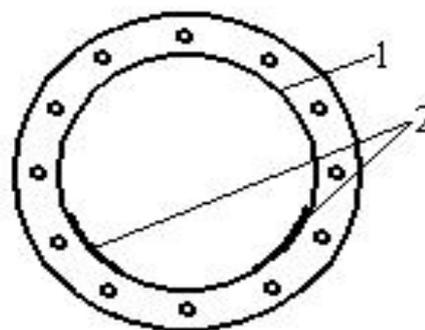
Рисунок 1.4 – Износ поворотного колена

Износ различных переходников связан как с неравномерностью стыковых соединений, так и с изменением формы зернопровода, а так же диаметра трубы.

При переходе труб квадратного сечения в круглое, происходит изменение ширины потока (сужение), в результате чего может возникнуть повышенное трение, в зависимости от объема потока, в нижней стенке круглой части переходника (рисунок 1.5а) или же в боковых стенках (рисунок 1.5б).



а)



б)

Рисунок 1.5 – Износ переходника: а – нижней стенки; б) – боковых стенок: 1 – внутренняя стенка переходника; 2 – места износа боковых стенок

Следствием износа распределителей потоков является истирание распределительной пластины, постоянно подверженной как ударному, так и абразивному воздействию движущимся потоком продукции.

Основным, важным способом уменьшения износов трубопроводов является применение самообразующихся подушек из транспортируемых продуктов в местах, подверженных износу. Подушки, принимая на себя удары струй транспортируемых продуктов, предотвращают износ. Для этого в трубопроводах используют вставные устройства, замедляющие износ [140].

В настоящее время широко используются новые материалы и конструкции деталей самотеков (из стекла, пластмассовых материалов), которые пока не

получили промышленного распространения. В Чехии и Словакии в мельничном производстве используют стеклянные самотеки, которые показали некоторые преимущества перед металлическими в условиях эксплуатации. В Австрии используются шарнирные соединения самотечных труб с внутренними резиновыми уплотнениями. Шарнирные соединения рекомендуются к применению в случае использования подвесных труб для перемещения свободно-текущих продуктов, а также в случаях частой замены труб. На рынках имеются предложения по зернопроводам, изготовленным из полиуретана, или в составе которых есть металлические трубы, покрытые или напыленные полимерными или полиуретановыми покрытиями с толщинами напыления от 1,5 до 10 мм. В мукомольной промышленности используют самотеки, покрытые эмалью с целью обеспечения скольжения муки [43, 139, 140].

Использование облицовки мест наибольших износов из стальных, стеклянных плит или пластмасс не способствует уменьшению изнашивания [140].

Из вышесказанного следует, что на скорость истирания участков зернопровода влияют несколько факторов, таких как:

- влажность зерна: чем больше влажность, тем меньше скорость и выше коэффициент трения, а так же появляется коррозионное влияние;
- чистота и сорность культуры: чем чище и меньше примесей в зерне, тем меньше негативное влияние на стенки самотека;
- вид культуры: у разных культур разная шероховатость поверхности, а значит и разный коэффициент трения, у ячменя и неочищенного риса он намного выше, чем у пшеницы и кукурузы;
- материал зернопровода.

Факторы, влияющие на скорость износа, определяют мгновенную скорость изнашивания зернопроводов.

На рисунке 1.6 (а) показан закон динамики изнашивания В.Ф. Лоренца.

Из графика динамики изнашивания (рисунок 1.6, а), изображающего нарастание износа по времени работы детали, скорость  $W'$  изнашивания в любой

момент времени может быть определена как тангенс угла наклона касательной к линии износа [11]:

$$W' = tg\alpha = \frac{dW}{d\tau}, \quad (1.1)$$

где  $W$  – износ (уменьшение толщины стенки самотека), мм;

$\tau$  – продолжительность воздействия на стенку, ч.

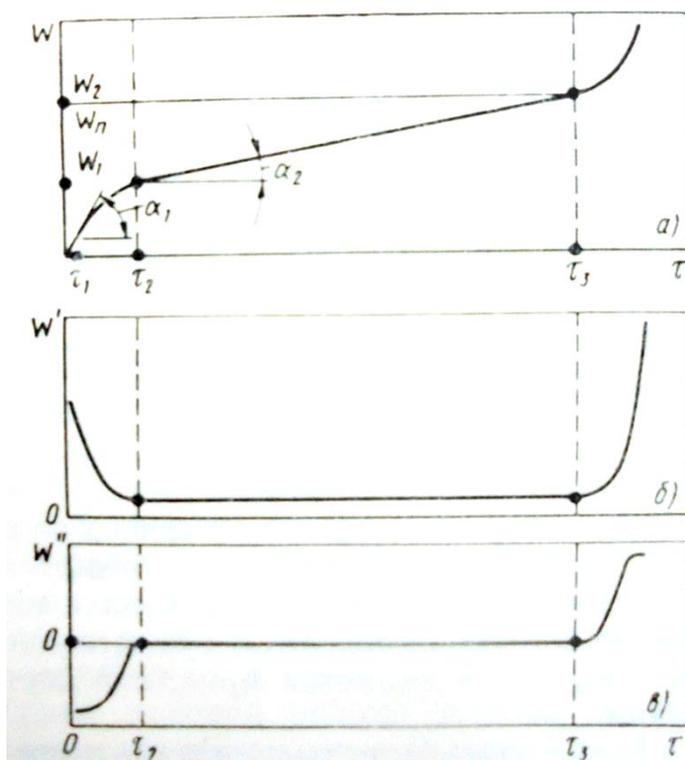


Рисунок 1.6 – Динамика (а), скорость (б), ускорение (в) изнашивания

На рисунке 1.6 изображены три характерных периода: период приработки  $0 - \tau_1$  с уменьшающейся скоростью изнашивания; нормальный период работы  $\tau_1 - \tau_2$  с постоянным значением скорости изнашивания; период «аварийного» износа после  $\tau_2$ , характеризующийся ускорением величины изнашивания (рисунок 1.6, а-в).

Закон динамики изнашивания Лоренца можно применить для описания изнашивания зернопроводов.

Износ  $W_1$  за время приработки, называемый первичным, при самых неблагоприятных случаях может достигать до 30-50% от предельного износа ( $W_n$ ). Приработка является необходимым процессом, от протекания которого в

определенных случаях зависит скорость изнашивания в нормальный период работы. Всегда необходимо стараться снизить первичный износ, так как именно на его значение уменьшается предельный износ [168].

Связь между текущим износом и мгновенной скоростью изнашивания можно отразить в характере нарастания износа по времени работы, и записать в виде уравнения  $W = f(\tau)$ , сокращенно называемой Т-функцией.

В литературе предложено восемь законов динамики изнашивания (рисунок 1.7). Самым простым законом динамики изнашивания является линейный (рисунок 1.7 (I)).

Уравнение, описывающее износ в зависимости от длительности работы, имеет вид:

$$W = k\tau, \quad (1.2)$$

где:  $k$  – коэффициент, зависящий от износостойкости материала и условий работы.

Зная значения предельного износа ( $W_{\text{п}}$ ), можно определить срок службы детали ( $T_{\text{д}}$ ):

$$T_{\text{д}} = \frac{W_{\text{п}}}{k}, \quad (1.3)$$

Закон динамики изнашивания, изображенный на рисунке 1.7 (II), имеет период приработки  $\tau_{\text{п}}$  с последующим изнашиванием по линейному закону.

Непрерывное и монотонное снижение скорости изнашивания до предельного износа, характерно для подшипников, шестерен и т.д. (рисунок 1.7 (III)). Постоянное увеличение скорости изнашивания (рисунок 1.7 (IV)) отражается отрицательным влиянием износа на трение деталей. График динамики изнашивания, рисунок 1.7 (V) характеризуется периодом отсутствия износа до момента  $\tau_1$  времени и последующим появлением износа и возрастанием скорости изнашивания. На рисунке 1.7 (VI), скорость изнашивания деталей изменяется при разных значениях износа  $W_2$  и  $W_3$ , независимо от расположения приведенных кривых. На рисунке 1.7 (VII) изображен вид изнашивания деталей, находящихся под постоянным нагружением, где скорость изнашивания убывает из-за

уменьшения усилия прижатия трущихся деталей, и может дойти до нулевого значения. Неоднородность свойств материала по глубине, приводит к искажению динамики изнашивания (рисунок 1.7 (VIII)) [168]. В период от 0 до  $\tau_1$  износ происходит с одной скоростью, в период от  $\tau_2$  и выше – с другой скоростью (большей, чем в первый период). Изменение скорости изнашивания происходит в период от  $\tau_1$  до  $\tau_2$ .

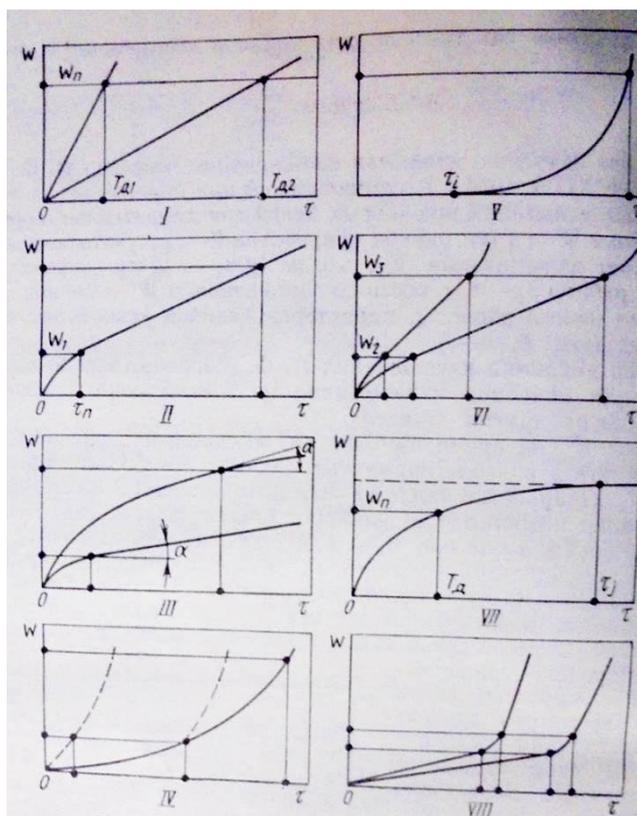


Рисунок 1.7 – Типовые графики законов динамики изнашивания

Абразивным изнашиванием называют процесс прямого разрушения посторонними твердыми частицами, вызывающими микрорезание поверхностного слоя детали.

Подводя итог выше сказанному, следует отметить, что стенки самотечных зернопроводов подвергаются абразивному изнашиванию, так как зерновой поток оказывает абразивное, ударное и весовое воздействие. Причем износ происходит строго в определенных местах, основная часть трубы остается не изношенной. На участках интенсивного износа повышается температура стенки самотека. При этом местами, наиболее подверженными возникновению очагов истирания

деталей зернопроводов являются поворотные колена и прямые участки набора скорости и торможения зернового потока. Износ стенок приводит к образованию раковин, которые имеют размер от нескольких миллиметров до 300 мм, глубиной от десятых долей миллиметра до полного протирания стенки. Рельеф раковины представляет собой постепенное снижение до максимальной величины или до сквозного протирания стенки, и затем подъем до практически не изношенной стенки.

### **1.3 Анализ методов восстановления самотечных труб**

Как уже было отмечено выше, износ самотеков является основной причиной выхода их из строя. Неочищенное или пересушенное зерно и кукуруза способны за 3-4 месяца протереть дыры в совершенно новых трубах. Покупка и замена изношенных труб на новые обходится предприятиям не дешево, поэтому восстановление самотеков является очень актуальным.

Большинство современных способов восстановления невозможно применить для ремонта самотечных зернопроводов из-за высокой стоимости, невозможности создания бесшовного соединения, которое не травмировало бы зерно, а так же необходимости проведения последующих обработок получаемых поверхностей [53, 87, 148, 181, 182].

Существует несколько способов восстановления зернопроводов. Самым быстрым и простым является приварка металлических латок или же подвязка брезентов или резины. Однако такой способ восстановления зернопроводов мало эффективен, так как, закрывая дыры с внешней стороны, совсем не обращается внимание на внутренние стенки, там остаются хорошо заточенные края, которые измельчают и травмируют зерно, что отрицательно сказывается на его качестве, сортности и, соответственно, цене [43].

Еще одним способом восстановления зернопроводов является футеровка изнашиваемых поверхностей полиуретаном или полиэтиленом. Этот способ

относительно новый и еще не очень изучен. Восстановление внутренних поверхностей футеровкой, по сравнению с залатыванием дыр лучше. К преимуществам такого метода можно отнести: износостойкость, стойкость к влиянию температур и окружающих воздействий, увеличенный срок службы [43, 133].

К недостаткам данного метода можно отнести изменение внутреннего диаметра самотека, что влияет на его пропускную способность из-за уменьшения скорости при изменении коэффициентов скольжения зерна о поверхности зернопроводов, а так же стоимости данного метода футеровки, в зависимости от материалов и толщин слоев покрытия. В зависимости от способа восстановления, полной или частичной замены могут возникать и другие проблемы, что следует учитывать, выбирая тот или другой метод, так как это может вызвать возникновение заторов на участках самотечной системы, и тем самым способствовать остановке работы комплекса или завода. Для решения данных проблем, связанных с футеровкой, предприятию может понадобиться увеличение диаметра труб, а так же перерасчет, регулировка или переналадка всего комплекса в целом, так как полимерные покрытия наносятся большой величины из-за их меньшей твердости и стойкости к изнашиванию в сравнении с гальваническими покрытиями.

В работе [43] исследуется способ восстановления самотечных труб с помощью нанесения на изношенные участки зернопроводов железа электролитическим методом. По сравнению с существующими и рассмотренными ранее методами восстановления данный метод имеет ряд преимуществ, в число которых входят: достаточно быстрое восстановление как внутренних, так и внешних стенок зернопровода металлом; отсутствие неровностей, внутренних повреждений, и минимальное изменение размеров зернопроводов, как с внутренней, так и с внешней стороны из-за небольшой толщины наносимого металлического слоя; меньшая шероховатость поверхности и меньший коэффициент изнашивания из-за низких коэффициентов трения зерна о металл

[43].

Гальванические методы восстановления деталей широко применяются в ремонтном производстве [14, 15, 20, 24, 99, 100, 101, 102, 119, 195]. В основе гальванических процессов лежат явления электрокристаллизации чистых металлов или их сплавов. В процессе электролиза под действием электрического тока ряд ионов металла осаждается на катоде (восстановление) и происходит окисление на аноде. В ряде случаев восстановление ионов металла сопровождается сопутствующим выделением водорода, что искажает кристаллическую решетку покрытия из-за внедрения водорода. Перенос заряженных ионов в электролите, которые возникают в результате диссоциации солей металла (кислот, оснований) и движутся в зависимости от заряда, обеспечивает прохождение электрического тока к катоду или аноду [22, 25].

Сами электроды являются проводниками первого рода, т.к. обладают электронной проводимостью. Заряженные ионы в растворе относят к проводникам второго рода. На границе раздела электрод-электролит прохождение электрического тока сопровождается электрохимическими реакциями образования новых фаз (веществ), в том числе происходит электроосаждение металлов.

Гальванические покрытия делятся на 3 вида в зависимости от их назначения и эксплуатационных характеристик:

1. Защитно-декоративные покрытия используются для придания деталям красивого внешнего вида, блеска, а так же для защиты от воздействия факторов внешней среды. Для придания красоты используются электролиты, содержащие медь, золото, серебро, алюминий и другие;

2. Защитные гальванические покрытия применяются для придания поверхности деталей коррозионной стойкости (железо, никель, цинк, медь);

3. Покрытия специального назначения применяются для увеличения физико-механических свойств поверхностей деталей (микротвердости, шероховатости, износостойкости), придания им новых свойств (например

электроизоляционных, магнитных), восстановления изношенных поверхностей [25, 57, 61, 106, 149, 171].

Электролитическое железнение применяют при значениях износа деталей до 5-6 мм, покрытия свыше 6 мм получаются с ухудшенными физико-механическими свойствами. При железнении используют хлоридные или серноокислые электролиты с добавлением сульфидов и хлоридов железа, молибдена, фосфора, никеля и других металлов. Покрытия из таких электролитов имеют высокие физико-механические свойства [42, 82, 108, 130, 142, 192].

Хромирование применяется при значениях износов от нескольких микрометров до 300 мкм. Покрытия электролитическим хромом имеют высокую микротвердость (8500-12000 МПа) и низкую шероховатость на восстановленных поверхностях [42].

Процессы хромирования и железнения очень схожи, их основное различие заключается в применении разных поляризующих форм токов и в некоторых случаях температур нагрева электролита. Преимуществами гальванических покрытий являются: простота обработки, возможность нанесения покрытий на детали без деформации на конечных стадиях обработки, низкая удельная себестоимость покрытий в сравнении с себестоимостью покрываемых деталей другими методами, значительного (в несколько раз) повышения долговечности [49, 63, 171, 189, 190].

Предполагаемые технологии восстановления внутренних поверхностей могут быть улучшены за счет использования гальванического процесса осаждения железа или хрома не только на постоянно-токовых режимах, но и нестационарных режимах осаждения. Сквозные отверстия, в зависимости от их размеров, завариваются обычной или микросваркой, или же применяются металло-тканевая заделка. После этого внутренняя изношенная поверхность покрывается электролитическим железом. Если отверстия небольшие, а к внешней поверхности зернопроводов не предъявляется никаких требований, то возможно их одновременное покрытие с внутренней и внешней стороны.

Покрyтия наносятся до восстановления необходимых геометрических размеров зернопроводов.

В литературе встречается множество способов нанесения гальванических покрытий электролитов железнения и хромирования на внешние и внутренние поверхности труб. На внешние поверхности труб электролитические осадки наносятся следующим образом: подготовленная труба к нанесению покрытия (промытая, обезжиренная, пассивированная), закрытая с двух краев заглушками опускается в ванну с электролитом. Затем положительный полюс источника питания подключается к анодам, расположенным с одной или двух сторон вдоль трубы, катодный полюс подключается непосредственно к самой трубе, затем подается питание. Процесс длится до достижения необходимой толщины нанесения покрытия, после чего питание отключается. Далее трубы вынимают и промывают [154, 155, 156, 158, 159, 160, 164, 170, 172].

Существуют и другие способы нанесения гальванических покрытий на внешние поверхности труб, которые от вышеуказанного отличаются незначительно, например:

- если длина трубы позволяет ее могут располагать в ванне не горизонтально, а вертикально [158, 164];
- в процессе нанесения гальванического осадка, труба вращается по кругу относительно своего центра, что улучшает качество покрытия [158];
- в процессе нанесения внешняя поверхность трубы обкатывается специальными металлическими катками [172].

Нанесение гальванических покрытий на внутренние поверхности труб по сравнению с внешними поверхностями осложнено целым рядом факторов, связанных с геометрией (длина, невозможность увидеть внутреннюю поверхность), поэтому требует определенных теоретических и практических навыков, а так же специального оборудования.

Существует несколько способов нанесения электролитических покрытий на внутренние поверхности труб. Первый и самый простой способ заключается в

помещении трубы в электролит и подключении к нему отрицательного полюса источника питания, положительный полюс подключается к аноду, находящемуся внутри трубы. Для экономии электролита и электроэнергии внешняя поверхность трубы может изолироваться специальным изоляционным материалом. Труба может располагаться как горизонтально, так и вертикально.

Второй способ нанесения электролитических покрытий заключается в следующем: труба помещается в ванну вертикально и подключается к отрицательному полюсу, положительный полюс подключается к аноду, расположенному по центру трубы. Анод имеет систему спиралей, находящихся под определенным углом вдоль всей своей длины. Так же возможно использование специальных прижимов, расположенных на аноде, для придания пластической деформации нанесенному покрытию. В процессе нанесения возможно вращение трубы, а анод с прижимами перемещают возвратно-поступательно или наоборот, вращают анод с прижимами, а труба совершает возвратно-поступательные движения (рисунок 1.8). Так же применяются аноды со свободно вращающимися роликами в процессе нанесения покрытия внутри трубы. Возможно использование системы циркуляции электролита [158].

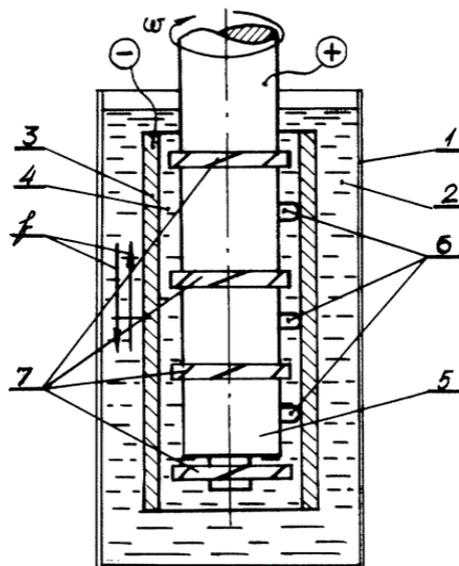


Рисунок 1.8 - Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность труб: 1 – ванна; 2 – электролит; 3 – труба; 4 – внутренняя полость трубы; 5 – анод; 6 – прижимы; 7 – система лопаток

Третий способ заключается в следующем: к горизонтально расположенной трубе подключается специальное оборудование, создающее циркуляцию электролита во внутреннем пространстве в течение всего процесса нанесения покрытия. Так же, как и в предыдущем способе, могут применяться аноды спиральной формы с прижимами и без, а так же со свободно вращающимися роликами (рисунок 1.9) [172].

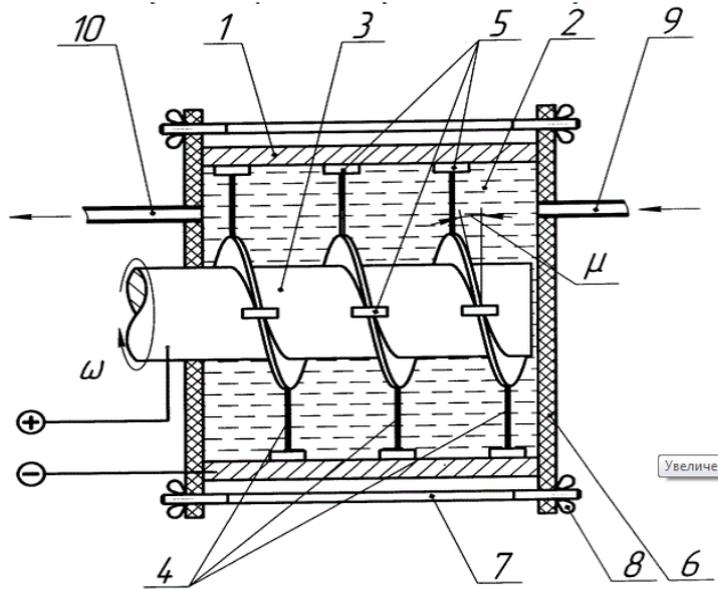


Рисунок 1.9 – Способ нанесения электролитического покрытия на внутреннюю поверхность труб: 1 – труба; 2 – электролит; 3 – электрод; 4 – набор державок; 5 – электродные прижимки; 6 – боковые стенки; 7 – стяжки боковых стенок; 8 – фиксаторы стяжек; 9 – подводящий патрубок; 10 – отводящий патрубок

Во всех способах нанесения электролитических покрытий, на внутренние поверхности труб, описанных выше, предшествуют подготовительные операции. Процессы нанесения длятся до достижения заданных толщин покрытия. После отключения питания следуют процессы промывки и сушки.

Данные способы нанесения электролитических покрытий имеют ряд недостатков, связанных с удалением выделяющегося в процессе осаждения водорода.

Гальванические покрытия, наносимые на различные детали, в том числе и

трубы, отличаются от многих способов тем, что получаемые покрытия равномерно наносятся на протяженности всей детали. При нанесении покрытий на длинные трубы могут возникнуть незначительные уменьшения толщины покрытия на конце трубы, по сравнению с ее началом.

В литературных источниках, связанных с нанесением электролитических покрытий на внутренние поверхности труб, описано применение устройств питания установок постоянным током, и есть несколько упоминаний о преимуществах применения переменного и асимметричного тока [38, 78, 84, 89, 110, 141, 143, 193, 194].

К недостаткам гальванического метода восстановления на внутренние стенки цилиндрических деталей можно отнести неравномерность осаждения покрытий на трубы больших длин и окружностей.

Использование нестационарных режимов осаждения позволит избежать разноклинности осадка по поверхности, добиться более высокой рассеивающей и кроющей способности электролита, большей эффективности использования компонентов электролита, а так же его меньшего наводороживания, за счет более эффективного удаления газов при прокачке электролита.

#### **1.4 Оборудование, применяемое для железнения и хромирования**

##### **Источники тока**

В настоящее время для электролитических процессов восстановления и упрочнения деталей используются различные виды тока: постоянный, переменный асимметричный и импульсный ток. Процессы гальванического нанесения металлов, осуществляемые на постоянном токе, называют стационарным электролизом, процессы, происходящие с применением других видов тока, называют нестационарным электролизом [38, 78, 84, 89, 110, 141, 143, 193].

В свою очередь процессы нанесения покрытий на постоянном токе можно проводить с использованием реверсивного или нереверсивного режима

осаждения. В качестве источников постоянного тока используются выпрямители различных видов и модификаций рисунок 1.10, 1.11. Для получения реверсивного тока используется дополнительное оборудование, чаще всего это различные переключатели. При нанесении покрытий на постоянном токе на поверхности могут возникать дендриты, неравномерные участки покрытия, раковины, непокрытые места. При использовании реверсивного постоянного тока, такие проблемы можно минимизировать, что позволит получать более качественные покрытия [54, 55, 56, 89].



Рисунок 1.10 – Внешний вид тиристорного выпрямителя серии ТВ1

На рисунке 1.10 изображен внешний вид выпрямителя серии ТВ1, работающего на основе тиристоров. Регулировка тока происходит с помощью блока тиристоров с водяным охлаждением.



Рисунок 1.11 – внешний вид выпрямителя ВАС 600/300

На рисунке 1.12 изображен внешний вид блока управления с расположенными по обе стороны ваннами.



Рисунок 1.12 – Блок управления постоянным током с 2 ваннами

На рисунке 1.13 изображена электрическая схема управления процессом электроосаждения совместно с выпрямителем ВАС 600/300. Принцип работы заключается в следующем: при включении автоматического выключателя QF подается напряжение через трансформатор Tr1 на диодный мост VD1-VD6. В начале работы 3х позиционный переключатель SA1–SA2 находится в нейтральном положении (положение 0). При переключении переключателя SA1 в положение 1, ток выдаваемый трансформатором, подается на левую ванну. При переключении переключателя SA1 в положение 2, положительный и отрицательный полюс меняются местами, происходит реверс тока (ток течет в обратном направлении). Ток, подаваемый на ванну, регулируется с помощью блока резисторов R1-R4. Резисторы представляют собой спиралевидную проволоку разной толщины с воздушным охлаждением. Напряжение на ванне постоянное и равно 12 или 24 В, максимальная сила тока равна 600 или 300А, в зависимости от положения переключателя на трансформаторе. Сила тока на второй ванне регулируется аналогично.

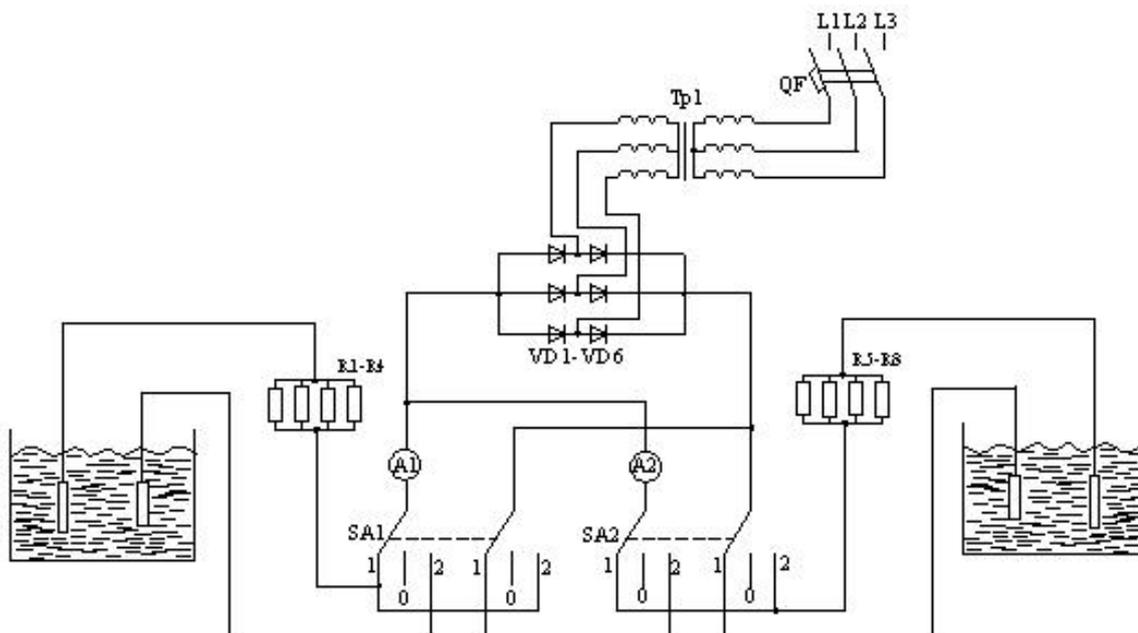


Рисунок 1.13 – Электрическая схема управления процессом осаждения на постоянном токе: QF – автоматический выключатель, SA1–SA2 – 3х позиционный переключатель, VD1-VD6 - диоды, R1-R8 - резисторы, Tp1 – трансформатор

В настоящее время на предприятиях чаще начинают использовать нестационарные режимы электролиза, что позволяет экономить электроэнергию, а так же упростить технологию нанесения покрытий за счет использования специализированного оборудования, однако такие способы нанесения покрытий на импульсных и реверсивных режимах еще недостаточно изучены [38, 84, 89, 110, 141, 143, 193].

В качестве источника переменного тока можно использовать обычный сварочный трансформатор. Простейшая электрическая схема получения асимметричного переменного тока показана на рисунке 1.14. В данной схеме питание осуществляется от вторичной обмотки трансформатора. Ток, выдаваемый трансформатором, промышленной частоты, напряжение может меняться и равно 5, 12, 24 В, сила тока изменяется в пределах от 0 до 600А. Один конец вторичной обмотки понижающего трансформатора подключается непосредственно к анодной штанге гальванической ванны, они как правило, расположены ниже катодных, а второй конец обмотки трансформатора подключается к двум

противоположно направленным однополупериодным диодам.

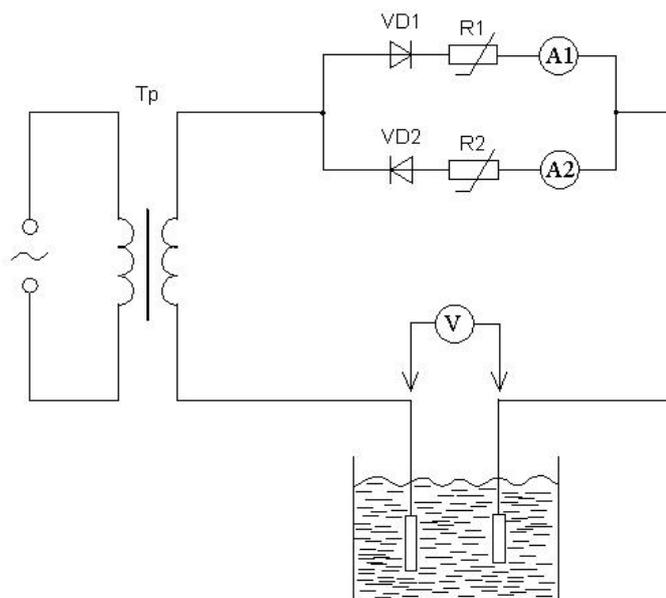


Рисунок 1.14 - Принципиальная электрическая схема преобразователя для получения асимметричного переменного тока: Tr - трансформатор; VD1, VD2 - силовые диоды; R1, R2 - реостаты катодного и анодного полупериодов; A1, A2 – амперметры; V - вольтметр

Ток, проходящий через реостат R2, будет иметь положительный знак, его будем называть анодной составляющей асимметричного переменного тока или анодным полупериодом, а ток, проходящий через реостат R1, соответственно, катодной составляющей асимметричного переменного тока или катодным полупериодом.

В катодный полупериод ток проходит через реостат R1, диод VD1, амперметр A1, а в анодный полупериод - через реостат R2, диод VD2 и амперметр A2. Если сопротивления  $R1 = R2$ , то на выходе ток будет симметричный переменный, а если  $R2 > R1$ , то амплитуда тока, проходящего через сопротивление R2 (анодная составляющая тока) уменьшится, в то время как амплитуда тока, проходящего через сопротивление R1 (катодная составляющая тока) остается без изменений. Так образуется асимметричный переменный ток, который является разновидностью реверсивного тока. Когда сопротивление R2 стремится к бесконечности (цепь разорвана), анодная составляющая тока стремится к нулю,

формируется так называемый импульсный ток.

В катодные полупериоды асимметричного переменного тока металл осаждается на детали, а в анодные полупериоды растворяется. Так как амплитуда тока в катодные полупериоды больше, чем в анодные полупериоды, то количество металла осаждаемого на поверхность гораздо больше, чем растворяется в анодный полупериод [43, 142].

Для промышленного применения данную схему, изображенную на рисунке 1.14 необходимо немного изменить, вместо реостатов необходимо использовать резисторы или блоки соединенных параллельно резисторов.

Так же для получения асимметричного переменного тока используются схемы с управляемыми тиристорами. Данные схемы сложнее по своему устройству от реостатных и резисторных, однако, они имеют ряд преимуществ включая более мелкий шаг регулирования токового диапазона.

На рисунке 1.15 изображена схема получения асимметричного переменного тока с помощью управляемых тиристоров. В катодный полупериод ток проходит через реостат R1, тиристор VS1, амперметр A1, а в анодный полупериод - через реостат R2, тиристор VS2 и амперметр A2. Управление тиристорами происходит через соединительные контакты 1, 2 и 3, 4 подключенными к электронному блоку управления. Схема управления тиристорами изображена на рисунке 1.16.

