

**ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»  
Институт механизации и технического сервиса**

на правах рукописи

---

**АБЖАЕВ МАРАТ МАЛИКОВИЧ**

**Разработка технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих  
органов сельскохозяйственных машин с применением металлокерами-  
ческих материалов**

**Научно-квалификационная работа (диссертация)**

на соискание квалификации «Исследователь. Преподаватель-  
исследователь» по направлению подготовки 35.06.04 Технологии, средства  
механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном  
хозяйстве

Научный руководитель  
доктор технических наук, профессор  
Адигамов Наиль Рашатович

---

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к представлению научного  
доклада об основных результатах подготовленной научно-квалификационной  
работы (диссертации) на государственной итоговой аттестации (протокол  
№14 от 03 июня 2019 г.)

Зав. кафедрой, профессор \_\_\_\_\_

Н.Р.Адигамов

Казань – 2019

РЕФЕРАТ

научной квалификационной работы Абжаева М.М.

на тему: **Разработка технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин с применением металлокерамических материалов**

Ресурс работы деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин в первую очередь связан с выходом их геометрических размеров за пределы допустимых значений. А это напрямую зависит от величины износа поверхности детали, сопрягаемой с рабочей средой или поверхностью другой детали. Износ практически исключить невозможно, однако можно уменьшить его величину путем создания на поверхностях деталей различных износостойких покрытий или упрочнением их с применением технологий на основе использования высоких энергий. Поэтому разработка конкурентоспособной технологии, которая позволяет существенное снижение износа поверхностей деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин является актуальной задачей.

Одним из решений этой проблемы является технологии упрочнения поверхностей деталей и рабочих органов СХМ с применением концентрированных потоков энергии. В данной работе для такой технологии в качестве концентрированного потока энергии выбран вибродуговой разряд с применением в технологическом процессе упрочнения металлокерамических материалов. Они могут быть в виде тугоплавких нанопорошков и быть составной частью электродов вибраторов вибродуговой установки.

Работа состоит из введения и пяти глав. Во введении обоснована актуальность темы. Первая глава обзорная, вторая теоретическая, третья посвящена описанию экспериментальной установки и методов исследований, четвертая исследовательская, пятая посвящена обоснованию технико-экономической эффективности предлагаемой технологии. В заключении

подведены итоги проделанной работы и сделаны выводы. Объем работы – 99 с, табл.– 6, рис.– 35, лит.ист. – 62.

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	
Глава 1. Обзор технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин.....	
1.1. Традиционные технологии упрочнения поверхностей деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин.....	
1.2. Технологии упрочнения поверхностей изделий концентрированными потоками энергий.....	
1.3. Упрочнение методами вибродуговой обработки.....	
1.4. Сущность метода вибродугового упрочнения.....	
1.5. Твердосплавные электроды и металлокерамические порошки.....	
Выводы по главе 1.....	
Глава 2. Теоретические аспекты исследований технологий вибродуговой обработки .....	
2.1. Физические процессы при вибродуговой обработке.....	
2.2. Особенности потока плазмы в электрической дуге .....	
Глава 3. Экспериментальные установки и исследовательское Оборудование.....	
3.1. Описание экспериментальной установки вибродуговой обработки.....	
3.1.1. Назначение установки вибродуговой обработки.....	
3.1.2. Устройство и принцип работы.....	
3.1.3. Подготовка установки к работе.....	
3.1.4. Порядок работы.....	
3.2. Методы исследования и исследовательское оборудование.....	
Глава 4. Экспериментальные исследования влияния вибродугового разряда на физико-механические свойства поверхностного слоя изделия...	
4.1. Планирование эксперимента и режимы обработки.....	

4.2. Топография образов.....	
4.4. Элементный анализ .....	
Глава 5. Обоснование экономической эффективности упрочнения рабочих органов СХМ на примере лемеха.....	
5.1. Экономическая эффективность упрочнения лемеха.....	
Заключение.....	
Список использованных источников.....	
Приложение: .....	



## ВВЕДЕНИЕ

Восстановление деталей сельскохозяйственных машин с заданными физико-механическими свойствами является весьма актуальным на сегодняшний день. В этом направлении широко проводятся исследования таких технологий, как технологии наплавки с использованием легированных порошковых проволок и нанопорошков. На сегодня в период острой борьбы в сфере производства востребованной и конкурентоспособной продукции интересуют не только технологии ремонтно-восстановительных работ, а технологии, позволяющие создание различных машин и механизмов с повышенными ресурсными характеристиками. Одним из решений этой проблемы является технологии упрочнения поверхностей сопряжения узлов трения машин и механизмов с применением концентрированных потоков энергии. Среди них наиболее простыми и доступными являются технологии наращивания изношенных поверхностей методами дуговой, газовой и плазменной металлизации. В данной работе в качестве концентрированного потока энергии выбран вибродуговой разряд с применением в технологическом процессе упрочнения металлокерамических материалов. Они могут быть в виде тугоплавких нанопорошков. Они также могут быть составной частью электродов вибраторов вибродуговой установки.

Достоинством технологии восстановления и упрочнения изношенных деталей методом вибродуговой металлизации является возможность получения поверхностей с заданными физико-механическими свойствами, При этом существенным преимуществом этой технологии является минимальное термическое воздействие на деталь и возможность легирования поверхностного слоя детали различными упрочняющими элементами. Использование вибродугового метода упрочнения допускает возможность применения различных составов проволок и металлокерамических порошков, что свою очередь предполагает обеспечение износостойкости восстанавливаемых деталей на за-

данным уровне. При этом есть реальная возможность достичь ресурса упрочненных деталей, превышающих ресурс новых деталей в два и более раз.

На сегодняшний день имеется множество литературы, как отечественной, так и зарубежной, по исследованию физики и применению концентрированных потоков энергии. Однако множество этих исследований не привязаны к конкретным технологическим задачам. Они носят в большинстве случаев общий характер, относящийся к исследованию физики и свойств самих концентрированных потоков энергии или возможностей этой энергии для решения тех или иных видов технических задач. На сегодня практически отсутствуют производственные технологии для реализации конкретной технической задачи рассматриваемого направления.

**Цель работы** – совершенствование технологий упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением концентрированных потоков энергии.

**Поставленные задачи НКР:**

- Проведение обзора технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин;
- Изучение физических процессов при вибродуговой обработке;
- Доработка экспериментальной установки применительно к задачам исследований;
- Выбор методов исследования и исследовательского оборудования;
- Проведение экспериментов по упрочнению поверхностей различных металлов на вибродуговой установке с применением металлокерамических материалов;
- Исследование физико-механических и структурных параметров поверхностного слоя образцов, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов;
- Определение технико-экономической эффективности вибродугового упрочнения культиваторных лап с многостержневыми электродами.

**Объект исследований** – технологии и устройства упрочнения сопрягаемых поверхностей машин и механизмов с применением методов вибродуговой обработки.

**Предмет исследований** – физико-механические и структурные параметры поверхностного слоя образцов, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов;

**Научная новизна:**

- Новые результаты исследований процесса упрочнения поверхностей металлических изделий, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов.

**Методы исследований:**

- Электрофизические и электрохимические методы исследования физико-механических и структурных параметров поверхностного слоя образцов, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов;

**Практическая значимость работы.**

Уникальность проводимых исследований заключается в обеспечении решения поставленных задач в соответствии с современными требованиями мирового уровня научно-исследовательских работ, если учесть, что потери от трения и износа в развитых государствах достигают 5...6 % национального дохода, а преодоление сопротивления трения поглощает во всем мире 20...25 % вырабатываемой в год энергии.

**Достоверность и обоснованность результатов исследований** подтверждается общепринятыми методами исследований с помощью современных контрольно-измерительных приборов и оборудования, а также данными проведенных экспериментальных работ.

**Реализация результатов исследований.** Результаты исследований используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

**Апробация работы.** Основные положения научно-квалификационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

- *Международная научно-практическая конференция: «Современное состояние, проблемы и перспективы развития сервиса агропромышленного комплекса»;*
- *Международная научно-практическая конференция «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы»;*
- *75-ая студенческая (региональная) научная конференция «Студенческая наука- аграрному производству»;*
- *Научно-практическая конференция «Аграрная наука XXI века»;*
- *Международная научно-практическая конференция: «Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации и технического сервиса агропромышленного комплекса».*

**Публикации.** По теме НКР опубликовано - статей.

**Структура и объем научно-квалификационной работы.** НКР состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на - страницах машинописного текста, содержит - рисунков и - таблиц. НКР содержит библиографию из - наименований.



# 1. ОБЗОР ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ И РАБОЧИХ ОРГАНОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

## 1.1. Традиционные технологии упрочнения поверхностей деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин

В промышленном и сельскохозяйственном производстве особое значение приобретают технологии, отвечающие требованиям ресурсосбережения без увеличения материальных затрат на их реализацию. Это в полной мере относится и к технологиям упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин, интенсивная эксплуатация которых приводит ухудшению агротехнических показателей сельскохозяйственной техники, увеличивает потери и ведет к удорожанию сельскохозяйственной продукции. На сегодня существует ряд упрочняющих технологий, основанных на применении высокоэнергетических методов. Рассмотрим некоторые из них.

*Упрочнение лезвий стрелчатых лап культиваторов путем нанесения многокомпонентных диффузионных покрытий в условиях ТВЧ-нагрева[1].*

В данной технологии вначале производится обмазка поверхности лезвия боросодержащей смесью с дополнительными компонентами хрома и титана с дальнейшим ТВЧ нагревом при температуре порядка  $1100^{\circ}\text{C}$  в течение времени до 7 мин. Сформированное диффузионное покрытие на основе бора, имеет характерное игольчатое строение. Толщина данных покрытий составляет порядка 200 мкм на стали 55 и 160 мкм на стали 65Г. Причем приблизительно 60 % оттолщины слоя формируется в первой половине фазы нагрева, остальные 40 % формируются во второй половине фазы нагрева и в течение времени остывания нагретой поверхности до температуры  $820 - 850^{\circ}\text{C}$ . Технология борирования с дополнительными компонентами хрома и титана с дальнейшим ТВЧ нагревом позволяет увеличить ресурс работ стрелчатых лап до трех раз.

ТВЧ закалка имеет ряд недостатков:

1. Ограниченность номенклатуры обрабатываемых деталей, т.к. индукционный нагрев применим преимущественно для цилиндрических изделий определенного диаметра. Для закалки стрелчатых лап требуется разработка специальной конструкции индуктора. Для некоторых деталей сложной формы изготовление индуктора затруднительно или даже невозможно;
2. В мелкосерийном и единичном производстве изготовление индуктора и разработка технологического процесса являются нерентабельными;
3. На деталях, имеющих глубокие впадины, выступы, резкие переходы, острые углы и т. д., не удастся получить равномерной толщины закаленного слоя;
4. Обработка деталей требует работу в специализированном помещении и стационарных условиях.

*Технологии восстановления лемехов и лап культиваторов [2 – 4].*

Лемех по конструкции представляет собой трапециевидную пластину из специальной износостойкой лемешной стали Л53 или Л65 длиной 250...400 мм с отверстиями под потайные болты. Сталь марки Л65 содержит 0,6 % С, 0,5 % Мn, 0,28 % Si. Со стороны лезвия лемех закаливается на ширину 20...45 мм до твердости до 60 HRC путем нагрева до температуры 780...820 °С и резкого охлаждения в воде. После закалки производится отпуск при температуре 350 °С с последующим охлаждением на воздухе. Твердость в незакаленной зоне не более 33 HRC.