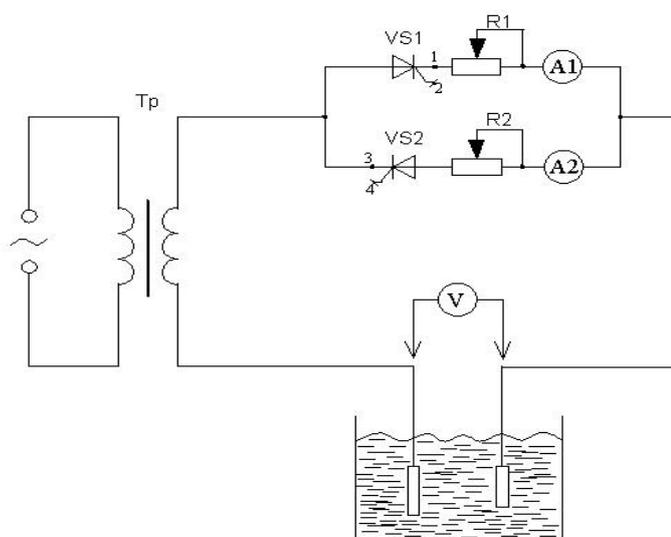


Рисунок 1.15 - Принципиальная электрическая схема преобразователя для получения асимметричного переменного тока с помощью тиристоров: Тр -

трансформатор; VS1, VS2 – управляемые тиристоры; R1, R2 - реостаты катодного и анодного полупериодов; A1, A2 – амперметры; V – вольтметр

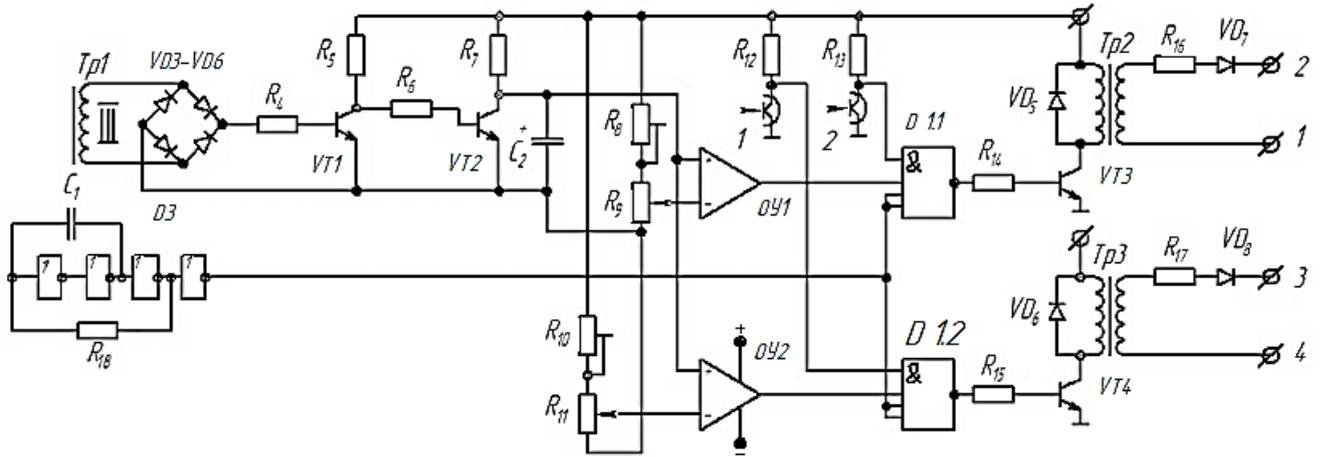


Рисунок 1.16 – Электрическая схема установки для нанесения покрытий

Ток анодной составляющей изменяется с помощью сопротивления R1, ток катодной составляющей сопротивлением R2. Напряжение с дополнительной обмотки трансформатора Tr1-III выпрямляется с помощью диодного моста VD3-VD6. Выпрямленное напряжение подается на вход коллекторов VT1 и VT2, затем сформированные прямоугольные импульсы с коллектора VT2 заряжают конденсатор C2, в результате чего формируется пилообразное напряжение, которое подается на один из входов компараторов ОУ1 и ОУ2. Через делители R8-R9 и R10-R11 подается постоянное напряжение на вторые входы компараторов. При условии совпадения пилообразного и постоянного напряжения компараторы переключаются и на их выходе появляются положительные потенциалы, которые подаются на входы микросхем D1.1 и D1.2 соответственно. На оставшиеся входы микросхем D1.1 и D1.2 подаются импульсы от генератора D3. Во время прохождения положительной полуволны оптрон 1 открыт, а оптрон 2 закрыт, следовательно, на входе микросхемы D1.1 формируется положительный потенциал (логическая единица), а на входе микросхемы D1.2 – отрицательный потенциал (логический ноль). Микросхема D1.2 открывается, пропуская усиленные транзистором VT3 импульсы от

генератора на импульсный трансформатор. От вторичной обмотки импульсного трансформатора Тр2 подается сигнал на управляющий электрод тиристора VD1 и открывают его. Во время прохождения отрицательной полуволны происходит аналогичное открытие тиристора VD2. Таким образом, происходит формирование асимметричного переменного тока в гальванической ванне [9].

Недостатком данной схемы управления в первую очередь является сложность ее изготовления и дороговизна используемых элементов. Наличие в схеме управления микросхем D1.1 и D1.2 и компараторов ОУ1 и ОУ2 делает ее уязвимой для скачков напряжения, что отразится на ее работоспособности, так как работа компараторов зависит от условия совпадения пилообразного и постоянного напряжения, а при перепаде напряжений это условие невыполнимо. Регулирование тока катодной и анодной полуволн происходит с помощью сопротивлений R1 и R2, что снижает ее эффективность и делает ее схожей с простейшей схемой, но усложненной дорогостоящей схемой управления.

При нанесении покрытий на асимметричном переменном токе происходит чередование катодных и анодных полупериодов. При катодном полупериоде покрытие осаждается на деталь, а при анодном растворяется. Для получения хорошего покрытия на переменном токе регулируют катодные и анодные токи, при этом возникает асимметрия. Режимы осаждения покрытий задаются с помощью двух параметров: плотности катодного тока и катодно-анодного отношения. Катодная плотность тока определяется по формуле [180]:

$$D_K = I_K / S, \quad (1.4)$$

где  $I$  – сила тока в катодный полупериод, А;

$S$  – суммарная площадь покрываемых деталей,  $\text{дм}^2$ .

Анодная плотность тока определяется по формуле:

$$D_A = I_A / S, \quad (1.5)$$

где  $D_A$  – анодная плотность тока (определяется по той же формуле что и катодная плотность тока,  $\text{А/дм}^2$ ).

Катодно-анодное отношение  $\beta$  определяется по формуле [46, 47]:

$$\beta = D_K / D_A, \quad (1.6)$$

Катодно-анодное отношение показывает во сколько раз плотность тока катодного полупериода больше анодного.

Так как площадь катода и анода в катодный и анодный полупериоды не изменяется то катодно-анодное отношение можно определять по формуле:

$$\beta = I_K / I_A, \quad (1.7)$$

где  $I_K$  – сила тока в катодный полупериод;

$I_A$  – сила тока в анодный полупериод.

В зависимости от катодно-анодного отношения можно получать различные значения кристаллических решеток осадков. Чем выше катодно-анодное отношение, тем более мелкая образуется кристаллическая решетка и наоборот, чем меньше  $\beta$ , тем крупнее кристаллическая решетка осаждаемого покрытия.

Использование асимметричного переменного тока в процессе железнения позволяет получать надежное сцепление осадков с основой при температурах электролитов около 20-40 °С, с возможностью регулирования твердости осадков от 550 до 3500 МПа.

### Ванны

На предприятиях, специализирующихся нанесением на детали покрытий железа и хрома, чаще всего используют ванный способ нанесения покрытий для всех деталей. Электролит наводится в ванне и затем по мере его расходования добавляются необходимые компоненты. Размер ванн напрямую зависит от покрываемых деталей. Ванны горячей, холодной промывки, пассивирования и осаждения покрытий имеют одинаковые размеры, их покрывают фторопластом и другими материалами. Для небольших и средних размеров деталей чаще всего используют одни и те же ванны (рисунок 1.17) [180].

Для нанесения покрытий на детали больших размеров, например, штоков гидроцилиндров, чаще всего используются ванны больших размеров с горизонтальным расположением (рисунок 1.18) или вертикальным расположением (рисунок 1.19).



Рисунок 1.17 – Внешний вид ванны, используемой на предприятиях

При вертикальном расположении ванн для удобства их закапывают в землю (с использованием мер предосторожности на случай пробоя ванны) или располагают производство на втором этаже, а сами ванны занимают пространство первого этажа.



Рисунок 1.18 – Горизонтальное расположение ванны для покрытий деталей больших размеров

Для подогрева электролитов в ваннах используют косвенный подогрев рабочего электролита. Для этого используют дополнительные емкости, в которые опускают ванны с электролитом. Подогрев может осуществляться подачей пара или же трансформаторного масла. В качестве нагревательных элементов масла используются тэны.



а)



б)

Рисунок 1.19 – Ванны с вертикальным расположением: а - без электролита, б - с электролитом

Для подогрева горячей промывочной воды может использоваться прямой нагрев тэнами или другими подогревающими приспособлениями.

### **1.5 Особенности электрокристаллизации железа и сплавов на его основе**

Гальванические покрытия широко применяются для восстановления изношенных деталей с целью повышения износостойкости, коррозионной стойкости, фреттингостойкости, усталостной прочности и других физико-механических свойств поверхностных слоев. Определяющее значение имеют такие показатели как рассеивающая и кроющая способность электролита, т.е. равномерность поверхностного (по площади детали) и объемного нанесения (по толщине) покрытия, что определяет прочность сцепления осадков с металлом основы, микротвердость, твердость, склонность к коррозии. В настоящее время уделяется большое внимание технологичности, экономичности и экологичности как гальванических так и других процессов восстановления деталей [74], а так же получения покрытий с заданными свойствами [45, 46, 50, 51, 52]. Процессы нанесения гальванических покрытий проводятся в постоянноточковых режимах, а так же на нестационарных режимах. В связи с этим, развитие в этой области связано с использованием прогрессивного оборудования, а именно, источников

тока (реверсивных, импульсных, асимметричных переменных токов) [117, 121, 157, 192]. Разработка методов и оборудования нестационарного электролиза позволит уменьшить трудоемкость технологических процессов, значительно повысить качественные показатели получаемых покрытий [6, 42, 54, 56, 58, 67, 126, 151, 152, 153, 165].

Микротвердость железных покрытий, полученных из хлоридных электролитов, зависит от плотности катодного тока и его асимметрии, увеличиваясь с ростом  $D_k$  и  $\beta$  до некоторой величины [6, 7, 165]. При этом микротвердость на обоих режимах осаждения сопоставима, что свидетельствует об обильности протекания катодных процессов электрокристаллизации железа. Рост толщины осадка от 0,3 мм до 3 мм приводит к уменьшению микротвердости от 5200 МПа до 2700 МПа, что можно объяснить релаксацией внутренних напряжений на дефектах нанесенного покрытия.

В практике гальванотехники для получения осадков с требуемыми физико-механическими свойствами широко используется осаждение сплавов, в том числе и на основе железа, для восстановления изношенных деталей [10, 17, 18, 19, 27, 48, 69, 76, 85, 88, 111, 118, 124, 125, 135, 137, 144, 145, 146, 147, 161, 162, 163, 173, 183]. Процессы совместного осаждения металлов и неметаллов отличаются большой сложностью и до конца еще не изучены. Установлено, что совместное осаждение металлов возможно, когда их стандартные потенциалы близки [85, 137, 144, 146]. В случае их большой разности, их сближают путем процессов комплексообразования ионов металлов в растворах, что приводит к изменению активности разряжающихся ионов. Возможно использование деполяризаторов торможения одной из нарушенных реакций осаждения одного из ионов в растворе.

На процессы формирования осадков сплавов влияют как параметры токов осаждения, так и процессы фазообразования в поверхностных слоях осадков, что обуславливает сдвиг равновесных потенциалов осаждения компонентов сплава. Совместное осаждение сплавов возможно за счет изменения активности ионов в

растворе и активности атомов в твердой фазе [137]. Разность стандартных потенциалов можно значительно компенсировать как за счет комплексообразования ионов одного из компонентов в растворе [137], так и за счет изменения величины перенапряжения в условиях электроосаждения [85]. Совместный разряд ионов может сопровождаться процессами деполяризации как одного компонента, так и обоих [137]. Причинами, вызывающими деполяризацию, являются концентрационные изменения ионов в приэлектродных слоях в растворе и сплавах металлов в твердой фазе, адсорбция водорода или его соединений в виде гидроокиси, что сопровождается образованием пленок на поверхности, которые могут привести и к пассивации поверхности [12]. На сплавах системы Fe-Ni, Fe-Co обнаружено изменение скорости восстановления электроположительного компонента и увеличение скорости восстановления электроотрицательного компонента сплава. К факторам, определяющим принципиальную возможность соосаждения компонентов сплава, можно отнести: величины равновесных потенциалов, катодную поляризацию, концентрационную поляризацию, режимы электролиза (плотность тока, температура, концентрация иона в растворе комплексообразователя). Все это вместе и определяет картину совместного осаждения сплавов, и соответственно, физико-механические свойства осадков. Сближение равновесных потенциалов осаждаемых катионов металлов за счет использования растворов их комплексных солей позволяет изменить их активность в растворе и тем самым позволяет провести процессы осаждения сплавов. Стабильность и устойчивость комплексных солей растворов (в зависимости от температуры, концентрации, кислотности) определяет качественные и количественные показатели процесса электроосаждения. Равенство потенциалов разряда ионов (с разными стандартными окислительно-восстановительными потенциалами) можно добиться как за счет изменения активности ионов в растворе, так и изменения степени перенапряжения разряда на катоде. Подбор условий электролиза позволяет получать сплавы железа с хромом, никелем, кобальтом. Отметим, что сопутствующее выделение водорода

снижает выход по току сплава в сравнении с теоретически возможным, что сказывается на величине катодной поляризации и химическом составе осажденного сплава, дефектности кристаллической решетки, наличии посторонних включений [12, 59].

В научно-технической литературе имеются сведения о получении сплавов железа как с металлическими компонентами Cr, Ni, Fe, Mn, Wo, V, а так же неметаллическими – серой, фосфором, углеродом [33, 62, 71, 120, 124, 150, 162, 191]. Легированные осадки железа отличаются по физико-механическим свойствам от осадков чистого железа.

В [137] получены осадки Fe-Cr из хлористых электролитов с содержанием хрома до 20%, что привело к повышению износостойкости и коррозионной стойкости, несмотря на уменьшение выхода по току сплава, что в конечном итоге ограничивает их использование в практических целях. Хлоридные электролиты с добавками карбонида имеют более высокие выходы сплава по току с содержанием хрома порядка 18-20% [72]. Введение органических добавок повышает сцепление осадка железа с основой. Повышение износостойкости осадков железа можно добиться, используя процессы термообработки осажденных покрытий за счет процессов удаления поглощаемого водорода и средовых превращений в объеме осадка.

Использование солей марганца в растворах железнения позволяет получать сплавы Fe-Mn с содержанием марганца до 2% [85]. Наличие марганца не сказывается на изменении микротвердости сплавов в сравнении с осадками чистого железа и величина упрочняющего эффекта незначительна.

Повышение твердости, износостойкости можно добиться, легируя железо вольфрамом, молибденом, ванадием [9, 85, 144, 145, 146]. Указывается, что получение таких электролитических сплавов возможно из легированных электролитов сложного состава, что ограничивает их использование. Осадки железа, легированные никелем, имеют невысокую коррозионную стойкость, высокую прочность сцепления с основой [125, 127, 135, 147, 192]. В одних

работах отмечают их твердость до 7000 МПа, а вместе с тем и высокую хрупкость. В других отмечают, что сплавы FeNi (20-40%) имеют величины износостойкости, твердости, характерные для чисто хромированных покрытий. Сплавы Fe-Co, Fe-Ti имеют повышенные эксплуатационные свойства [11, 13, 28, 83, 127, 137]. Повышение микротвердости железных гальваноосадков в пределах до 7000 МПа отмечено при легировании их фосфором [76, 118, 161, 163] с последующей термообработкой гальваноосадков, которой невозможно добиться на осадках чистого железа.

Приведенные литературные данные показывают, что в исследованиях разных авторов имеются противоречивые данные по физико-механическим свойствам осадков сплава железа, несмотря на большое количество экспериментальных работ по осаждению покрытий в электролитах разного состава. Нет четких представлений о механизме процесса осаждения, особенно в случае получения сплавов с неметаллическими включениями, влияния процессов выделения водорода и процессов термообработки на свойства осадков.

Проведение работ в области получения сплавов на основе железа особенно актуально в области ремонта изношенных деталей с/х техники.

Проведено большое количество исследований физико-механических свойств осадков железа от условий электроосаждения [4, 5, 12, 23, 35, 39, 69, 72, 96, 109, 162, 166, 186]. Существуют работы по исследованию микроструктуры покрытий железом [11, 19, 71, 123, 124, 177, 187]. Получены сведения о дислокационной структуре электролитических осадков железа на основе электронно-микроскопических и рентгено-структурных исследований [21, 36, 37, 77, 97, 116, 122, 125, 136, 177]. Дислокации сосредоточены в области границ субзерен, а повышение плотности катодного тока приводит к уменьшению размеров субзерен и увеличению угла разориентировки [36, 37, 77, 97, 116, 136]. Авторы этих работ предлагают принять размеры субзерен за основу характеристики прочностных свойств осадков во взаимосвязи с концентрациями дислокаций. Эволюция дислокационной структуры в процессе зарождения и роста кристаллов

электролитического осадка определяла адсорбционную прочность границ кристаллитов и тем самым физико-механические свойства покрытий в том числе повышение прочности электролитического железа [34].

Накопление в металле дислокаций, других дефектов, водорода приводит к увеличению идеального объема металла [35, 37], внутренних напряжений [21, 97], что способствует повышению хрупкости покрытий [2, 3, 8, 16, 44, 66, 73, 185, 188]. Водород в металле может присутствовать в атомарной, молекулярной формах и является причиной формирования дефектов электроосажденного железа, причиной значительных микроискажений решетки железа и появлений субмикроискажений [64, 65, 79, 81, 175, 176]. Анализ литературных источников по электроосаждению железа показывает, что износостойкость покрытий определяется такими физико-механическими свойствами как микротвердость, предел прочности, модуль упругости, внутренние напряжения.

В [129] рассматриваются вопросы взаимосвязи микротвердости покрытий с их структурой, в особенности, микроструктурой на начальных этапах разрушения металла. Сделаны попытки увязать режимы электролиза с уровнем твердости покрытий. Предполагается, что именно «тонкая» структура покрытий электролитического железа ответственна за процессы разрушения металла. Выяснение механизма разрушения на основе анализа внутренних напряжений, микротвердости гальванических осадков позволит указать оптимальные условия электролиза с физико-механическими свойствами осадков. Существуют разные методы исследования внутренних напряжений: методы гибкого катода, послойного снятия покрытий, разрезных колец, рентгенодифрактометрического анализа, который позволяет анализировать внутренние напряжения на субмикроскопическом уровне [41, 70, 128]. Необходимо учитывать, что уровни внутренних напряжений со временем изменяются из-за диффузии водорода, релаксации пиков напряжения, образования интерметаллических соединений, перехода метастабильных кристаллических структур в устойчивые, чем и могут быть обусловлены различные результаты авторов при исследовании одинаковых

объектов. Все это необходимо учитывать для получения достоверных и сравнимых результатов. Исследование структуры электроосажденного Fe показало, что осадок насыщается дефектами и при этом упрочняется до твердости 6500 МПа, величина субзерен достигает 80-120 Å<sup>0</sup>. Ужесточение режимов электролиза приводит к трещинообразному разрушению из-за переупрочнения. В связи с этим актуальны другие пути получения износостойких и прочных покрытий железа, например методами осаждения легированных сплавов на основе железа и использования методов термического упрочнения.

### **1.6 Задачи исследования**

На основании проведенного анализа сформированы **задачи исследования**:

1. Исследовать виды и характер износа деталей самотечных зернопроводов, динамику их изнашивания в процессе работы.
2. Выполнить теоретическое обоснование процесса восстановления зернопроводов электролитическими покрытиями на основе железа и хрома и исследовать структуру и физико-механические свойства получаемых покрытий для самотечных зернопроводов.
3. Предложить технологию и средства восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов, обосновать технологические параметры (плотность тока, температуру и состав электролита) и их влияние на физико-механические и эксплуатационные свойства восстановленных элементов зернопроводов.
4. Разработать практические рекомендации по восстановлению и упрочнению самотечных зернопроводов электролитическими покрытиями на основе железа и хрома с оценкой экономической эффективности предлагаемой технологии.

### **Выводы по 1 главе**

1. Перспективным направлением восстановления изношенных деталей

является использование гальванических покрытий на основе железа и его сплавов, что позволяет экономить дорогостоящие запасные части, увеличить долговечность и надежность эксплуатации отремонтированных деталей;

2. Покрытия железом и его сплавами имеют высокие физико-механические свойства, что позволяет наносить их на изношенные поверхности как в случае небольших износов (до 0,5 мм), так и больших (до 3-5 мм). Использование нестационарных режимов электролиза позволяет регулировать по толщине осадка микротвердость, сцепляемость, выход по току, рассеивающую и кроющую способность электролитов;

3. Покрытия железом из среднекислых электролитов обладают высокими пластическими свойствами и невысокой твердостью, из хлоридных – твердые, но хрупкие осадки. К недостаткам сернокислых электролитов можно отнести невысокую скорость осаждения из-за невозможности использования высоких катодных плотностей тока осаждения в нестационарных режимах нанесения. В хлоридных электролитах для получения качественных осадков необходимо поддерживать высокую температуру электролита (80-100 °С);

4. Использование нестационарных режимов нанесения железа позволит ликвидировать указанные недостатки сернокислых и хлоридных электролитов, увеличить скорости осаждения и проводить осаждение из холодных электролитов;

5. Микротвердость осадков железа не зависит от режимов нанесения и находится в пределах 2,5-5,2 МПа, поэтому ее повышение возможно в случае нанесения легированных покрытий;

6. Исследование технологических приемов, способствующих осаждению сплавов Fe-Ni, Fe-Co, Fe-Wo, Fe-V на основе рациональных режимов осаждения из растворов комплексных солей позволит получать качественные осадки с требуемыми физико-механическими свойствами;

7. Структура гальванических осадков железа определяется условиями электроосаждения, а высокая плотность дислокаций и включений по границам зерен кристаллов определяет адсорбционную прочность, микротвердость и

прочность сцепления с основой. На рекристаллизацию осадков (их размеров, разоринтировку) влияют токовые режимы нанесения и условия последующей термической обработки. Формирование твердых покрытий железом из неравновесных насыщенных дефектами структур с переводом их в равновесные стабильные структуры можно добиться удалением водорода, путем образования устойчивых интерметаллических соединений, уменьшения величины зерен кристаллов, перехода к термодинамически выгодным структурам.

Одним из путей получения износостойких и упрочненных покрытий является легирование электролитических сплавов железа, что позволяет использовать их при ремонте изношенных деталей с/х техники. Направленное формирование легированных структур за счет использования нестационарных режимов нанесения при электроосаждении позволит обеспечить необходимые физико-механические и эксплуатационные свойства отремонтированных деталей, а так же значительно снизить материально-технические затраты на ремонт, в том числе и за счет отказа от дорогостоящих запасных частей (в основном зарубежного производства).

8. Местами, наиболее подверженными возникновению очагов истирания деталей зернопроводов, являются поворотные колена и прямые участки набора скорости и торможения зернового потока. Изношенные места имеют форму раковин размером от нескольких миллиметров до 300 мм, глубиной от десятых долей миллиметра до полного протирания стенки. Рельеф раковины представляет собой постепенное снижение до максимальной величины, и затем подъем до практически не изношенной стенки.

9. Восстановление изношенных зернопроводов с помощью пластиковых (пластмассовых) технологий и материалов приводит к значительному уменьшению внутреннего диаметра труб, что сказывается в сторону уменьшения их производительности, поскольку при незначительной плотности и твердости нужно наносить большие толщины таких материалов. Вместе с тем, в результате процессов истирания пластмассовых стенок при транспортировке зерновых

продуктов происходит их загрязнение составляющими пластмасс, что ухудшает качество и санитарно-гигиенические характеристики продуктов. Использование гальванических износостойких покрытий лишено этих недостатков. Диаметр восстановленных трубопроводов изменяется незначительно, что не сказывается на транспортных характеристиках, так же они отличаются низкими коэффициентами трения, что уменьшает некондиционность зерна после транспортных перемещений из-за процессов трения.

## ГЛАВА 2. АНАЛИЗ ИЗНОСОВ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕРНОПРОВОДОВ

### 2.1 Исследование динамики изнашивания самотечных зернопроводов

Исследуя процессы изнашивания можно прийти к выводу, что некоторые законы динамики изнашивания В.Ф. Лоренца можно применить для описания процессов изнашивания самотечных труб. Однако этими законами можно описать не все процессы, происходящие во время работы зернопроводов.

Большую роль при изнашивании зернопроводов играет качество материалов и их поверхностные свойства, что проявляется при построении графиков динамики изнашивания.

На рисунке 2.1 изображен график изнашивания самотечных труб, который можно наблюдать на прямолинейных участках ускорения или торможения потоков зерна, где в течение всего периода нормальной эксплуатации происходит постепенный износ. На графике этот временной участок изображен отрезком  $0-t_1$ . В конце периода нормальной работы зернопроводов можно наблюдать резкое повышение скорости изнашивания, когда материал зернопровода становится очень тонким, и в дальнейшем протирается до сквозных отверстий.

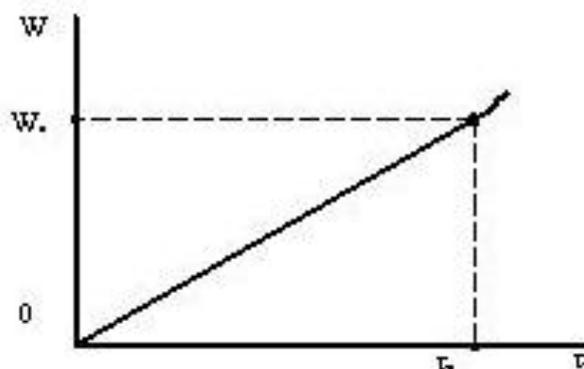


Рисунок 2.1 – График динамики изнашивания прямолинейного участка зернопровода

При использовании самотечных труб с не качественной внутренней поверхностью можно наблюдать участок приработки поверхности ( $0-\tau_1$ ), с дальнейшим постепенным износом на участке  $\tau_1-\tau_2$  и возрастанием скорости износа на участке после  $\tau_3$  (рисунок 2.2). Данный вид изнашивания можно наблюдать на всех участках систем зернопроводов.

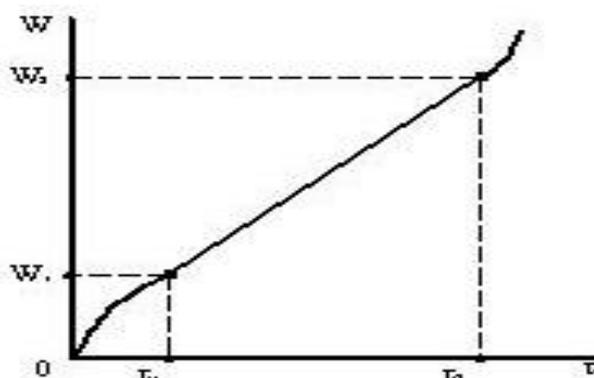


Рисунок 2.2 – Классический график динамики изнашивания с участком приработки

График динамики изнашивания состоит из трех участков: притирания, основного износа, и интенсивного износа. Износ на каждом из этих участков осуществляется по определенному закону, который можно записать в виде аналитической зависимости.

Для первого участка (притирания) приемлемо уравнение параболы, проходящей через начало координат:

$$W = -a\tau^2 + b\tau \quad (2.1)$$

Точкой окончания первого участка и одновременно начала второго участка будет точка касания  $\tau_1$  параболы и прямой линии.

Второй участок графика динамики изнашивания (основного износа) описывается в общем виде линейной функцией 2.2, и выглядит следующим образом:

$$W = q\tau + p, \quad (2.2)$$

где  $W$  – величина износа, мг; мм;

$q$  – показатель интенсивности изнашивания материала стенки самотека, мг/т; мм/т;

$p$  – показатель смещения кривой относительно начала координат: мг; мм;

$\tau$ – количество зерна, прошедшего через зернопровод, т.

Величина износа может измеряться в единицах длины (мм), как изменение толщины стенки детали или в единицах потери массы (мг) при истирании. Продолжительность изнашивания определяется временем работы (ч) детали или единицами массы материала (т), прошедшего через зернопровод.

Показатель интенсивности « $q$ » характеризует «скорость» изнашивания. Чем он больше, тем интенсивность изнашивания выше и тем круче проходит кривая основного износа на графике.

Показатель « $p$ » смещения кривой относительно начала координат косвенно характеризует свойства истираемой поверхности. В некоторых случаях поверхность такова, что притирания не происходит. Тогда показатель смещения кривой равен нулю ( $p=0$ ) и износ идет в соответствии с линейной моделью в виде прямой линии на графике, проходящей через начало координат, как показано на графике, рисунок 2.1.

В большинстве случаев взаимодействия трущихся поверхностей этап притирания присутствует, тогда показатель  $p$  больше нуля ( $p>0$ ). Если трущаяся поверхность обладает повышенной прочностью, то на графике износа возникает участок, когда износ в процессе притирания не наблюдается (рисунок 1.7 графикv). В этот период под действием удара частиц о поверхность, температуры, трения происходит изменение свойств поверхности без отрыва и износа частиц потоком, который воздействует на поверхность. В этом случае показатель меньше нуля ( $p<0$ ).

Для того, чтобы найти точку, в которой парабола переходит в прямолинейную зависимость, необходимо записать функцию касательной к параболе. Функция касательной в общем виде имеет вид:

$$W = f'(\tau_1) + f'(\tau_1)(\tau - \tau_1). \quad (2.3)$$

Производная функция 2.3 по времени имеет вид:

$$W' = -2a\tau + b \quad (2.4)$$

Тогда функцию касательной можно записать в следующем виде:

$$W = -a\tau_1^2 + b\tau_1 + (-2a\tau_1 + b)(\tau - \tau_1), \quad (2.5)$$

или после преобразований получим следующую зависимость:

$$W = (-2a\tau_1 + b)\tau + a\tau_1^2 \quad (2.6)$$

Сравнив функции 2.1 и 2.6 получим:

$$q = -2a\tau_1 + b; \quad (2.7)$$

$$p = a\tau_1^2 \text{ или } a = p/\tau_1^2, \quad (2.8)$$

тогда:

$$b = 2a\tau_1 - q. \quad (2.9)$$

Подставим в формулу 2.9 значение  $a$  и получим выражение показателя  $b$ :

$$b = \frac{2p}{\tau_1} + q, \quad (2.10)$$

Подставив полученные значения в функцию 2.2 получим выражение квадратичной параболы (2.2) через показатели линейной модели износа  $q$  и  $p$ :

$$W = \frac{p}{\tau_1^2} \tau^2 + \left( \frac{2p}{\tau_1} + q \right) \tau \quad (2.11)$$

Это дает нам возможность получить аналитическое выражение износа в период притирания (на первом этапе при изменении продолжительности изнашивания от  $\tau=0$  до  $\tau=\tau_1$ ) в зависимости от показателей  $p$  и  $q$  линейной модели.

Нами предлагается совместить две аналитические зависимости: линейную и квадратичную в одну непрерывную функцию с помощью функции Хейвисайда (Heavisida) (рисунок 2.3).

Функция Хейвисайда для описания первого этапа изнашивания имеет вид:

$$W_{\Phi 1} = \Phi(\tau) \cdot \Phi(\tau - \tau_1) \quad (2.12)$$

Функция Хейвисайда для первого этапа изнашивания принимает значение, равное единице в диапазоне аргумента от нуля до  $\tau_1$  (рисунок 2.3б). Во всех остальных значениях функция 2.12 равна нулю.

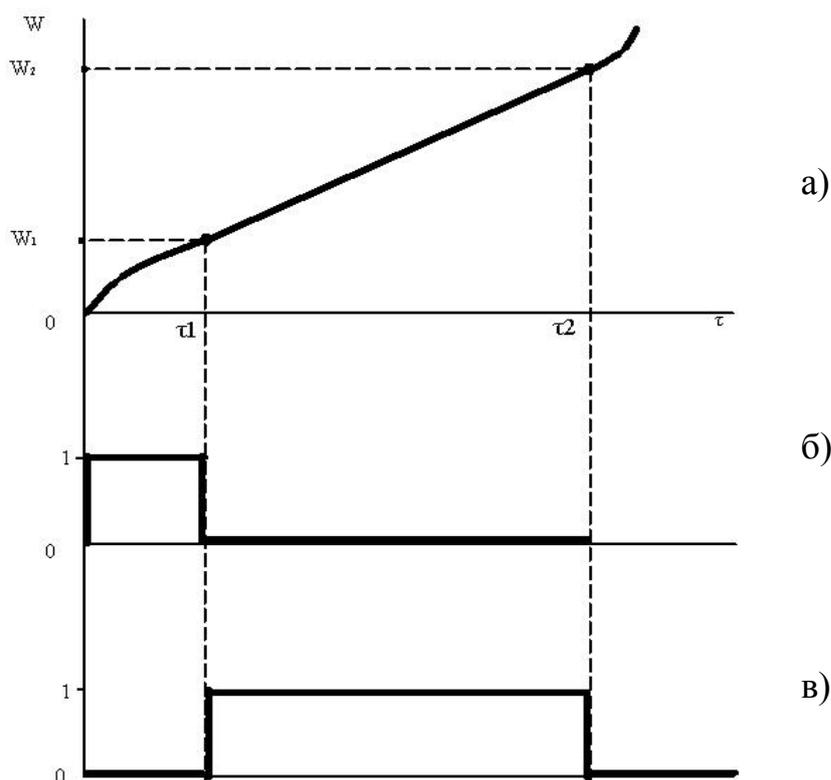


Рисунок 2.3 – График динамики изнашивания и функция Хейвисайда

Функция Хейвисайда для описания второго этапа изнашивания имеет вид:

$$W_{\Phi 2} = \Phi(\tau_1) \cdot \Phi(-\tau_2), \quad (2.13)$$

Функция Хейвисайда второго этапа изнашивания в диапазоне от  $\tau_1$  до  $\tau_2$  принимает значение единицы (рисунок 2.3в), в остальных случаях - равна нулю.

Тогда аналитическая зависимость изнашивания самотечного зернопровода потоком зерна будет иметь вид:

$$W = \left[ \frac{p}{\tau_1^2} \cdot \tau^2 + \left( \frac{2p}{\tau_1} + q \right) \cdot \tau \right] \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_1) + [q\tau + p] \cdot \Phi(\tau_1) \quad (2.14)$$

Третий участок интенсивного износа в расчет не включался, так как по времени он очень мал и в период его действия происходит протирание стенки до сквозного отверстия и разрушение зернопровода, что недопустимо.

Полученная аналитическая зависимость (2.14) позволяет расчетным методом определить величину износа стенки зернопровода в зависимости от продолжительности его работы.