Для повышения износостойкости лемеха на его верхнюю или нижнюю поверхность наносится слой износостойкого сплава сормаита № 1 (Рис.1.1) толщиной до 1,7 мм, содержащим около 28 % хрома, 15 % марганца, 3 % углерода, 3,1 % кремния, остальное – железо. Ширина наплавляемой полосы на прямолинейном участке равна 25...30 мм, а у носка – 55...65 мм.

В процессе эксплуатации слой металла на рабочей стороне лемеха изнашивается быстрее, а на тыльной – более износостойкой – медленнее.

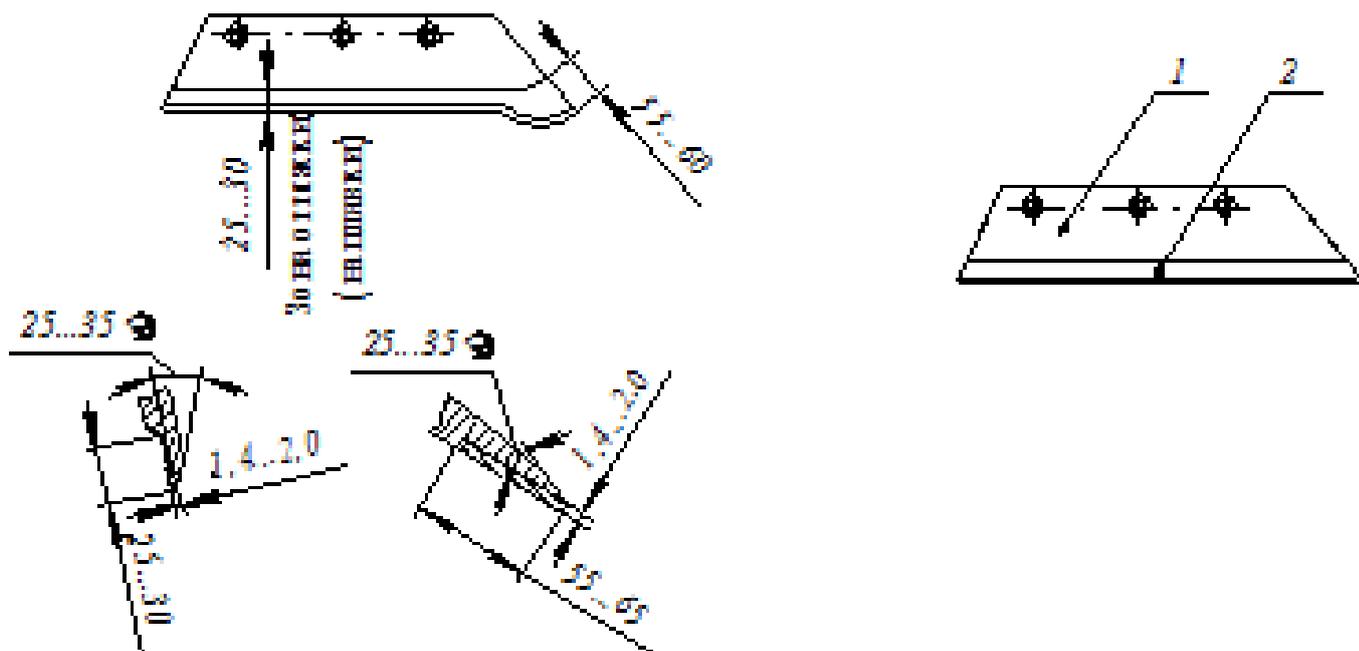


Рисунок 1.1 Зоны восстановления самозатачивающегося лемеха

При этом острота лезвия лемеха сохраняется, и такой лемех называется самозатачивающимся. Свойством самозатачивания обладают и лемеха из двухслойной стали, у которых верхний слой – мягкая сталь, а нижний тонкий – высоколегированная износостойкая сталь. Срок службы таких лемехов в 2 раза больше, чем у лемехов, наплавленных сормайтотом.

Основные дефекты лемехов: износ по ширине до 10 мм, изгиб и коробление поверхности, выкрашивание лезвия на глубину более 10 мм, обломы лезвия, переломы, затупление лезвия, когда его толщина превышает 1 мм. В процессе работы характер износа лемеха зависит от типа обрабатываемой почвы. При вспашке тяжелых и средних почв наиболее сильно изнашивается носок и лезвие лемеха. На лезвии образуется затылочная фаска с отрицательным задним углом.

При работе такого лемеха почва, находящаяся между образовавшейся фаской и плотным не взрыхленным слоем, выдавливает лемех вверх. В ре-

зультате этого глубина вспашки становится неравномерной. При вспашке песчаных и супесчаных почв изнашивается лицевая поверхность лемеха. Лемеха часто заменяют из-за износа носовой части при вполне работоспособном лезвии. Восстанавливают лемеха оттяжкой, оттяжкой с последующей наплавкой твердого сплава, приваркой нового лезвия или носовой части.

**Восстановление лемеха оттяжкой.** При оттяжке из утолщенной части лемеха (магазина) металл после нагрева перемещают к изношенным местам кузнечным способом. Оттяжку начинают при температуре 1200 °С (светло-желтый цвет каления) и заканчивают при 800 °С (вишнево-красный цвет каления). Оттяжка при меньшей температуре приводит к появлению трещин на лезвии. Лемех следует нагревать минимальное число раз. Удары наносят по тыльной стороне лемеха, начиная с носка и разгоняя запас металла по всей длине и ширине. Форму восстановленного лемеха проверяют по шаблону. Оттянутый лемех затачивают на обдирочно-шлифовальном или специальном станке в соответствии с техническими условиями. При заточке лемех перемещают относительно шлифовального круга от носка к пятке и обратно.

После заточки лезвия производят термическую обработку лемеха. Нагревают лемех со стороны лезвия на 1/3 ширины до температуры 780...820 °С и быстро охлаждают в теплой (30...40 °С) подсоленной воде. Лемех опускают в воду спинкой вниз, чем предотвращается возможность появления на лезвии закалочных трещин.

Затем лемеху проводят отпуск при температуре 350 °С (серый цвет побежалости), охлаждая на воздухе. Качество закалки проверяют личным напильником (13...26 насечек/см) и молотком массой 0,5 кг. Напильник должен скользить по лезвию, не оставляя следов а при свободном падении молотка с высоты 0,3...0,4 м лезвие не должно выкрашиваться.

**Ремонт лемеха приваркой нового лезвия.** Если запас металла магазина лемеха израсходован, его восстанавливают приваркой нового лезвия или носка, которые изготавливают из выбракованных лемехов или рессор (Рис.

1.2 и 1.3). После приварки лезвие оттягивают, затачивают и подвергают термообработке.

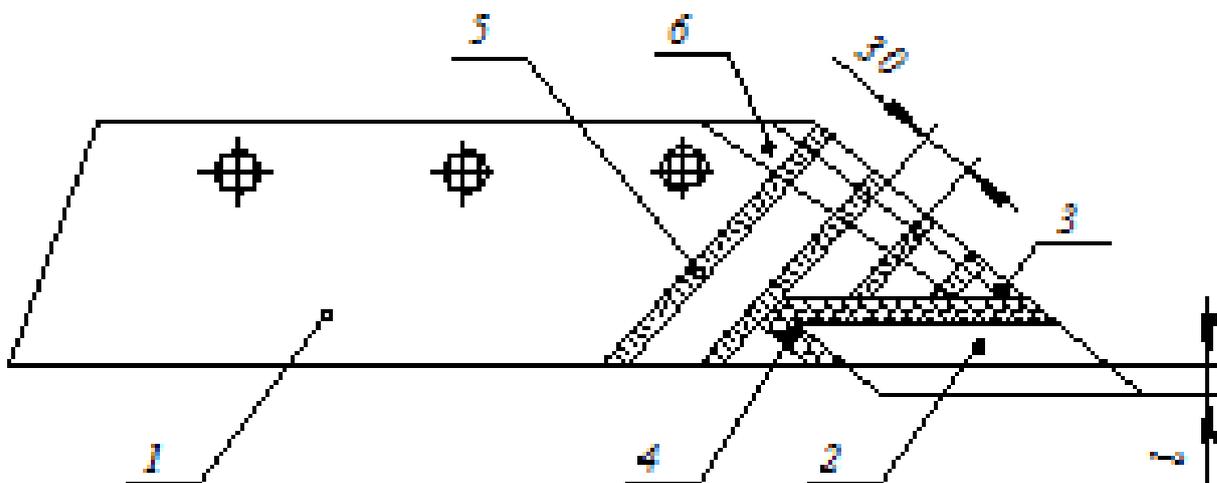


Рисунок 1.2. Восстановление лемеха приваркой носка:

- 1 – рабочая поверхность лемеха; 2 – приваренный носок лемеха;
- 3 – полевой обрез; 4 – сварные швы; 5 – армирующие валики;
- 6 – область лучевидного износа

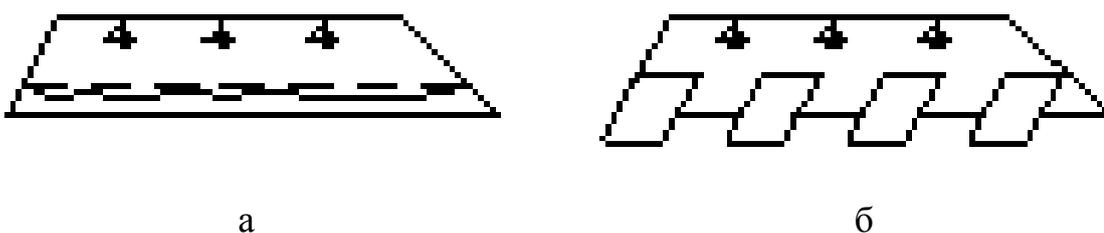


Рисунок 1.3. Восстановление лемеха приваркой лезвия (а)  
или пластин (б)

**Восстановление лемеха наплавкой твердого сплава.** Самозатачивающиеся лезвия лемехов достигается при определенном соотношении толщины и износостойкости слоя твердого сплава и основного металла лезвия. Для определения основных размеров самозатачивающегося лезвия его условно раз-

деляют на две части (с толщиной  $h_1$  и  $h_2$ ), и определяют угол клина  $\gamma$ . При этом соотношение коэффициентов износостойкости твердого наплавленного слоя и основного металла лемеха принимают равным 6:1.

Чтобы лезвие, самозатачивалось на всю ширину наплавленной части, верхний слой лемеха необходимо делать с углом клина  $\gamma = 25 \dots 30^\circ$ , а длину выступающей части твердого слоя  $l = (0,3 \dots 0,5) h'_1$ . Где  $h'_1$  – толщина режущего слоя равная  $h'_1 = 0,6 h_{np}$  ( $h_{np}$  – толщина лезвия в крайней нижней точке при его предельном затуплении, мм).

Процесс восстановления лемеха наплавкой твердым сплавом состоит из оттяжки, наплавки сплава, выравнивания и заточки. Лезвие лемеха оттягивают кузнечным способом. Важно при этом получить необходимую толщину и угол наклона лезвия. При уменьшении толщины лезвия основной металл будет изнашиваться быстрее наплавленного слоя, в результате чего твердый слой будет обламываться. Если толщина лезвия будет больше оптимальной, то во время работы быстрее будет изнашиваться наплавленный слой. Это приведет к образованию затылочной фаски и затуплению лезвия. Поэтому после оттяжки толщину профиль лезвия проверяют угловым шаблоном. Режущая кромка лезвия должна совпадать с нанесенной на шаблоне риской или смещаться не более чем на 3 мм вглубь его.

Для обработки тяжелых глинистых почв лемеха наплавляют с тыльной стороны, а легких супесчаных – с лицевой стороны. *Сормайт №1 (ЦС-1)* наплавляют кислородно-ацетиленовым пламенем горелкой № 3. Наплавку ведут справа налево, начав с носка лемеха. Участок лезвия длиной 80...90 мм предварительно нагревают до температуры 800...1000 °С (от вишнево-красного до оранжевого цвета каления) и посыпают прокаленной бурой для снятия окисной пленки (окалины). Затем лезвие нагревают вторично и в момент «запотевания» металла (расплавления металла только в тонком поверхностном слое) вносят пруток присадочного материала, перемещая горелку и пруток поперек лезвия навстречу друг другу.

Износостойкий слой наплавляют на всю ширину лезвия. При этом горелку необходимо держать под углом около  $60^\circ$  к плоскости лемеха. Во избежание пережога металла пламя горелки нельзя задерживать на режущей кромке. Толщина наплавленного слоя должна быть 1,5...2 мм, ширина наплавки на прямолинейном участке 25...30 мм, а на носке – 55...65 мм.

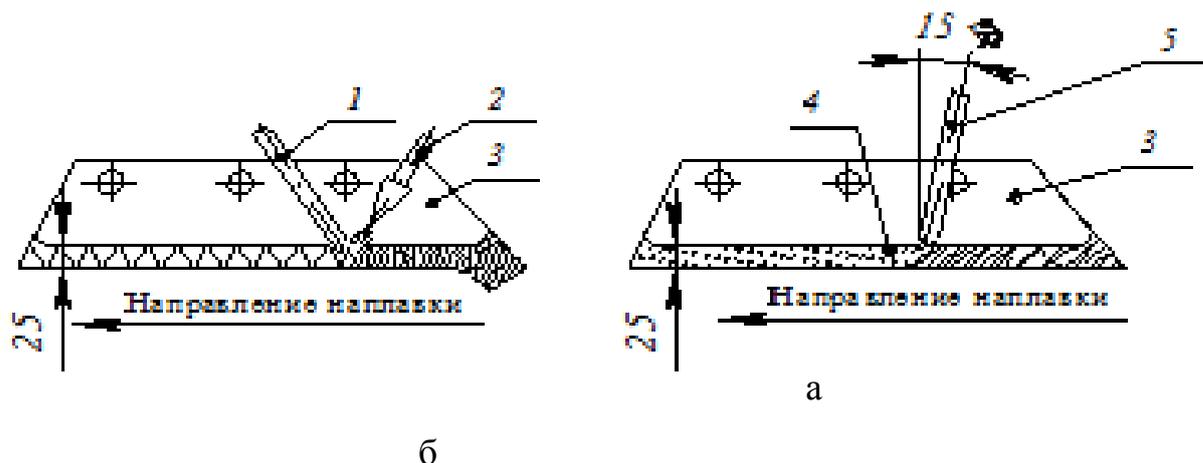


Рисунок 1.4. Схема наплавки лезвия лемеха твердым сплавом с помощью газовой горелки (а) и электродуговой наплавки порошкообразным твердым сплавом (б): 1 – пруток твердого металла; 2 – горелка; 3 – лемех; 4 – шихта; 5 – графитовый электрод

**Наплавку шихтой НП-1, ННР-1**, состоящей из 82...85 % порошковых твердых сплавов и 15...18 % флюсов, производят нижним нагревом лезвия газовым пламенем или электродуговой сваркой графитным не плавящимся электродом. Свободно насыпанный слой шихты должен быть в 3...3,5 раза толще наплаваемого слоя. Лемеха наплавляют с носка: движение электрода должно быть зигзагообразным. После наплавки наплавленный твердый слой уплотняют и выравнивают кузнечным способом.

**Индукционный способ наплавки** (Рис. 1.5) более производителен газового и электродугового метода. Нагрев шихты и лезвия осуществляется токами высокой частоты 50...100 кГц. Время нагрева при указанном интервале частоты равна 1,5...6 мин. Глубина прогрева достигает 5 мм. После наплавки

поверхность лезвия выравнивают на заточном станке. При этом обнажают наплавленный слой по всей длине лезвия. Благодаря выравниванию ускоряется приработка лезвия. Затем лезвие затачивают в соответствии с техническими условиями.

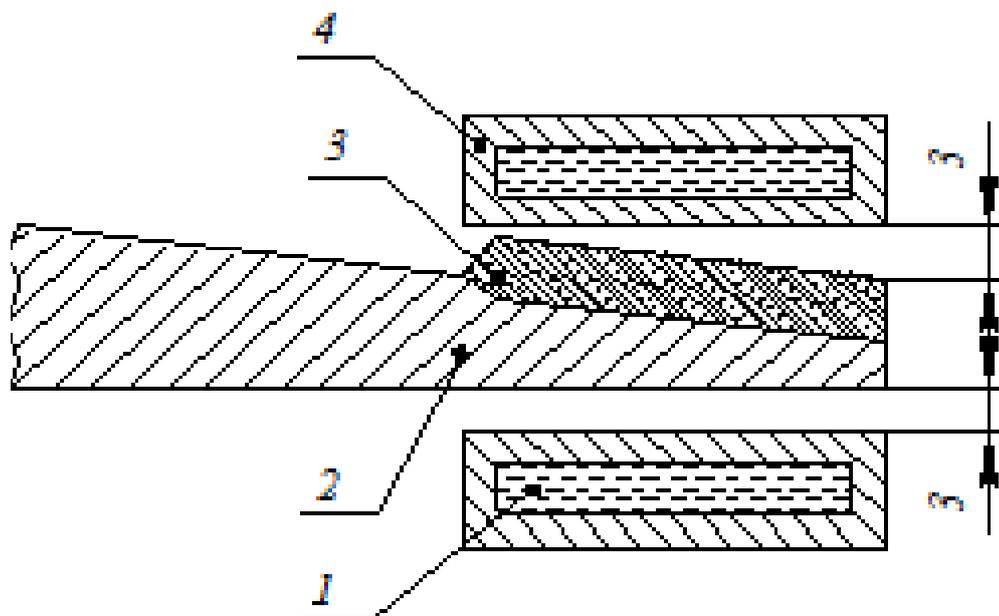


Рисунок 1.5. Схема индукционной наплавки порошкообразным твердым сплавом: 1 – охлаждающая жидкость; 2 – восстанавливаемая деталь; 3 – шихта; 4 – индуктор одновитковый

После наплавки поверхность лезвия выравнивают на заточном станке. При этом обнажают наплавленный слой по всей длине лезвия. Благодаря выравниванию ускоряется приработка лезвия. Затем лезвие затачивают в соответствии с техническими условиями.

#### **Технические требования к восстановленным лемехам:**

1. Поверхность лемеха должна быть ровной, без трещин. Допускается коробление спинки лемеха до 2 мм, а лезвия (выпуклость па рабочей поверхности) – до 4 мм.
2. Размеры отремонтированного лемеха должны соответствовать шаблону. Отклонение размеров по ширине – не более 5 мм, по длине – не более 10 мм.

3. Толщина режущей кромки лезвия должна быть не более 1 мм, угол заточки (с рабочей стороны) – 25...35°, ширина фаски на прямолинейном участке – 4...7 мм, на носке – 7...14 мм.

4. Лемеха, восстановленные без наплавки, должны быть термически обработаны (закалка с последующим отпуском). Твердость поверхности лезвия 45...60 HRC. Твердость незакаленной части лемеха не должна превышать 30 HRC.

**Восстановление лап культиваторов** проводят аналогично восстановлению лемехов. Затупившиеся при работе лапы, затачивают на обдирочно-шлифовальном или универсальном заточном станке с лицевой стороны под углом 20...25°. Если износ режущей кромки лапы по ширине не превышает 10 мм, ее оттягивают кузнечным способом так же, как и лемех. После заточки производят закалку в масляной ванне (нагрев до 900 °С) и отпуск при температуре 400 °С.

Для повышения долговечности лезвие лапы после оттяжки кузнечным способом наплавляют твердым сплавом. Толщина наплавленного слоя на прямолинейном участке – 0,3...0,5 мм, ширина – 15 мм (Рис. 6). Лапы культиваторов наплавляют сормайтот № 1(ЦС-1), используя газовое пламя, или электродами Т-590, Т-630.

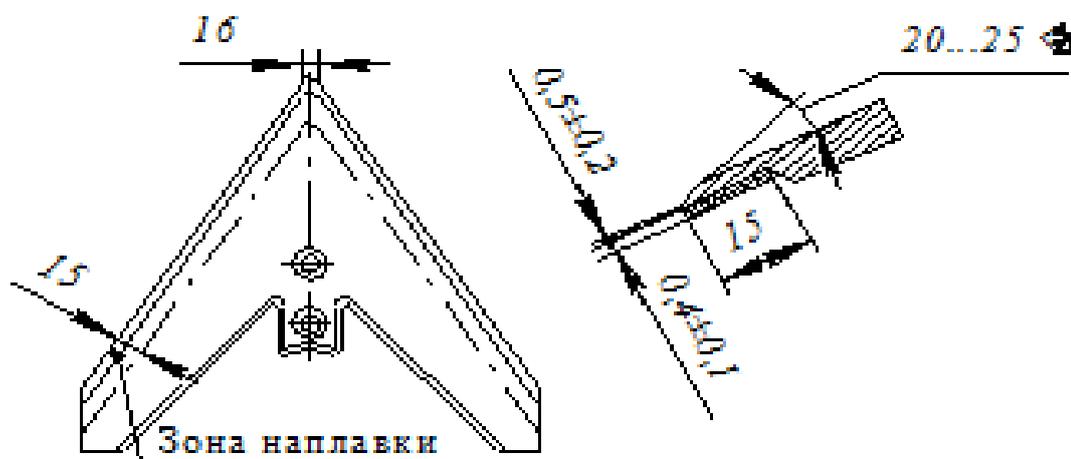


Рис. 1.6. Восстановление лапы культиватора наплавкой

При неровной наплавке нужно выровнять слой гладилкой кузнечным способом. Выравнивание производят при температуре 1200...900 °С (от светло-желтого до светло-красного цвета каления). Профиль лапы проверяют по шаблону. После выравнивания производят заточку лап с лицевой стороны.

*Восстановление дисков борон, луцильников, сеялок[2 – 4].*

Основными дефектами дисков являются коробление, затупление лезвия, образование трещин около квадратных отверстий крепления (у дисков борон и луцильников), износ стенок посадочных отверстий.

Затупленные сферические диски затачивают с выпуклой стороны на универсальном заточном станке СЗУ или на токарном станке с помощью приспособления (Рис. 1.7). Лезвие затачивают на угол заточки 35...37° до толщины лезвия не более 0,5 мм. Радиальное и осевое биение дисков допускается не более 5 мм.