Для выполнения расчетов необходимо иметь значения показателя «q»

интенсивности изнашивания стенки и показателя «р» смещения кривой относительно начала координат. Эти показатели определяются экспериментальным путем.

## **2.2 Исследование динамики изнашивания восстановленных и упрочненных зернопроводов**

Восстановленный зернопровод представляет собой зернопровод, на изношенную стенку которого нанесен слой другого материала. Восстанавливающий слой материала характеризуется показателями:  $h_v$  – толщиной восстанавливающего слоя, мм;  $q_v$  – показателем интенсивности изнашивания нанесенного слоя, мм/т;  $p_v$  – показателем смещения кривой.

Толщина восстанавливающего слоя назначается в зависимости от условий эксплуатации участка зернопровода, а показатели  $q_v$  и  $p_v$  определяются экспериментально для каждого восстанавливающего материала. На кривой износа появляется третий участок (рисунок 2.4). При этом притиранию будет подвергаться нанесенный восстанавливающий материал-  $h_v$ . Второй участок кривой износа (в диапазоне  $\tau_1$ – $\tau_2$ ) соответствует износу восстанавливающего материала. Третий участок (в диапазоне  $\tau_2$ – $\tau_3$ ) соответствует износу оставшейся стенки материала зернопровода. Та же динамика износа будет наблюдаться при эксплуатации упрочненного зернопровода: вначале будет изношен упрочняющий слой, затем с гораздо большей интенсивностью основной материал стенки зернопровода.

Восстанавливающий и упрочняющий слои обладают каждый свойственной ему интенсивностью изнашивания в зависимости от эксплуатационных свойств материала. Для того чтобы аналитически описать динамику изнашивания упрочненной или восстановленной поверхности нами предлагается использовать показатель относительной интенсивности износа. Он представляет собой отношение показателя интенсивности изнашивания восстанавливающего или

упрочняющего слоя к показателю интенсивности изнашивания основного материала стенки зернопровода:

$$d_b = q_b / q, \text{ или } d_y = q_y / q; \quad (2.15)$$

где  $q_b, q_y$  – показатели интенсивности изнашивания восстанавливающего и упрочняющего слоя;

$d_b, d_y$  – показатели относительной изнашиваемости восстанавливающего и упрочняющего слоя.

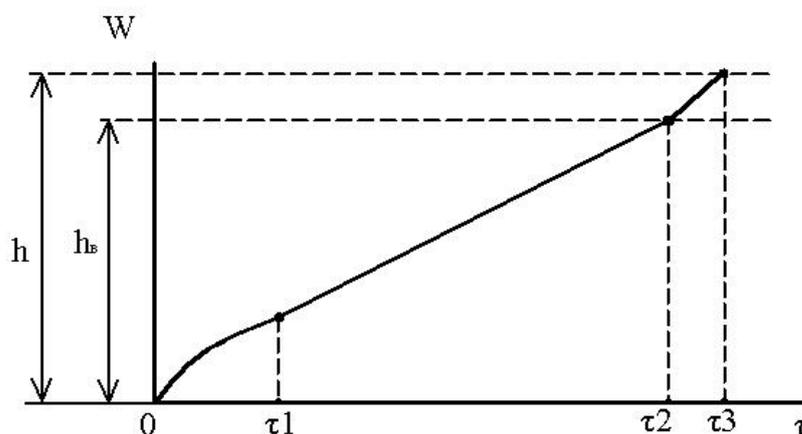


Рисунок 2.4 – График зависимости изнашивания восстановленной стенки зернопровода от продолжительности изнашивания

Для восстановленного или упрочненного зернопровода участок притирания будет представлять собой притирание нанесенного слоя и описываться выражением:

$$W_{1B} = (p_b / \tau_{b1}^2) \cdot \tau^2 + (2p_b / \tau_{b1} + q_b) \tau, \quad (2.16)$$

Участок основного износа нанесенного восстанавливающего или упрочняющего слоя будет описываться линейной математической моделью:

$$W_{B2} = q \cdot d_b \cdot \tau + p_b, \quad (2.17)$$

Если пренебречь зоной плавного перехода изнашивания нанесенного слоя в изнашивание материала стенки зернопровода и посчитать, что переход этот происходит скачкообразно в точке  $\tau_2$ , когда величина износа равна толщине нанесенного восстанавливающего или упрочняющего слоя, то участок изнашивания оставшейся стальной стенки зернопровода будет описываться

выражением:

$$W_3 = q \cdot \tau + p_3, \quad (2.18)$$

где  $p_3$  – показатель смещения линейной модели стенки зернопровода по оси ОУ относительно начала координат при наличии восстанавливающего или упрочняющего слоя, мм.

Момент условной точки перехода от изнашивания нанесенного слоя к изнашиванию материала стенки зернопровода  $\tau_2$  определится преобразованием выражения 2.17 при условии  $W_{B2}=3$ :

$$\tau_2 = (p_B - h_B) / q \cdot d_B, \quad (2.19)$$

где  $h_B$  – толщина нанесенного восстанавливающего или упрочняющего слоя, мм.

Показатель смещения линейной модели изнашивания стенки зернопровода определится подстановкой выражения 2.19 в зависимость 2.18 при условии  $W_3 = h_B$ :

$$p_3 = h_B - (p_B - h_B) / d_B, \quad (2.20)$$

Тогда выражение 18 принимает вид:

$$W_3 = q\tau + h_B - (p_B - h_B) / d_B, \quad (2.21)$$

С учетом выражений 2.16, 2.17 и 2.21 аналитическая зависимость изнашивания восстановленного или упрочненного зернопровода потоком зерна принимает вид:

$$W(\tau) = \left[ \frac{p_B \cdot \tau^2}{\tau_1^2} + \left( \frac{2p_B}{\tau_1} + q \cdot d_B \right) \cdot \tau \right] \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_1) + [q \cdot d_B \cdot \tau + p_B] \cdot \Phi(\tau_1) \cdot \Phi(-\tau_2) + \left[ (q\tau + s - \frac{p_B}{d_B}) \cdot \Phi(\tau_2) \right] \quad (2.22)$$

Если участок притирания отсутствует или им можно пренебречь, то  $p_B=0$  и  $\tau_1=0$  и выражение 2.22 принимает вид:

$$W(\tau) = q \cdot d_B \cdot \tau \cdot \Phi(\tau) \cdot \Phi(-\tau_2) + q\tau + h_B - \frac{h_B}{d_B} \cdot \Phi(\tau_2) \quad (2.23)$$

Выражение 2.23 ясно показывает, что на функцию износа от количества прошедшего материала оказывают влияние показатель интенсивности изнашивания материала стенки самотека  $q$  и показатель относительной

изнашиваемости нанесенного восстанавливающего или упрочняющего слоя  $d_b$ .

На рисунке 2.5 представлена схема износа стенки зернопровода, которая восстановлена Fe-Ni или Fe-Ni-P покрытием и дополнительно упрочнена хромированием. Первая кривая представляет собой изнашивание нового зернопровода, изготовленного из листовой стали, с толщиной стенки  $h$ . Вторая кривая показывает износ той же стенки, но восстановленной Fe-Ni сплавом, третья кривая Fe-Ni-P сплавом. Кривая 4 показывает износ упрочняющего слоя хромом. После того как будет изношен упрочняющий хромовый слой начинается износ основного материала. Из точки окончания износа хрома нами для сравнения построены три прямые линии износа: 5 – износ листовой стали, 6 – износ Fe-Ni сплава, 7 – износ Fe-Ni-P сплава. По пересечению этих линий с горизонтальной линией толщины стенки определяется наработка зернопровода. В начальный период от  $\tau_1$  до  $\tau_{Cr}$  происходит износ упрочняющего хромового слоя, толщиной  $h_y$ . На втором этапе от  $\tau_{Cr}$  до  $\tau_{Ni}$  происходит износ восстанавливающего слоя, который имеет толщину  $h_b$ . По рисунку видно, что слой, восстановленный Fe-Ni-P сплавом, работает дольше Fe-Ni сплава, так как у него показатель интенсивности изнашивания меньше чем у Fe-Ni. Продолжительность истирания происходит до минимально допустимой толщины стенки и определяется выражениями 2.24-2.27. Это дает возможность определить ожидаемую продолжительность работы зернопровода до предельного состояния и спланировать время замены изношенной детали на новую или отремонтированную.

$$W_{Cr} = q_{Cr3} \cdot \tau \cdot d_{Cr}; \tau_{Cr} = h_{Cr} / q_{Cr3} \cdot d_{Cr} \quad (2.24)$$

$$W_{Fe-Ni} = q_{Cr3} \cdot \tau \cdot d_{Fe-Ni}; \tau_{Fe-Ni} = (h_{Fe-Ni} / q_{Cr3} \cdot d_{Fe-Ni}) + \tau_{Cr} \quad (2.25)$$

$$W_{Fe-Ni-P} = q_{Cr3} \cdot \tau \cdot d_{Fe-Ni-P}; \tau_{Fe-Ni-P} = (h_{Fe-Ni-P} / q_{Cr3} \cdot d_{Fe-Ni-P}) + \tau_{Cr} \quad (2.26)$$

$$W_{Cr3} = q_{Cr3} \cdot \tau; \tau_{Cr3} = h_{Cr3} / q_{Cr3} + \tau_{Cr} + \tau_{Fe-Ni} \quad (2.27)$$

Полученные выше зависимости носят эмпирический характер. Для них нами экспериментально определены показатели  $q$  и  $r$ . Полученные зависимости позволяют решить обратную задачу: обосновать толщину нанесенных слоев для получения заданной наработки. На правой стороне графика показаны точки

пересечений линий кривых износа с правой границей графика, которые показывают толщину необходимого слоя, чтобы получить заданную наработку. График 2.5 и формулы 2.24-2.27 показывают, что толщина восстанавливающего и упрочняющего слоев Fe-Ni-P сплава должна быть 3,2 мм, Fe-Ni – 4,38 мм, Стали – 6 мм. Это подтверждается данными эксперимента.

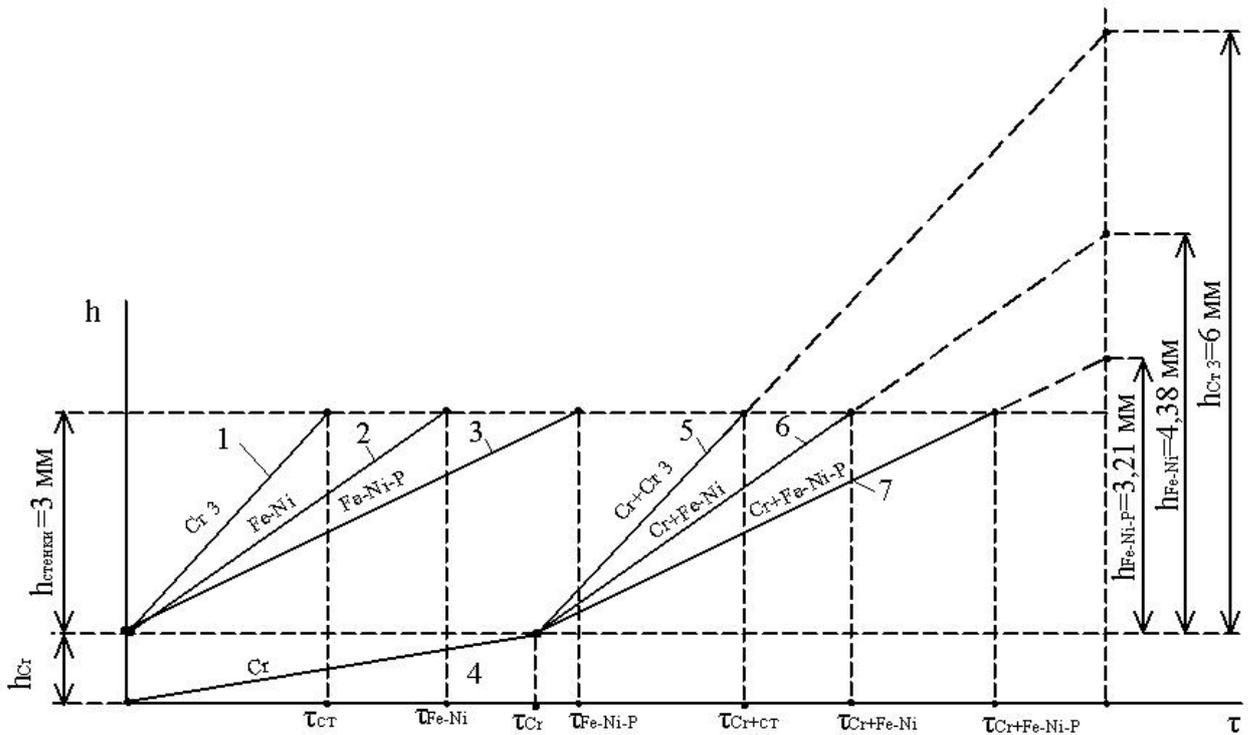


Рисунок 2.5 – График зависимости изнашивания восстановленной и упрочненной стенок зернопровода от количества прошедшего материала

Если задана продолжительность работы зернопровода, например: он должен доработать до конца сезона без остановки, тогда с помощью графика на рисунке 2.5 и формул 2.24-2.27 можно определить толщину восстанавливающего слоя, которая обеспечила бы заданную долговечность зернопровода.

### 2.3 Теоретические предпосылки к обоснованию режимов нанесения электролитических покрытий

Зачастую зернопровод протирается до сквозных отверстий и толщина кромки отверстия стенки близка к нулю. Зернопровод необходимо направлять на восстановление, когда минимальная толщина стенки достигает 0,1-0,2 мм.

Восстановление тонкостенных деталей имеет особенность: при нагреве острые края стенки оплавляются, тем самым отверстие увеличивается. Попытка упрочнения тонкой стенки без ее нагрева приводит к наводороживанию материала и водородному охрупчиванию. Это затрудняет процесс наращивания раковины металлом, так как хрупкая тонкая стенка может осыпаться.

Детали зернопроводов (поворотные колена, переходники, соединители, вводы) имеют сложную форму, что затрудняет возможность достижения восстанавливаемой поверхности инструментом.

Все это дает основания сформулировать условия восстановления самотечных зернопроводов:

1. восстановление должно производиться без нагрева стенки зернопровода;
2. должно быть до минимума сокращено водородное охрупчивание самотека, особенно истонченных мест;
3. инструмент и материал должны иметь возможность проникать в сложные внутренние поверхности самотека.

Таковыми свойствами обладают гальванические методы восстановления изношенных поверхностей.

Нами предлагается восстановление изношенных стенок зернопроводов выполнять на нестационарных режимах переменного асимметричного тока с регулируемым катодно-анодным отношением. При малых значениях катодно-анодного отношения в процессе нанесения восстанавливающего слоя формируется мягкий слой, обладающий высокой сцепляемостью с основным металлом, твердость которого соизмерима с твердостью металла стенки зернопровода. Повышение катодно-анодного отношения позволяет получить постепенное наращивание твердости по толщине слоя до максимальной твердости, которая обеспечивает повышенную износостойкость.

Восстановление на нестационарных режимах тока дает возможность использования как уже известных сплавов и электролитов, так и новых. Так

использование Fe-Ni-P сплава обеспечивает повышенную твердость и износостойкость при низкой себестоимости. Однако технология использования указанного сплава и свойства восстановленной с его применением поверхности исследованы недостаточно.

Таким образом, наиболее перспективным способом восстановления изношенных самотечных зернопроводов можно считать электролитический метод покрытия изношенных поверхностей Fe-Ni-P сплавом на нестационарных режимах электролиза. Восстановление и упрочнение стенок зернопровода может проводиться по всей внутренней поверхности или локально в местах повышенного износа, в гальванических ваннах или вне ваннным способом.

Каждая изношенная поверхность характеризуется своей глубиной, площадью, градиентом толщины изношенной стенки. Возникает задача определения необходимой толщины наносимого покрытия и выбора технологических режимов электролиза для получения этой толщины.

Толщина наносимого слоя будет определяться по предложенной нами формуле 2.23, исходя из продолжительности безремонтной эксплуатации восстанавливаемой детали. Необходимая наработка может быть обеспечена, как показывает рисунок 2.5, толщиной восстанавливаемого слоя и толщиной упрочняющего слоя. Традиционно толщина хромового покрытия не превышает 0,3 мм так как покрытие может отслаиваться. Кроме того хромовое покрытие дорого. Поэтому мы рекомендуем толщину хромового покрытия не более 0,2 мм, а толщину Fe-Ni-P покрытия вычислять по предложенной формуле.

Наши исследования показали (рисунок 4.18), что максимальная твердость Fe-Ni-P покрытия близка к твердости покрытия хромом (ниже на 28%). Это дает основание ограничиться нанесением только Fe-Ni-P покрытия без хромирования.

Время осаждения, как известно [180], определяется отношением произведения плотности осажденного металла, толщины покрытия к произведению катодной силы тока, электрохимического эквивалента и выхода металла по току. Зависимость времени осаждения от указанных параметров

выражается формулой 2.28 [180]:

$$t_0 = \frac{1000 \cdot \gamma \cdot h}{D_k \cdot C \cdot \eta}, \quad (2.28)$$

где  $C$  – электрохимический эквивалент (для каждого металла величина постоянная), для железа  $C=1,043$  г/А·ч, для хрома  $C=0,323$  г/А·ч;

$\gamma$  – плотность осаждаемого металла,  $\gamma_{ж} = 7,62$  г/см<sup>3</sup>;

$h$  – требуемая толщина покрытия, мм;

$D_k$  – катодная плотность тока, А/дм<sup>2</sup>;

$\eta$  – выход металла по току, %.

Катодная плотность тока, проходящего через электролит в процессе электроосаждения, определяется по формуле:

$$D_k = I / S_k, \quad (2.29)$$

где  $I$  – сила тока, проходящего через электролит в процессе электроосаждения, А;

$S_k$  – площадь раковины покрываемой детали.

Это дает основание рекомендовать следующие параметры нанесения Fe-Ni-P покрытия:

- плотность тока до 30 А/дм<sup>2</sup>;
- температуру 20 – 30 °С;
- катодно-анодное отношение ( $\beta=1,3-2$ ) в первые 0,3-2 минуты с последующим постепенным увеличением до  $\beta=7-8$ ;
- длительность восстановления в зависимости от величины износа определяется по формуле (2.25).

Раковина локального износа имеет постепенное снижение толщины стенки от краев раковины к точке максимального износа. Поэтому в процессе нанесения необходимо добиться, чтобы наносимый восстанавливающий слой выравнивал толщину стенки до заданного размера. Исходя из формулы 2.25, этого можно добиться за счет снижения площади анода и удаления его от восстанавливаемой поверхности. Это условие приводит к необходимости для каждой раковины индивидуально изготавливать анод соответствующей площади и форме раковины.

С целью снижения площади по периферии анода вырезаются треугольные пазы, а оставшиеся лепестки отгибаются от поверхности с целью постепенного увеличения расстояния от анода до восстанавливаемой поверхности.

### **Выводы по 2 главе**

1. Получена аналитическая зависимость изнашивания стенки нового зернопровода на этапах притирания и основного износа, которая позволяет расчетным методом определить величину износа стенки зернопровода в зависимости от количества прошедшего зерна.

2. Предложена аналитическая зависимость изнашивания восстановленного и упрочненного зернопровода потоком зерна в зависимости от количества прошедшего материала, позволяющая аналитически определить величину износа восстановленной и упрочненной стенки зернопровода в процессе эксплуатации.

3. Получены зависимости износа стенки зернопровода в процессе работы с учетом количества прошедшего материала и относительной изнашиваемости наносимого слоя, что дает возможность определить ожидаемую продолжительность работы зернопровода до предельного состояния и спланировать время замены изношенной детали на новую или отремонтированную и обосновать толщину восстанавливающего и упрочняющего слоя, обеспечивающего заданную наработку.

4. Продолжительность осаждения восстанавливающего или упрочняющего слоя определяется толщиной наносимого покрытия, при этом следует учитывать площадь раковины износа и применять обоснованную нами плотность тока.

## ГЛАВА 3. ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Методика нанесения покрытий

Электроосаждение железо-никелевых покрытий проводилось из электролита, содержащего серную кислоту ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) с  $\text{pH}=1,0-0,6$  – 350-400 г/л; сернокислое железо ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) – 150-350 г/л, никель сернокислый ( $\text{NiSO}_4$ ) – 35-75 г/л, аскорбиновую кислоту ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) – 3-7 г/л. Аскорбиновая кислота была введена для замедления реакции перехода трехвалентного железа в двухвалентное, и тем самым увеличения долговечности электролита.

Электроосаждение железо-никель-фосфорных покрытий проводилось из электролита, содержащего серную кислоту ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) с  $\text{pH}=1,0-0,6$  – 350-400 г/л; сернокислое железо ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) – 150-350 г/л, никель сернокислый ( $\text{NiSO}_4$ ) – 10-75 г/л, гипофосфит натрия ( $\text{Na}(\text{PH}_2\text{O}_2)$ ) – 5-15 г/л, аскорбиновую кислоту ( $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ ) – 3-7 г/л.

Электролит железнения готовился путем растворения в серной кислоте расчетного количества компонентов, добавляемых поочередно пропорциями до полного растворения. В качестве ванн использовались футерованные фторопластом металлические и полиэтиленовые емкости объемом 1,5 и 3 л. В качестве анодов использовались растворимые аноды, изготовленные из Ст3 в виде пластинок прямоугольной формы с соотношением анода к катоду 1:2.

Процесс хромирования осуществлялся в известном малоконцентрированном электролите следующего состава: хромовый ангидрид ( $\text{CrO}_3$ ) – 90-150 г/л, серная кислота ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) – 0,9-1,5 г/л, кристаллический фиолетовый (КФ) – 0,9-1,5 г/л [8, 165].

Электролит готовился путем растворения каждого компонента в отдельности в дистиллированной воде и последующем смешивании в гальванической ванне с доливанием воды до необходимого объема. В качестве

анодов использовались свинцовые пластины. Использовалась сваренная из нержавеющей стали ванна объемом 100 литров. В процессе испытаний ванна заполнялась наполовину. Изготовленный электролит хромирования наводился один раз и использовался на всем протяжении исследований.

Нанесение покрытий происходило при следующих режимах:

- железо-никелевого и железо-никель-фосфорного покрытий на асимметричном переменном токе: катодная плотность тока составляла в пределах 2-35 А/дм<sup>2</sup>, катодно-анодное отношение ( $\beta$ ) – 2-12, температура электролита находилась в пределах 20-40 °С, кислотность электролита рН = 0,9-1,0;

- железо-никелевого и железо-никель-фосфорного покрытий на постоянном токе: катодная плотность тока составляла в пределах 5-35 А/дм<sup>2</sup>, температура электролита находилась в пределах 50-70 °С, кислотность электролита рН = 0,9-1,0;

- хрома на асимметричном переменном токе с плотностью тока 40 - 150 А/дм<sup>2</sup>,  $t_{кат}/t_{ан} = 50-70$ ,  $\beta = 1-3$ , при температуре 30 - 60 °С [194].

В качестве опытных образцов, на которые наносили покрытия, использовались заготовки из листовой стали Ст3, размером 30x40x2 мм (для физико-механических исследований (а)) и 15x10x2 мм (для рентгеноструктурных исследований (б)) (рисунок 3.1).

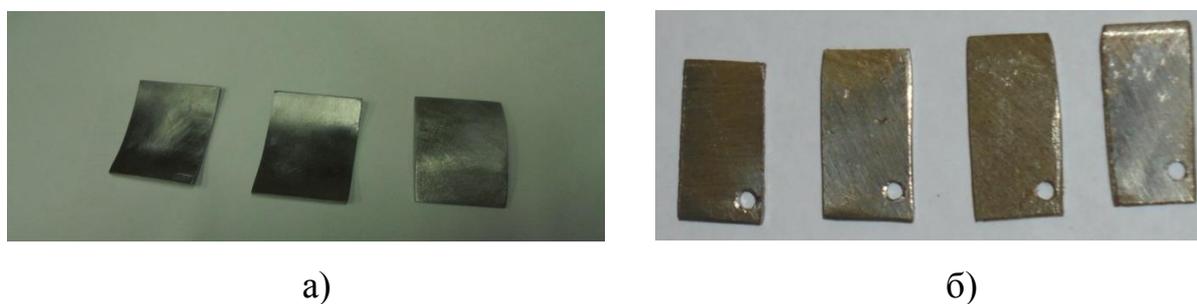


Рисунок 3.1 – Внешний вид образцов для физико-механических (а) и рентгеноструктурных исследований (б)

Электроосаждение проводилось в одинаковых условиях с 3-5 кратной повторностью в свежеприготовленном электролите.

Для определения кислотности электролита использовали лакмусовую бумагу и электронный рН-метр (KL-012). Уровень электролита и кислотность в ванне поддерживалась добавлением серной кислоты и дистиллированной воды.

Количество осажденного металла на катоде определялось весовым методом с помощью взвешивания образцов до и после нанесения на лабораторных весах ВЛА-200М с точностью 0,1 мг. Образцы после осаждения на них металла тщательно промывались в холодной и горячей воде, выдерживались в эксикаторах до постоянного веса.

Электролитические покрытия наносили на образцы плоской прямоугольной и изогнутой формы. Перед нанесением образцы проходили подготовительные операции: тщательно отмывались и обезжиривались в теплой воде содержащей тринатрийфосфат, едкий натр, соду, промывались в горячей, холодной воде, высушивались и взвешивались. Обезжиривание и промывка проводилась проточной водой. Далее образцы подвергались анодному травлению и пассивированию в 30% серной кислоте в течении 0,5-2 минут, с плотностью анодного тока 30-50 А/дм<sup>2</sup>. После травления образцы промывались в горячей и холодной воде, и затем помещались в гальваническую ванну на подвесках. Режим осаждения покрытий (плотность тока и катодно-анодное отношение) устанавливали в течение 2 минут с постепенным увеличением тока от 2А до рабочих параметров. После завершения процесса электроосаждения детали тщательно промывались в горячей и холодной воде и высушивались. Последующая механическая обработка после нанесения покрытий не проводилась, т.к. полученные покрытия наносились определенной толщины и имели равномерные поверхности по всей площади образцов.

Хромирование проводили после аналогичных подготовительных операций так же, как и для электроосаждения покрытий на основе железа. Хромом покрывали образцы на постоянном и асимметричном переменном токе. После завешивания деталей в ванну подавался скачок тока, превосходящий в 2-4 раза рабочий ток на 20-60 секунд, после чего устанавливалось рабочее значение тока.

Для улучшения качества получаемого покрытия в процессе нанесения использовался реверс тока, через каждые 10 минут катодного тока, на 2-3 минуты включали анодный ток при одинаковой плотности тока. Процесс длится до достижения необходимой толщины покрытия. Восстановленные детали промывались в горячей и холодной воде.

### 3.2 Приборы и оборудование

Питание лабораторной установки осуществлялось как постоянным, так и асимметричным переменным током, электрическая схема питания лабораторной установки представлена на рисунке 3.2.

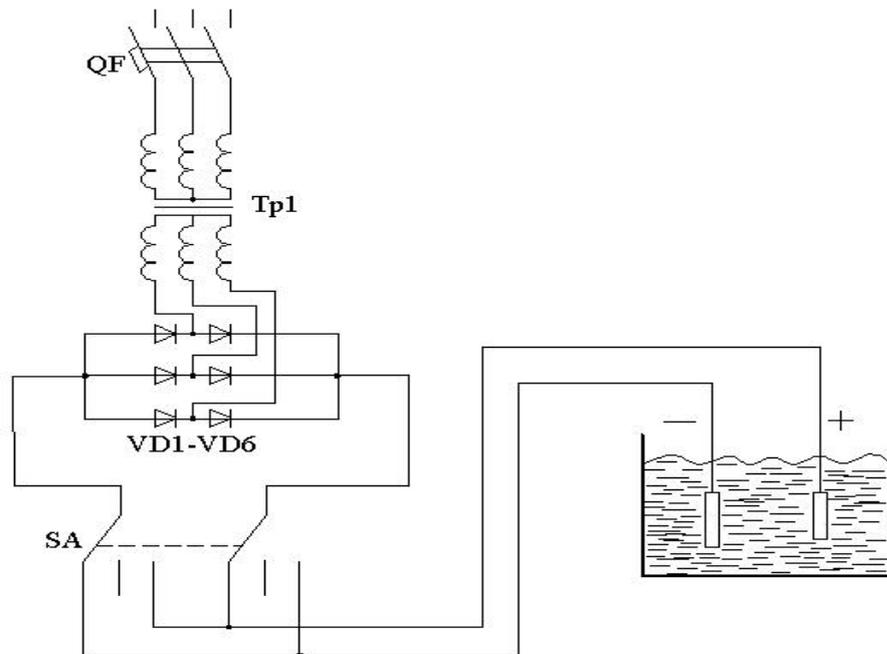


Рисунок 3.2 – Электрическая схема питания лабораторной установки на постоянном токе

Питание лабораторной установки асимметричным переменным током осуществлялось по схемам изображенным на рисунках 3.3 и 3.4.

Микротвердость электролитических покрытий определялась с помощью микротвердомера ПМТ-3, согласно ГОСТ 9450-76 (рисунок 3.5) [32].

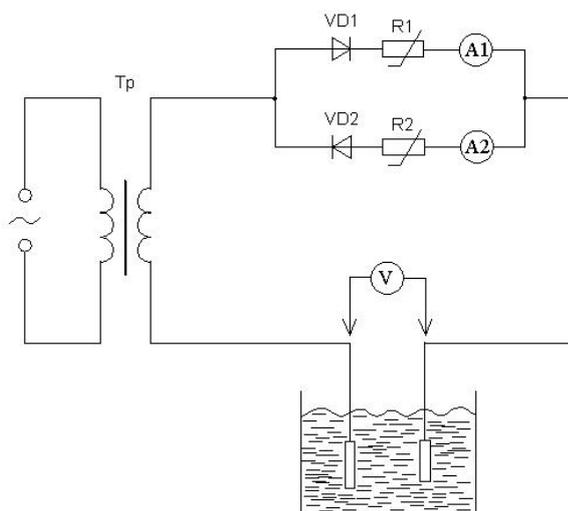


Рисунок 3.3 – Принципиальная электрическая схема преобразователя для получения асимметричного переменного тока: Тр - трансформатор; VD1, VD2 - силовые диоды; R1, R2 - реостаты катодного и анодного полупериодов; A1, A2 – амперметры; V – вольтметр

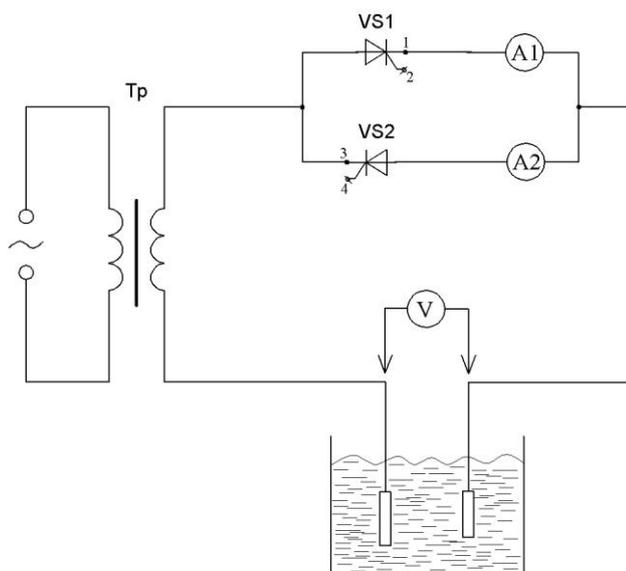


Рисунок 3.4 - Принципиальная электрическая схема преобразователя для получения асимметричного переменного тока с помощью тиристорov: Тр - трансформатор; VS1, VS2 – управляемые тиристоры; A1, A2 – амперметры; V – вольтметр

На образцах делали по 10 уколов на однородных участках покрытий с выдержкой 10 с. Уколы производили на образцах без видимых повреждений (трещин, отслаивания осадка и т.д.). Полученное максимальное и минимальное

значения отбрасывались, а из оставшихся значений рассчитывали среднее значение.



Рисунок 3.5 - Внешний вид микротвердомера ПМТ-3.

### **3.3 Анализ элементного состава покрытий**

Анализ элементного состава покрытий, нанесенных на образцы, изготовленные из Ст3, выполнялся методом электронной микроскопии и рентгеноспектрального анализа.

Химический и элементный состав определяли при помощи растрового электронного микроскопа JSM-6380LV (JEOL, Япония) с системой микроанализа INCA 250 (Oxford Instrument, Великобритания) (рисунок 3.6). Анализ кристаллических фаз выполнен при помощи рентгеновской дифрактометрии ARL X'TRA (Thermo Scientific, Швейцария) [131, 132].

Условия съемки на растровом электронном микроскопе JSM-6380LV – ускоряющее напряжение 20 кВ.

Принцип работы растрового электронного микроскопа заключается во взаимодействии электронного пучка, генерирующегося электронной пушкой, с исследуемым образцом. На поверхность образца направляется электронный пучок, в результате взаимодействия образуются низкоэнергетичные вторичные

электроны, несущие информацию о топографии поверхности, физических и химических свойствах поверхности образца. С помощью детектора вторичных электронов (полупроводниковых элементов) количественные изменения этих электронов преобразуются в электрические сигналы. Электрические сигналы поступают вначале в предусилитель, а затем в операционный усилитель, после чего полученные данные о покрытии образца регистрируются в цифровой форме [103, 131, 132].



Рисунок 3.6 – Внешний вид растрового электронного микроскопа JSM-6380LV

Фазовый состав исследовали методом рентгеновской дифрактометрии в геометрии Брегга–Брентано с использованием  $\text{CuK } \alpha$ -излучения на рентгеновском дифрактометре ARL X'TRA (рисунок 3.7). Дифрактограммы получали с приповерхностного слоя ( $\sim 15$  мкм). Дискриминация неупругого рассеянного излучения осуществлялась полупроводниковым энергодисперсионным детектором с разрешением 250 эВ и охладителем на элементах Пельтье [134].



Рисунок 3.7 – Внешний вид рентгеновского дифрактометра ARL X'TRA

### 3.4 Методика определения износостойкости покрытий

Исследования на износостойкость гальванических покрытий проводились на образцах диск-колодка в условиях трения без смазочного материала в соответствии с ГОСТ 30480-97 [31] и ГОСТ 17367-71 [30] для испытаний на абразивное изнашивание [107]. На рисунке 3.8 представлена лабораторная установка для испытаний на износостойкость в сборе.



Рисунок 3.8 – Устройство для испытания образцов на износостойкость

В качестве контр образца (контр тела) использовался цилиндр, изготовленный из серого чугуна (СЧ28-48) диаметром 134 мм обернутого

абразивной шкуркой.

В качестве образцов (колодок) использовались стальные пластинки марки Ст3, размером 30x40x2 мм, изогнутые согласно радиусу цилиндра равному 67 мм. Изгиб осуществлялся для увеличения площади соприкосновения образцов с контр телом. Площадь контактирующей поверхности составляла 12 см<sup>2</sup>. Материал образцов был выбран исходя из данных об материалах из которых изготавливаются зернопроводы.

Перед нанесением покрытий пластины притирались контр образцом до достижения максимальной площади соприкосновения.

После нанесения Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытий толщина пластин была равна 2,30±0,01 мм. Толщина образцов, покрытых хромом, составляла 2,03±0,001 мм. В качестве образцов для сравнения с электролитическими покрытиями использовались пластины из Ст3 без покрытия толщиной 2±0,1 мм.

Испытанию подвергали следующие образцы:

1. Колодки с электроосажденным железо-никелевым сплавом;
2. Колодки с электроосажденным железо-никель-фосфорным сплавом;
3. Колодки хромированные;
4. Пластины из Ст3 без покрытий.

При испытании на износостойкость покрытий частота вращения контр образца соответствовала 50 мин<sup>-1</sup>, что соответствовало скорости 21,38 м/с, нагрузка – 1600 г. Общий пройденный путь при испытании на износостойкость составлял 10000 м. Взвешивание проводилось на лабораторных весах ВЛА-200М, с точностью 0,1 мг.

Износ определялся по разнице массы образцов через каждые 60 минут (пройденный путь составлял около 1000 м). Продукты трения с рабочей поверхности притира удалялись с помощью прикрепленной щетки, которая постоянно касалась контр образца.

### **Выводы по 3 главе**

1. При проведении экспериментальных исследований использовались стандартные методики, а так же методики, разработанные на их основе, современные поверенные приборы и оборудование.

2. Экспериментальные исследования проводились с 5 кратной повторностью. Обработка экспериментальных результатов проходила с использованием статистических методов с исключением случайных величин и указанием точек усредненных оптимальных значений.

## ГЛАВА 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Исследование микротвердости Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытий

Микротвердость электролитических покрытий является наиболее значимой характеристикой при выборе покрытия. Значения микротвердости напрямую зависят от основных компонентов в составе электролита [28, 129, 174].

На рисунке 4.1 представлено влияние катодно-анодного отношения и плотности тока катодного полупериода на значения микротвердости Fe-Ni покрытия.

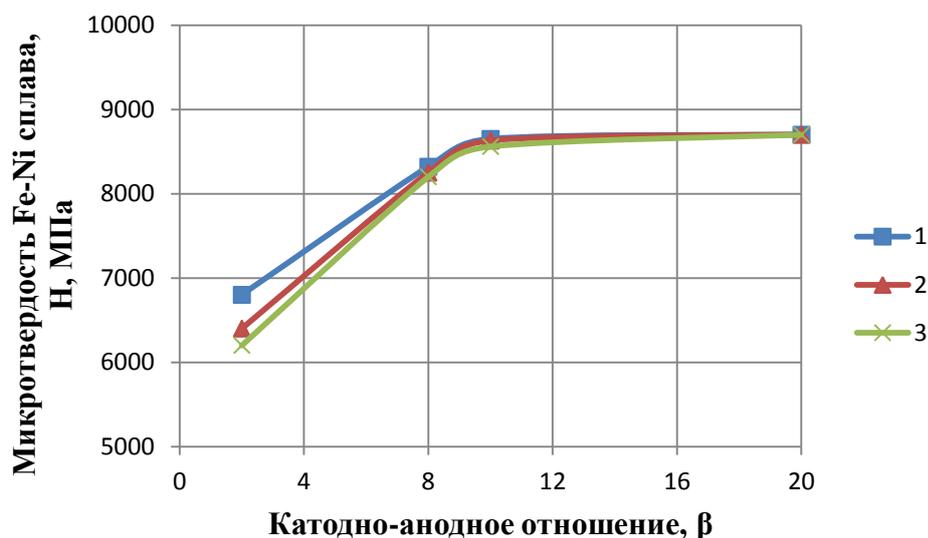


Рисунок 4.1 - Влияние катодно-анодного отношения и плотности тока на микротвердость железо-никелевого сплава: 1 - Дк = 30 А/дм<sup>2</sup>, 2 - Дк = 20 А/дм<sup>2</sup>, 3 - Дк = 10 А/дм<sup>2</sup>

Из рисунка 4.1 следует, что микротвердость сплава достигает максимального значения 8700 МПа, при β=9-10. Увеличение катодно-анодного отношения свыше β=10 не приводит к существенному повышению микротвердости. Отметим, что при этом покрытия Fe-Ni получаются равномерными по поверхности, обладающими слоисто-блочной структурой с

варьируемым содержанием Ni по толщине покрытия.

На рисунке 4.2 изображено влияние катодно-анодного отношения и плотности тока на значения микротвердости Fe-Ni-P покрытия.

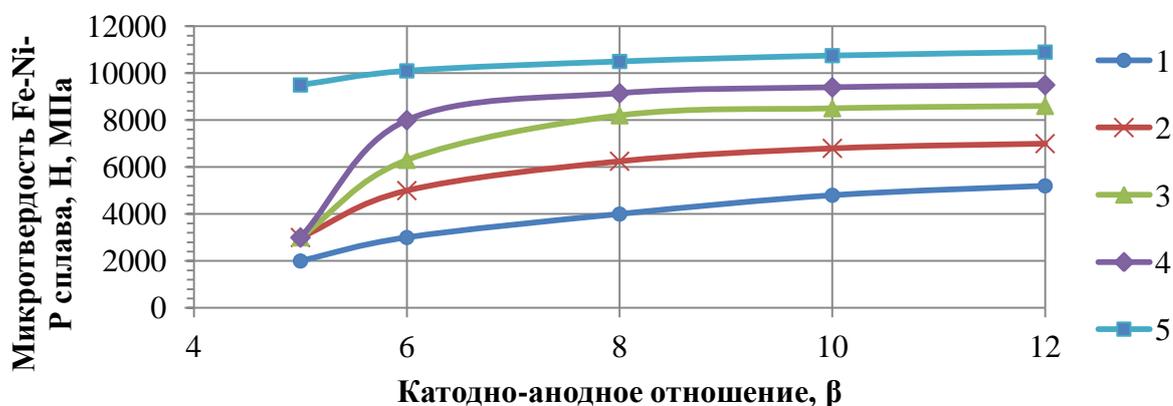


Рисунок 4.2 – Зависимость микротвердости покрытий Fe-Ni-P от плотности тока и катодно-анодного отношения: 1 – 2 А/дм<sup>2</sup>, 2 – 10 А/дм<sup>2</sup>, 3 – 20 А/дм<sup>2</sup>, 4 – 30 А/дм<sup>2</sup>, 5 – 30 А/дм<sup>2</sup> с термообработкой

Из графиков на рисунке 4.2 следует, что микротвердость Fe-Ni-P сплава, полученного при  $\beta=5$  не зависит от плотности тока и лежит в пределах 2000-3500 МПа. При возрастании катодно-анодного отношения от  $\beta=5$  до  $\beta=7-8$  наблюдается резкое увеличение микротвердости до 9500 МПа, особенно осязаемое на высоких плотностях тока 20-30 А/дм<sup>2</sup>. Повышение катодно-анодного отношения свыше  $\beta=7-8$  не приводит к существенному росту микротвердости. Следовательно, для получения Fe-Ni-P покрытия твердостью до 9500 МПа необходимы плотность тока 20-30 А/дм<sup>2</sup> и катодно-анодное отношение  $\beta=7-8$ . Термообработка при температуре 400 °С в течение часа в защитной атмосфере повышает микротвердость Fe-Ni-P покрытия до 11000 МПа.

Из графиков на рисунках 4.1 и 4.2 видно: микротвердость Fe-Ni и Fe-Ni-R сплавов зависит от величины катодно-анодного отношения  $\beta$  (т.е. условий электролиза). При электролизе на малой асимметрии переменного тока ( $\beta=1,3\dots 2$ ) твердость осадка не превышает 850 – 890 МПа. Постепенное наращивание твердости путем увеличения катодно-анодного отношения обеспечивает не

резкое, а постепенное развитие внутренних напряжений в покрытии и, как следствие, хорошее сцепление осадка с основным металлом и высокую износостойкость поверхности: получение твердых осадков Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов на мягком подслое.

Содержание фосфора в сплаве Fe-Ni-P влияет на микротвердость покрытия. На рисунке 4.3 представлена зависимость микротвердости сплава Fe-Ni-P от содержания фосфора при  $20 \text{ A/дм}^2$  и катодно-анодном отношении  $\beta=6$ .

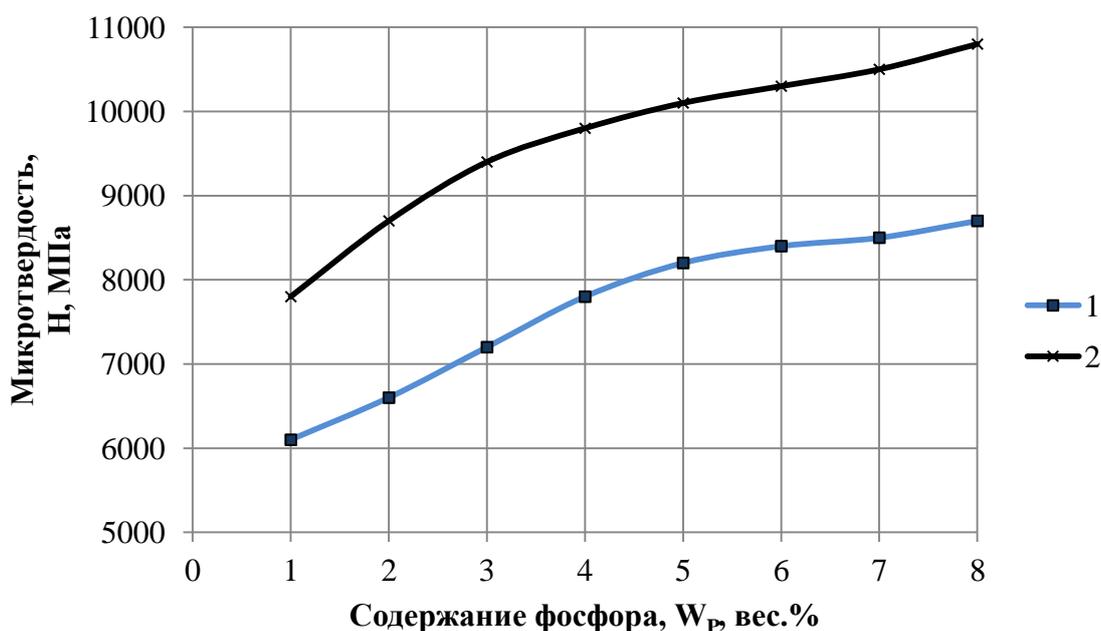


Рисунок 4.3 – Зависимость микротвердости сплава Fe-Ni-P от содержания фосфора в сплаве без термообработки (1), после термообработки (2)

Из рисунка 4.3 следует, что с увеличением содержания фосфора микротвердость покрытия повышается от 6100 до 8700 МПа. Термообработка в защитной атмосфере при  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение часа приводит к увеличению микротвердости до 7800 - 11000 МПа. Повышению микротвердости Fe-Ni-P сплавов способствует образование перенасыщенного твердого раствора фосфора в  $\text{Fe}_a\text{Ni}$ . Сплавы Fe-Ni-P с содержанием от 1,3 до 3,2 % фосфора имеют мелкокристаллическую, слоисто-блочную структуру. Покрытия с содержанием фосфора от 3,5 до 8% рентгеноаморфны, так как в области углов  $2\theta=20-35-54^{\circ}$  обнаруживается широкое гало, как и на сплавах Ni-P в работах [11, 136, 177, 196].

Зафиксированы линии  $\alpha$ - Fe (110), Ni (111) и Ni (200) на сплавах с содержанием фосфора в пределах 1,2-2,7%. После термообработки твердый раствор Fe-Ni-P сплава распадается с образованием фаз фосфидов  $Fe_3P$ ,  $Fe_3P$ ,  $Ni_3P$ ,  $Ni_5P_2$  и возникают линии металлического  $\alpha$ -Fe (110), Ni (111) и Ni (200), что прослеживается и на сплавах Fe-P и Ni-P [177].

#### **4.2 Исследование влияния параметров процесса на содержание основных компонентов в покрытии**

Для получения железо-никелевого покрытия в сульфатных электролитах использованы сернокислое железо ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) и сернокислый никель ( $NiSO_4$ ). Для получения железо-никель-фосфорного покрытия использованы сернокислое железо, сернокислый никель и гипофосфит натрия ( $Na(PH_2O_2)$ ). Изменяя концентрации  $NiSO_4$  в железо-никелевом электролите,  $NiSO_4$  и  $Na(PH_2O_2)$  в железо-никель-фосфорном электролите железнения, возможно изменять и содержание этих компонентов в получаемом покрытии. Изменение содержания основных компонентов влияет на структуру сплава и физико-механические свойства покрытий.

Отметим, что содержание фосфора в покрытии зависит не только от условий электролиза, но и от концентрации гипофосфита натрия в электролите. Введение в состав электролита железнения большей концентрации гипофосфита натрия до 50 г/л позволяет повысить содержание фосфора в сплаве Fe-Ni-P, а также регулировать содержание Ni и P. Причем введение гипофосфита натрия уменьшает содержание Ni в сплаве, увеличивая содержание фосфора, по сравнению со сплавом Fe-Ni. С увеличением катодно-анодного отношения содержание Ni и P в покрытии Fe-Ni-P возрастает. Так, при  $\beta=2$  состав сплава в %: 5,4% - Ni, 13,3% - P и 81% - Fe; при  $\beta=5$ : 11,8% - Ni, 16,8% - P и 72,2% - Fe; при повышении  $\beta$  до 8 содержание фосфора увеличивается до 5,3-10%, а содержание никеля уменьшается до 8,5-6,3% (в зависимости от плотности тока).

Отметим, что в процессе длительного электролиза происходит изменение концентрации ионов железа и никеля в электролите, а так же изменение кислотности, что будет сказываться на количественном элементном составе покрытий Fe-Ni-P из-за изменения выхода по току.

Осаждение как железо-никелевого, так и железо-никель-фосфорного покрытия на асимметричном переменном токе позволяет регулировать содержание основных компонентов в покрытии (рисунок 4.4, 4.5) изменением катодно-анодного отношения и плотности тока.

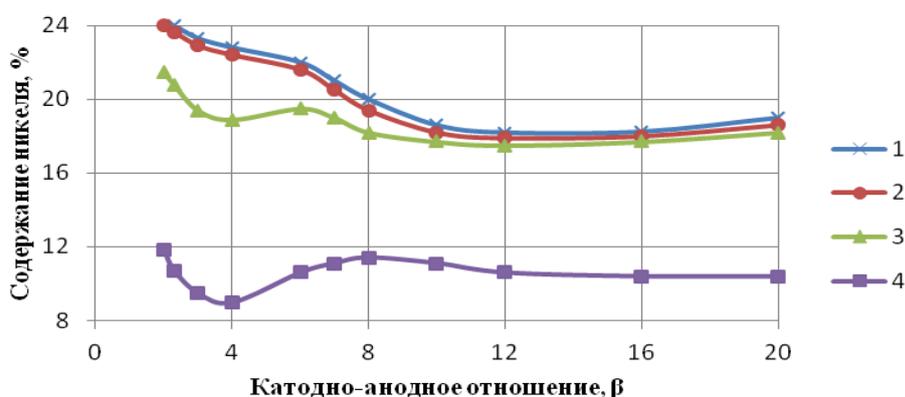


Рисунок 4.4 - Зависимость содержания никеля в Fe-Ni сплаве от катодно-анодного отношения и плотности тока катодного полупериода: 1 - Дк = 30 А/дм<sup>2</sup>, 2 - Дк = 20 А/дм<sup>2</sup>, 3 - Дк = 10 А/дм<sup>2</sup>, 4 - Дк = 2 А/дм<sup>2</sup>

Анализ рисунка 4.4 показывает, что состав Fe-Ni сплава можно регулировать изменением условий электролиза. Повышение плотности тока катодного полупериода с 2 до 30 А/дм<sup>2</sup> приводит к резкому увеличению процентного содержания никеля в сплаве (от 8,9% при 5 А/дм<sup>2</sup> до 24,7% при 30 А/дм<sup>2</sup>). Катодно-анодное отношение в пределах от 2 до 12 оказывает влияние на содержание Ni в сплаве, дальнейшее увеличение катодно-анодного отношения не изменяет содержание никеля в сплаве.

Зависимость содержания фосфора в покрытии Fe-Ni-P от плотности катодного тока и катодно-анодного отношения при толщине покрытия 30 мкм представлена на рисунке 4.5.

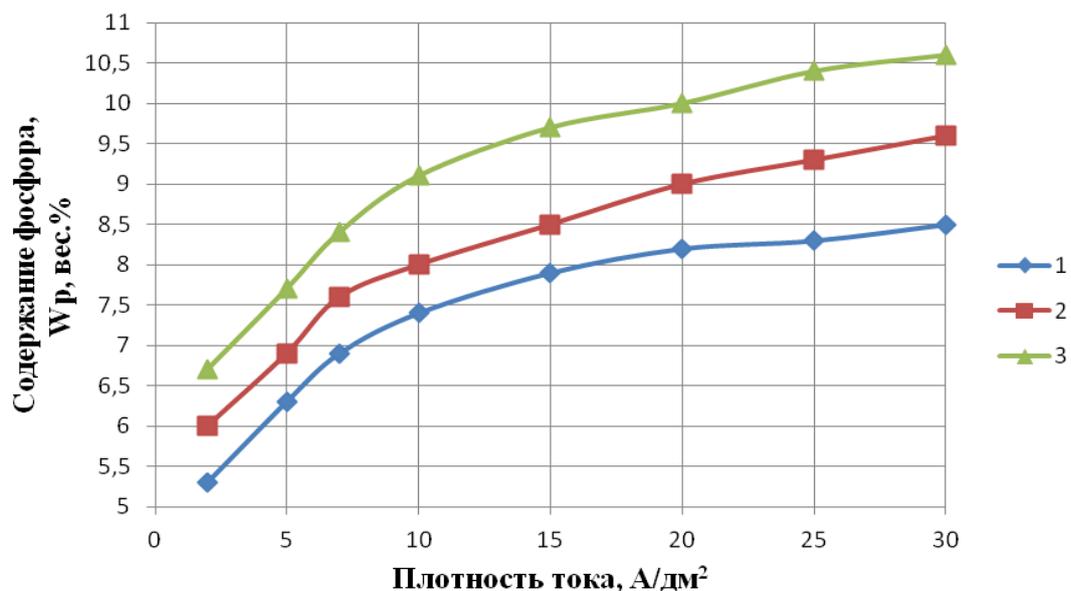


Рисунок 4.5 – Зависимость содержания фосфора в покрытии Fe-Ni-P от плотности катодного тока: 1 -  $\beta=4$ ; 2 -  $\beta=8$ ; 3 -  $\beta=12$

Анализ рисунка 4.5 показывает, что на асимметричном переменном токе с увеличением плотности катодного тока в интервале от 2 до 15 А/дм<sup>2</sup> происходит резкое увеличение содержания фосфора в покрытии на 4,7% (от 5 до 9,7 %), а при значениях тока от 15 до 30 А/дм<sup>2</sup> увеличение содержания фосфора происходит незначительно, на 1%. При увеличении катодно-анодного отношения от 4 до 12, так же происходит увеличение содержания фосфора в покрытии в 1,1-1,5 раза. При значениях концентрации гипофосфита натрия от 5 до 15 г/л в электролите и постоянстве остального состава, возможно варьировать концентрацией фосфора в сплаве железо-никель-фосфор от 5 до 11 вес. % за счет изменения режимов осаждения на асимметричном переменном токе.

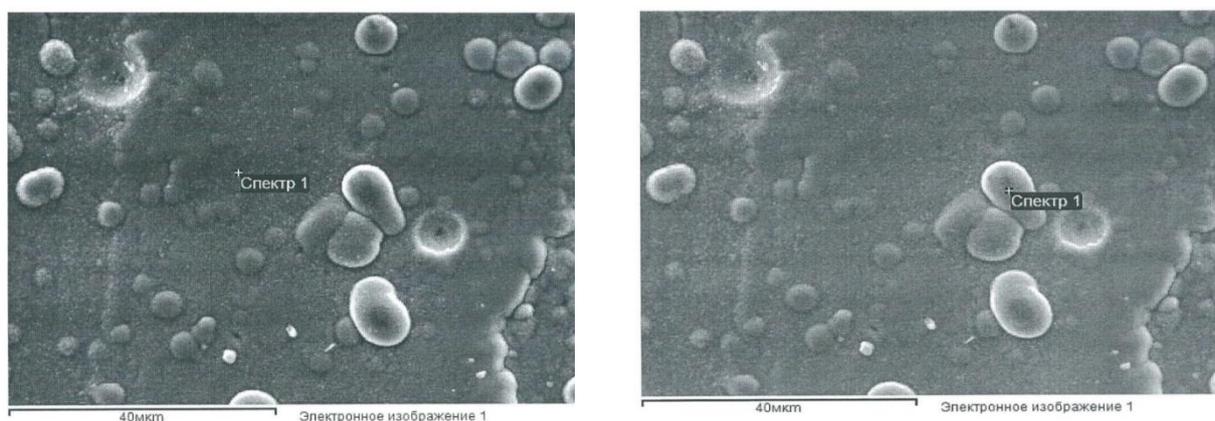
### 4.3 Исследование микроструктуры железо–никелевых (Fe-Ni) и железо-никель-фосфорных (Fe-Ni-P) покрытий

Осаждение гальванических покрытий железа и сплавов на его основе широко используется для восстановления геометрических размеров изношенных деталей в машиностроении из-за высоких функциональных свойств

поверхностных слоев (твердости, износо- и коррозионной стойкости, антифрикционных характеристик) [10, 111]. Гальваническим покрытиям Fe-Ni-P присущ особый комплекс физико-механических и химических свойств, однако, в литературе отсутствуют сведения об элементном, фазовом составе покрытий Fe-Ni-P, их микроструктуре в зависимости от условий электролиза, которые оказывают существенное влияние на износостойкость и микротвердость восстановленной поверхности.

В гальванической паре Fe, сплав Fe-Ni-P является катодным покрытием и будет защищать стальную деталь только в случае отсутствия пор, микротрещин и трещин. Сегрегация фосфора и его соединений по границам кристаллитов будет способствовать повышению коррозионной стойкости и микротвердости покрытий Fe-Ni-P.

Микроструктура и элементный состав Fe-Ni-P покрытий определялся на образцах, полученных при  $D_k = 10 \text{ А/дм}^2$ ,  $\beta=12$ , времени осаждения 30 секунд в плоскости (рисунок 4.6 а) и центре кристаллизации (рисунок 4.6 б). Значения содержания элементов в плоскости и центре кристаллизации представлены в таблице 4.1. Элементный состав Fe-Ni-P покрытия содержит значительное количество фосфора (5,25 – 7,11 вес. %). Размер наносфер составляет порядка 10-20 нм, агломератов – 1 мкм.



а)

б)

Рисунок 4.6 – Микроструктура поверхности покрытия сплавом Fe-Ni-P в плоскости (а) и центре (б) кристаллизации

Исследование микроструктуры поверхности покрытий сплавами Fe-Ni-P в начальные моменты осаждения ( $t=30$  с,  $D_k = 10$  А/дм<sup>2</sup>,  $\beta=12$ ) показало (рисунок 4.6а и 4.6б) образование массива связанных и несвязанных между собой сфероидальных частиц микро и наносфер, которые объединяются в агломераты. При этом видно, что покрытие осаждается на запассивированную поверхность и наблюдается повышение концентрации углерода во включениях вдоль границ наносфер и агломератов, и пониженная концентрация кислорода и фосфора.

Таблица 4.1 – Элементный состав покрытия Fe-Ni-P в зависимости от условий осаждения

Элемент	Ni	C	P	Fe	O	Итого
Содержание, вес.% (рисунок 11а)	10,4	8,51	5,25	67,6	8,24	100
Содержание, вес.% (рисунок 11б)	8,24	6,62	7,11	63,83	14,2	100

Из литературных данных известно [128], что повышенное содержание фосфора в покрытиях железа способствует уменьшению внутренних напряжений, блокирует образование микротрещин и их развитие, что повышает микротвердость.

Увеличение времени электролиза до 1 часа приводит к увеличению содержания в покрытии фосфора до 9,5-10,1 %, никеля до 12,5-18% за счет уменьшения содержания железа. Таким образом, с возрастанием содержания фосфора в покрытии формируется сплошное равномерное глобулярно-сфероидальное покрытие со слоисто-блочной структурой (видно из анализа рисунков 4.6 а, 4.6 б). Периодическое образование слоистых структур обусловлено периодическим защелачиванием прикатодного пространства из-за особенностей электролиза на асимметричном переменном токе и обусловлено выпадением малорастворимого осадка FePO<sub>4</sub> и его последующим включением в покрытие, как следует из анализа дифрактограмм, а так же из расчетного сравнения с базой данных ASTM [29, 104, 105] (рисунок 4.7, кр. 1, 2 ).

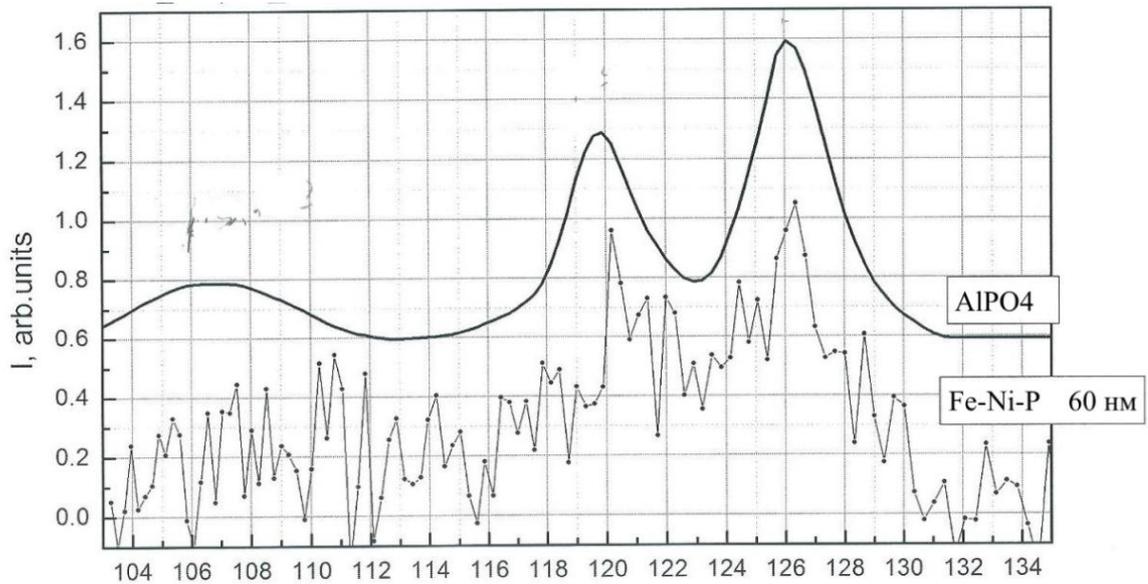


Рисунок 4.7 – Дифрактограмма Fe-Ni-P покрытия до термообработки

Из анализа дифрактограмм покрытий Fe-Ni-P по характеристическому изменению элементов (Fe, Ni, C, P, O), полученных при электролизе на асимметричном переменном токе (при  $D_k = 10-30 \text{ А/дм}^2$ ,  $\beta=6-12$ ) до термообработки обнаружены следующие фазы  $\alpha$ -Fe,  $\beta$ -Ni,  $\text{Fe}_\alpha\text{Ni}$  твердый раствор фосфора в интерметаллическом соединении  $\text{Fe}_\alpha\text{Ni}$ . После термообработки добавляются фазы фосфора из соединений  $\text{Ni}_2\text{P}$ ,  $\text{Ni}_3\text{P}$ ,  $\text{Fe}_3\text{P}$ . Фазы включения металлов Fe и Ni имеют мелкокристаллическую структуру, фосфора-аморфную (гало), в целом формируется сплошное сфероидально-глобулярное покрытие со смешанной аморфно кристаллической структурой с фазами  $\text{Fe}_3\text{P}$  и  $\text{Ni}_3\text{P}$ . Увеличение размера глобул по мере роста катодного импульса осаждения сплава Fe-Ni-P приводит к уменьшению межфазной поверхности в условиях нестационарного осаждения, что способствует росту концентрации P. Это приводит к увеличению износостойкости покрытий.

Наличие углерода в покрытии сказывается на гетерогенности поверхности и служит барьером для предотвращения движения дислокаций, вакансий, дефектов структуры, сказывается на развитии микротрещин, а в целом влияет на физико-механические свойства, а так же на коррозионную стойкость по данным [10, 124]. Кислород и углерод в покрытии возникают из-за включения в него продуктов

распада аскорбиновой кислоты.

Отметим, исходя из анализа элементного состава, что осаждение покрытия Fe-Ni (зарождение кристаллов) вначале происходит на участках, содержащих карбид железа ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ). Так же отметим, незначительную количественную разность элементного состава в центрах кристаллизации и плоскости кристаллизации. Как видно, в зависимости от условий электрокристаллизации образуются сплавы железа с никелем, железа с никелем и фосфором, особенности микроструктуры которых зависят от условий электроосаждения (плотности тока в анодный и катодный период, катодно-анодного отношения, состава электролита, режима нанесения). Изменение этих условий приводит к разным физико-механическим свойствам поверхности Fe-Ni или Fe-Ni-P сплава и его количественного состава. Увеличение поляризации, частоты, плотности импульса катодного тока, катодно-анодного отношения способствует получению мелкозернистых структур.

Fe-Ni покрытие получали на асимметричном переменном токе  $D_k=40 \text{ А/дм}^2$ ,  $\beta=2$ , частотой  $\nu=60 \text{ Гц}$ ,  $t=30 \text{ мин}$ ; Fe-Ni-P – на асимметричном переменном токе  $D_k=40 \text{ А/дм}^2$ ,  $\beta=10$ , частотой  $\nu=60 \text{ Гц}$ ,  $t=30 \text{ мин}$ . Микроструктура Fe-Ni и Fe-Ni-P сплава представлена на рисунке 4.8, элементный состав представлен в таблице 4.2.

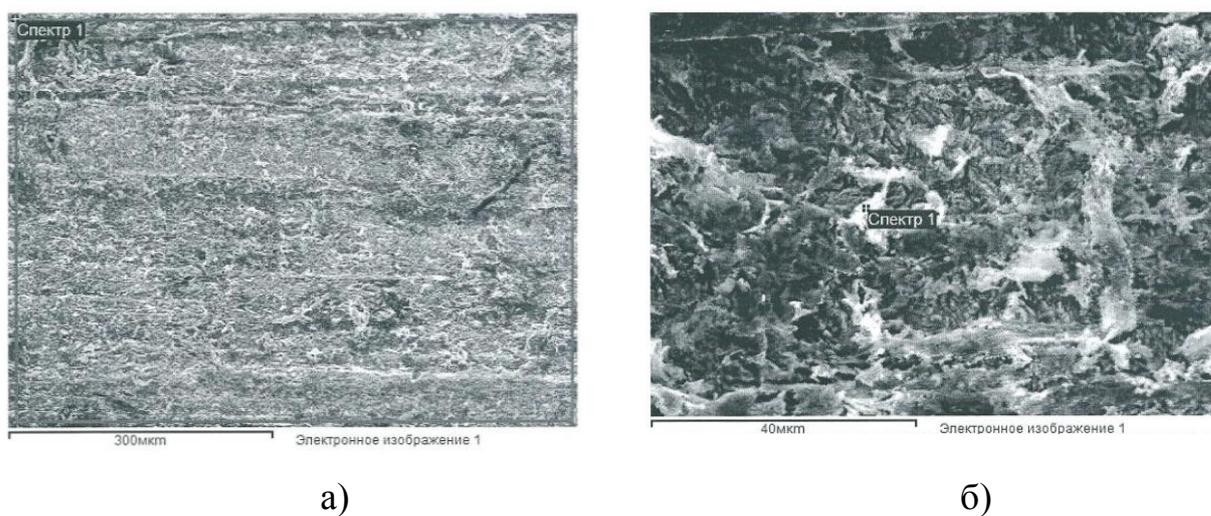


Рисунок 4.8 – Микроструктура поверхности железо-никелевого (а) и железо-никель-фосфорного (б) покрытий;

Таблица 4.2 – Элементный состав Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытия

Fe-Ni		Fe-Ni-P	
Элемент	Весовой %	Элемент	Весовой %
О К	9,56	Р К	10,62
FeК	78,47	О К	11,50
NiК	11,97	Fe К	63,29
		Ni К	14,59
Итого	100,00		100,00

Структура покрытий Fe-Ni и Fe-Ni-P совершенная, слоисто-блочная, плотная. Основными фазами в сплаве Fe-Ni-P является  $\alpha$ -Fe и  $\beta$ -Ni и  $\text{FePO}_4$  в стационарном режиме электролиза (рисунок 4.8 а, б), как и в [166], в нестационарном  $\text{FePO}_4$  отсутствует.

В работе [177] в сернокислых средах с органическими добавками при использовании переменного-токового режима высокой частоты нанесения Fe-Ni-P обнаружено так же появление фазы железа  $\varepsilon$ -Fe с гексагональной плотноупакованной кристаллической решеткой, состоящей из параллельно расположенных пластин толщиной 10-20 нм, что придает повышенную микротвердость покрытию, что возможно и в наших условиях. В нашем случае покрытия Fe-Ni-P, полученные при  $\beta=1,3-2$ , имеют твердость, которая возрастает от 850 до 890 МПа (содержание фосфора  $C_p=2,5-4,9\%$ ), а при  $\beta=8-10$  от 8000 до 9500 МПа, в интервале плотностей тока от 2 до 30 А/дм<sup>2</sup>. Размеры блоков мозаики кристаллитов находятся в пределах 20-50 нм.

Анализ химического состава покрытий Fe-Ni показал, что покрытия содержат только Fe, Ni, C, O (примерно 75% Fe). Установлено, что электроосажденный сплав представляет собой твердый раствор  $\alpha$ -Fe в никеле. Структурный анализ, проведенный методом рентгеновской дифракции, показал, что сплав состоит из фазы – FeNi. Присутствуют отдельные линии, которые идентифицируют никель и железо. Следовательно, можно полагать, что атомы никеля образуют твердые растворы замещения с железом, поскольку они имеют близкие по величине атомные радиусы. Дифрактограмма слоев покрытий показывает расширение дифракционных линий порядка  $1^0$  для  $\text{Fe}_\alpha\text{Ni}$ , что

характерно для нано структур. Это расширение возникает из-за наличия остаточных внутренних напряжений, обусловленных замещением атомов Fe, атомами Ni в кристаллической решетке. Уменьшение интенсивности линий (110) и возрастание интенсивности линий (211) свидетельствует о наличии дефектов в виде вакансий в этих плоскостях, возникающих во время электроосаждения. На основании снятых дифрактограмм рассчитаны значения величин плотности дислокаций и размеров блоков мозаики, которые оказались равны соответственно в среднем  $2 \cdot 10^{-3}$  и 5-17 нм и определяются условиями электролиза (в условиях стационарного электролиза  $D_k=12 \text{ A/дм}^2$ ,  $t=30$  мин).