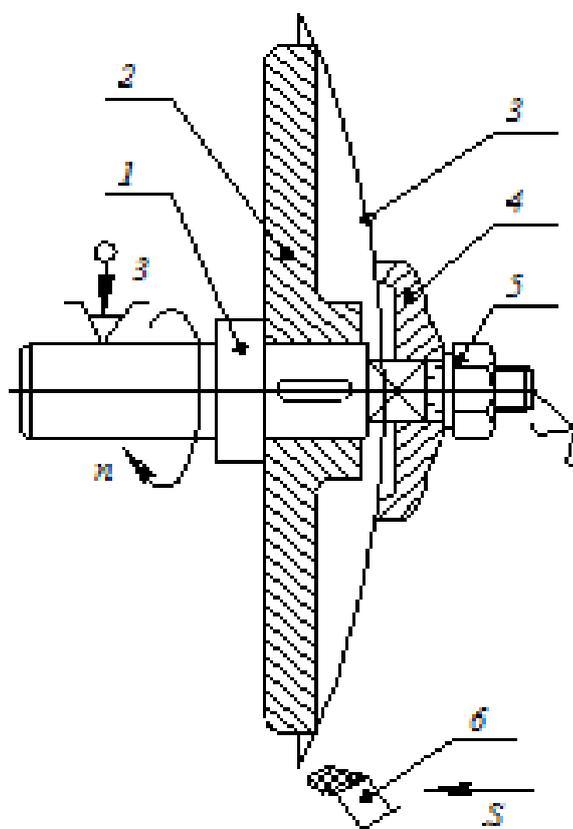


Рисунок 1.7. Схема затачивания диска на токарно-винторезном станке: 1 – оправка; 2 – планшайба; 3 – диск; 4 – шайба; 5 – гайка; 6 – резец

Дисковый нож плуга затачивают с обеих сторон на угол заточки 20...25° до толщины кромки лезвия 0,3...0,5 мм. Трещины в дисках заваривают электродуговой сваркой. При износе квадратного отверстия к диску приваривают накладку с квадратным отверстием, изготовленную кузнечным способом из выбракованных дисков. Диски сошников сеялок диаметром менее допустимого размера, а также имеющие на лезвии изломы и трещины, выбраковывают. Деформацию диска устраняют рихтовкой.

*Восстановление ножей режущих аппаратов [2 – 4].*

Характерными дефектами сегментных ножей являются: затупление режущих кромок (у гладких сегментных ножей), износ насечки (у насеченных сегментных ножей), выкрашивание кромок лезвий, появление трещин.

Насеченные сегменты выбраковывают при износе насечки до высоты 0,2...0,3 мм. Гладкие сегменты косилок при толщине кромок лезвия более 0,05 мм затачивают на станке ОР-3562 под углом 18...25° до толщины 0,01...0,02 мм. Сегменты режущего аппарата силосоуборочных комбайнов могут работать при большем затуплении лезвия.

*Восстановление почворежущих рабочих органов наплавкой «намораживанием» [2 – 4].*

Процесс наплавки «намораживанием из расплава» применяется при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих и землеройных машин (плужных лемехов, стрелчатых лап, ножей бульдозеров и грейдеров, зубьев ковшей. Сущность нанесения износостойкого слоя «намораживанием» (Рис. 1.8) заключается в кристаллизации сплава на более холодной очищенной от оксидной пленки поверхности детали, погруженной в расплав материала. В качестве материала расплава используют: сормайт, карбидоборидная порошковая смесь КБХ (5% карбида хрома, 5% бориды хрома, 60% феррохрома, 30% железного порошка) на основе хрома (4,0...6,0 % углерода, 0,7...0,9 % бора, 0,4...1,4 % кремния), псевдосплава ПС-14-60 – материала на основе железа, полученного спеканием (4,0...5,7 % углерода, 35,7 % хрома, 0,7 % марганца, 0,7...1,8 % никеля, 0,52...1,13 % меди и 0,1...0,32 % бора).

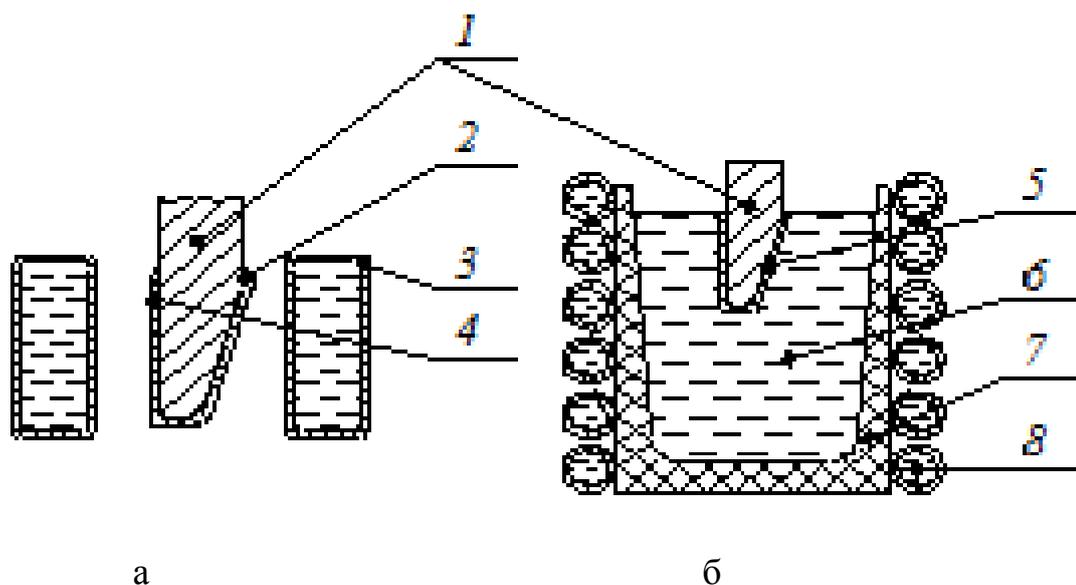


Рисунок 1.8. Нанесение износостойкого слоя намораживанием из расплава:  
 а – устройство активации; б – устройство для нанесения покрытия;  
 1 – восстанавливаемая деталь; 2 – флюс; 3 – индуктор; 4 – теплоизолирующий материал; 5 – покрытие; 6 – расплав; 7 – тигель; 8 – индуктор

Основные операции наплавки «намораживанием»: подготовка расплава и восстанавливаемой поверхности, погружение заготовки в расплав, выдержка, извлечение из расплава и охлаждение. Расплав нагревают в тигеле 7 с помощью индуктора 8 высокочастотной установки до температуры, превосходящей на 30...50 °С температуру его плавления. Выгоранию легирующих элементов препятствует слой расплавленного флюса АН-348А на поверхности расплава.

Поверхности заготовки, не подлежащие восстановлению и соприкасающиеся с расплавом, защищают тонким слоем меловой обмазки.

На восстанавливаемые поверхности последовательно наносят слои водного раствора жидкого стекла и порошкообразного флюса 2, включающего 40 % (по массе) буры и 60 % борного ангидрида. Заготовку с нанесенным слоем флюса помещают в высокочастотный индуктор 3 для снятия окисной пленки (активации). Активация длится в течение 10...12 с при температуре

850...900 °С. При этом флюс плавится, очищает поверхность от оксидов и защищает ее от последующего окисления.

Горячую заготовку погружают на 0,8...1,2 с в расплав б. За это время на относительно холодной поверхности заготовки образуются кристаллы расплава, которые, затвердевая, образуют покрытие толщиной 2,5...3,0 мм. Затем деталь охлаждают на воздухе.

На качество и толщину нанесенного металла влияют температура детали и расплава, продолжительность погружения. Износостойкость наплавленных «намораживанием» деталей в 1,8...3,5 раза выше, чем новых изделий. По производительности способ конкурирует со всеми видами наплавки.

Нанесение сплава «намораживанием» обеспечивает повышение износостойкости деталей за счет твердых структурных составляющих и нарушения формы кристаллов (анизотропии). Наличие в наплавочных материалах хрома и углерода способствует образованию карбидов хрома, микротвердость которых в 1,3...1,5 раза выше микротвердости кварца.

*Технология упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин электроконтактной приваркой(ЭКП) [11]*

Одним из резервов снижения себестоимости восстановления и упрочнения режущих рабочих органов ЭКП является использование в качестве присадочного материала отходов машиностроения, в частности отходов шлифования шарикоподшипникового производства (шлама ШХ15). До настоящего времени возможность использования шлама ШХ15 для получения упрочняющих покрытий ЭКП практически не исследована. Это в полной мере относится и к дисковым рабочим органам сельскохозяйственных машин. Поэтому данная работа посвящена исследованию и разработке технологии восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин ЭКП шлама ШХ15.

В работе изучены основные свойства шлама ШХ15 и впервые проведены исследования возможности использования его для получения покрытий без дополнительной переработки, то есть практически в исходном состоянии,

изучено влияние основных технологических параметров ЭКП на формирование покрытия и соединение его с основой, рассмотрены особенности формирования покрытия и образования соединения между приваренным слоем и основой с позиций современных представлений о механизме образования соединения в твёрдой фазе и разработана модель деформирования порошкового слоя, позволяющая увязать рост прочности соединения покрытия с основным металлом и плотности покрытия с величиной деформации и площадью контакта между формируемым покрытием и основным металлом, изучены физико-механические свойства покрытия из шлама ШХ15 и предложен расчётно-экспериментальный метод определения оптимальных параметров режима ЭКП шлама к стальным деталям. Разработаны поворотное устройство для осуществления ЭКП стальной ленты, проволоки и порошковых материалов при получении упрочняющих покрытий на плоских дисковых рабочих органах, способ подачи шлама в зону сварки и на примере дисков сошников зерновых сеялок разработана технология восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин ЭКП шлама ШХ 15.

## **1.2. Технологии упрочнения поверхностей изделий концентрированными потоками энергий**

Технологические процессы термообработки, напыления и другие методы поверхностной обработки металлов напрямую зависят от расширения применения концентрированных потоков энергии, таких как электронный луч, лазерное излучение, плазменное и ионное воздействие.

Концентрированные потоки энергии (КПЭ) различной физической природы являются универсальным технологическим инструментом. К ним можно отнести: электронные и ионные пучки, плазменные струи и дуги, электродуговые, микродуговые и электроимпульсные воздействия и т. д. При помощи КПЭ, без механического силового воздействия инструмента на заготовку, а также без соприкосновения инструмента и изделия, можно выпол-

нять различные технологические операции за счет использования физических и химических явлений.

Выполнение таких операций с использованием воздействия концентрированных потоков энергий, открывает новые возможности в обработке изделий:

- Возможность обработки особо твердых материалов, металлического и неметаллического типа, композитных структур, жаропрочных и труднообрабатываемых металлов и сплавов.
- Осуществление локальных и точечных воздействий, позволяющих получать, например, малые отверстия,резы небольшой толщины и различной формы, сварочные швы требуемой конфигурации и размера, производить соединение окончательно обработанных компонентов без последующей финишной обработки и т. п.
- Выполнение новых операций, таких как создание трафаретов и обработка с использованием их, напыление и наплавку покрытий, в том числе многослойных, создание пространственных изделий, осуществление сварки, с принципиально новыми конфигурациями, и свойствами, соединяемых компонентов и сварочных швов(герметизация заполненных емкостей и др.).