Исследование параметров элементарных ячеек фаз проводилось в области углов  $2\theta = 20 - 120^\circ$  ( $\alpha$ -Fe). Результаты фазового анализа сопоставлялись с картотеккой ASTM. Структура металлической матрицы сплава Fe-Ni гладкая, мелкозернистая, слоисто-блочная с размерами кристаллов порядка 400 нм.

#### 4.4 Исследование выхода Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов по току

Зависимость выхода по току Fe-Ni сплава от плотности тока и катодно-анодного отношения показана на рисунке 4.9.

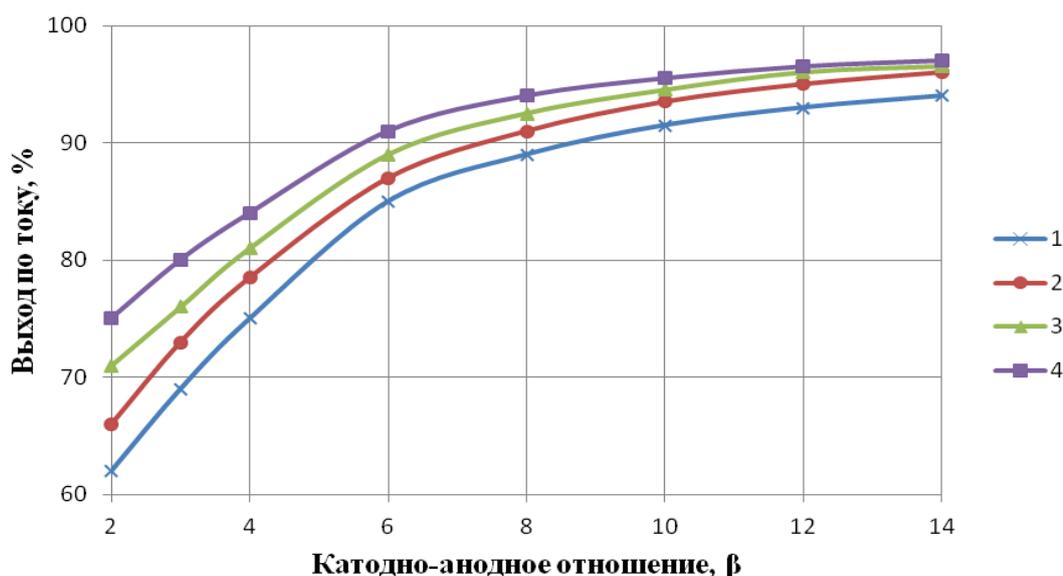


Рисунок 4.9 – Зависимость выхода по току сплава Fe-Ni от плотности тока и катодно-анодного отношения: 1 – 2 А/дм<sup>2</sup>, 2 – 10 А/дм<sup>2</sup>, 3 – 20 А/дм<sup>2</sup>, 4 – 30 А/дм<sup>2</sup>

Из рисунка 4.9 видно, что с ростом плотности асимметричного переменного тока и катодно-анодного отношения увеличивается выход металла покрытия по току. Во всех случаях Fe-Ni сплав содержит более высокий процент железа в покрытии. Выход по току сплава составляет 85-97%, начиная с  $\beta=6$  и выше.

На рисунке 4.10 изображена зависимость выхода по току сплава Fe-Ni-P от плотности тока и катодно-анодного отношения.

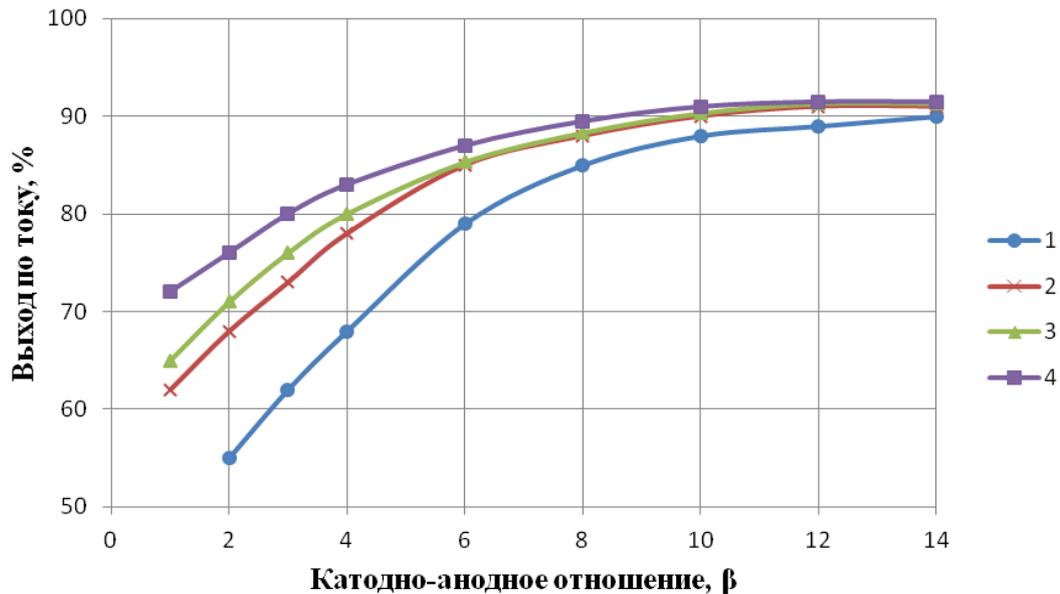


Рисунок 4.10 – Зависимость выхода по току сплава Fe-Ni-P от плотности тока и катодно-анодного отношения: 1 – 2 А/дм<sup>2</sup>, 2 – 10 А/дм<sup>2</sup>, 3 – 20 А/дм<sup>2</sup>, 4 – 30 А/дм<sup>2</sup>

Исследование зависимости выхода по току сплава Fe-Ni-P показало, что с ростом плотности импульса катодного асимметричного переменного тока выход по току возрастает как с ростом плотности тока, так и с ростом катодно-анодного отношения.

Отметим, что при сопоставимых плотностях тока осаждения Fe-Ni-P сплава, с нестационарными режимами осаждения, на постоянно-токовых режимах выход по току меньше на 5-10 % в интервале от 2 до 30 А/дм<sup>2</sup>. Начиная с  $\beta=6$  и больше, выход по току составляет 85-95 % на асимметричном переменном токе в интервале плотностей 10-30 А/дм<sup>2</sup>. Скорость электроосаждения сплавов Fe-Ni-P в

этом интервале плотностей асимметричного переменного тока при катодно-анодном отношении  $\beta=6$  возрастает от 0,16 до 0,22 мм/ч, а в интервале  $\beta=8-14$  она возрастает до 0,22-0,35 мм/ч. При плотности тока 5 А/дм<sup>2</sup> выход по току изменяется от 55 до 75 % в интервале  $\beta = 2 - 6$ , что обусловлено условиями электрокристаллизации, а скорость осаждения порядка 0,11 – 0,12 мм/ч. Качество поверхности покрытий Fe-Ni-P по визуальной оценке - полублестящее или блестящее.

Наличие водорода в сплаве повышает хрупкость поверхностного слоя. Зависимость содержания водорода в железо-никелевом и железо-никель-фосфорном покрытии при толщине покрытия 30 мкм и катодно-анодном отношении при  $\beta=6$  от плотности тока представлена на рисунке 4.11.

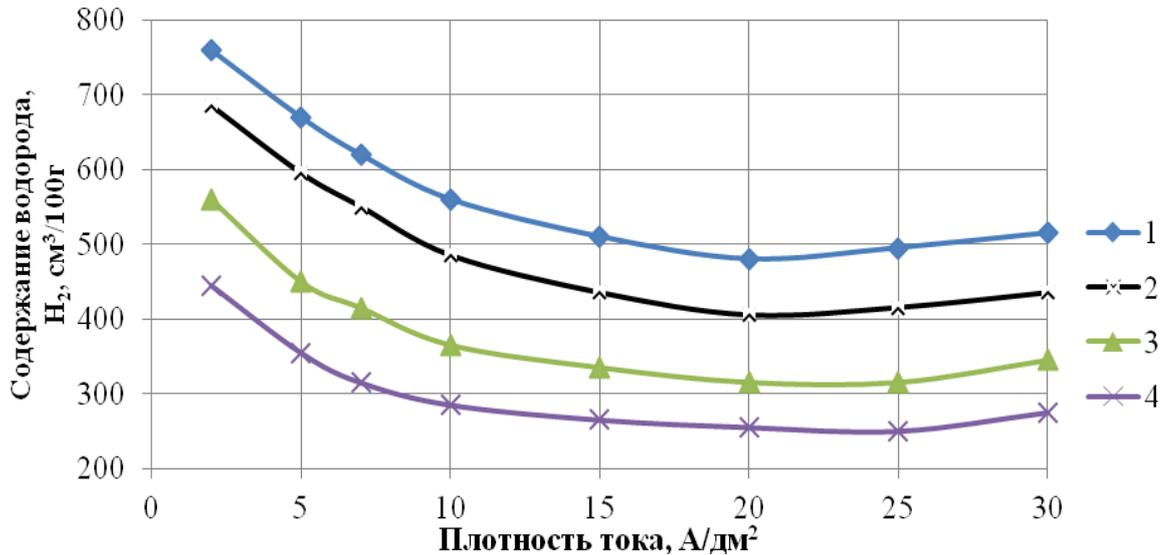


Рисунок 4.11 – Зависимость содержания водорода в Fe-Ni(кривые 1, 3) и Fe-Ni-P (кривые 2, 4) покрытии на постоянном (кривые 1, 2) и асимметричном переменном токе (кривые 3, 4)

Как видно из рисунка 4.11 количество поглощенного водорода Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями зависит от условий электролиза и в случае асимметричного переменного тока оно на 70-110 см<sup>3</sup>/100г меньше, чем на постоянном токе. Увеличение плотности катодного постоянного тока приводит к снижению количества поглощенного водорода в железо-никелевом покрытии от 760 до

515см<sup>3</sup>/100г, в железо-никель-фосфорном покрытии от 560 до 345см<sup>3</sup>/100г. При аналогичных плотностях асимметричного переменного тока содержание водорода уменьшается в железо-никелевом покрытии от 685 до 435см<sup>3</sup>/100г, в железо-никель-фосфорном покрытии от 445 до 275см<sup>3</sup>/100г. Как в случае с применением постоянного, так и асимметричного переменного тока выделение водорода минимально при 15 А/дм<sup>2</sup>. Дальнейшее увеличение плотности тока изменяет выделение водорода не значительно как в Fe-Ni, так и Fe-Ni-P покрытиях.

Из графиков, изображенных на рисунке 4.11 видно, что добавление в покрытие фосфора изменяет содержание водорода в меньшую сторону.

Зависимость содержания водорода и фосфора в железо-никель-фосфорном покрытии от плотности асимметричного переменного тока при катодно-анодном отношении  $\beta=6$  и толщине покрытия 30 мкм представлена на рисунке 4.12.

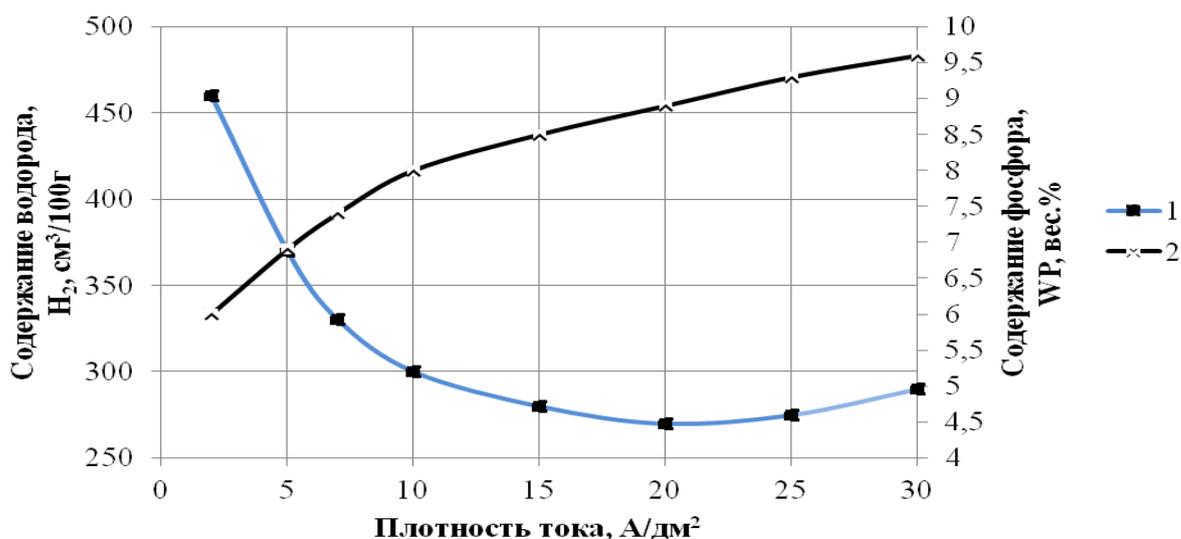


Рисунок 4.12 – Зависимость содержания водорода (1) и фосфора (2) в покрытии Fe-Ni-P от плотности асимметричного переменного тока при  $\beta=6$

Из рисунка 4.12 следует, что увеличение содержания фосфора в покрытии Fe-Ni-P приводит к уменьшению содержания водорода в 1,5-2 раза в интервале плотности тока 2-20 А/дм<sup>2</sup>, свыше 20 А/дм<sup>2</sup> содержание водорода почти не изменяется и составляет 300-270 см<sup>3</sup> на 100 грамм покрытия.

#### 4.5 Исследование хромовых покрытий

На рисунке 4.13 изображена зависимость содержания водорода в осадках хрома от плотности тока и температуры электролита. С ростом плотности тока повышается содержание водорода в покрытии как на постоянном, так и на асимметричном переменном токах. Изменение температуры электролита так же увеличивает содержание водорода. Более низкое содержание водорода в покрытии на асимметричном переменном токе говорит о более качественном покрытии и о меньшем загрязнении окружающей среды частицами хрома, уносимыми выделяющимся водородом.

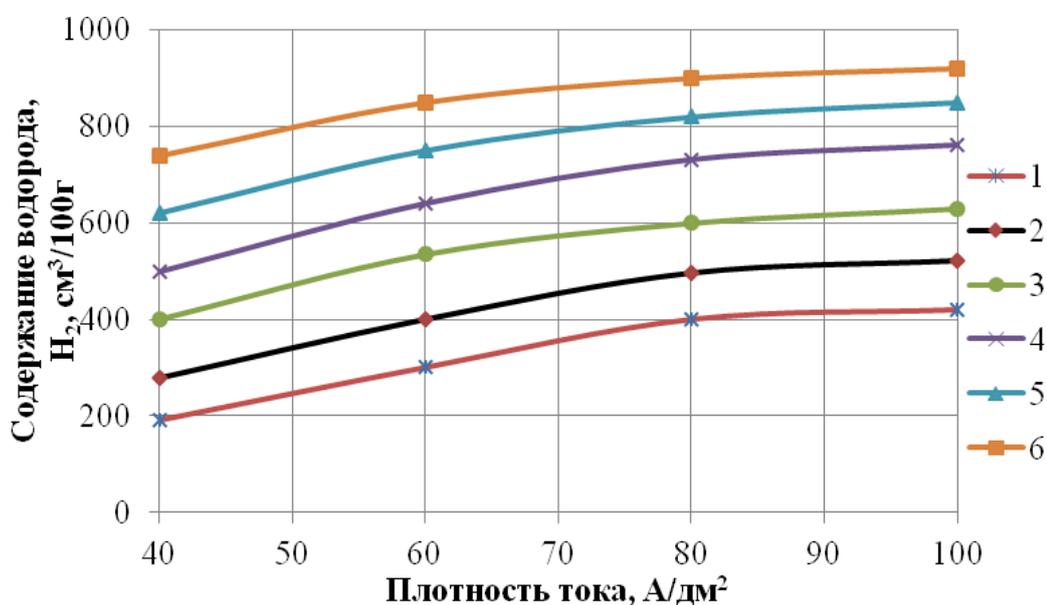


Рисунок 4.13 – Зависимость содержания водорода в осадках хрома в малоконцентрированных электролитах на постоянном (2, 4, 6) и асимметричном переменном токе (1, 3, 5) в покрытии, при 45 °С – кривые 1, 2; 55 °С – кривые 3, 4; 65 °С – кривые 5, 6

Для восстановления и упрочнения деталей хромированием использовали малоконцентрированный электролит, который позволяет уменьшить выделение водорода, повысить микротвердость в пределах от 14500 до 16000 МПа (рисунок 4.14), и обеспечить низкие значения шероховатости поверхности, что позволяет повысить износостойкость.

Зависимость микротвердости хромовых покрытий от плотности тока, полученная в малоцентрированном электролите при  $D_k=40-100 \text{ А/дм}^2$ , температуре электролита  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , представлена на рисунке 4.14.

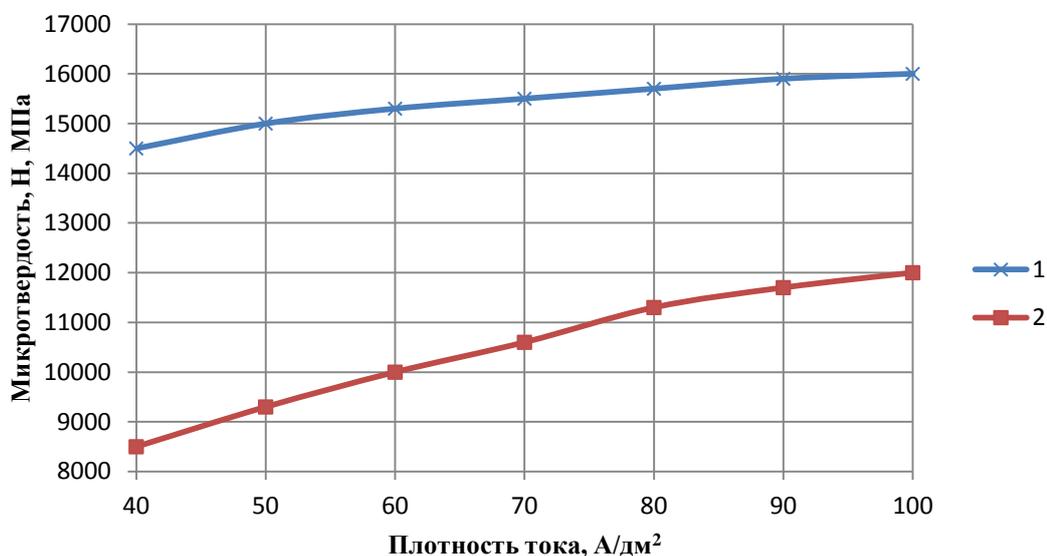


Рисунок 4.14—Зависимость микротвердости хромовых покрытий от плотности тока: 1 – на асимметричном переменном токе, 2 – на постоянном токе

Из рисунка 4.14 следует, что микротвердость хромовых покрытий возрастает с увеличением токового значения, на постоянном токе от 8500 МПа при  $40 \text{ А/дм}^2$ , до 12000 МПа при  $100 \text{ А/дм}^2$ , а на асимметричном переменном токе от 14500 МПа при  $40 \text{ А/дм}^2$ , до 16000 МПа при  $100 \text{ А/дм}^2$ .

Следовательно, хромирование следует проводить на асимметричном переменном токе при  $D_k=40-100 \text{ А/дм}^2$ , катодно-анодном отношении  $\beta = 1 - 3$ ,  $T_3 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Микроструктура поверхности хромового покрытия представлена на рисунке 4.15.

Покрyтия хромом имеют трещиноватую сфероидально-блочную микроструктуру с ярко выраженными границами раздела фаз кристаллитов. Рентгенограмма хромового покрытия с параметром  $A$  кристаллической решетки 1,176; 1,444; 2,040  $\text{А}^\circ$  в зависимости от кристаллографической ориентации 110, 200, 211 показана на рисунке 4.16, расшифровка рентгенограммы представлена в

таблице 4.3.

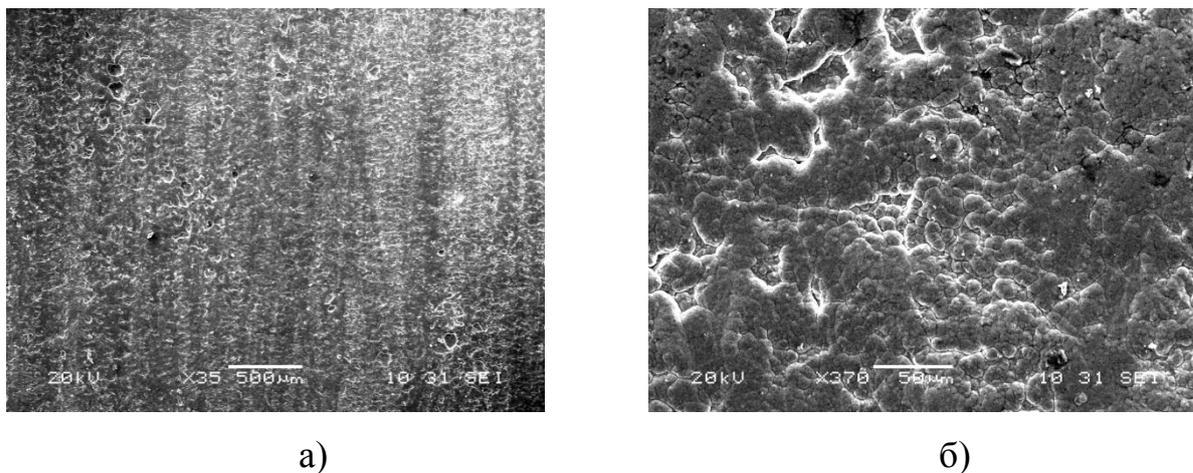


Рисунок 4.15 – Микроструктура поверхности хромового покрытия: а – при 35 кратном увеличении; б – при 370 кратном увеличении

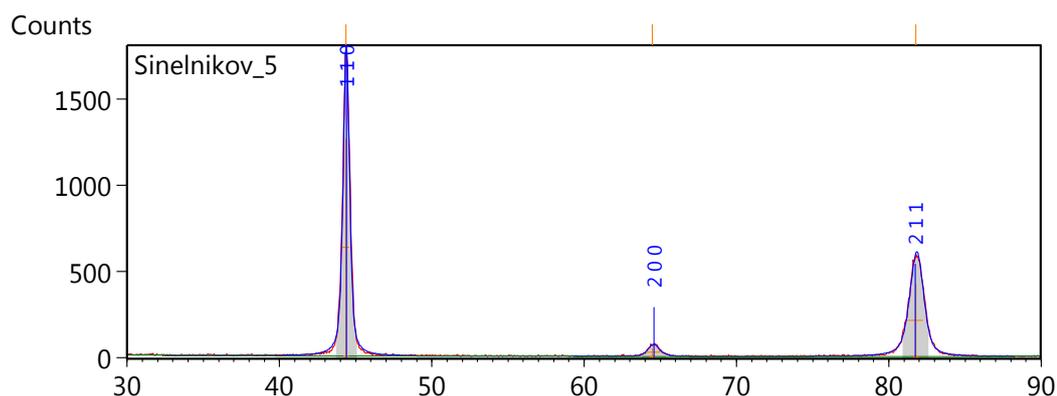


Рисунок 4.16 – Рентгенограмма хромового покрытия

Таблица 4.3 – Результаты рентгенограммы хромового покрытия

Peak Number	Pos. [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]	FWHM Left [°2Th.]	Area [cps*°2Th.]
1	44.353(6)	2.04072	100.00	0.48(1)	784.08
2	64.49(5)	1.44383	3.81	0.8(1)	57.28
3	81.77(2)	1.17683	33.64	1.06(3)	564.42

За счет повышения равномерности, снижения шероховатости покрытий, отсутствия дендритов возможно значительное снижение нормативной толщины покрытия и исключение механической обработки после хромирования.

#### 4.6 Исследование износостойкости восстановленных Fe-Ni, Fe-Ni-P и хромовых покрытий

Одной из самых значимых физико-механических свойств любых покрытий является износостойкость, поскольку она влияет на долговечность всех деталей и оборудования, подверженного трению.

Чаще всего зернопроводы изготавливают из листовой стали, поэтому для сравнительных испытаний были изготовлены образцы из Ст3.

Результаты испытаний на изнашивание образцов, изготовленных из Ст3 без покрытия, а так же покрытых железо-никелевым, железо-никель-фосфорным сплавами и хромом приведены на рисунке 4.17 и в таблице 4.4. Приведенные данные указаны в виде усредненных значений, полученных в результате обработки пятикратной повторности испытаний.

Таблица 4.4 - Результаты испытаний на изнашивание

Пройденный путь, м	Потеря массы образцов			
	Без покрытия	Fe-Ni покрытие	Fe-Ni-P покрытие	Хромовое покрытие
1200	0,13	0,1	0,07	0,06
2400	0,26	0,21	0,13	0,11
3600	0,38	0,28	0,20	0,17
4800	0,51	0,36	0,27	0,23
6000	0,64	0,45	0,34	0,28
7200	0,77	0,56	0,40	0,34
8400	0,9	0,65	0,47	0,42
9600	1,03	0,76	0,55	0,48
10800	1,17	0,84	0,62	0,55
12000	1,31	0,96	0,70	0,61

Образцы с покрытиями Fe-Ni и Fe-Ni-P обладают большей износостойкостью, исходя из потери массы.

Из рисунка 4.17 видно, что кривые износа образцов, как без покрытия, так и с Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями имеют линейный характер износа. Значения износа Fe-Ni на 20-30% и Fe-Ni-P на 40-50% ниже, чем у образцов без покрытий. Износ

образцов упрочненных хромом на 50-55% ниже.

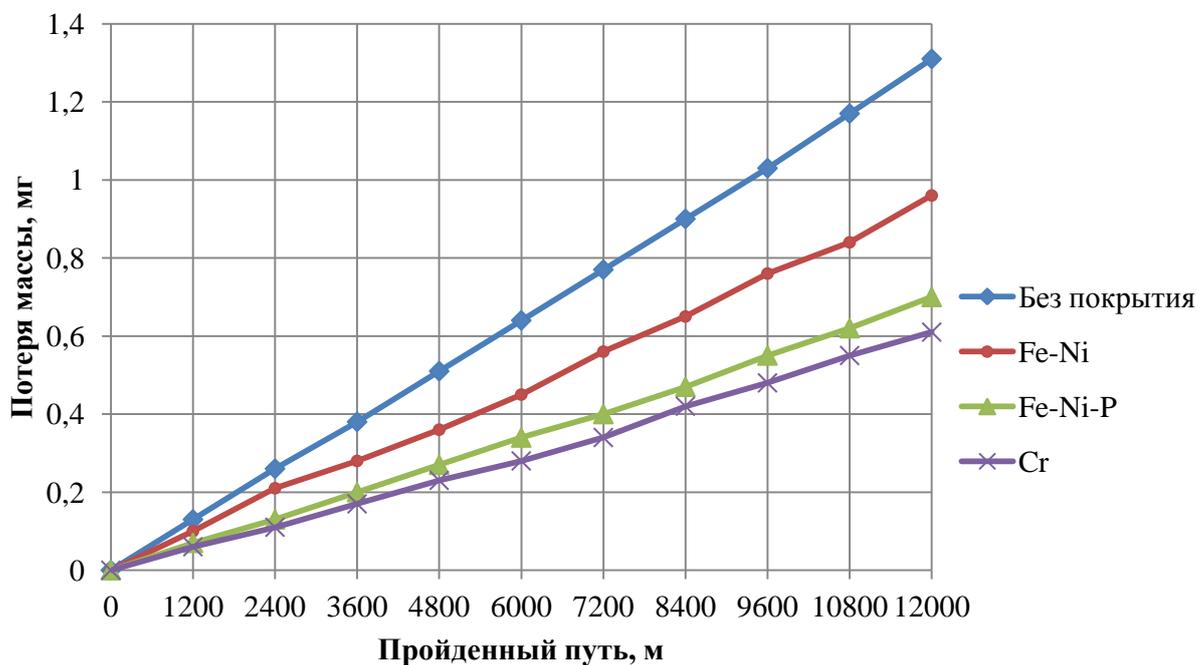


Рисунок 4.17 – Результаты испытаний на износ

В таблице 4.5 приведены рассчитанные результаты показателя относительной интенсивности изнашивания восстановленного и упрочненного слоя, который показывает во сколько раз интенсивность изнашивания материала исследуемого слоя больше контрольного материала – Ст 3.

Таблица 4.5 – Значения показателя относительной интенсивности изнашивания восстановленного и упрочненного слоя

	Ст 3	Fe-Ni	Fe-Ni-P	Cr
m, мг	0,13	0,1	0,07	0,06
d	1	1,37	1,87	2,15

На рисунке 4.18 представлена диаграмма значений относительной интенсивности изнашивания испытываемых материалов.

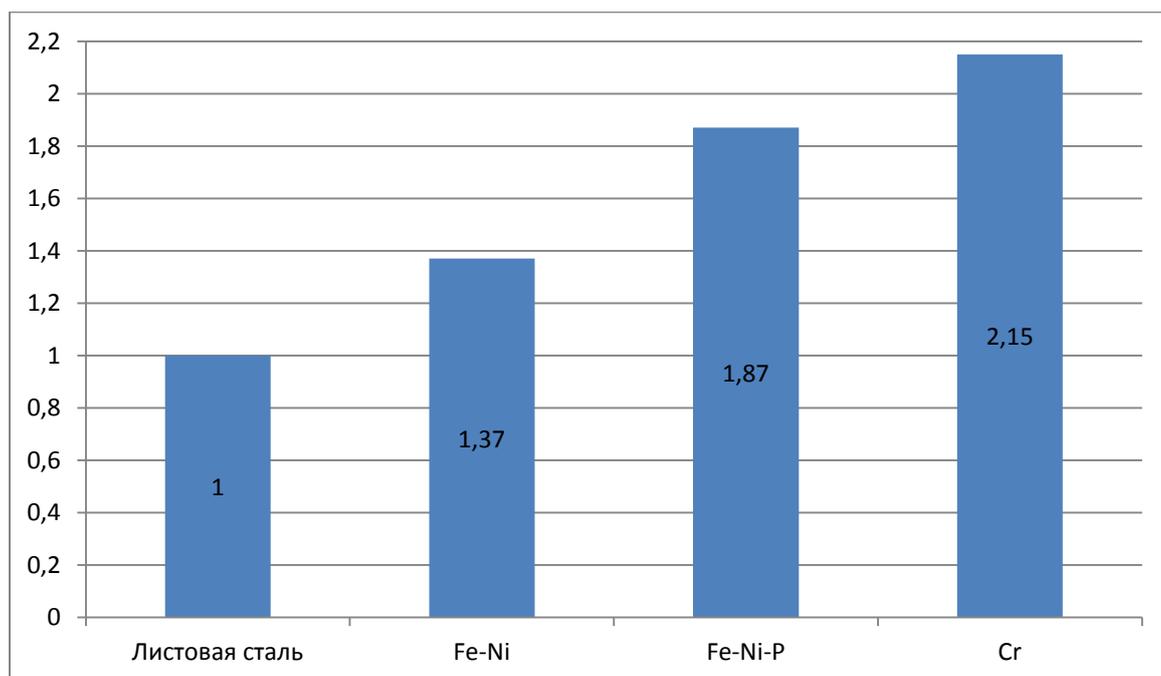


Рисунок 4.18 – Значения показателя относительной интенсивности изнашивания восстановленного Fe-Ni и Fe-Ni-P упрочненного Cr слоев

На диаграмме видно: интенсивность изнашивания Fe-Ni сплава составляет 1,37, интенсивность изнашивания Fe-Ni-P сплава составляет 1,87, а интенсивность изнашивания Cr покрытия – 2,15. Интенсивность изнашивания Fe-Ni-P сплава на 28% меньше хромового покрытия.

#### 4.7 Производственные испытания восстановленных и упрочненных самотечных зернопроводов

Производственные испытания поворотных колен, восстановленных электролитическим железнением на основе сплава Fe-Ni-P и упрочненных хромированием, проводились в условиях «ООО Воронежпищепродукт». В процессе испытаний сравнивали новое поворотное колено с восстановленным Fe-Ni-P сплавом и упрочненным хромированием и новое колено упрочненное хромированием.

В производственных условиях на стенки зернопровода в процессе транспортирования зерна действует значительное количество случайных

факторов. Это триботехнические свойства сыпучего материала: зерно ячменя и проса изнашивает стенки зернопровода гораздо интенсивнее, чем зерно пшеницы. Оказывают влияние влажность, сорность, температура окружающей среды. Последовательность и перемещение различных видов зерна так же носит случайный характер.

Как было выше отмечено на интенсивность изнашивания определяющее влияние оказывает место установки исследуемого элемента в транспортной системе предприятия. Поэтому для анализа долговечности самотечного зернопровода нами выбран усредненный критерий: количество перемещенного зерна элементом самотека до возникновения сквозного протирания стенки. Для исследований было выбрано поворотное колено. Оно устанавливалось после участка набора скорости длиной 6 метров.

Восстановление и упрочнение поворотных колен проводилось по разработанной нами технологии в условиях лаборатории ФГБОУ ВО Воронежского ГАУ им. Императора Петра I. На изношенные поворотные колена после предварительных подготовительных операций наносилось электролитическое Fe-Ni-P покрытие толщиной 3 мм. Восстановленное и новое поворотные колена упрочнялись хромированием на толщину 200 мкм. Погрешность по толщине стенки восстановленного в размер поворотного колена составляла 0,1 мм.

Сравнение испытуемых поворотных колен проводилось по основному эксплуатационному показателю, т.е. по величине износа.

Испытания проводились нами в течение 2015-2017 годов совместно с сотрудниками предприятия. Через самотечные зернопроводы проходило около 25 тысяч тонн зерна различных сельскохозяйственных культур в течение рабочего сезона. За период работы в 2015 году были изношены 2 новых поворотных колена за сезон до сквозных отверстий. То есть, на одно колено пришлось 12,5 тысяч тон зерна. В 2016 году проходили испытания на износ новые поворотные колена, упрочненные хромированием. Детали отработали без отказов весь сезон, по

завершению рабочего сезона износ составил не более 0,2 мм. Испытания поворотных колен, восстановленных железо-никелевым и железо-никель-фосфорным сплавами за 2017 рабочий сезон, показали, что зернопровода не протерлись до сквозных отверстий, при этом износ зернопровода, восстановленного железо-никелевым сплавом, составил не более 1 мм, а износ железо-никель-фосфорным сплавом не более 0,5 мм.

Представляет интерес определение средней интенсивности изнашивания поворотного колена, работающего в указанных условиях предприятия. Пренебрегаем этапом притирания стенки зернопровода, так как в этих условиях он значительно короче периода эксплуатации самотека до сквозного износа стенки.

Материал стенки зернопровода – тонкостенная листовая сталь Ст 3, толщиной  $s=3$  мм. Зависимость износа носит линейный характер:

$$s = q_{Ст3} \cdot \tau, \quad (4.1)$$

где  $s$  – толщина стенки,  $s=3$  мм;

$q_{Ст3}$  – интенсивность изнашивания стенки зернопровода, мм/т;

$\tau$  – продолжительность изнашивания в виде количества прошедшего через него материала, Т.

Тогда :

$$q_{Ст3} = s / \tau \quad (4.2)$$

Подставляя полученные в результате производственных испытаний значения, получим величину средней интенсивности изнашивания стенки зернопровода из стали Ст 3:

$$q_{Ст3} = 3 / 12500 = 24 \cdot 10^{-5} \text{ мм/т.}$$

Износ восстановленного и упрочненного поворотных колен значительно ниже нового, что увеличивает время безремонтной работы (без остановок на замену изношенных колен) предприятия.

Эксплуатационные испытания применения Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытий и использования дополнительного упрочнения хромированием доказали

возможность использования их для восстановления самотечных зернопроводов.

### Выводы по 4 главе

1. Микротвердость Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов возрастает с увеличением катодно-анодного отношения при изменении  $\beta$  от 1,3 до 7-8 и плотности тока от 10 до 30 А/дм<sup>2</sup>. Максимальное значение микротвердости достигается у Fe-Ni сплава 8700МПа, у Fe-Ni-P сплава 9500МПа. Повышение плотности тока свыше 30 А/дм<sup>2</sup> и катодно-анодного отношения свыше  $\beta=7-8$  не приводит к существенному росту микротвердости.

2. С увеличением содержания фосфора в покрытии от 1 до 8 вес.% микротвердость повышается от 6100 до 8700 МПа. Термообработка в защитной атмосфере при 400 °С в течении часа приводит к увеличению микротвердости до 7800 - 11000 МПа.

3. Повышение плотности тока катодного полупериода с 2 до 30 А/дм<sup>2</sup> приводит к резкому увеличению процентного содержания никеля в Fe-Ni сплаве (от 8,9% при 5 А/дм<sup>2</sup> до 24,7% при 30 А/дм<sup>2</sup>). Катодно-анодное отношение в пределах от 2 до 10 оказывает влияние на содержание Ni в сплаве, дальнейшее увеличение катодно-анодного отношения не изменяет содержание никеля в сплаве.

4. Выход Fe-Ni и Fe-Ni-P сплавов по току возрастает с увеличением катодно-анодного отношения от 2 до 8 при различных плотностях тока и достигает 85 – 97 %. Дальнейшее увеличение катодно-анодного отношения не приводит к существенному росту выхода сплавов по току.

5. На асимметричном переменном токе с увеличением плотности катодного тока в интервале от 2 до 15 А/дм<sup>2</sup> происходит резкое увеличение содержания фосфора в Fe-Ni-Pпокрытии на 4,7% (от 5 до 9,7 %), а при значениях плотности тока от 15 до 30 А/дм<sup>2</sup> увеличение содержания фосфора происходит незначительно, на 1%. Увеличение содержания фосфора в сплаве происходит в

основном за счет снижения содержания никеля.

6. Износ образцов, как без покрытия, так и с Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями имеет линейный характер. Значения износа Fe-Ni на 20-30% и Fe-Ni-P на 40-50% ниже, чем у образцов без покрытий. Износ образцов упрочненных хромом на 50-55% ниже.

7. Количество поглощенного водорода в Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиях снижается от 560 до 255 см<sup>3</sup>/100г при возрастании плотности тока от 2 до 20 А/дм<sup>2</sup>. Дальнейшее повышение плотности тока не приводит к существенному изменению содержания поглощенного водорода в покрытии. При электроосаждении на асимметричном переменном токе количество поглощенного водорода на 70-110 см<sup>3</sup>/100г меньше, чем при осаждении на постоянном токе.

8. Увеличение содержания фосфора в покрытии Fe-Ni-P приводит к уменьшению содержания водорода в 1,5-2 раза в интервале плотности тока 2-20 А/дм<sup>2</sup>, свыше 20 А/дм<sup>2</sup> содержание водорода практически не изменяется и составляет 300-270 см<sup>3</sup> на 100 грамм покрытия.

9. У покрытий хромом с ростом плотности тока от 40 до 100 А/дм<sup>2</sup> повышается содержание водорода в покрытии как на постоянном от 280 до 920 см<sup>3</sup>/100г, так и на асимметричном переменном токах от 190 до 850 см<sup>3</sup>/100г. Изменение температуры электролита от 45 до 65 °С так же увеличивает содержание водорода на 200 - 235 см<sup>3</sup>/100г. Более низкое содержание водорода в покрытии на асимметричном переменном токе говорит о более качественном покрытии и о меньшем загрязнении окружающей среды частицами хрома, уносимыми выделяющимся водородом.

10. Микротвердость хромовых покрытий возрастает с увеличением токового значения, на постоянном токе от 8500 МПа при 40 А/дм<sup>2</sup>, до 12000 МПа при 100 А/дм<sup>2</sup>, а на асимметричном переменном токе от 14500 МПа при 40 А/дм<sup>2</sup>, до 16000 МПа при 100 А/дм<sup>2</sup>.

11. Абразивно-механический износ и коррозионная стойкость восстановленных зернопроводов, покрытых изнутри Fe-Ni и Fe-Ni-P в 2,5-3 раза

меньше, чем у аналогичных, изготовленных из листовой стали.

12. Результаты экспериментальных данных и предложенные аналитические зависимости показали, что интенсивность изнашивания Fe-Ni-сплава составляет 0,73 от интенсивности изнашивания контрольного образца Ст 3, интенсивность изнашивания Fe-Ni-P сплава составляет 0,53, а интенсивность изнашивания покрытия Cr - 0,46 от интенсивности изнашивания контрольного образца.

## **ГЛАВА 5. РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ И ТЕХНИКО- ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЗЕРНОПРОВОДОВ**

### **5.1 Технология восстановления зернопроводов Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытиями и упрочнение хромированием**

На основании проведенных экспериментальных и теоретических исследований, а так же анализа литературных источников, нами предлагается технологический процесс восстановления самотечных зернопроводов электролитическим железо-никель-фосфорным сплавом (Fe-Ni-P) из сульфатных электролитов с последующим поверхностным упрочнением хромированием.

Применение сульфатного электролита вместо хлоридного и нестационарных режимов осаждения позволяет улучшить экологическую нагрузку производственной среды за счет снижения выделения водорода и хлоридных частиц. Заданное изменение нестационарных режимов осаждения увеличивает выход металла по току и позволяет регулировать физико-механические и эксплуатационные свойства покрытия.

Экологичный недорогой технологический процесс восстановления и упрочнения изношенных самотечных зернопроводов рекомендуется к использованию в условиях сельскохозяйственного предприятия, эксплуатирующего самотечные зернопровода.

Технологический процесс для ванного способа восстановления зернопроводов включает следующие технологические операции:

1. Очистка деталей от загрязнений (грязи, пыли, масла, различных герметиков и т.п.) в горячей воде, или в бензине (ацетоне) с промывкой холодной водой;
2. Механическая обработка поверхности, подлежащей электролитическому осаждению Fe-Ni, Fe-Ni-P сплавов и хрома. Механическая

обработка проводится для очистки поверхности от следов коррозии, износов, придания поверхности необходимой геометрии. В случаях отсутствия видимых следов коррозии и нарушения геометрии формы механическая обработка может не проводиться. Заделывание сквозных отверстий электропроводной пластмассой, тканью или завариванием листовой сталью в пределах геометрических размеров зернопровода. Данная операция не применяется, если отсутствуют сквозные отверстия;

3. Промывка деталей горячей водой;
4. Монтаж деталей на подвесные приспособления с обеспечением надежного контакта детали с подвесным приспособлением;
5. Изоляция не покрываемых поверхностей хлорвиниловой или полиэтиленовой пленкой и лентой, или специальными лаками, красками, резиной, различными изоляционными пастами и пр.;
6. Промывка в холодной или горячей воде с органическими добавками или щелочными растворами или обезжиривание поверхности вручную венской известью с последующей промывкой в чистой воде;
7. Промывка в горячей воде;
8. Промывка подвески с деталями проточной водой;
9. Приготовление или регулирование сульфатного электролита;
10. Завешивание деталей в ванну железнения без тока на 2-5 минуты;
11. Анодное травление деталей в растворе электролита на анодном токе в течении 20-30 с, при  $I = 20-25 \text{ А/дм}^2$ ;
12. Установка рабочих режимов нанесения покрытий происходит в течение 2 минут с постепенным увеличением тока. Нанесение покрытий осуществляется при катодной плотности тока 20 - 30  $\text{А/дм}^2$ ;
13. Извлечение подвески с деталями из ванны;
14. Промывка в горячей воде;
15. Промывка в холодной проточной воде;
16. Нейтрализация в 10% растворе едкого натрия;

17. Демонтаж деталей из подвесных приспособлений;
18. Контроль качества покрытия: внешний осмотр поверхности детали, замер толщины покрытия.

Технологический процесс для самотечных зернопроводов вневаннным способом состоит из следующих операций:

1. Очистка деталей от посторонних загрязнений;
2. Механическая обработка поверхности подлежащей восстановлению. Механическая обработка поверхностей подлежащих восстановлению, при отсутствии видимых нарушений форм и деформации может не применяться. Заделывание сквозных отверстий электропроводной пластмассой, тканью или завариванием листовой сталью в пределах геометрических размеров зернопровода. Данная операция не применяется, если отсутствуют сквозные отверстия;
3. Промывка деталей горячей водой, для удаления загрязнений и металлических частиц после механической обработки;
4. Монтаж специальной оснастки на зернопровод, для обеспечения надежного контакта и хорошей герметизации (недопущение протекания электролита). Оснастка монтируется на ближайший к изношенному участку фланец зернопровода;
5. Изоляция не покрываемых поверхностей хлорвиниловой или полиэтиленовой пленкой и лентой, или специальными лаками, красками, резиной, различными изоляционными пастами и пр.;
6. Обезжиривание и промывка в горячей воде с органическими добавками или щелочными растворами или обезжиривание поверхности вручную венской известью с последующей промывкой в чистой воде;
7. Промывка в горячей воде;
8. Промывка оснастки с деталями проточной водой;
9. Приготовление или регулирование сульфатного электролита;
10. Заполнение внутреннего объема зернопровода рабочим

электролитами выдержка детали с электролитом без тока в течении 3-7 минут. Электролит подается и удаляется через специальные патрубки и специальную оснастку - блок подачи электролита, в состав которого входит не токопроводящий коррозионностойкий насос, емкость для электролита, вентили;

11. Анодное травление деталей происходит в рабочем электролите при анодной силе тока  $20-30 \text{ А/дм}^2$  в течении 20-30 секунд;

12. Электроосаждение. Рабочие режимы устанавливаются в течение 2-5 минут с постепенным увеличением тока. Нанесение покрытий происходит при катодной плотности тока  $20-30 \text{ А/дм}^2$ ;

13. Откачка электролита железнения;

14. Промывка в горячей воде;

15. Промывка в холодной проточной воде;

16. Нейтрализация;

17. Демонтаж оснастки;

18. Осмотр детали, проверка качества покрытия и передача детали в эксплуатацию.

В таблице 5.1 приведено сравнение существующего [60] технологического процесса и предлагаемого технологического процесса.

Предлагаемый технологический процесс имеет ряд отличий по сравнению с существующим:

– анодное травление происходит в том же электролите что и нанесение покрытия. Это позволяет исключить из техпроцесса приготовление раствора для анодного травления, последующую промывку в холодной и дистиллированной воде, тем самым снизив загрязнение сточных вод, и дополнительные затраты на приобретение емкости и компонентов для анодного травления;

– электроосаждение в сульфатном электролите немного снижает скорость процесса восстановления по сравнению с хлоридным электролитом, но более экологично и менее агрессивно.

Таблица 5.1 – Технологические операции восстановления и упрочнения поворотных колен предлагаемого технологического процесса в сравнении с типовым

№ пп	Наименование операции стандартного технологического процесса	Наименование операции предложенного технологического процесса
1	Очистка деталей	Очистка деталей
2	Механическая обработка поверхностей и заделывание сквозных отверстий	Механическая обработка поверхностей и заделывание сквозных отверстий
3	Промывка деталей горячей водой	Промывка деталей горячей водой
4	Монтаж деталей в подвесное приспособление	Монтаж специальной оснастки
5	Изоляция не покрываемых поверхностей	Изоляция не покрываемых поверхностей
6	Обезжиривание	Обезжиривание
7	Промывка в горячей воде	Промывка в горячей воде
8	Промывка подвески с деталями проточной водой	Промывка оснастки с деталями проточной водой
9	Приготовление или регулирование хлоридного электролита	Приготовление или регулирование сульфатного электролита
10	Приготовление 30 % раствора серной кислоты для анодного травления	–
11	Погружение в ванну травления	Заполнение сульфатным электролитом
12	Анодное травление	Анодное травление
13	Промывка подвески с деталями в холодной проточной воде	–
14	Промывка деталей в дистиллированной воде	–
15	Электроосаждение	Электроосаждение
16	Извлечение подвески с деталями из ванны	Откачка электролита железнения
17	Промывка в горячей воде	Промывка в горячей воде
18	Промывка в проточной холодной воде	Промывка в проточной холодной воде
19	Нейтрализация	Нейтрализация
20	Демонтаж деталей с подвески	Демонтаж оснастки
21	Контроль качества покрытия внешним осмотром, контроль толщины	Контроль качества покрытия внешним осмотром, контроль толщины

На рисунке 5.1 изображена схема предлагаемой нами оснастки для восстановления и упрочнения внутренних стенок поворотных колен вневаннным способом с помощью электролитических покрытий с анодом по форме износов раковин.

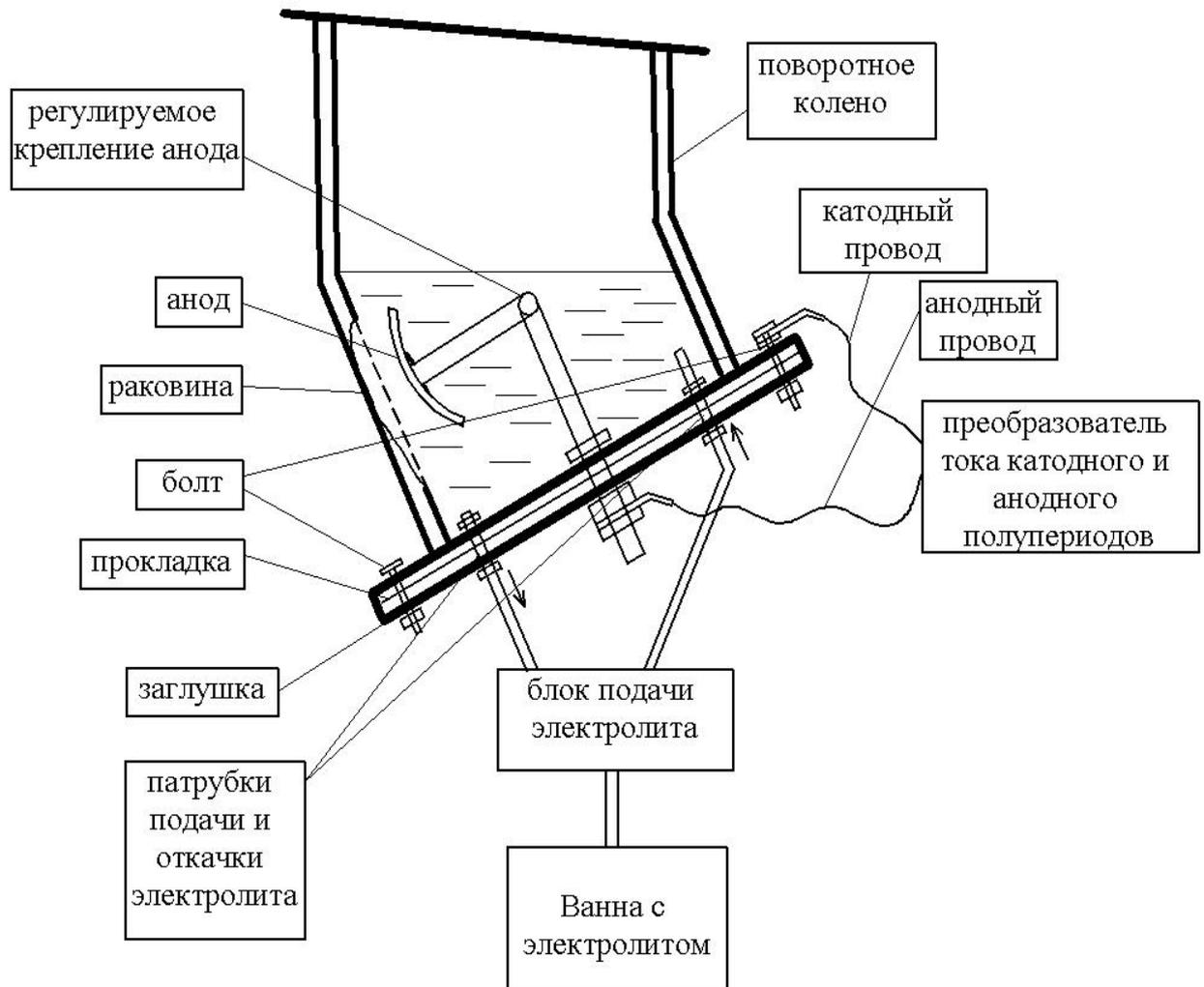


Рисунок 5.1 – Схема оснастки для восстановления и упрочнения поворотных колен вневаннным способом

Принцип работы оснастки для восстановления и упрочнения поворотных колен заключается в следующем: поворотное колено с помощью болтового крепления соединяется через прорезиненную прокладку с заглушкой. Заглушка имеет 2 патрубка для подачи и откачки электролита из полости восстанавливаемого элемента зернопровода с помощью блока подачи электролита, который состоит из коррозионностойкого насоса, патрубков,

шлангов, вентилях подачи и откачки электролита, емкости, устройства подогрева электролита. В центре заглушки крепится регулируемое крепление анода, с помощью которого происходит регулировка расстояния анода от износной раковины. Подача питания и регулировка параметров осаждения осуществляется от преобразователя тока катодного и анодного полупериодов через соединительные провода, концы которых соединяются через болтовое крепление с поворотным коленом и анодом.

После проведения всех подготовительных операций открывается вентиль подачи электролита и насосом через шланг подается электролит в полость восстанавливаемой детали. Уровень электролита в восстанавливаемой детали устанавливается на 3-5 сантиметров выше анода и контролируется визуально. После достижения необходимого уровня электролита открывается вентиль откачки электролита, в результате чего происходит циркуляция электролита в полости восстанавливаемой детали. В конце работы перекрывается вентиль подачи и происходит откачка электролита.

На рисунке 5.2 изображена схема устройства для восстановления и упрочнения внутренних стенок зернопроводов с помощью электролитических покрытий с вращающимся анодом.

Принцип работы устройства следующий: зернопровод 21 (цилиндрическая труба) закрепляется на стойках 23, с боковых краев устанавливаются заглушки с прокладками и с помощью болтовых креплений осуществляется герметизация конструкции. В центре зернопровода располагается анод 20, удерживаемый с краев винило-пластиковыми подшипниками 25. Анод на наружном конце имеет шкив, соединенный с двигателем 19 клиноременной передачей 18. С противоположной стороны от двигателя прикреплен дополнительный сектор для возможности полного заполнения зернопровода электролитом. Сектор имеет отверстие, через которое происходит заполнение электролитом и водой, а так же удаление водорода. Катодный провод подключается к зернопроводу болтовым креплением, анодный провод к аноду через скользящий контакт.

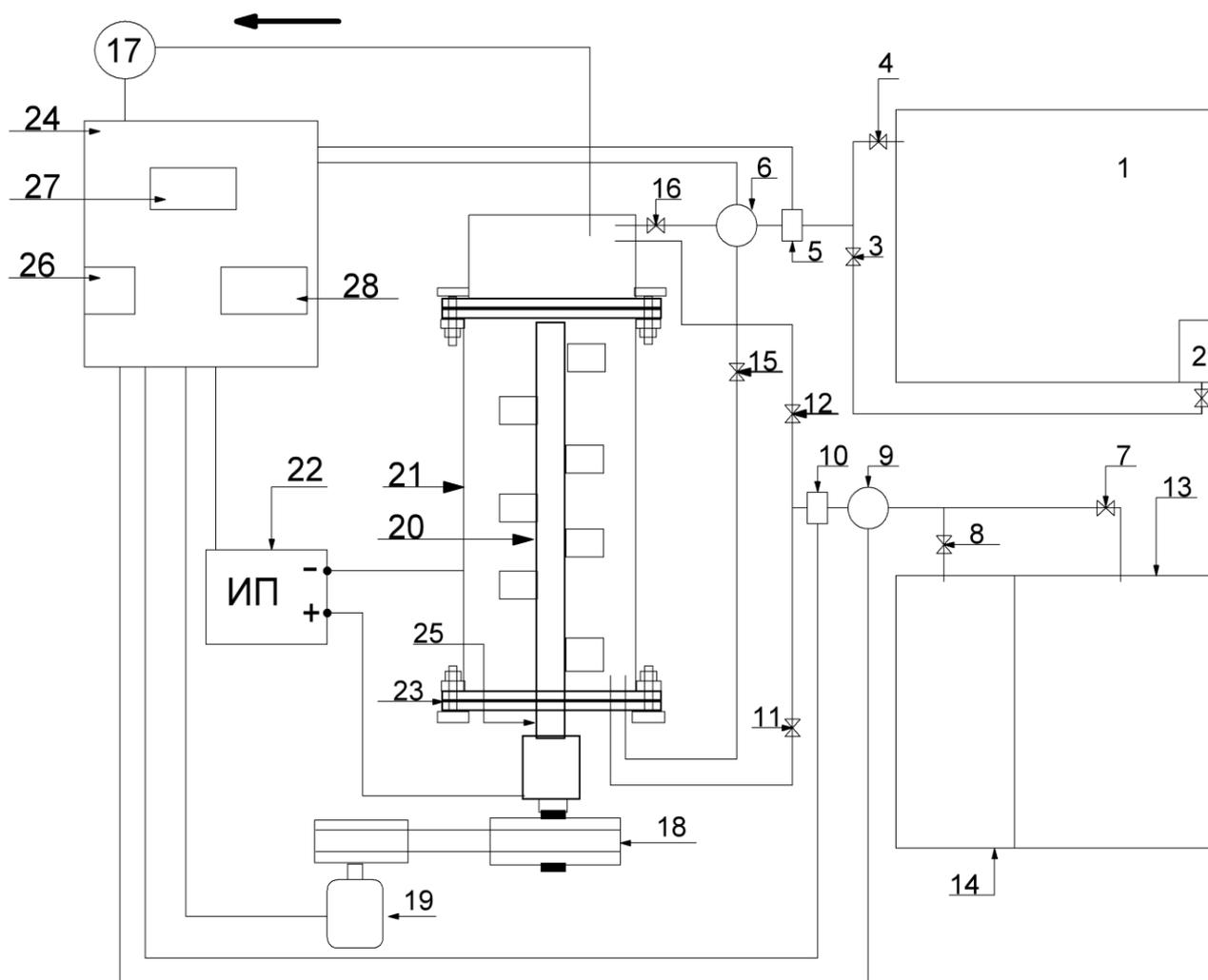


Рисунок 5.2 - Схема устройства для восстановления внутренних стенок зернопроводов

При включении питания на блоке управления 24 запускается двигатель вытяжки 17, затем сигналом с блока управления, с помощью насоса 6 через датчик расходомер электролита 5 и верхний клапан 4 подается электролит из ванны 1 внутрь зернопровода 21 до его полного заполнения (объем зернопровода определяется математически). Датчик расходомер электролита 5 сообщает свои показания на блок управления и при достижении нужного объема блок управления отключает насос подачи и откачки электролита 6. После этого оператор задает параметры электролиза на панели управления 28, которые отображаются на дисплее 27. Сигнал включения с блока управления подается на источник питания 22, одновременно включается двигатель 19 для перемешивания

электролита. После завершения процесса осаждения отключается источник питания, останавливается двигатель 17, насосом 6 откачивается электролит в ванну 1 через нижний клапан 3 и систему очистки электролита 2. Затем из ванны 13 с водой насосом 9 через клапан 7 и датчик расходомер воды 10 ванна заполняется водой для промывки, при этом включается вращение анода 20 для лучшей промывки. После завершения промывки отключается двигатель 19 и происходит откачка воды насосом 9 через нижний клапан 8 в ванну улавливания и очистки воды 14, после чего отключается питание вытяжки 17 и происходит демонтаж зернопровода. Клапаны 11, 12 и 15, 16 позволяют при откачке и заполнении зернопровода электролитом и водой двигаться только в одном направлении.

Зернопровод располагается под определенным углом для более удобного и компактного размещения в помещении, а так же для лучшего удаления водорода с электролита, что повышает прочность наносимого покрытия.

Контроль нанесения покрытия осуществляется оператором в процессе электролиза с помощью ультразвукового толщиномера.

На рисунке 5.3 изображена схема блока управления тиристорами VS1 и VS2 для регулирования асимметричного переменного тока.

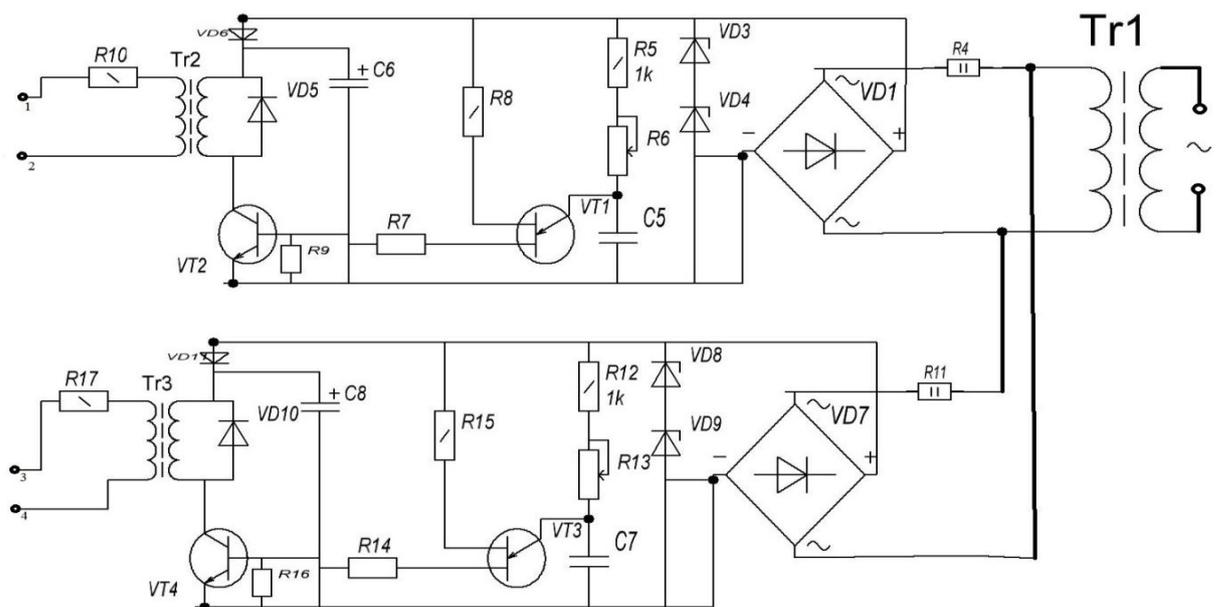


Рисунок 5.3 – Схема управления тиристорами VS1, VS2

Блок управления тиристорами содержит генератор импульсов на однопереходном транзисторе VT1 и VT3. С помощью переменного резистора R6 и R13 регулируется задержка импульсов относительно момента перехода сетевого напряжения через ноль, чем изменяется угол включения тиристорov. Стабилизированное напряжение и ток заряжают емкости C5 и C7, затем подается на коллектор транзистора VT1 и VT3, после этого пилообразное импульсное напряжение подается на заряд емкостей C6 и C8, и на коллекторы транзисторов VT2 и VT4. Транзисторы VT2 и VT4 служат усилителем мощности импульса. Блок управления питается через гасящие резисторы R4, R11, R17, R10 и диодные мосты VD1 и VD7. Выпрямленное диодным мостом напряжение стабилизировано стабилитронами VD3, VD4, VD8 и VD9.

## **5.2 Результаты внедрения и рекомендации производству**

Результаты диссертационных исследований внедрены в ООО «Воронежпищепродукт». По данным предприятия предложенный способ восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов позволил значительно увеличить срок службы самотечного оборудования.

Внедрение в учебный процесс подготовки инженеров сельского хозяйства во ВГАУ им. Императора Петра I позволило расширить диапазон изучения современных технологий восстановления деталей, использовать их в процессе лабораторно-практических занятий, а так же в экспериментальных исследованиях молодых ученых.

Для улучшения качества хромового покрытия в процессе нанесения на постоянном токе предложено использовать реверс тока, через каждые 10 минут, на 2-3 минуты. При этом покрытие получается более равномерным, с большей плотностью и меньшей шероховатостью, практически исключается возникновение дефектов (раковин, рыхлой структуры и т.п.). Процесс хромирования лучше заканчивать при небольшой анодной выдержке в течение

20-30 спри рабочей плотности тока, что способствует удалению дендритов и неровностей поверхности, позволяя отказаться от механической обработки поверхности.

Контроль качества поверхности при железнении и упрочнении зернопроводов хромированием вневанным способом предлагается проводить в процессе осаждения покрытий с помощью электронного ультразвукового толщиномера, который позволяет без остановки процесса электроосаждения производить измерения. Данный способ позволяет с большой точностью определять значения толщины зернопроводов, которые в виду сложности своей достаточно трудно осуществить другими существующими способами. При стационарном способе железнения и хромирования контроль качества наносимого покрытия осуществляется так же толщиномером, но только после завершения процесса осаждения.

Нами предлагается использование малоцентрированных электролитов хромирования, что позволяет повысить скорость осаждения, уменьшить вредные выделения в 10 – 15 раз, снизить потребление электроэнергии в 10 – 15 раз, повысить качество получаемого покрытия что, безусловно, является экологическим преимуществом по сравнению со стандартным электролитом хромирования.

Использование катализатора (кристаллического фиолетового) позволяет уменьшить выделение водорода, а так же улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства получаемого покрытия.

В качестве анодов для нанесения Fe-Ni и Fe-Ni-P покрытий по всей поверхности на внутренние стенки зернопроводов рекомендуются круглые стальные аноды марок Ст3, Ст5, 10, 20 диаметром 40-60 мм. В случае хромирования - цилиндрические нерастворимые свинцовые или угольные аноды.

Для заравнивания изношенных раковин зернопроводов предлагается использовать аноды по форме износа раковин изготовленных из листовой стали. Это позволяет равномерно заравнивать изношенные раковины восстанавливаемых

стенок зернопроводов, места приближенные к аноду зарастаются более интенсивно, чем удаленные от анода, за счет этого происходит выравнивание толщины изношенной поверхности раковин.

Выход на рабочие режимы осаждения происходит в течение 2 минут при начальном значении катодно-анодного отношения  $\beta = 1,5 - 2$ , с постепенным его увеличением. Такое постепенное увеличение значения катодно-анодного отношения обеспечивает хорошее сцепление осадка с основой.

Использование нестационарных режимов осаждения позволит избежать разноклинности осадка по поверхности, добиться более высокой рассеивающей и кроющей способности электролита, большей эффективности использования компонентов электролита, а так же его меньшего наводороживания, за счет более эффективного удаления газов при прокачке электролита.

Нанесение железо-никелевого и железо-никель-фосфорного покрытий предлагается вести на асимметричном переменном токе с катодной плотностью тока от 2 до 35 А/дм<sup>2</sup>, катодно-анодном отношении ( $\beta$ ) от 2 до 7-8, температурой электролита 20-30 °С, кислотностью электролита рН = 0,9-1,0;

### **5.3 Экономическая эффективность восстановления и упрочнения самотечных зернопроводов гальваническими покрытиями**

Оценка экономической эффективности технологии восстановления самотечных зернопроводов учитывает не только себестоимость процесса, но и долговечность восстановленных и упрочненных деталей. Для оценки экономической эффективности с учетом долговечности восстановленных деталей наиболее подходит технико-экономический критерий, предложенный Шадричевым В.А. [184]:

$$C_{\text{восст}} \leq C_{\text{н}} \cdot K,$$

где  $C_{\text{восст}}$  – себестоимость восстановления детали;

$C_{\text{н}}$  – себестоимость новой детали;

$K$  – коэффициент долговечности восстановленной детали.

Себестоимость восстановления и упрочнения внутренней поверхности одного изношенного самотечного зернопровода определяется по формуле:

$$C_{\text{восст}} = ЗП + З_{\text{м}} + З_{\text{пр}} + З_{\text{об}}, \quad (5.1)$$

где  $ЗП$  – затраты на заработную плату рабочих занимающихся восстановлением труб зернопроводов, руб.;

$З_{\text{м}}$  – затраты на приобретение (покупку) материалов для восстановления и упрочнения хромированием труб зернопроводов, руб.;

$З_{\text{пр}}$  – затраты на производственные нужды, руб.;

$З_{\text{об}}$  – затраты на амортизацию оборудования для восстановления труб зернопроводов, руб.

Затраты на заработную плату рабочего занимающегося восстановлением 1 зернопровода определяются по формуле:

$$ЗП = (ЗП_0 + ЗП_0(ЗП_{\text{д}} + Н)) \cdot t_{\text{восст}}, \quad (5.2)$$

где  $ЗП_0$  – основная часовая заработная плата рабочего, руб.;

$ЗП_{\text{д}}$  – дополнительная заработная плата рабочего, % от  $ЗП_0$ ;

$Н$  – налоговые отчисления выплачиваемые предприятием в социальные фонды, % от  $ЗП_0$ ;

$t_{\text{восст}}$  – время, затрачиваемое на восстановление 1 зернопровода, ч.

Основная заработная плата рабочего определяется из формулы:

$$ЗП_0 = ТС_p \cdot t_{\text{восст}}, \quad (5.3)$$

где  $ТС_p$  – почасовая тарифная ставка рабочего, занятого восстановлением зернопровода, руб.;

Дополнительная заработная плата рабочего в среднем равна 5% от основной заработной платы.