Рассмотрим различные виды концентрированных потоков и выделим преимущества каждого из них.

### ***Ионно-лучевая обработка изделий***

Для ионно-лучевой обработки изделий с большой площадью поверхности используют различные способы, к которым относятся: сканирование поверхности изделия узким сфокусированным ионным пучком, обработка изделия ионным пучком большого сечения, площадь которого сопоставима с площадью, установленного под пучком, неподвижного изделия, а также обработка ионным пучком ленточного сечения изделий, перемещаемых поперек оси пучка. В последнем случае обеспечивается обработка изделий значительной протяженности, например тонких листов электротехнической стали. Способ сканирования поверхности сфокусированным пучком имеет недос-

татки, обусловленные ограничением размера обрабатываемых изделий и невысокой производительностью процесса обработки, связанной с ограничением тока пучка с малым поперечным сечением собственным пространственным зарядом. При обработке широким пучком неподвижных изделий их размер также ограничен из-за необходимости создания однородного плазменного эмиттера ионов с большой площадью поверхности, что является достаточно сложной физико-технической задачей. Создание однородного ленточного плазменного эмиттера ионов является более простой задачей по причине одномерности объекта, основную трудность в этом случае представляет создание ионно-оптической системы, обеспечивающей создание ленточного пучка значительной протяженности с высокой плотностью тока, необходимой для высокопроизводительной ионной обработки. Нагрев до высоких температур электродов ионно-оптической системы, имеющих значительную протяженность, приводит к изменению ее геометрических размеров: изменяются ширина эмиссионной щели, длина ускоряющего зазора, нарушается условие плоско параллельности электродов, что влияет на величину тока пучка, условия его фокусировки и, в конечном счете, на степень неравномерности ионной обработки.

Оптимальным способом для обработки больших поверхностей является применение пучка с большим поперечным сечением, имеющим форму неравноосного прямоугольника, относительно большой оси которого перемещают обрабатываемые изделия. Это позволяет уменьшить плотность тока эмиссии ионов и снизить температуру электродов, что ослабляет влияние термомеханических эффектов. Известен способ получения таких пучков с использованием многоапертурных многоэлектродных ионно-оптических систем (аналог), которые состоят из плоскопараллельных экранного и ускоряющего электродов с круглыми отверстиями. Однако ионно-оптическая прозрачность таких систем, определяемая долей ионов, извлекаемых из плазмы, от общего потока ионов в направлении экранного электрода ионно-оптической системы, невысока (0,2-0,5). Для повышения тока пучка необхо-

димо увеличивать прозрачность электродов ионно-оптических систем, что достигается использованием щелевых апертур, формируемых набором параллельно устанавливаемых тонких стержней или проволок. Для дальнейшего увеличения ионно-оптической прозрачности ионно-оптических систем необходимо увеличивать поперечный размер щелей, однако это приводит к росту отрицательного напряжения отсечки вторичных электронов, прикладываемого к ускоряющему электроду ионно-оптической системы, увеличению частоты возникновения дуг и пробоев ускоряющего промежутка между электродами ионно-оптической системы. Уменьшение напряжения отсечки и увеличение ширины щелей достигается применением ионно-оптических систем, в которых ускоряющий электрод состоит из двух одинаковых многоапертурных электродов, расположенных на определенном расстоянии друг от друга и имеющих одинаковый потенциал. Поскольку длина щелей ограничена из-за удлинения нитей или стержней при нагреве и нарушения геометрии ионно-оптической системы, пучок большого сечения формируют с использованием ионно-оптических систем, электроды которых образованы набором большого числа параллельно расположенных щелевых апертур с оптимальной длиной щелей, а обработку изделий с большой площадью поверхности производят перемещением изделия поперек большой оси сечения пучка. Такой способ обработки (прототип) используется в установке для ионно-плазменной обработки. В способе-прототипе используется ионно-оптическая система, формирующая ионный пучок сечением  $600 \times 100$  мм с энергией ионов 10-30 кэВ и током пучка до 0,2 А, ширина щелей которой при напряжении отсечки 4 кВ составляет 10 мм в системе с обычным ускоряющим электродом и 20 мм - при использовании двойного ускоряющего электрода. Длина щелевых апертур, ограниченная вследствие нагрева и коробления формирующих апертуры вольфрамовых проволок диаметром 2 мм, составляет 100 мм.

К недостаткам этого способа-прототипа относится то, что даже при высокой однородности плазменного эмиттера ионов многощелевая ионно-

оптическая система обеспечивает близкое к равномерному распределение плотности тока пучка вдоль большой оси его поперечного сечения только на определенном расстоянии от ионно-оптической системы в определенных режимах ее работы, задаваемых сочетанием тока пучка и ускоряющего напряжения. Равномерность обеспечивается в результате угловой расходимости формируемых в одиночных апертурах элементарных пучков и их перекрывания в пространстве дрейфа пучка. Неоднородность распределения плотности тока пучка по сечению обусловлена многощелевой структурой ионно-оптической системы и характеризуется чередованием максимумов и минимумов плотности тока в направлении длинной оси пучка. Поэтому даже при незначительном изменении режимов генерации пучка или при обработке поверхностей сложной формы флюенс (физическая величина, интеграл по времени от плотности потока частиц или энергии) ионного облучения поверхности изделий, перемещаемых поперек длинной оси пучка, также будет неравномерно распределен по поверхности.

Электронный луч представляет собой направленный поток электронов, переносящий энергию от излучателя электронов к изделию. Электроны излучаются катодом, затем ускоряются в электрическом поле, приобретая кинетическую энергию, пропорциональную их скорости, формируются электрическими и магнитными полями в узкий пучок и направляются на обрабатываемое изделие.

Электроны проникают внутрь материала изделия, взаимодействуя с атомами, молекулами и свободными электронами материала. При взаимодействии электроны одновременно с передачей встречной частице своей кинетической энергии изменяют направление движения. В результате передачи кинетической энергии электроны атомов вещества приобретают энергию, покидают свою орбиту и переходят на более высокий энергетический уровень или вообще уходят из сферы действия ядра, что вызывает ионизацию атомов. На пути электронного луча создается плазма, плотность, которой пропорциональна плотности тока в луче, вероятности ионизации атомов и обратно про-

порциональна длине свободного пробега электронов. Сам пучок также меняет свои параметры. Диаметр пучка резко увеличивается, плотность тока в нем падает, энергия электронов уменьшается. Чтобы сохранить параметры электронного луча неизменными на пути электронов, в пространстве рабочей камеры создают глубокий вакуум, так чтобы средняя длина свободного пробега электронов между двумя соударениями была больше расстояния от катода до поверхности изделия. Принято считать, что диаметр пучка увеличивается примерно на величину, равную глубине проникновения электронов в вещество.

Различают два режима нагрева вещества электронным лучом.

1. Чисто поверхностный нагрев, при котором размеры пучка много больше глубины его проникновения внутрь материала. Размеры пучка при прохождении в материале существенно не меняются. Этот вид нагрева применяется для плавки, термообработки, нанесения пленок испарением.
2. Глубинный нагрев, при котором диаметр пучка сравним или много меньше расстояния, на которое пучок проникает в материал. Применяют такой нагрев для осуществления резания и удаления тонких слоев материалов, сварки, прошивания отверстий. Глубину проникновения электронов в материал изделия можно определить из соотношения

**Размерная обработка.** Размерную обработку материалов электронным лучом осуществляют при плотности тепловой энергии  $10^6 - 10^9$  Вт/см<sup>2</sup>, что позволяет разогреть до кипения и испарения самые тугоплавкие металлы, твердые сплавы, минералокерамику, технические камни. При воздействии остронаправленного электронного луча в изделиях образуются отверстия диаметром 0,01 мм и более, а при перемещении луча или изделия получается узкий рез.

Электронный луч проникает в обрабатываемый материал на глубину, в сотни раз большую его диаметра, что позволяет выполнять глубокие полости и отверстия, получение которых иными методами невозможно. Обрабатыв-

ваемость материалов электронным лучом определяется только их теплофизическими свойствами и не зависит от механических свойств.

Малая инерционность электронного луча позволяет вести размерную обработку или сварку в импульсном режиме с большим диапазоном регулирования частоты следования импульсов, их длительности и пауз между ними. При работе в импульсном режиме электронный луч имеет большую удельную мощность в фокальном пятне, чем в непрерывном режиме. Поэтому при прошивании отверстий в металлах или керамики, а также при размерной обработке целесообразно применять импульсный режим. Длительность импульсов составляет от 2 мкс до 0,01 с при частоте повторения от единиц до 5 – 10 кГц.

Электроннолучевую обработку тугоплавких металлов (вольфрама, молибдена) и металлов, обладающих хорошей теплопроводностью (медь, серебро), производят при удельной мощности луча  $10^7 - 10^8$  Вт/см<sup>2</sup> и выше, так как при меньшей плотности время обработки значительно увеличивается.

При прошивании неглубоких отверстий их диаметры примерно на 10% больше диаметра электронного луча. При глубинах обработки, достигающих стократной величины диаметров отверстия и более, диаметр луча должен быть в два-четыре раза меньше отверстия. Прошивание столь глубоких отверстий ведут путем изменения фокусного расстояния магнитной линзы по мере углубления отверстия.

**Обработка диэлектриков.** При размерной обработке электронным лучом диэлектриков ввиду их малой теплопроводности возникают высокие температурные перепады, что вызывает значительные остаточные термические напряжения, приводящие к растрескиванию. Для их исключения производят предварительный подогрев с последующим отжигом в вакуумной печи для снятия напряжений. При обработке диэлектриков на их поверхности возникают отрицательные заряды, что приводит к снижению энергии электронов, к увеличению диаметра луча и его расфокусировки.

Электроннолучевую обработку применяют для чернового прошивания отверстий диаметром 0,04 мм и более в алмазных волокнах. Обработку ведут в импульсном режиме с частотой 30 – 500 Гц при ускоряющем напряжении 70 кВ и токе 3 – 6 мА. Для получения круглого отверстия алмазной заготовке сообщают вращение с небольшой скоростью. При этом остро сфокусированный пучок электронов отклоняется от оптической оси, обрабатывая различные зоны волоочильного канала.

**Лазерная обработка.** В связи с тем, что лазерное излучение значительно превосходит другие виды энергии по плотности мощности, это позволяет существенно повысить, как и производительность обработки, так и дает возможность получить новые свойства поверхностей. У лазерного луча, как у источника нагрева при термической обработке металлов можно выделить два основных преимущества:

1. Высокая концентрация подводимой энергии и локальность позволяет производить обработку только поверхностного участка металла без нагрева остального объема, что приводит к минимальному короблению деталей, позволяет провести нагрев и охлаждение обрабатываемого объема материала с большими скоростями при очень непродолжительном воздействии.

2. Возможность контроля, диагностирования и регулирования параметров лазерной обработки в широком интервале режимов позволяет разработать обширный ряд методов поверхностной лазерной обработки.

**Плазменная обработка металлов.** Модификация поверхностей деталей, изделий и биологических объектов путем воздействия на них высококонцентрированной атмосферной плазмы. Эффективность плазменной обработки основана: на тепловом и газодинамическом эффектах; на взаимодействии с потоком ионизированных, возбужденных частиц и озона; на испускании инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения; на термической и структурной неоднородности плазменного потока; на наличии низкочастотных и высокочастотных пульсаций плазмы; на перемешивании плазменного потока с холодным газом окружающей среды; на специфическом

взаимодействии плазмы с металлом, слоем жировых, водяных и адсорбированных молекул. Основными характеристиками плазмы, оказывающими влияние на технологию плазменной обработки, выступают её температура, давление, энтальпия, скорость истечения и состав.

Назначение плазменной обработки материалов.

**Плазменная закалка** – повышение физико-механических свойств поверхностного слоя металла при высокоскоростном плазменном нагреве и быстром охлаждении за счет передачи тепла в глубинные слои материала.

**Плазменная химико-термическая обработка** (азотирование, цементация, борирование и др.) – модификация топографии и диффузионное насыщение поверхностного слоя металла при локальном воздействии высококонцентрированной плазмы и прохождении плазмохимических реакций.

**Плазменная сфероидизация**– получение порошков сферической формы из различных материалов.

**Плазменная активация, очистка, залечивание дефектов** – обработка деталей и изделий из полимерных, металлических, керамических, стеклянных и др. материалов перед склеиванием, опрессовкой, печатью, кашированием (технологический процесс нанесения и закрепления на непрозрачный материал непрозрачной плёнки путём клеевого соединения или припрессовки двух поверхностей (лайнера и основы), корпусированием (завершающая стадия микроэлектронного производства, в процессе которой полупроводниковый кристалл устанавливается в корпус), заливкой компаундом, сваркой, пайкой и т.д. (например, при изоляции кабеля перед соединением с разъемом, высоковольтных трансформаторов перед заливкой компаундом и др.).

**Бактерицидная плазменная обработка поверхностей**– обеззараживание изделий. **Плазменная обработка семян** – повышение устойчивости к грибковым и бактериальным заболеваниям, увеличение всхожести и энергии прорастания.

### ***Вакуумно-плазменная обработка.***

Процессу такой обработки подвергаются предварительно очищенные от загрязнений и посторонних примесей объекты, загруженные в вакуумную камеру. Технология ионной очистки позволяет увеличить производительность процесса и повысить его эффективность, исключить возникновение технологических дефектов. Перед началом процедуры деталь предварительно накаляют — для лучшего сцепления наносимого слоя с поверхностью подложки. Нанесение защитного слоя происходит с помощью накаливаемого дугового разряда, передающего порошок в состоянии плазмы к поверхности обрабатываемой детали. Ионно-плазменная обработка Выбор установки плазменной обработки определяется в соответствии с технологическими возможностями данной модели оборудования и задачами, которые с ее помощью предстоит решить. Современные установки применяются с целью упрочнения изделий из нержавеющей стали и титановых сплавов, а также придания им необходимых физико-механических характеристик. Высокотехнологичная система плазменной обработки металлов выполняет свои функции в условиях серийного производства деталей и оборудования, обеспечивая высокое качество технологических процессов, внушительную производительность, безопасность и безвредность в рабочем состоянии, простоту эксплуатации и относительно невысокие затраты.

Проведенный анализ показал, что среди плазменных методов обработки поверхностей перспективным в своем развитии является вибродуговой и электроискровой способы упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин. Производительность и качество вибродугового и электроискрового упрочнения зависит от следующих факторов: режимов обработки (мощности разряда, возмущающей силы, амплитуды и частоты колебаний обрабатываемого инструмента, скорости его движения, температуры, напряжения, механических свойств материала обрабатываемых деталей, их геометрии и др. Имеющиеся в литературе данные свидетельствуют о недостаточной изученности процесса вибрационного и электроискрового упрочнения материала

обрабатываемых деталей (лап культиваторов, лемехов, дисков сошника и др.) Отсутствует и конкретная теория этого технологического процесса. В данной работе будут рассмотрены теоретические и технологические вопросы вибродугового упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин.

### **1.3. Упрочнение методами вибродуговой обработки**

Анализ свойств плазмы и возможностей ее применения показал, что для упрочнения режущих элементов сельскохозяйственных агрегатов наиболее подходящей технологией является вибродуговая плазменная технология упрочнения [5 – 7]. Здесь на упрочняемую поверхность наносится композиционный материал, содержащий оксиды алюминия  $Al_2O_3$  и кремния  $SiO_2$ , а также карбида бора  $B_4C$ . При вибродуговой наплавке на поверхности образуется покрытие, содержащее керамические сверхтвердые включения из карбида бора, корунда и карбокорунда. Одновременно с наплавкой имеет место легирование упрочняемой поверхности бором и азотом вследствие диссоциации боронитро содержащих компонентов композиционного материала, а также углеродом за счет его диффузии от сублимации графитового электрода при горении дуги. Упрочненный слой состоит из трех зон: упрочненной основы, переходной и основной верхней. Упрочненная основа характеризуется ярко выраженными фазовыми изменениями, обусловленными диффузией элементов, входящих в состав композиционного материала. Переходная зона представляет собой сплав расплавленного верхнего слоя детали и композиционного материала. Основная верхняя зона является наиболее твердой и состоит из стальной матрицы, содержащей образованные карбиды железа  $FeC$ ,  $Fe_2C_3$ , бориды  $FeB$  и  $Fe_2B$  и керамические фазы – железную шпинель  $FeO$ ,  $Al_2O_3$ , карбид бора  $B_4C$ , корунд и карбокорунд. При указанной обработке поверхность рабочих органов машин приобретает твердость порядка 70 HRC и их износостойкость увеличивается в 2,0 – 2,5 раза.

В работе [8] рассмотрено применение вибродуговой плазмы для упрочнения поверхностей конкретных режущих элементов сельскохозяйственной техники. Для исследований были использованы образцы из стали 45 толщиной 4 мм. В качестве композиционного материала была выбрана паста следующего состава: порошок ПГ-10Н-01 - 55%, карбид бора - 20 %, бура - 10%, криолит - 8%, SiO<sub>2</sub> - 5%. Al - 2%. Связывающее вещество - 20% раствор жидкого стекла.

Сравнение результатов обработки поверхности стали 45 с наплавленным слоем из композиционного материала показывает, что микротвердость наплавленного слоя в 3 раза превышает микротвердость материала основы, а микротвердость упрочненного слоя основы – до 1,5 раза. Исследования показали, что упрочненный слой материала основы в зависимости от вкладываемой мощности разряда может достигать 1,5 – 2 мм толщины, а в некоторых случаях до 3 – 4 мм.

Было исследовано изменение микротвердости поверхности стали 45 при обработке вибродуговой плазмой без применения композиционного материала. В этом случае микротвердость в глубине основы увеличивается в 1,5 раза, а в поверхностном оплавленном слое до 4 раз. Рассматриваемая технология была использована для упрочнения таких элементов сельскохозяйственных агрегатов, как диск сошника, лапа культиватора, диск бороны, зуб бороны и др.

В работе [9] дается описание инновационного метода упрочнения рабочих органов почвообрабатывающей техники, эксплуатируемых в абразивной среде. Он осуществляется карбовибродуговой наплавкой рабочих органов с использованием композиционных металлокерамических паст с одновременным термодиффузионным упрочнением основного металла рабочего органа. По результатам проведенных исследований определены оптимальный состав и концентрация компонентов пасты, которые обеспечивают повышение износостойкости упрочненных рабочих органов в среднем в 1,8...2,0 раза.

В состав паст входят стальная матрица (наплавочный порошок), оксид алюминия  $Al_2O_3$ , двуокись кремния  $SiO_2$ , карбид бора  $B_4C$ , являющиеся керамическими компонентами, а также вещества, содержащие азот (нитрат аммония  $NH_4NO_3$ , карбамид  $NH_2CONH_2$  и др.), и криолит  $Na_3AlF_6$ , улучшающий стабильность и качество горения дуги [1, 4]. Связующим веществом является 50% водный раствор клея ПВА. Было установлено, что компоненты пасты существенно влияют на твердость и износостойкость упрочненных поверхностей.

Анализ полученных данных показал, что с увеличением процентного содержания в пасте керамических компонентов от 10% до 30% микротвердость наплавленного покрытия также возрастает вне зависимости от того, какой керамический компонент используется. При этом наибольшее среднее значение микротвердости (1508 HV, что соответствует твердости 75 HRC) показали образцы, упрочненные с использованием пасты, содержащей в своем составе 30% карбида бора  $B_4C$ . Твердость полученного покрытия в среднем в 1,5...1,7 раза превышает твердость закаленной стали 65Г, из которой изготавливают большинство серийно выпускаемых рабочих органов.

В работе [10] представлено описание метода упрочнения рабочих органов сельскохозяйственных машин, работающих в условиях абразивного износа. Метод включает вибродуговую наплавку нанометаллокерамических композиционных порошковых материалов (НМКМ) с одновременным термодиффузионным упрочнением. Определены оптимальные состав и концентрация компонентов материала, обеспечивающие наилучшие физико-механические свойства и ресурс упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин.

Для получения износостойкого упрочняющего покрытия разработан метод вибродуговой наплавки с использованием графитового электрода. При его использовании одновременно с наплавкой происходит термодиффузионное упрочнение поверхности рабочего органа бором, азотом и углеродом (боронитроцементация). Углерод при наплавке выделяется за счет сублима-

ции графитового электрода. Электродуговая вибрация электрода обеспечивает получение более прочного и плотного покрытия за счет сплавления материала рабочего органа и смешивания керамических и легирующих компонентов НМКМ.

Результаты проведенных исследований показали, что наибольшую твердость как наплавленного слоя, так и упрочненной подложки имеет образец, обработанный с использованием НМКМ с массовым соотношением компонентов в пасте: порошок стальной ПГ-10Н-01 – 20%, карбид бора  $B_4C$  – 63%, бура  $Na_2B_4O_7$  – 12% и алюминиевый порошок  $Al$  – 5%. Анализируя составы паст, которые были использованы для упрочнения образцов, можно прийти к выводу, что определяющую роль в получении наиболее высокой твердости играют карбид бора  $B_4C$  и бор, содержащийся в буре  $Na_2B_4O_7$ . В результате расплавления пасты также происходит образование атомарного азота, который совместно с углеродом, образующимся в результате сублимации графитового электрода при горении дуги, диффундирует в упрочняемую подложку, образуя твердый раствор, который повышает её твердость.

Проведенные исследования позволили установить, что микроструктура упрочнённых образцов независимо от состава используемых паст состоит из трех зон. Подложка (зона 1) имеет выраженные фазовые изменения до линии раздела за счёт диффузии элементов, входящих в состав наплавленной пасты, и углерода. Наплавленный слой состоит из 2-х зон – переходной и основной упрочненной зоны. Переходная зона представляет собой сплав расплавленного верхнего слоя подложки и материала пасты. Основная упрочненная зона является наиболее твердой и состоит из стальной матрицы, удерживающей образованные карбиды железа  $FeC$ ,  $Fe_2C_3$ , бориды  $FeB$  и  $Fe_2B$  и керамические фазы – железную шпинель, карбид бора и корунд. Линия перехода наплавленного слоя в подложку более четко прослеживается на снимках микроструктуры при малом увеличении.