Налоговые отчисления, выплачиваемые предприятием в различные фонды, определяются как:

$$Н = Н_{\text{пф}} + \text{ФФОМС} + \text{ФСС}, \quad (5.4)$$

где  $Н_{\text{пф}}$  – налоговые отчисления в пенсионный фонд,  $Н_{\text{пф}}=22\%$ ;

ФФОМС – взнос в фонд обязательного медицинского страхования,  
ФФОМС=2,9%;

ФСС – отчисления в фонд социального страхования, ФСС=5,1%.

Тогда общий процент налоговых отчислений будет равен 30 %.

Время восстановления определяется как сумма времени, затраченного на все операции:

$$t_{\text{восст}} = t_{\text{п.п.}} + t_{\text{ж}} + t_{\text{хр}} + t_{\text{п.о.}}, \quad (5.5)$$

где  $t_{\text{п.п.}}$  – время, затрачиваемое на подготовку поверхности одной трубы,

$t_{\text{п.п.}}=0,3$  ч.;

$t_{\text{ж}}$  – время, затрачиваемое на процесс нанесения электролитического железа на восстановление одного зернопровода, ч.;

$t_{\text{хр}}$  – время, которое затрачивается на осаждение хромового покрытия.

Так как толщина осаждаемого упрочняющего покрытия на зернопровод рекомендована  $h=0,02$  мм,  $t_{\text{хр}}=0,5$  ч;

Время, затрачиваемое на процесс нанесения электролитического железа, определяется по формуле 2.28.

Оно зависит от толщины наносимого слоя  $h$ . Как было показано ранее, толщина наносимого слоя сплава железа может быть от десятых долей миллиметра до 6 мм. Расчет ведем по максимальной толщине слоя Fe-Ni-P покрытия  $h=4$  мм, при катодной плотности тока  $D_{\text{к}}=30$  А/дм<sup>2</sup>.

Тогда общее время, затрачиваемое на восстановление, будет равно -  $t_{\text{восст}} = 6,4$  ч.

Восстановлением и упрочнением зернопроводов занят гальваник 4 разряда. Основная заработная плата гальваника 4 разряда, с почасовой оплатой труда равна:  $ЗП_0=120$  руб/ч.

Затраты на заработную плату рабочего за восстановление и упрочнение одного зернопровода, включающие выплаты на основную и дополнительную заработные платы и налоговые отчисления, составили  $ЗП = 1048$  руб.

Затраты на приобретение материалов для восстановления и упрочнения

труб зернопроводов определяются исходя из расхода компонентов электролитов.

Количество осажденного металла определяется как сумма объема раковин и дополнительной толщины восстанавливающего слоя, превышающего толщину стенки зернопровода. Объем раковины износа принимаем по максимальной глубине, равной толщине стенки зернопровода. Тогда количество осажденного восстанавливающего металла составит 151,6 грамм.

Количество металла упрочняющего слоя (толщина слоя рекомендована  $h_y = 0,2$  мм) зависит от площади покрытия. Для локального упрочнения, как наиболее экономичного, площадь покрытия составит в среднем  $1546 \text{ дм}^2$ , количество осажденного хрома составит 7,43 грамма.

Расход остальных компонентов электролита железнения и хромирования определялся на основании наблюдений и процентного соотношения по сравнению с основным компонентом (железом и хромом). Для удобства расчета расходов компонентов все данные приведены в таблице 5.2 для железнения и в таблице 5.3 для хромирования.

Таблица 5.2 – Стоимость материалов и компонентов для восстановления одного зернопровода железнением

№ п/п	Наименование материалов и компонентов	Единица измерения	Цена за единицу, руб.	Расход, кг	Стоимость, руб.
1	Железо сернокислое	кг	165	0,1516	25,02
2	Никель сернокислый	кг	472	0,03032	14,31
3	Гипофосфит натрия	кг	340	0,0101	3,43
4	Серная кислота	кг	35	0,25	8,75
5	Соляная кислота	кг	25	0,25	6,25
6	Аскорбиновая кислота	кг	138	0,0014	0,19
Всего					57,95

Стоимость материалов на восстановление одного зернопровода – 57,95 руб.

Стоимость материалов для упрочнения одного зернопровода хромированием составляет – 15,89 руб.

Стоимость материалов для восстановления и упрочнения одного зернопровода равна  $Z_m = 73,84$  руб.

Производственные затраты для восстановления и упрочнения одного зернопровода определяются по формуле:

$$Z_{пр} = Z_{ээ} + Z_{к.у} + Z_{а.п.}, \quad (5.8)$$

где  $Z_{ээ}$  – затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$Z_{к.у}$  – затраты на оплату коммунальных услуг, руб.;

$Z_{а.п.}$  – затраты на амортизацию производственного помещения, руб.;

Таблица 5.3 – Стоимость материалов и компонентов для упрочнения одного зернопровода хромированием

№ п/п	Наименование материалов и компонентов	Единица измерения	Цена за единицу, руб.	Расход, кг	Стоимость, руб/кг
1	Хромовый ангидрид	кг	828	0,00743	6,15
2	Серная кислота	кг	35	0,25	8,75
3	Кристаллический фиолетовый	кг	12390	0,00008	0,99
Всего					15,89

Затраты на электроэнергию, потребляемую электрооборудованием, определяются по формуле:

$$Z_{ээ} = ((P_{осв} \cdot t_p) + (P_{уст.ж} \cdot t_p) + (P_{э.дв} \cdot t_{р.э.дв} \cdot \eta_{э.д.}) + (P_{уст.хр} \cdot t_p) + (P_{тэн} \cdot t_p)) \cdot Ц_{э}, \quad (5.9)$$

где  $P_{осв}$  – суммарная мощность осветительных приборов,  $P_{осв} = 1$  кВт;

$t_p$  – время работы оборудования, ч;

$P_{уст.ж}$  – потребляемая мощность установки при железнении,  $P_{уст.ж} = 7,3$  кВт;

$P_{э.дв.}$  – мощность электродвигателя вентиляции,  $P_{э.дв.} = 0,55$  кВт;

$t_{р.э.д.}$  – время работы вентиляции, ч;

$\eta_{э.д.}$  – КПД электродвигателя,  $\eta_{э.д.} = 0,85$ ;

$P_{уст.хр}$  – потребляемая мощность установки при хромировании,  $P_{уст.хр} = 4,8$  кВт;

$P_{\text{тэн}}$  – мощность тэнов, подогревающих электролит хромирования и воду в промывочных ваннах,  $P_{\text{тэн}} = 1$  кВт;

$\text{Ц}_э$  – стоимость 1 кВт электроэнергии согласно тарифу,  $\text{Ц}_э = 3,1$  руб/кВт на 1.01.2018 г. [115].

Тогда затраты на электроэнергию для восстановления одного зернопровода составляют  $Z_{ээ} = 164,24$  руб.

Затраты на оплату коммунальных услуг при восстановлении одного зернопровода определяются по формуле:

$$Z_{\text{к.у}} = V_{\text{х.в}} \cdot \text{Ц}_{\text{х.в}} + V_{\text{г.в}} \cdot \text{Ц}_{\text{г.в}} + V_{\text{водоотв.}} \cdot \text{Ц}_{\text{водоотв.}} \quad (5.10)$$

где  $V_{\text{х.в}}$  – объем потребления холодной воды,  $V_{\text{х.в}} = 30$  л;

$\text{Ц}_{\text{х.в}}$  – стоимость холодной воды за  $1 \text{ м}^3$ ,  $\text{Ц}_{\text{х.в}} = 23,6$  руб. [114];

$V_{\text{г.в}}$  – объем потребления горячей воды,  $V_{\text{г.в}} = 20$  л;

$\text{Ц}_{\text{г.в}}$  – стоимость горячей воды за  $1 \text{ м}^3$ ,  $\text{Ц}_{\text{г.в}} = 105,38$  руб. [112];

$V_{\text{водоотв.}}$  – объем водоотведения горячей и холодной воды,  $V_{\text{водоотв.}} = 20$  л;

$\text{Ц}_{\text{водоотв.}}$  – стоимость водоотведения горячей и холодной воды за  $1 \text{ м}^3$ ,

$\text{Ц}_{\text{водоотв.}} = 11,28$  руб. [114].

Тогда затраты на оплату коммунальных услуг при восстановлении одного зернопровода составят  $Z_{\text{к.у}} = 3,04$  руб.

Стоимость амортизации нежилого производственного помещения площадью  $50 \text{ м}^2$  составляет 3000 руб/месяц. Амортизация на одни сутки составит 100 руб.

Производственные затраты для восстановления и упрочнения одного зернопровода составят  $Z_{\text{пр}} = 267,24$  руб.

Затраты на амортизацию оборудования для восстановления труб зернопроводов определяется по формуле:

$$Z_{\text{об}} = ((Z_{\text{уст}} + Z_{\text{вент}} + Z_{\text{ванны}}) / q + Z_{\text{монт.раб}}) / n, \quad (5.11)$$

где  $Z_{\text{уст}}$  – затраты на приобретение установки для электроосаждения железа и хрома;  $Z_{\text{уст}} = 40000$  руб;

$Z_{\text{вент}}$  – затраты на приобретение улиткового вентилятора для принудительной вентиляции,  $Z_{\text{вент}} = 2300$  руб;

$Z_{\text{ванны}}$  – затраты на приобретение 5 ванн,  $Z_{\text{ванны}} = 5000$  руб;

$Z_{\text{монт.раб}}$  – затраты на монтажные работы на участке восстановления;

$Z_{\text{монт.раб}} = 5000$  руб;

$q$  – срок эксплуатации оборудования, средний срок эксплуатации оборудования составляет 10 лет;

$n$  – количество восстанавливаемых деталей в год,  $n = 200$  шт.

Тогда затраты на амортизацию оборудования на восстановление одного зернопровода составят  $Z_{\text{об}} = 48,65$  руб.

Себестоимость восстановления Fe-Ni или Fe-Ni-P покрытием одного изношенного самотечного зернопровода с внутренней поверхности составит 863,35 руб.

Себестоимость упрочнения хромированием одного нового или восстановленного зернопровода с внутренней стенки зернопровода составила 574,38 руб.

Себестоимость восстановления и упрочнения хромированием одного изношенного самотечного зернопровода с внутренней поверхности составит  $C_{\text{вост}} = 1437,73$  руб.

Изношенные самотечные трубы иногда футеруются или используют вставки из полиуретана или полиэтилена, но чаще всего просто выбрасываются. Стоимость самотечного зернопровода зависит от длины и толщины трубы. Средняя стоимость нового зернопровода ( $C_{\text{нз}}$ ) длиной 2000 мм, внутренним диаметром 300 мм и толщиной металла 3 мм составляет  $C_{\text{нз}} = 3500$  руб. [113]. Средняя стоимость нового поворотного колена ( $C_{\text{нк}}$ ) внутренним диаметром 300 мм и толщиной металла 3 мм составляет  $C_{\text{нк}} = 1800$  руб. [113].

Согласно эксплуатационным испытаниям восстановленного железнением и упрочненного хромированием самотечного зернопровода его износ оказался в среднем в 2-4 раз меньше, и поворотного колена в 2-3 раза меньше, чем износ

нового зернопровода и поворотного колена.

Сравнение полученных данных по технико-экономическому критерию, предложенному Шадричевым В.А., показывает экономическую целесообразность восстановления электролитическим покрытием железо-никель-фосфор (Fe-Ni-P) и упрочнения хромированием, как зернопроводов, так и поворотных колен самотечных труб:

$$1437,73 \leq 3500 \cdot 2 = 7000$$

поворотного колена:

$$1437,73 \leq 1800 \cdot 2 = 3600.$$

Практически экономический эффект от восстановления и упрочнения деталей зернопроводов будет выше указанного, так как в расчетах не учтены затраты на остановку производства и монтажные работы по замене изношенных деталей на новые.

Затраты на восстановление 20 поворотных колен и 10 самотечных зернопроводов предлагаемым способом составляют –43131,9 руб. Стоимость приобретения и замены на новые зернопровода и поворотные колена с учетом минимальной долговечности восстановленных и упрочненных деталей зернопроводов составит –142 000 руб.

Экономический эффект от внедрения технологии восстановления самотечных зернопроводов в масштабах предприятия, с годовым объемом износа зернопроводов 20 поворотных колен и 10 самотечных труб составит 98 868 руб.

### **Выводы по 5 главе**

1. Разработан технологический процесс восстановления изношенных элементов зернопроводов, позволяющий снизить экологическую нагрузку на производственную среду за счет использования рабочего сульфатного электролита и для анодного травления и для нанесения покрытия, а так же снизить материальные затраты на восстановление одной детали.

2. Предложена недорогая технологическая оснастка и преобразователь тока катодного полупериода и катодно-анодного отношения для восстановления и упрочнения поворотных колен и прямолинейных участков самотечных зернопроводов.

3. Проведены производственные испытания на предприятии ООО «Воронежпищепродукт», которые подтверждают увеличение наработки поворотных колен, восстановленных железо-никель-фосфорными сплавами, минимум в 2 раза.

4. Экономическая эффективность от внедрения технологии восстановления самотечных зернопроводов в масштабах предприятия ООО «Воронежпищепродукт» с годовым объемом износа зернопроводов 20 поворотных колен и 10 самотечных труб составила 98 868 руб.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Износ деталей самотечных транспортных систем зерноперерабатывающих предприятий наиболее интенсивно происходит преимущественно в локальных местах, где зерновой поток изменяет направление движения, при этом площадь раковины от 10 до 300 см<sup>2</sup>, глубина - до образования сквозных протертостей.

2. Предложены аналитические зависимости динамики изнашивания восстановленной стенки самотека, позволяющие обосновать толщину электролитического покрытия изношенной части самотека, обеспечивающую сезонную наработку, железо-никелевым  $h=4,38$  мм и железо-никель-фосфорным  $h=3,21$  мм сплавами, упрочнение восстановленной или новой поверхности хромированием.

3. Предложена методика восстановления изношенных участков зернопроводов электролитическими покрытиями Fe-Ni-P сплавами. Анализом микроструктуры железо-никель-фосфорного покрытия установлено: с возрастанием содержания фосфора формируется сплошное равномерное глобулярно-сфероидальное покрытие со слоисто-блочной структурой, которое обеспечивает повышение микротвердости до 8500-9500 МПа. Микротвердость поверхности увеличивается на 30% при повышении содержания фосфора от 1 до 8 %, и на 70% при повышении катодно-анодного отношения от 1,3 до 10. Потеря массы металла в результате изнашивания поверхности, восстановленной сплавом Fe-Ni-P на 40-50% меньше поверхности зернопровода без покрытия.

4. Предложен усовершенствованный технологический процесс, преобразователь тока катодного полупериода и катодно-анодного отношения, и технологическая оснастка для восстановления и упрочнения изношенных самотечных зернопроводов покрытием Fe-Ni-P, при температуре 20-30 °С, плотности асимметричного переменного электрического тока 2-30 А/дм<sup>2</sup>, при

катодно-анодном отношении 1,3-10 с применением сульфатного электролита и электрода, соответствующего площади раковины.

5. Результаты исследований внедрены в учебный процесс ВГАУ им. Императора Петра I и на ООО «Воронежпищепродукт». Долговечность восстановленного и упрочненного зернопровода увеличивается минимум в 2 раза, экономия денежных средств при восстановлении одного поворотного колена составляет 363 рубля. Экономический эффект от внедрения технологии восстановления самотечных зернопроводов в масштабах предприятия, с годовым объемом 20 поворотных колен и 10 самотечных труб составляет 98 868 руб.

#### **Рекомендации производству:**

Предложенная технология, технологическое оборудование и оснастка рекомендуется для восстановления и упрочнения изношенных зернопроводов электролитическими покрытиями в условиях сельскохозяйственных предприятий, эксплуатирующих самотечные зернопровода.

#### **Перспективы дальнейшей разработки темы:**

Дальнейшие исследования направлены на углубление теоретических и практических исследований влияния режимов нанесения и составов электролита на процесс электроосаждения покрытий на основе железа, с использованием различных легирующих добавок для восстановления деталей машин и оборудования на сельскохозяйственных предприятиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивное изнашивание деталей [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [v-mireauto.ru/abrazivnoe-iznashivanie-detalej/](http://v-mireauto.ru/abrazivnoe-iznashivanie-detalej/).
2. Амфельд Г. Водород в металлах. Т.1. Основные свойства [Текст] / Под ред. Г. Амфельда и Г. Фелькля // - М.: Мир, 1981. - 241 с.
3. Амфельд Г. Водород в металлах. Т.2. Прикладные аспекты [Текст] / Под ред. Г. Амфельда и Г. Фелькля // М.: Мир, 1981. - 430 с.
4. Андреева Л.Н. Внутренние напряжения в осадках железа, полученного из сульфато-хлористого электролита [Текст] / Андреева Л.Н. // Кишинев: Штиинца. - 1987. - С. 46-51.
5. Артамонов В.В. О количественном определении прочности сцепления гальванических покрытий с основой [Текст] / В.В. Артамонов, Д.Н. Набиев, В.П. Артамонов // Контроль. Диагностика. - 2010. - №2. – С. 59-62.
6. Астанин В.К. Износ деталей и виды восстановления [Текст] / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, В.В. Емцев, Э.М. Санников // 33 международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы науки 21 века». – Москва. - 2018. - С. 38-43.
7. Астанин В.К. Износостойкость деталей, восстановленных хромированием на нестационарных режимах осаждения [Текст] / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. - 2017. - № 2. - С. 102-109.
8. Астанин В.К. Наводороживание основного металла и хромовых покрытий [Текст] / В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, Н.Ю. Стекольников, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. - 2018. №2 (38). – С. 127-136.
9. Афанасьев Е.А. Упрочнение и восстановление деталей машин

электроосажденными композиционными покрытиями на основе железа с применением дисульфида молибдена [Текст] : дис. ... канд. тех. наук : 05.20.03 / Афанасьев Е.А. – Курск, 2014. – 174 с.

10. Афанасьев Е.А. Электроосаждение бинарных покрытий на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин [Текст] / Е.А. Афанасьев, В.И. Серебровский, В.В. Серебровский // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2012. - №7. – С. 79-81.

11. Бабяк С.И. Структурные особенности химических покрытий Ni-P-Cu [Текст] / С.И. Бабяк // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. – 2009. - №2. – С. 89-90.

12. Баграмян А.Т. Физико-механические свойства электролитических осадков [Текст] / Баграмян А.Т., Петрова Ю.С. // М.: Изд. АН СССР, 1960. - 206 с.

13. Барабаш М.А. Разработка электроосажденных железо-титановых сплавов и их термическая обработка для восстановления и упрочнения деталей машин [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Барабаш М.А. – Курск: ЮЗГУ, 2010.

14. Батищев А.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники [Текст] / А.Н. Батищев, И.Г. Голубев, В.П. Лялякин - М.: Информагротех, 1995. - 295 с.

15. Беленький М.А. Электроосаждение металлических покрытий [Текст] / М.А. Беленький, А.Ф. Иванов // М: Металлургия, 1985. - 288 с.

16. Белоглядов С.М. Наводороживание стали при электрохимических процессах [Текст] / С.М. Белоглядов // Л.: Изд-во Ленинградского университета, 1975. — 412 с.

17. Березин Н.Б. Электроосаждение металлов и сплавов из водных растворов комплексных соединений: Монография [Текст] / Н.Б. Березин и др. – Казань: Казанский государственный технологический университет, 2006. – 282 с.

18. Боярский В.Н. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники железоборидными покрытиями [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / Боярский В.Н. - М.: МГАУ, 2000. - 198 с.

19. Буров Л.М. Особенности формирования структуры электроосажденных сплавов Ni-Mo в зависимости от условий электролиза [Текст] / Л.М. Буров, Т.Е. Петрунина, В.Г. Отрощенко // Вопросы формирования метастабильной структуры сплавов: Днепропетровск: Днепропетр. Университет. - 1981. - С. 116-123.

20. Валовик Е.А. Справочник по восстановлению деталей [Текст] / под ред. Е.А. Валовик // – М.: Колос, 1981. – 351с.

21. Викарчук А.А. Дефекты структуры, формирующиеся при электрокристаллизации ОЦК-металлов [Текст] / А.А. Викарчук, А.П. Воленко, И.С. Ясников. – СПб: Политехника, 2004. – 124 с.

22. Виноградов С.Н. Гальваническое покрытие металлами [Текст] / С.Н. Виноградов, О.С. Виноградов, К.В. Таранцев. // Пенза: Пензенский государственный университет. - 2008.

23. Гадалов В.Н. К вопросу о прочности сцепления гальванических покрытий с металлической основой [Текст] / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Д.Н. Романенко и др. // Заготовительные производства в машиностроении. - 2012. - №4. – С. 45-47.

24. Гадалов В.Н. Реновация машиностроительной и сельскохозяйственной техники гальваническими железохромистыми покрытиями с применением цементации [Текст] / В.Н. Гадалов, В.И. Серебровский, Ю.В. Скрипина и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2012. - №2. – С. 90-94.

25. Гальваническое покрытие [Электронный ресурс] / ООО «Пульс». – Режим доступа: <http://galvanika33.ru/galvanicheskoe-pokrytie/>.

26. Гальперин А.С. Определение оптимальной долговечности машин [Текст] / А.С. Гальперин, М.И. Сушкевич // М.: «Колос», 1970. - 183 с.

27. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению [Текст] / Ю.Д. Гамбург // М.: Техносфера, 2006. – 216 с.

28. Гнездилова Ю.П. Исследование микротвердости при

электрокристаллизации сплавов на основе железа [Текст] / Ю.П. Гнездилова, В.В. Серебровский, Н.В. Коняев // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2009. - №1. – С. 76-78.

29. Горелик С.С. Рентгенографический и электроннооптический анализ [Текст] / С.С. Горелик, Л.Н. Расторгуев, Ю.А. Скаков. - М.: Metallurgy, 1970. - 366 с.

30. ГОСТ 17367-71 Металлы. Метод испытания на абразивное изнашивание при трении о закрепленные абразивные частицы [Текст]. – Введ. 1973-01-01. – М: Издательство стандартов, 1973.

31. ГОСТ 30480-97 Обеспечение износостойкости изделий. Методы испытаний на износостойкость [Текст]. – Введ. 1998-07-01. – М: Издательство стандартов, 1998.

32. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников [Текст]. – Введ. 1977-01-01. – М: Издательство стандартов, 1993.

33. Гузун М.В. Структура, физико-механические и эксплуатационные свойства композиционных покрытий на основе железа и его сплавов [Текст] / М.В. Гузун, Ж.И. Бобанова, и др. // Электронная обработка материалов. – 2006. - №5. – С. 20-27.

34. Гурланд Дж. Разрушение композитов с дисперсными частицами в металлической матрице [Текст] / Дж. Гурланд // В сб. Разрушение и усталость. - М.: Мир. - 1978. - С. 58-105.

35. Гурьянов Г.В. Влияние условий электролиза на модуль упругости электролитических железных покрытий [Текст] / Г.В. Гурьянов, А.Е. Ташкин // Доклады научной конференции молодых ученых. - Кишинев: Изд-во КСХИ им. В.М. Фрунзе. - 1968. - С. 21-23.

36. Гурьянов Г.В. Образование дефектов структуры в электролитическом железе [Текст] / Г.В. Гурьянов // Кишинев: Принт. ИПФ АН МССР, 1989. - 45 с.

37. Гурьянов Г.В. Структура и механические свойства, электролитических железных покрытий [Текст] / Гурьянов Г.В. // Кишинев:

Принт. ИМ АН МССР, 1989. - 63 с.

38. Деморецкий Д.А. Гальваническая установка для нанесения покрытий на асимметричном переменном токе [Текст] / Д.А. Деморецкий, С.Ю. Ганигин, И.Д. Ибатуллин и др. // Известия Самарского научного центра РАН. - 2012. – Т.14. - №1-2. – С. 544-546.

39. Денисов В.А. Сравнительная оценка триботехнических свойств покрытий, полученных железнением [Текст] / В.А. Денисов, Е.О. Решиков, Е.В. Агеева // Труды ГОСНИТИ. - 2016. - Т. 124. - № 2. - С. 46-51.

40. Денисов В.А. Эффективность восстановления вала ротора турбокомпрессора электроискровой обработкой электроэрозионными материалами [Текст] / В.А. Денисов, Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев // В сборнике: Управление социально-экономическим развитием регионов: проблемы и пути их решения сборник научных статей 6-ой Международной научно-практической конференции. - 2016. - С. 84-89.

41. Дехтярь Д.И. Определение остаточных напряжений в покрытиях и биометаллах [Текст] / Д.И. Дехтярь // Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1968. - 176 с.

42. Емцев В.В. Анализ износов сельскохозяйственных машин [Текст] / В.В. Емцев // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в агропромышленном комплексе : материалы международной научно-практической конференции. – Ч. I – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ. - 2017. – С. 266-270.

43. Емцев В.В. Восстановление самотечных зернопроводов [Текст] / В.В. Емцев, В.К. Астанин, Ю.А. Стекольников, Э.М. Санников // Фундаментальные и прикладные исследования в области естественных и технических наук по материалам международной научно-практической конференции. – Белгород. - 2018. – С. 73-75.

44. Емцев В.В. Наводороживание в процессе хромирования при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники [Текст]

/ В.В. Емцев, Н.Ю. Стекольников, Э.М. Санников, В.К. Астанин, Н.В. Кузовкин // Повышение эффективности использования мобильных энергетических средств в различных режимах движения : материалы международной научно-практической конференции, посвященной 115 годовщине со дня рождения профессора Харитончика Ефима Мироновича. - 2017. - С. 27-31.

45. Ерохин М.Н. Влияние технологических режимов cvd-процесса на свойства получаемых хромовых покрытий[Текст] / М.Н. Ерохин, С.П. Казанцев, Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2015. - № 6 (70). - С. 17-21.

46. Ерохин М.Н. Износостойкость карбидосодержащих хромовых покрытий, полученных из газовой фазы[Текст] / М.Н. Ерохин, Н.Н. Чупятов, С.П. Казанцев // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2017. - № 5 (81). - С. 48-53.

47. Ерохин М.Н. Износостойкость прецизионных деталей гидравлических систем, восстановленных карбидохромовым покрытием[Текст] / М.Н. Ерохин, Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2016. - № 3 (73). - С. 41-45.

48. Ерохин М.Н. Изучение прочности сцепления карбидосодержащего хромового cvd-покрытия с подложкой из качественной углеродистой стали[Текст] / М.Н. Ерохин, Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2016. - № 2 (72). - С. 47-51.

49. Ерохин М.Н. Применение карбонильного хрома для получения упрочняющих покрытий на деталях сельскохозяйственной техники[Текст] / М.Н. Ерохин, Н.Н. Чупятов, С.П. Казанцев // В сборнике: Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию Белорусского государственного аграрного технического университета и памяти первого ректора БИМСХ (БГАТУ) д-ра техн. наук, проф. В. П. Сулова. Министерство сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь, Учреждение образования "Белорусский государственный аграрный технический университет", Республиканское объединение "Белагросервис"; под общей редакцией И. Н. Шило, Н. А. Лабушева. - 2014. - С. 275-278.

50. Ерохин М.Н. Разработка методики управления процессом формирования cvd-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки[Текст] / М.Н. Ерохин, Л.В. Плетнев, Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2016. - № 5 (75). - С. 25-30.

51. Ерохин М.Н. Управление процессом формирования карбидохромовых cvd-покрытий на внешней поверхности цилиндрической подложки[Текст] / М.Н. Ерохин, Л.В. Плетнев, Н.Н. Чупятов // Труды ГОСНИТИ. - 2016. - Т. 124. - № 3. - С. 26-34.

52. Ерохин М.Н. Формирование рабочих поверхностей деталей гидросистем с заданными свойствами[Текст] / М.Н.Ерохин, Н.Н. Чупятов // В сборнике: ДОКЛАДЫ ТСХА Материалы международной научной конференции. - 2018. - С. 250-252.

53. Ерохин М.Н. Химическое газофазное осаждение износостойкого железоникелевого покрытия на прецизионные детали гидравлических систем[Текст] / Л.В. Козырева, В.В. Козырев, Н.Н. Чупятов // Перспективные материалы. -2018. - № 5. - С. 76-83.

54. Жачкин С.Ю. Влияние режимов электролиза на микротвердость дисперсно-упрочненных композитных материалов на основе железа / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков, Р.Н. Задорожний, С.В. Нелысов // Труды ГОСНИТИ. - 2017. - Т. 128. - С. 55-60.

55. Жачкин С.Ю. Моделирование режимов осаждения композитных гальванических дисперсно-упрочненных покрытий при восстановлении деталей сельхозмашин [Текст] / С.Ю. Жачкин, В.П. Лялякин, Н.А. Пеньков, М.Н. Краснова // Технический сервис машин. - 2018. - Т. 131. - С. 237-243.

56. Жачкин С.Ю. Управление свойствами гальванических композитных покрытий, применяемых для восстановления деталей сельхозмашин / С.Ю. Жачкин, Н.А. Пеньков // Труды ГОСНИТИ. - 2015. - Т. 118. - С. 210-213.

57. Закиров Ш.З. Упрочнение деталей электроосаждением железа [Текст] / Ш.З. Закиров // Душанбе: Изд-во «Ирфон», 1978. - 208 с.

58. Захаров Ю.А. Повышение производительности электролиза механическим активированием катодной поверхности / Ю.А. Захаров, И.А. Спицын // В сборнике: Эксплуатация автотракторной техники: опыт, проблемы, инновации, перспективы сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – 2013. – С 46-49.

59. Звягинцева А.В. Особенности поведения водорода в металлах и сплавах, полученных электролизом, и возможности их применения в альтернативных источниках энергии [Текст] / А.В. Звягинцева, Ю.Н. Шалимов, М.В. Лутовац // International Scientific Journal Life and Ecology. 2015. - №2. – С. 98-99.

60. Золоторев С.М. Проектирование мукомольных, крупяных и комбикормовых заводов. Изд. 2-е., доп. и перераб. [Текст] / С.М. Золоторев // М.: «Колос», 1976. – 288 с.

61. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям: ИТС36-2017. Обработка поверхностей металлов и пластмасс с использованием электролитических или химических процессов [Текст]. – Москва:

Бюро НДТ, 2017. – 238 с.

62. Калмыков Д.В. Восстановление деталей машин цементованными железохромистыми покрытиями [Текст] / Д.В. Калмыков, А.А. Никулин // Главный механик. - 2009. - №3. – С. 9-12.

63. Калмыков Д.В. Восстановление и упрочнение деталей автомобилей гальваническими покрытиями [Текст] / Д.В. Калмыков // Главный механик. - 2010. – №10. – С. 33-38.

64. Кан Р. Физическое металловедение. Вып. 1. Атомное строение металлов и сплавов [Текст] / Под ред. Р. Кана. - М.: Мир, 1967. - 333 с.

65. Кан Р. Физическое металловедение. Вып. 3. Дефекты кристаллического строения и механические свойства металлов и сплавов [Текст] / Под ред. Р. Кана. - М.: Мир, 1968. - 484 с.

66. Караванова А.А. Влияние водорода на структуру и свойства высокоуглеродистых сталей и гальванических покрытий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Караванова А.А. – М.: ЦНИИЧермет им. И.П. Бардина, 2012.

67. Кисель Ю.Е. Повышение износостойкости деталей электрохимическими сплавами на основе железа / Ю.Е. Кисель, Г.В. Гурьянов, А.Н. Лысенко, А.А. Обозов // Сельский механизатор. – 2017. - №2. – С. 34-35.

68. Клейс И.В. Применение стандартных показателей абразивной износостойкости в инженерной практике [Текст] / И.В. Клейс // Трение и износ. - 1980. - Т.1. - № 6. - С. 1039-1044.

69. Ковалев В.Е. Исследование физико-механических свойств железо-вольфрамового сплава, полученного из хлористых элементов, применительно к восстановлению деталей сельхозтехники [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ковалев В.Е. – Харьков, 1975. – 26 с.

70. Ковенский И.М. Современные методы исследования металлических покрытий [Текст] / И.М. Ковенский, В.В. Поветкин, И.Д. Моргун // Тюмень: ТюмИИ, 1989. - 68 с.

71. Ковенский И.М. Формирование структуры железо-никелевых

покрытий в зависимости от условий электрокристаллизации. [Текст] / И.М. Ковенский, В.В. Поветкин // Изв. АН СССР. Металлы. - 1990. - № 1. - С. 117- 119.

72. Козин Е.С. Коррозионная стойкость низкоуглеродистых сталей с гальваническими покрытиями [Текст] / Е.С. Козин, С.И. Кошелев, Е.В. Кушнаренко и др. // Вестник Оренбургского государственного университета, 2013. - №1(150). – С. 182-186.

73. Козлов В.М. О роли выделяющегося водорода в образовании структурных несовершенств при электрокристаллизации никеля [Текст] / В.М. Козлов // Электрохимия. - 1982. - Т. 18. - № 10. - С. 1353-1358.

74. Козырева Л.В. Восстановление деталей гидравлических систем с учётом требований экологической безопасности [Текст] / Л.В. Козырева, В.В. Козырев, Н.Н. Чупятов, Н.А. Филиппова // Технологии техносферной безопасности. - 2015. - № 1 (59). - С. 204-208.

75. Колодяжный С.А. Получение вкладышей для ДВС на основе компонентов с ограниченной степенью растворимости (свинцовистые бронзы) и восстановление стальных коленчатых валов на основе сплава Ni-B [Текст] / С.А. Колодяжный, Ю.Н. Шалимов, М.В. Лутовац, А.В. Звягинцева, В.И. Кудряш, А.В. Руссу // В сборнике: Комплексные проблемы техносферной безопасности. Воронежский государственный технический университет. 2016. – С. 196-200.

76. Коняев Н.В. Восстановление и упрочнение деталей машин электролитическими железо-фосфорными покрытиями [Текст] : дис. ... канд. техн. наук. / Коняев Н.В. - Курск: КГТУ, 2002. - 194 с.

77. Копылов Ю.Р. Структура и свойства восстановленного слоя при гальваномеханическом остаивании [Текст] / Ю.Р. Копылов, О.В. Горожанкина, В.Н. Гадалов и др. // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2013. - №3(48). – С. 151-156.

78. Косов В.П. Влияние промышленного переменного тока на процесс гальванического осаждения железа [Текст] / В.П. Косов, Ю.Н. Петров, Д.М. Эрлих // Тр. Кишиневского СХИ. - Т. 123. – Кишинев. - 1974. - С. 4-8.