Одним из эффективных путей увеличения срока службы рабочих органов сельскохозяйственных машин является повышение износостойкости лезвий с

обеспечением их самозатачивания в процессе эксплуатации. На практике получение самозагачивающихся лезвий рабочих органов, в том числе и дисковых, при их восстановлении и упрочнении методами наплавки или напыления износостойких сплавов, термообработки и т.п. реализовано в ГОСНИТИ, ВИСХОМе, ВИМе, РостНИИТМе и др. организациях. Однако, большинство применяемых технологий достаточно трудоёмки или малоэффективны. Особенно это относится к методам восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов, имеющих небольшую толщину, например дисков сошников зерновых сеялок, дисковых ножей ботворезного аппарата свеклокомбайна и др. Кроме того, практически во всех применяемых методах наплавки для получения упрочняющих покрытий используют износостойкие сплавы или их композиции, имеющие высокую стоимость, что значительно повышает себестоимость их восстановления и упрочнения.

Перспективным способом восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин является электроконтактная приварка (ЭКП) порошков износостойких сплавов, которая осуществляется без расплавления основного и присадочного материалов, то есть в твёрдом состоянии, и имеет ряд преимуществ, основными из которых являются меньшая энергоёмкость и высокая производительность процесса, возможность получения покрытий из различных металлов и сплавов на их основе, незначительное термическое влияние на материал детали, высокие механические свойства соединений, отсутствие выгорания легирующих элементов и благоприятные санитарно-производственные условия работы оператора.

Одним из резервов снижения себестоимости восстановления и упрочнения режущих рабочих органов ЭКП является использование в качестве присадочного материала отходов машиностроения, в частности отходов шлифования шарикоподшипникового производства (шлама ШХ15). До настоящего времени возможность использования шлама ШХ15 для получения упрочняющих покрытий ЭКП практически не исследована. Это в полной мере относится и к дисковым рабочим органам сельскохозяйственных машин.

Поэтому данная работа посвящена исследованию и разработке технологии восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин ЭКП шлама ШХ15.

В работе изучены основные свойства шлама ШХ15 и впервые проведены исследования возможности использования его для получения покрытий без дополнительной переработки, то есть практически в исходном состоянии, изучено влияние основных технологических параметров ЭКП на формирование покрытия и соединение его с основой, рассмотрены особенности формирования покрытия и образования соединения между приваренным слоем и основой с позиций современных представлений о механизме образования соединения в твёрдой фазе и разработана модель деформирования порошкового слоя, позволяющая увязать рост прочности соединения покрытия с основным металлом и плотности покрытия с величиной деформации и площадью контакта между формируемым покрытием и основным металлом, изучены физико-механические свойства покрытия из шлама ШХ15 и предложен расчётно-экспериментальный метод определения оптимальных параметров режима ЭКП шлама к стальным деталям. Разработаны поворотное устройство для осуществления ЭКП стальной ленты, проволоки и порошковых материалов при получении упрочняющих покрытий на плоских дисковых рабочих органах, способ подачи шлама в зону сварки и на примере дисков сошников зерновых сеялок разработана технология восстановления и упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин ЭКП шлама ШХ 15.

#### **1.4. Сущность метода вибродугового упрочнения**

Сущность процесса вибродуговой обработки заключается в повторении циклов замыкания и размыкания электрода с поверхностью детали. Электрод и деталь соединены с источником сварочного тока. Каждый цикл вибрации электрода включает в себя четыре последовательных процесса: короткое замыкание, отрыв электрода от детали, электрический разряд, холостой ход.

Вибродуговая обработка имеет следующие преимущества: небольшой нагрев детали, возможность наплавки деталей с малым диаметром, незначительная зона термического влияния, возможность получения необходимых прочностей наплавленного слоя за счет применения различных марок электродной проволоки. К недостаткам вибродуговой обработки относятся наличие пор и микротрещин в наплавленном металле, большие внутренние напряжения в деталях, что резко снижает их усталостную прочность, особенно при работе на знакопеременных нагрузках. Вибродуговая обработка основана на протекании импульсного разряда между электродом (анодом) и деталью (катодом).

Сущность вибродуговой обработки заключается в том, что полярно переносится материал электрода на деталь, данный процесс называется наращиванием. Выполняется он при одновременном термическом воздействии тока и легировании поверхности детали элементами упрочняющего электрода и азота воздуха. Нарощенный слой имеет высокую твердость, обусловленную образованием карбидов, нитридов, карбонитридов и закалочных структур. Вибродуговое упрочнение и наращивание происходит в воздушной или газовой среде при тепловом и химическом действии электрического разряда, между катодом и анодом, которому задано колебательное движение от вибратора. За очень короткое время разряда ( $10^{-8} - 10^{-5}$  с) через электроды проходит мощный (до  $10^6$  А/мм<sup>2</sup>) импульс тока. Температура в зазоре достигает до 11 000°С, при таком уровне тепла азот и легирующие элементы, которые находятся в электроде, легируют в поверхность детали, тем самым повышая ее физико-механические параметры.

При вибродуговом упрочнении осуществляется воздействие на металлические поверхности в газовой среде короткими (10 – 2000 мкс) электрическими разрядами с энергией от сотых долей до десятка и более джоулей и частотой до 1000 Гц. При периодическом, с определённой частотой, контакте электрода (анода) с обрабатываемым изделием (катодом) и его разрыве возникают электрические разряды, создаваемые генератором импульсов. Под действием высокой температуры в зоне разряда (5000 – 11000 °С) происхо-

дит следующее: идут процессы преимущественного разрушения материала электрода (анода) и образования вторичных структур в рабочей его части; осуществляется перенос продуктов эрозии электрода на деталь (катод); на поверхности обрабатываемого изделия протекают микрометаллургические и плазмохимические процессы; элементы материала электрода диффундируют в поверхностный слой изделия без существенного ее нагрева; поверхность изделия приобретает новый специфичный рельеф; образуется на поверхности изделия измененный слой, включающий белый слой, диффузионную зону и зону термического влияния, при этом изменяются свойства поверхностного слоя; формируется поверхностный слой мелкодисперсного состава, вплоть до наноуровня; происходит изменение размера изделия. Во вновь образованном рельефе отсутствуют протяженные выступы клинообразной в поперечном сечении формы, образованные обработкой резанием, которые заменяются выступами ограниченной длины, по форме близкими к шаровому сегменту, обладающими высокой несущей способностью; рельеф приобретает выпукло-вогнутый характер и его параметры одинаковы во всех направлениях.

Сам процесс вибродугового упрочнения экологически чистый и безопасный, так как осуществляется при напряжении 20 – 100 В и длительности импульсных разрядов  $10^{-6}$  –  $10^{-2}$  с. При этом толщина формируемых слоев из твердых сплавов составляет ~ 0,1 – 2,0 мм, а из пластичных и более легкоплавких материалов слой покрытия может достигать 0,3 – 3,0 мм. В зоне разряда электроэрозия, массоперенос материала электродов (в паровой, жидкой и твердой фазах), кристаллизация и другие явления протекают в крайне неравновесных условиях способствующих образованию структур с мелким зерном, высокой плотностью дислокаций, с особым напряженно-деформированным состоянием. Изменяя параметры и условия вибродугового упрочнения, можно регулировать микрометаллургические и плазмохимические процессы в этой зоне, проводить направленный синтез тугоплавких и других химических соединений и формировать сложные композиционные покрытия из интерметаллидов, карбидов, нитридов, окислов, как за счет ма-

териалов электродов, так и элементов межэлектродной среды. В качестве материалов электродов могут быть графитовые и твердосплавные материалы.

### **1.5. Твердосплавные электроды и металлокерамические порошки**

В данной научно-квалификационной работе в технологическом процессе вибродугового упрочнения будут использованы металлокерамические порошки, а электроды будут многостержневыми из твердосплавных материалов. Поэтому эти вопросы рассмотрим отдельно.

#### *Металлокерамические порошки*

Разновидностей металлокерамических порошков множество, однако, нас интересуют порошки с точки зрения их применения в технологическом процессе вибродугового упрочнения с целью получения более твердых и износостойких поверхностных слоев деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин. Композиционные порошки могут быть классифицированы на основе следующих принципов: по конструкции частицы (строению, морфологии); способу получения; характеру взаимодействия компонентов при нагреве и назначению покрытия. Конструкции частиц композиционного порошка обусловлены способом их получения и разделяются на две группы (класса): плакированные и конгломерированные частицы. Применение плакированных порошков дало возможность ввести в покрытие материалы, которые не поддаются напылению (не пластифицируются или возгоняются), создать целую гамму различных композиций, обеспечивающих получение высококачественных покрытий. Конгломерирование (агломерирование) исходных порошков на связках спеканием, прессованием с последующим дроблением обеспечило еще более широкие возможности получения газотермических покрытий за счет реализации межфазных и химических процессов в частицах при их нагреве и нанесении на подложку.

## **Общие сведения о композиционных порошках.**

Одной из существенных особенностей газотермического напыления порошков является возможность управления составом, структурой и соответственно свойствами покрытий за счет применения различных порошковых композиций с широким интервалом соотношения компонентов, в качестве которых могут выступать металлы, сплавы, оксиды, карбиды, бориды, нитриды, сульфиды, графит (алмаз), твердые смазки и т.д.

Применение для этих целей механических смесей имеет ряд существенных недостатков, главным из которых является сегрегация компонентов при смешивании, транспортировании их смеси из дозирующих устройств в струю, а также в процессе самого напыления. Сегрегация приводит к неравномерности формирования структуры, пористости, снижению прочности, и в ряде случаев эксплуатационных характеристик покрытий. Кроме того, при напылении механических смесей происходит окисление некоторых компонентов. Наличие в смеси порошков с различными гранулометрическим составом, формой, плотностью, теплопроводностью, температурой плавления приводит к неравномерности нагрева отдельных частиц в полете, ускорения, затвердевания, кристаллизации и в конечном счете не способствует достижению положительных результатов. В связи с этим и начали развиваться методы изготовления порошков, обеспечивающие наличие в каждой частице комплекса всех исходных компонентов. При этом все частицы порошка имеют одинаковые массу, химический состав, плотность, теплопроводность и т.д. Для достижения этого применяемые способы дают возможность получать порошки плакированного и конгломератного строения. Такие порошки называются композиционными порошками.

В литературе распространены несколько терминов для обозначения композиционных материалов: плакированные порошки, экзотермически реагируемые порошки (для интерметаллидных композиций с экзотермическим эффектом при их взаимодействии), композитные порошки, агломерированные порошки (для порошков, получаемых спеканием, прокаткой, дроблением

или перемешиванием со связкой и последующей сушкой при перемешивании или распылении) и т.д.

Термины «плакированный порошок», «конгломерированный порошок» являются двумя частными случаями общего названия «композиционный материал», который должен удовлетворять следующим требованиям:

1. изготавливаться человеком;
2. представлять собой сочетание хотя бы двух химическиразнородных материалов с четкой границей раздела между компонентами;
3. образовывать этот материал сочетанием компонентов;
4. характеризоваться свойствами, которыми не может обладать никакой из компонентов, взятый в отдельности.