79. Котрелл А. Теория дислокаций [Текст] / А. Котрелл // М.: Мир, 1969. - 99 с.
80. Крагельский И.В. Трение, изнашивание и смазка: Справочник [Текст] / Под ред. И.В. Крагельского // М.: Машиностроение, 1978. – 800 с.
81. Креймер Г. Прочность твердых сплавов [Текст] / Г. Креймер // М.: Metallurgia, 1971. - 247 с.
82. Кретов С.С. Анализ способов улучшения качества гальванических покрытий [Текст] / С.С. Кретов // Вестник Самарского государственного технического университета: Серия Технические науки, 2013. - №4(40). – С. 77-82.
83. Кудрявцев Т.Н. К вопросу об электролитическом осаждении сплавов титана [Текст] / Т.Н. Кудрявцев, Р.Г. Голованская // Защита металлов. - 1970. - №4. – С. 32-35.
84. Кузьмар И. Гальваническое осаждение функциональных покрытий в нестационарных режимах электролиза [Текст] / И. Кузьмар, Л. Кушнер, В. Ланин и др. // Технология в электронной промышленности. - 2013. – Т.4. - №64. – С. 70-74.
85. Лайнер В.И. Защитные покрытия металлов [Текст] / В.И. Лайнер // М.: Metallurgia, 1974.- 559 с.
86. Латыпов Р.А. Исследование и разработка технологии восстановления вала ротора турбокомпрессора электроискровой обработкой электроэрозионными наноматериалами [Текст] / Р.А.Латыпов, В.А. Денисов, Е.В. Агеев // Современные материалы, техника и технологии. - 2016. - № 2 (5). - С. 141-146.
87. Латыпов Р.А. Рециклинг отходов твердых сплавов для восстановления и упрочнения изделий [Текст]: Монография / Р.А. Латыпов, Е.В. Агеев, В.А. Денисов, Г.Р. Латыпова // Курск, 2017. – 184 с.
88. Летов С.С. Применение электроосажденных бинарных покрытий на основе железа для упрочнения и восстановления деталей машин [Текст] / С.С. Летов, В.В. Серебровский, Е.А. Афанасьев и др. // Инструмент и технологии. - 2011. - №34. – С. 26-30.

89. Литовка Ю.В. Устройство реализации режима реверсивного тока с заданной длиной импульса [Текст] / Ю.В. Литовка, А.С. Егоров // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. - 2013. - №2(46). – С. 280-286.

90. Лялякин В.П. Восстановление деталей - важное направление импортозамещения при эксплуатации сельскохозяйственной техники[Текст] / В.П. Лялякин // Труды ГОСНИТИ. - 2015. - Т. 119. - С. 183-192.

91. Лялякин В.П. Восстановление деталей машин - важное направление импортозамещения в агропромышленном комплексе[Текст] / В.П. Лялякин // Высотехнологическое импортоопережение при возделывании сельскохозяйственных культур, восстановлении сенокосов и пастбищ. Подготовка специалистов для проектирования, создания и внедрения импортоопережающей инновационной техники в сельскохозяйственное производство материалы выездного заседания секции механизации, электрификации и автоматизации Отделения сельского хозяйства Российской академии наук - РАН. - 2015. - С. 105-113.

92. Лялякин В.П. Выбор метода восстановления изношенных поверхностей деталей[Текст] / Лялякин В.П., Денисов В.А. // Упрочняющие технологии и покрытия. - 2018. - Т. 14. - № 12 (168). - С. 536-539.

93. Лялякин В.П. Перспективы восстановления деталей в АПК[Текст] / В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Повышение конкурентоспособности российской сельскохозяйственной продукции на внутренних и внешних рынках Материалы международного конгресса: материалы для обсуждения. Северо-Западный центр междисциплинарных исследований проблем продовольственного обеспечения, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, ООО "Экспофорум-Интернэшнл". - 2017. - С. 194-195.

94. Лялякин В.П. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники[Текст] / В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Техника и оборудование для села. - 2016. - № 4. - С. 41-43.

95. Лялякин В.П. Перспективы восстановления деталей сельскохозяйственной техники [Текст] / В.П. Лялякин // В сборнике: Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК. Материалы IX Международной научно-практической конференции "ИнформАгро-2017". - 2017. - С. 473-477.

96. Майзелис А.А. Влияние медного подслоя на прочность сцепления гальванического покрытия с углеродистой сталью [Текст] / А.А. Майзелис, Б.И. Байрачный, Ю.В. Зайцева и др. // Прогресивні технології і системи машинобудовання. - 2014. - №1(47). – 183-189.

97. Мамонтов Е.А. Образование дефектов структуры при электроосаждении железа [Текст] / Е.А. Мамонтов // Физико-химические проблемы кристаллизации. - Алма-Ата: Изд-во Каз. ун-та. - 1971. - Вып. 2. - С. 145-171.

98. Мартянова А.Е. Исследование изнашивания самотечных зернопроводов (самотеков) потоком риса-зерна [Текст] : автореф. ... канд. тех. наук : 01.02.06 / Мартянова А.Е. – Астрахань, 2000. – 23 с.

99. Мелков М.П. Восстановление автомобильных деталей твердым железом [Текст] / М.П. Мелков, А.Н. Швецов, И.М. Мелкова // М.: Транспорт, 1982. - 198 с.

100. Мелков М.П. Гальваническое наращивание деталей машин железом [Текст] / М.П. Мелков // М.: Лесная промышленность, 1971. - 137 с.

101. Мелков М.П. Твердое осталивание автотракторных деталей [Текст] / М.П. Мелков // - М.: Транспорт, 1971. - 222 с.

102. Мелков М.П. Электролитическое наращивание деталей машин твердым железом [Текст] / М.П. Мелков // Саратов: Приволжское книжное изд., 1964. - 204 с.

103. Микроскоп электронный сканирующий JSM-6490LV [Электронный ресурс] / ALL-Pribors. – Режим доступа: <https://all-pribors.ru/opisanie/52316-12-jsm-6490lv-55630>.

104. Миркин Л.И. Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов [Текст] / Л.И. Миркин // М.: Машиностроение, 1981. - 134 с.

105. Миркин Л.И. Справочник по рентгеноструктурному анализу поликристаллов [Текст] / Л.И. Миркин // М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. - 863 с.

106. Митряков А.В. Восстановление деталей железнением [Текст] / А.В. Митряков // Саратов: саратовский государственный технический университет. - 2005.

107. Михальченков А.М. Совершенствование конструкции приспособления для проведения ускоренных испытаний материалов на стойкость к абразивному изнашиванию [Текст] / А.М. Михальченков, В.А. Денисов, С.И. Будко, М.А. Михальченкова // Технология металлов. - 2015. - № 12. - С. 31-34.

108. Михутова В.А. Электроосаждение никеля и сплава никель-фосфор из сульфатно-хлоридного электролита, содержащего малонову кислоту / В.А. Митухова, А.А. Спицина, Т.Е. Цупак // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. - №7. – Т.26. – С. 116-120.

109. Мохова О.П. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники железнением периодическим током управляемой формы [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Мохова О.П. - Балашиха: ВСХИЗО, 1991.

110. Мунтян В.Е. Исследование и разработка технологии восстановления автотракторных деталей железнением с применением трехфазного двухполупериодного асимметричного тока [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Мунтян В.Е. – Кишинев. - 1982. - С. 27-54.

111. Нарсия Х.С. Восстановление деталей электролитическими сплавами [Текст] / Х.С. Нарсия // Восстановление деталей с.-х. машин, тракторов и автомобилей: Экспрессинформ, Госагропром СССР. АгроНИИТЭИИТ. - 1986. - вып. 11. - С. 18 - 19.

112. Официальный сайт компании «Воронежтеплосеть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://teplovrn.info/>.

113. Официальный сайт компании «Воронежхлебмонтаж» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vhm24.ru/>.

114. Официальный сайт компании «Росводоканал Воронеж» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://voronezh-rvk.ru/>.

115. Официальный сайт компании «Россети» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mrsk-1.ru/>.

116. Панин В.И Структурные уровни деформации твердых тел [Текст] / В.И. Панин, В.А. Лихачев, Ю.В. Гриняев // Новосибирск: Изд-во «Наука» Сибирское отделение, 1985. - 226 с.

117. Пархоменко В. Д. Железнение деталей сельскохозяйственной техники периодическим током регулируемой длительностью прямого и обратного импульсов [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Пархоменко В.Д. - М.: ВСХИЗО, 1993. - 16 с.

118. Петров Ю.Н. Исследование износостойкости электролитических сплавов железа с фосфором [Текст] / Ю.Н. Петров, В.К. Сидельников, А.Н. Ягубец // Труды Кишиневского СХИ. – Кишинев: КСХИ. - 1970. - Т. 59. - С. 60-67.

119. Петров Ю.Н. Ремонт автотракторных деталей гальваническими покрытиями [Текст] / Ю.Н. Петров, В.П. Косов, М.П. Стратулат // Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1976. - 149 с.

120. Петрушова О.Ю. Разработка электролита для электроосаждения сплава никель-фосфор с добавкой аминокислотной кислоты [Текст] / О.Ю. Петрушова, Т.В. Пузакова, Т.Е. Цупак // Успехи в химии и химической технологии. – 2013. - №7. – Т.27. – С. 44-51.

121. Пиявский Р.С. Гальванические покрытия [Текст] / Р.С. Пиявский // Киев: Техника, 1975. – 174 с.

122. Поветкин В.В. Образование дислокаций в электролитических осадках [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский // Электрохимия. - 1981. - Т. 17. - № 11. - С. 1680-1686.

123. Поветкин В.В. Структура и свойства электролитических покрытий [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский, Ю.И. Установщиков // М.: Наука, 1992. - 256 с.

124. Поветкин В.В. Структура электроосажденных сплавов металлов подгруппы железа [Текст] / В.В. Поветкин, И.М. Ковенский // Изв. АН СССР. Металлы. - 1983. - №3. - С. 108-111.

125. Поветкин В.В. Электронномикроскопическое исследование структуры электроосажденных железо-никелевых сплавов [Текст] / В.В. Поветкин, Ю.И. Устиновщиков, М.С. Захаров // Физика и химия обработки металлов. - 1976. - № 6. - С. 116-119.

126. Полищук С.Д. Технология повышения надежности деталей и систем автотракторных двигателей совершенствованием электрохимических процессов : дис. ... д-ра тех. наук : 05.20.03 / Полищук С.Д. – Рязань, 2005. – 434 с.

127. Полукаров Ю.М. Электрокристаллизация металлов [Текст] / Ю.М. Полукаров // М.: Химия, 1985. – С. 12-16.

128. Поперека М.Я. Внутренние напряжения электролитически осаждаемых металлов [Текст] / Поперека М.Я. // Новосибирск: Изд-во Новосибирского университета, 1966. - 335 с.

129. Пронин А.Н. Влияние условий электроосаждения на микротвердость железных гальванических покрытий [Текст] / А.Н. Пронин, Л.Х. Балдаев, А.А. Жосанов и др. // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2012. - №4. – С. 68-70.

130. Пулатов А.Б. Исследование процесса железнения из холодных хлористых электролитов применительно к ремонту деталей машин [Текст]: автореф. дис. канд. техн. наук. / Пулатов А.Б. – М.: ВСХИЗО. - 1961. - 21 с.

131. Растровый электронный микроскоп [Электронный ресурс] / Википедия. – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.

132. Растровый электронный микроскоп JSM-6380LV JEOL с системой микроанализа INCA 250 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ckp.vsu.ru/index.php?r=equipment%2Fview&id=6>

133. Рацкевич Н.В. Восстановление труб зернопроводов методом футеровки [Текст] / Н.В. Рацкевич, И.В. Титова // Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию агроинженерного факультета. Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I. – Воронеж. - 2015. – С. 125-129.

134. Рентгеновский дифрактометр ARL X'TRA [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ckp.vsu.ru/index.php?r=equipment%2Fview&id=2>

135. Рошкован Г.В. Восстановление автотракторных деталей самосмазывающимися железо-никелевыми покрытиями [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Рошкован Г.В. - Кишинев: Кишиневский СХИ, 1992. - 17 с.

136. Рыбковский В.Я. Исследование влияния тонкой структуры на некоторые физико-механические свойства электролитического железа [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Рыбковский В.Я. – Новочеркасск, 1970.

137. Саварец А.И. Повышение долговечности трущихся пар машин и механизмов многокомпонентными электроосажденными сплавами железа [Текст] : дис. ... д-ра.техн. наук. / Саварец А.И. - М.: ГОСНИТИ, 1997. - 320 с.

138. Самотек-зернопровод [Электронный ресурс] / Производственная компания Электросила. – Режим доступа: <https://electro-sila36.ru/elevatorное-oborudovanie/samoteki-zernovye/>.

139. Самотечное транспортирование [Электронный ресурс] / РГАУ-МСХА Зооинженерный факультет. – Режим доступа: <http://www.activestudy.info/samotechnoe-transportirovanie/>.

140. Самотечный транспорт [Электронный ресурс] / РГАУ-МСХА Зооинженерный факультет. – Режим доступа: <http://www.activestudy.info/samotechnyj-transport/>.

141. Серебровский В.В. Влияние нестационарных режимов электролиза на

электроосаждение железных покрытий / В.В. Серебровский // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2008. - №8. – С. 42-44.

142. Серебровский В.В. Восстановление и упрочнение деталей машин гальваническими покрытиями [Текст] / В.В. Серебровский, Р.И. Сафронов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2007. - №1. – С. 18-19.

143. Серебровский В.В. Особенности осаждения гальванических покрытий на переменном асимметричном токе [Текст] / Серебровский В.В. // Аграрная наука. - 2008. - №2. – С. 29-30.

144. Серебровский В.В. Повышение прочности электролитического железа легирующими добавками молибдена [Текст] / В.В. Серебровский, В.И. Серебровский, Е.В. Павлова, С.А. Богомолов // Известия Юго-Западного государственного университета. - 2012. - №2-2. – С. 143-145.

145. Серебровский В.В. Повышение эксплуатационных свойств железных гальванических покрытий путем легирования вольфрамом и молибденом [Текст] / В.В. Серебровский // Аграрная наука. - 2008. - №3. – С. 34-35.

146. Серебровский В.И. Упрочнение электролитического железа легирующими добавками молибдена [Текст] / В.И. Серебровский, А.Ю. Молодкин, А.Н. Пронин // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. - 2012. - №7. – С. 75-76.

147. Ситникова Т.Г. Электроосаждение сплавов хром-никель из электролитов на основе соединений  $\text{Cr}^{3+}$  [Текст] / Т.Г. Ситникова, А.С. Ситникова // Физикохимия поверхности и защита материалов. - 2003. – Т.39. - №3. – С. 272-275.

148. Слинко Д.Б. Технологические особенности восстановления валов плазменной наплавкой [Текст] / Д.Б.Слинко, А.С. Дорохов, В.А. Денисов, В.А. Павлов // Заготовительные производства в машиностроении. - 2018. - Т. 16. - № 12. - С. 566-569.

149. Соколова И.А. Особенности технологии гальванических процессов

при восстановлении деталей машин [Текст] / И.А. Соколова // Известия Калининградского государственного технического университета. - 2010. - №17. – С. 94-98.

150. Спицина А.А. Электроосаждение сплава никель-фосфор из сульфатно-глутаратно-хлоридного электролита [Текст] / А.А. Спицина, Т.Е. Цупак // Успехи в химии и химической технологии. – 2012. - №7. – Т.26. – С. 126-129.

151. Спицын И.А. Способы перемешивания электролита при восстановлении деталей транспортно-технологических машин композиционными электрохимическими покрытиями / И.А. Спицын, И.Н. Филин // В сборнике: Вклад молодых ученых в инновационное развитие АПК России Сборник статей Международной научно-практической конференции молодых ученых, посвященная 65-летию ФГБОУ ВО Пензенская ГСХА. - 2016. - С. 93-96.

152. Спицын И.А. Технологическая надежность нанесения гальванопокрытий в проточном электролите / И.А. Спицын / В сборнике: Образование, наука, практика: инновационный аспект Сборник материалов международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию ФГБОУ ВПО "Пензенская ГСХА". Пензенская государственная сельскохозяйственная академия. - 2011. - С. 211-213.

153. Спицын И.А. Технологическая надёжность нанесения гальванопокрытий в проточном электролите железнения / И.А. Спицын // В сборнике: Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы сборник научных трудов международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Ф. Х. Бурумкулова. Институт механики и энергетики; Ответственный за выпуск: Столяров А. В.. - 2016. - С. 52-54.

154. Способ гальвано-механического хромирования цилиндрических изделий [Текст] : пат. 2400571 Российская федерация : Бодров В.В., Багаутдинов

Р.М. – 2009. – 7 с.

155. Способ нанесения гальванических покрытий хромом на внутреннюю поверхность труб [Текст] : пат. 2173356 Российская федерация : Крыщенко К.И., Дзегиленок В.Н., Нейланд А.Б., Хрупачев А.Г., Хорошев И.Н. – 2000. – 4 с.

156. Способ упрочняющей обработки поверхностей цилиндрических деталей [Текст] : пат. 2418105 Российская федерация : Сорокин В.М., Михеев А.В., Тудакова Н.М., Танчук С.С., Берглезов В.В. – 2009. – 8 с.

157. Способ электролитического железнения [Текст] : а. с. 354009 СССР : Р.С. Пиявский. - 1972. - 4 с.

158. Способ электролитического нанесения покрытия на внутреннюю поверхность полого изделия [Текст] : пат. 2156837 Российская федерация : Черепанов Ю.П., Ромашов А.А., Зайчиков О.Д. – 1998. – 5 с.

159. Способ электролитического нанесения покрытия на внутреннюю поверхность полого изделия [Текст] : пат. 2282683 Российская федерация : Ромашов А.А., Ромашов Д.А. – 2004. – 6 с.

160. Способ электролитического нанесения покрытия на изделия с поверхностью двойной кривизны [Текст] : пат. 2156836 Российская федерация : Черепанов Ю.П., Ромашов А.А., Зайчиков О.Д. – 1998. – 5 с.

161. Способ электролитического осаждения железо-фосфорных покрытий [Текст] : пат. 246252 Российская федерация : Сидельников В.К., Ягубец А.Н., Мельникова М.М. - 1969. - 4 с.

162. Способ электролитического осаждения сплава железо-молибден [Текст] : пат. 2174163 Российская федерация : Серебровский В.И., Серебровская Л.Н., Коняев Н.В. и др. - 2001 - 6 с.

163. Способ электролитического осаждения сплава железо-фосфор [Текст] : пат. 2164560 Российская федерация : Серебровский В.И., Серебровская Л.Н., Коняев Н.В. и др. - 2001.

164. Способ электрохимической металлизации внутренней поверхности труб [Текст] : пат. 2244766 Российская федерация : Сидоренко О.А., Герасимова

Н.П., Вертинская Н.Д. – 2002. – 6 с.

165. Стекольников Н.Ю. Восстановление изношенных деталей сельскохозяйственной техники гальваническими покрытиями [Текст] / Н.Ю. Стекольников, Ю.А. Стекольников, В.К. Астанин, В.В. Емцев, Э.М. Санников // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. - 2017. - № 133. - С. 173-185.

166. Ташкин А.Е. Исследование влияния условий электролиза на некоторые основные механические характеристики электролитических железных покрытий [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. / Ташкин А.Е. – Каунас, 1970. - 19 с.

167. Тененбаум М.М. Закономерности абразивного изнашивания деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин [Текст] / М.М. Тененбаум // Трение и износ. - 1980. - Т.1. - № 2. - С. 357-364.

168. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию [Текст] / М.М. Тененбаум // М.: «Машиностроение», 1976. - 271 с.

169. Типичные явления при самотечном транспортировании [Электронный ресурс] / РГАУ-МСХА Зооинженерный факультет. – Режим доступа: [www.activestudy.info/tipichnye-yavleniya-pri-samotechnom-transportirovanii/](http://www.activestudy.info/tipichnye-yavleniya-pri-samotechnom-transportirovanii/).

170. Токарева И.А. Особенности технологических процессов хромирования из электролитов на основе низковалентных соединений хрома [Текст] / И.А. Токарева, Ю.Н. Шалимов // Технология машиностроения. 2014. - №1. – С. 35-40.

171. Упрочнение деталей покрытиями [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/01/tehnologicheskie\\_trebovaniya\\_k\\_uprochnyayuschim\\_pokrytiyam/](http://dlja-mashinostroitelja.info/2011/01/tehnologicheskie_trebovaniya_k_uprochnyayuschim_pokrytiyam/).

172. Устройство для нанесения гальваномеханических покрытий на внутреннюю поверхность деталей цилиндрической формы [Текст] : пат. 2324013 Российская федерация : Чижов М.И., Юров А.Н. – 2006. – 3 с.

173. Федотьев Н.П. Электролитические сплавы [Текст] / Н.П. Федотьев,

Н.Н. Бибииков, П.М. Вячеславов и др. // М.: Машгиз, 1962. - 312 с.

174. Федотьев Н.П. Электролитические сплавы [Текст] / Н.П. Федотьев, Н.Н. Бибииков, П.М. Вячеславов, С.Я. Грилихес // М.: Машгиз, 1962. - 312 с.

175. Хирт Дж. Теория дислокаций [Текст] / Хирт Дж., Лоте И. // М.: Атомиздат, 1972. – 599 с.

176. Хирш Л. Успехи физики металлов [Текст] / Хирш Л. // М.: Metallurgizdat, 1960. - № 3. - 283 с.

177. Чаевский В.В. Влияние параметров электрохимического осаждения на структуру и фазовый состав покрытия сплавом Ni-P [Текст] / В.В. Чаевский, В.В. Жилинский, О. Чернашей // Труды БГТУ. – 2016. - №6. – С. 106-109.

178. Черноиванов В.И. Организация и технология восстановления деталей машин[Текст]: Монография / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин, И.Г. Голубев // Правдинский, 2016. – 568 с.

179. Черноиванов В.И. Особенности изнашивания деталей сельхозмашин, упрочненных композиционными боридными покрытиями Fe NB-Fe-B[Текст] / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин, В.Ф. Аулов, А.В. Ишков, Н.Т. Кривочуров, В.В. Иванайский, Д.В. Коваль, А.В. Соколов // Трение и износ. - 2015. - Т. 36. - № 2. - С. 174-180.

180. Черноиванов В.И. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве: Учебное пособие [Текст] / В.И. Черноиванов, В.В. Бледных, А.Э. Северный и др. // Москва – Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. – 992 с.

181. Чупятов Н.Н. Анализ современных способов восстановления и упрочнения поверхностей[Текст] / Н.Н. Чупятов // Труды ГОСНИТИ. - 2016. - Т. 125. - С. 171-181.

182. Чупятов Н.Н. Применение карбидосодержащих материалов, полученных из газовой фазы для упрочнения деталей сельскохозяйственной техники[Текст] / Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования

Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2016. - № 1 (71). - С. 29-33.

183. Чупятов Н.Н. Прогнозирование химического состава и свойства покрытий, получаемых термическим разложением  $\text{Cr}(\text{CO})_6$  в газовой фазе [Текст] / Н.Н. Чупятов // Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. - 2015. - № 5 (69). - С. 22-26.

184. Шадричев В.А. Основы выбора рационального способа восстановления автомобильных деталей металлопокрытиями [Текст] / В.А. Шадричев // М. – Л.: Машгиз, 1962. – 296 с.

185. Шалимов Ю.Н. Исследования в области наводороживания металлов / Ю.Н. Шалимов // Российский инженер. – 2016. – Т.2. - №1(4). – С. 20-42.

186. Шалимов Ю.Н. Об особенностях воздействия температуры приэлектродного слоя на процессы получения электролитических металлов и сплавов [Текст] / Ю.Н. Шалимов, А.В. Звягинцева, Д.Л. Шалимов, А.В. Руссу // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. – Т. 14. - №3. – С. 141-149.

187. Шалимов Ю.Н. Образование дефектов структуры при катодном восстановлении металлов [Текст] / Ю.Н. Шалимов, И.А. Токарева, Е.П. Евсеев, В.Ф. Бабкин, Д.Л. Шалимов // Технология машиностроения. 2014. - №2. – С. 5-12.

188. Шаповалов В.И. Влияние водорода на структуру и свойства железоуглеродистых сплавов [Текст] / Шаповалов В.И. // М: Металлургия, 1982. - 232 с.

189. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник [Текст] / Под.ред. проф. М.А. Шлугера // М.: Машиностроение. - 1985. - Т. 1. - 240 с.

190. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении: Справочник [Текст] / Под.ред. проф. М.А. Шлугера // М.: Машиностроение. -

1985. - Т. 2. - 246 с.

191. Электролит для осаждения покрытий из сплава никель-железо [Текст] : пат. 2237756 Российская федерация : Милушкин А.С. – 2002.

192. Эпштейн А.А. Восстановление деталей машин холодным гальваническим железнением [Текст] / А.А. Эпштейн, А.С. Фрейдлин // Киев: Техника. - 1981. – 164 с.

193. Эрлих Д.М. Скорость осаждения железных покрытий на периодическом токе с обратным регулируемым импульсом [Текст] / Д.М. Эрлих, В.П. Косов // Тр. Кишиневского СХИ. - Т. 123. – Кишинев. - 1974. - С. 24-28.

194. Юдин В.М. Нанесение гальванических покрытий при большой плотности тока [Текст] / В.М. Юдин, Н.Н. Вихарев // Техника и оборудование для села. - 2011. - №5. – С. 22-23.

195. Astanin V.K. Hardening parts by chrome plating in manufacture and repair / V.K. Astanin, E.V. Pukhov, Y.A. Stekolnikov, V.V. Emtsev, O.A. Golikova // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 327, Material Science in Mechanical Engineering, 2018.

196. Liu C.T. Trans. ASM [Текст] / C.T. Liu, J. Gurland // 1968. - №61. - P. 156-167.

ПРИЛОЖЕНИЯ



**Общество с ограниченной ответственностью  
«Воронежпищепродукт»**

Исх. N 119  
23 мая 2018 года

394033 г. Воронеж  
ул. Остужева, 21

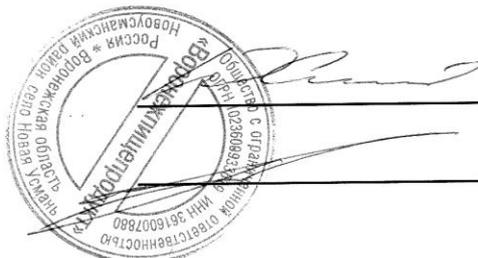
**Акт внедрения**

В условиях элеваторного комплекса ООО «Воронежпищепродукт» проведены сравнительные эксплуатационные испытания износостойкости стандартных самотечных зернопроводов (поворотных колен) с износостойкостью хромированного, а так же восстановленного электролитическим железоникелевым и железо-никель-фосфорным сплавами по технологии, предложенной учеными Воронежского аграрного университета профессорами В.К Астаниным, Е.В. Пуховым, кандидатом химических наук Ю.А. Стекольниковым, аспирантом В.В. Емцевым. Восстановление поворотных колен железением и упрочнение хромированием осуществлялось в условиях ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ им. Императора Петра I. Железо-никелевый, железо-никель-фосфорный сплавы наносились локально на места с износом более 1 мм. Упрочнение хромированием осуществлялось по всей внутренней поверхности поворотного колена на толщину 100-400 мкм. Испытания проводились в течение 2015-2017 годов сотрудниками предприятия. Через самотечные зернопровода проходило около 25 тысяч тонн зерна различных сельскохозяйственных культур в течение рабочего сезона. За период работы в 2015 году были изношены 2 стандартных поворотных колена за сезон до сквозных отверстий. В 2016 году проходили испытания на износ стандартные поворотные колена, упрочненные хромированием. Детали отработали без отказов весь сезон, по завершению рабочего сезона износ составил не более 0,2 мм. Испытания поворотных колен восстановленных железоникелевым и железо-никель-фосфорным сплавами за 2017 рабочий сезон показали, что зернопровода не протерлись до сквозных отверстий, при этом износ зернопровода восстановленного железоникелевым сплавом составил не более 1 мм, а износ железо-никель-фосфорным сплавом не более 0,5 мм.

Из вышеуказанного можно заключить, что предложенный способ восстановления железоникелевым и железо-никель-фосфорным сплавами и упрочнения хромированием самотечных зернопроводов, позволяет значительно увеличить срок службы самотечного оборудования по сравнению со стандартным.

**Генеральный директор**

**Главный инженер**



**Ю.В.Соболев**

**И.Д.Нечаев**

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

восстановления внутренних поверхностей самотечных зернопроводов электролитическими покрытиями

№ п/п	Содержание операции	Оборудование, приспособления, инструмент, материалы	Технические условия
1	Очистка деталей	Стол (верстак, ванна), холодная или горячая вода, бензин (технический ацетон), метелки покрытые марлей	Очистка проводится в зависимости от характера загрязнения (пыли, грязи, масляных и др. загрязнений) проточной водой или в емкости с водой, при наличии масляных загрязнений используется для очистки ацетон или бензин.
2	Механическая обработка, заделывание сквозных отверстий	Стол (верстак), напильник (NEO 37-022, зернистость 2), шкурка шлифовальная (MATRIX 75284, P40) Сварочный аппарат, электроды, стальные заплаты, электропроводная пластмасса, электропроводная ткань.	Механическая обработка проводится для очистки поверхности от следов коррозии, износов, придания поверхности необходимой геометрии. В случаях отсутствия следов коррозии механическая обработка может не проводиться. Заделывание сквозных отверстий электропроводной пластмассой, тканью или завариванием листовой сталью, в пределах геометрических размеров зернопровода. Данная операция не применяется, если отсутствуют сквозные отверстия.
3	Промывка деталей в горячей воде	Промывочная ванна, горячая вода	Окунуть 3-5 раз в ванну с горячей водой, проводится для удаления металлических частиц после механической обработки.

4	Монтаж специальной оснастки	Текстолитовая заглушка, прорезиненная прокладка, болты, анод, регулируемое крепление анода.	Монтаж специальной оснастки на зернопровод (для вневанного способа), осуществляется для обеспечения надежного контакта и хорошей герметизации. В случае подтеков возможно использование емкостей для сбора электролита. Заглушку прикрепить к фланцу зернопровода через прорезиненную прокладку болтами, установить анод в соответствии с чертежом с помощью регулируемого крепления анода. К регулируемому креплению анода присоединить анодный провод, к болтовому креплению - катодный провод идущие от преобразователя тока катодного и анодного полупериодов, обеспечивая надежный контакт. Соединить патрубки подачи и откачки электролита с шлангами, обеспечивая герметичность соединения.
5	Изоляция не покрываемых поверхностей	Хлорвиниловая, полиэтиленовая пленка, не токопроводящие лаки (МЛ 92, 318, ФЛ-98), краски (Эмаль ЭП-925, Эмаль ГФ-916, Эмаль КО-89), пасты (парафин - 70%, канифоль - 30%), кисти и т.п.	Изоляция не покрываемых поверхностей проводится для предотвращения нанесения покрытий на изношенные стенки зернопроводов. Изоляционный материал должен полностью покрывать участки подлежащие восстановлению.
6	Обезжиривание и	Венская известь, щелочные растворы,	Обезжиривание производится вручную

	промывка в горячей воде	приточно-вытяжная вентиляция.	венской известью или в щелочных растворах содержащих едкий натр, жидкое стекло, углекислую соду.
7	Промывка в горячей воде	Промывочная ванна, горячая вода	Окунуть 3-5 раз в ванну с горячей водой.
8	Промывка в холодной проточной воде	Холодная проточная вода, шланг	Обильно промыть струей холодной воды.
9	Приготовление или регулирование электролита	Состав электролита железнения: серная кислота ( $H_2SO_4$ ) с $pH=1,0-0,6$ – 350-400 г/л: сернокислое железо ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) – 150-350 г/л, никель сернокислый ( $NiSO_4$ ) – 10-75 г/л, гипофосфит натрия ( $Na(PH_2O_2)$ ) – 5-15 г/л, аскорбиновую кислоту ( $C_6H_8O_6$ ) – 3-7 г/л.	Электролит железнения готовился путем растворения в серной кислоте расчетного количества компонентов, добавляемых поочередно пропорциями до полного растворения. Для определения кислотности электролита использовали лакмусовую бумагу и электронный рН-метр (KL-012). Уровень электролита и кислотность в ванне поддерживалась добавлением серной кислоты и дистиллированной воды.
10	Заполнение электролитом	Блок подачи электролита (коррозионностойкий насос, патрубки, емкость с электролитом, шланги, вентили, устройство подогрева электролита).	Электролит подается и удаляется насосом через специальные патрубки, шланги и вентили в заглушке из емкости с электролитом. Уровень электролита в восстанавливаемой детали устанавливается на 3-5 см. выше анода и контролируется визуально. После заполнения вентили переключаются для циркуляции электролита по схеме емкость с электролитом – насос - восстанавливаемая деталь - емкость с

			электролитом.
11	Анодное травление	Преобразователь тока катодного полупериода и катодно-анодного отношения, блок подачи электролита.	Подогрев детали происходит электролитом путем теплопередачи в циркулирующем электролите в течении 3-7 минут без тока. Анодное травление деталей происходит в рабочем электролите при анодной плотности тока 20-30 А/дм <sup>2</sup> и катодной плотности тока равной 0, в течении 20-30 секунд.
12	Железнение	Преобразователь тока катодного полупериода и катодно-анодного отношения, блок подачи электролита, ультразвуковой толщиномер.	Рабочие режимы устанавливаются: катодная плотность тока в начале работы равна 2 А/дм <sup>2</sup> , анодная 1 А/дм <sup>2</sup> , затем постепенно в течение 2-5 минут повышается катодная плотность тока до 20-30 А/дм <sup>2</sup> , а анодная плотность тока до 2-4,3 А/дм <sup>2</sup> , достигая катодно-анодного соотношения 7-10. Процесс нанесения продолжается в течении времени, необходимого для получения заданной толщины. Уровень электролита в восстанавливаемой детали контролируется визуально и регулируется с помощью вентиляей.
13	Откачка электролита железнения	Блок подачи электролита.	Происходит отключение питания, затем происходит переключение вентиля и откачка электролита до полного удаления электролита из восстанавливаемой

			детали.
14	Промывка в горячей воде	Промывочная ванна.	Окунуть 3-5 раз восстановленную деталь в ванну с горячей водой.
15	Промывка в холодной проточной воде	Шланг, холодная вода	Обильная промывка в холодной проточной воде.
16	Нейтрализация	Раствор едкого натра, емкость.	Раствор заливается через верхнюю горловину зернопровода, выдерживается время в течении 5 минут, сливается обратно через верхнюю горловину путем опрокидывания зернопровода.
17	Демонтаж оснастки	Ключи, резиновые перчатки.	Откручиваются болтовые соединения, отсоединяется заглушка, прокладка, регулируемое крепление анода.
18	Осмотр детали, проверка качества покрытия и передача детали в эксплуатацию	Ультразвуковой толщиномер.	Контроль качества поверхности происходит с помощью визуального осмотра и электронного ультразвукового толщиномера.