Таким образом, композиционный порошковый материал - это порошок сложного состава, у которого каждая гранулометрически самостоятельная частица состоит из макрообъемов нескольких компонентов, отличающихся по химическому составу, и идентична по качественному составу всем остальным частицам. В объеме этого определения композиционный порошок отличается от порошков сплава из дисперсно упрочненного материала (по размеру объемов компонентов) и механической смеси различных порошковых материалов (по характеру состава). Не следует также подменять указанный термин термином «порошковая композиция», которым в его точном смысле определяют компактный композиционный материал, полученный из порошковых материалов.

Конструкции частиц композиционного порошка обусловлены способом их получения и разделяются на две группы (класса): плакированные и конгломерированные частицы. Кроме того, можно рассматривать частицу, полученную с применением двух указанных способов.

При плакировании исходной частицы (ядра) на ее поверхности формируются один или несколько слоев других материалов. Конгломерированием можно достичь большего разнообразия в строении частиц. При использовании исходных порошков с частицами одинаковых размеров (отношение диа-

метров 1/3) образуются гомодисперсные конгломератные частицы. Если одна частица служит ядром, на поверхности которого размещены мелкодисперсные частицы остальных компонентов, то формируются гетеродисперсные конгломератные частицы. Комбинации двух основных типов частиц (плакированных и конгломератных) позволяют получать порошки смешанного типа. Причем одни и те же компоненты могут присутствовать как в виде плакирующей оболочки, так и в составе конгломератов. Число получаемых частиц для трехкомпонентной системы 34 и для двухкомпонентной - 7.

В зависимости от характера взаимодействия компонентов при их нагреве порошки можно разделить на две большие группы: термонейтральные и экзотермически реагирующие. В последних при нагреве протекают химические реакции, обусловленные взаимодействием компонентов, с образованием покрытий, состав которых резко отличается от исходного состава. В термонейтральных композициях также возможно взаимодействие в результате плавления компонентов (в особенности, в системе металл-металлоподобное соединение). В отдельную группу следует выделить порошки на основе оксидов, при плавлении интенсивно диссоциирующих и образующих новые соединения с компонентами порошка. Среди всех плакированных порошков преобладают порошки, плакированные никелем (кобальтом), а порошки с нанесенным на их поверхность алюминием являются самыми распространенными среди порошков конгломератного типа.

**Плакированный композиционный порошок.** Композиционный порошок – это порошок, каждая частица которого состоит из отличающихся по химическому составу центральной части и окружающей ее оболочки.

#### *Твердосплавные электроды*

При вибродуговом упрочнении применяют омедненные графитовые электроды или электроды для наплавки поверхностей слоев с особыми свойствами.

**Омедненные графитовые электроды.** Воздушно-дуговая резка металлов или разделка кромок деталей под сварку требует применения особых

сварочных материалов. И в данном случае наилучшим вариантом считаются омедненные угольные электроды. Эти электроды также применяются и при производстве других типов работ: для удаления дефектов, возникающих на поверхности литых деталей; для строжки; для срезки с поверхности деталей металлических заклепок; для прошивки элементов, изготовленных из углеродистой, легированной или низколегированной стали. Такие работы очень востребованы в металлургии и на литейных (в том числе и сталелитейных) предприятиях, при производстве металлических конструкций, в судостроении и машиностроении.

Основным составным элементом электродов этого типа является уголь. Причем в процессе производства может использоваться как натуральный материал, так и созданный искусственно. В качестве связующих элементов могут выступать различные смолы или деготь. Кроме того, в состав электрода иногда входят и некоторые металлы в виде порошка. Полученный таким образом состав проходит этапы экструзии и формовки, после чего подвергается термообработке. Далее на поверхность изделий наносится медное покрытие. Для этого может применяться электролитический способ или же метод напыления. Такое покрытие выполняет сразу несколько функций:

- повышает качество и скорость работы при снижении расхода подручных средств;
- позволяет продлить срок эксплуатации воздушно-дуговой горелки, так как прекрасно поддерживает горение дуги, а значит, более бережно относится к оборудованию;
- наличие медного покрытия делает более стойким к различным внешним воздействиям и сам электрод. Как известно, уголь – материал очень мягкий, поэтому в процессе транспортировки электродов при неосторожном обращении с упаковками возникает угроза повреждения изделий. Медное покрытие в этом случае выполняет защитную роль.

На отечественном рынке графитовые омедненные электроды представлены несколькими видами:

- круглые – имеют большую область использования и выпускаются в широкой вариативности диаметров (начиная от 3,2 мм и заканчивая 19,0 мм);
- бесконечные (с ниппелем или соединяемые) – самые экономичные электроды с точки зрения расхода подручных материалов. Их применение позволяет полностью избежать ситуации, когда остается небольшой по длине отрезок электрода, который уже не может быть использован и мог бы стать отходами при использовании обычных изделий. Сечение бесконечных электродов всегда круглое, а самые распространенные диаметры – 8, 10, 13, 16, 19 и 25 мм;
- плоские – представлены на рынке двумя разновидностями: квадратные и прямоугольные. Самыми востребованными являются электроды сечением 8x8, 10x5, 15x5, 20x5, 25x5 и 20x6 мм при длине 305 и 355 мм. Кроме того, производители изготавливают на заказ электроды длиной 430 и 510 мм;
- полукруглые – универсальные электроды, область применения которых наиболее широка, так как они объединяют в себе достоинства и возможности круглых и прямоугольных изделий. Такой электрод, например, позволяет вырезать в поверхности металлов канавку любой формы в зависимости от того, какая сторона изделия (округлая или прямоугольная) становится рабочей. Маркировка продукции состоит из трех цифр: первая показывает ширину плоской стороны, вторая – радиус изделия, третья – его длину. Самыми популярными являются полукруглые электроды с маркировкой 13x6,5x355; 10x5x355 и 19x9,5x355.

Кроме того, иностранные производители выпускают и еще один вид омедненных угольных электродов, которые на нашем рынке практически не присутствуют. Это полые электроды, служащие для выполнения строжки, то есть операции, в ходе которой на поверхности металлического изделия формируется канавка в виде буквы U.

**Электроды для наплавки поверхностей слоев с особыми свойствами.** Эти электроды являются наиболее распространенными. Группа электродов для наплавки представлена марками, которые предназначены для ручной наплавки поверхностных слоев изношенных деталей. Такой наплавляемый

слой обладает особыми свойствами (кроме марок электродов предназначенных для наплавки деталей из цветных металлов). Наплавляющие электроды изготавливаются и поставляются в соответствии с требованиями ГОСТов 9466-75 и 10051-75. В некоторых случаях для наплавочных работ используют также сварочные электроды, такие марки, например, которые предназначены для сваривания коррозионностойких, высоколегированных, жаропрочных и жаростойких сталей.

Наплавочные электроды для восстановления поверхностных слоев согласно ГОСТу 10051-75 по твердости и химическому составу наплавляемого металла при нормальной температуре распределяются на 44 типа (например, Э-13Х16Н8М5С5Г46, Э-110Х14В13Ф2, Э-16Г2ХМ). Предприятия изготовители многие марки регламентируют наплавленный металл техническими условиями.

В зависимости от условий работы и принятой системы легирования получаемого наплавляемого металла наплавочные электроды (электроды для наплавки) условно разделяются на 6 следующих групп:

- 1-я группа электродов, обеспечивает получение низколегированного, низкоуглеродистого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к ударным нагрузкам в условиях трения. (ОЗН-300М /11Г3С, ОЗН-400М /15Г4С, НР-70 /Э-30Г2ХМ, ЦНИИН-4 /Э-65Х25Г13Н3);

- 2-я группа электродов, обеспечивает получение низколегированного среднеуглеродистого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к ударным нагрузкам в условиях трения при нормальных и повышенных температурах эксплуатации (до 600-650 гр С). (ЭН-60М /Э-70Х3СМТ, ЦН-14, 13КН/ЛИВТ /Э-80Х4С, ОЗШ-3 /Э-37Х9С2, ОЗИ-3 /Э-90Х4М4ВФ)

- 3-я группа электродов, обеспечивает получение легированного или высоколегированного углеродистого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к ударным нагрузкам в условиях абразивного трения. (ОЗН-6 /90Х4Г2С3Р, ОЗН-7 /75Х5Г4С3РФ, ВСН-6 /Э-110Х14В13Ф2, Т-590 /Э-320Х25С2ГР);

- 4-я группа электродов, обеспечивает получение высоколегированного углеродистого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к большим давлениям и высоким температур эксплуатации (до 650-850 гр С). (ОЗШ-6 /10Х33Н11МЗСГ, УОНИ-13/Н1-БК /Э-09Х31Н8АМ2, ОЗИ-5 /Э-10К18В11М10Х3СФ);

- 5-я группа электродов, обеспечивает получение аустенитного высоколегированного наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к условиям эрозионно-коррозионного изнашивания и трения при повышенных температурах эксплуатации (до 570-600 гр С). (ЦН-6Л /Э-08Х17Н8С6Г);

- 6-я группа электродов, обеспечивает получение высоколегированного дисперсноупрочняемого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к тяжелым температурно-деформационным условиям (до 950-1100 гр С). (ОЗШ-6 /10Х33Н11МЗСГ, ОЗШ-8 /11Х31Н11ГСМЗЮФ).

**Электроды для наплавки, стойкие к абразивному износу.** Наплавка – это метод нанесения слоя расплавленного металла, присадочного, на основной. Электроды для наплавления, стойкие к абразивному воздействию, создают на деталях новый слой с отличными механическими свойствами и характеристиками. За счет их использования можно:

- привести изделие в первоначальный вид;
- вернуть ему геометрические размеры;
- придать новые ценные качества;
- увеличить износостойкость, способность противостоять воздействию температур.

Электроды для наплавки, стойкие к абразивному износу, используются при ремонте самого разного оборудования. Ими могут быть зубчатые барабаны, крестовины, валы, звездочки, оси, отражательные плиты, крестовины стрелочных переходов, шнеки, дробилки. В таком случае рекомендуется применить наплавочные электроды марки ОЗН-400М, ЦНИИН-4, ОЗН-7М.

Выполняя земляные работы, абразивному истиранию подвергаются звенья цепей гусениц, ковши экскаваторов, ножи бульдозеров, наконечники

рыхлителей. Защитить от нагрузок и разрушения эти детали необходимо применяя марку электрода T-590 и T-620, ОК Weartrode 35. Их пруток сделан из углеродистой стали, обмазка содержит ферробор, карбид бора, феррохром, ферротитан.

**Электроды для наплавки, стойкие к ударным нагрузкам.** Электроды для выполнения работ по наплавке, стойкие к ударным нагрузкам, используются при ремонте дробильного оборудования, например, клещей, била, брони и роликов, конусов, корпусов. Применяются такие марки как ОК 13Mn, раньше ее называли ОК 86.08, ОК Weartrode 55, T-590H, T-590 и T-620. С их помощью можно наплавить четыре и больше слоев. Марки T-590 и T-620 наплавляют слой не подверженный образованию трещин при ударе. Они износостойкие, хорошо соединяются с основным металлом, помогают продлить ресурс работы изделий в несколько раз. Электроды типа ОМГ-Н, ЦНИИН-4, ОЗН-7М, ОЗН-400М, ОЗН-300М создают твердый наплавляемый металл. Значение 45-65 HRC будет во втором слое. Для наплавки деталей, сделанных из нержавеющей стали, используется марка ЦН-6Л, ЦН-12М-67. При работе с медью нужен Комсомолец-100. Наплавка бронзой выполняется ОЗБ-2М.

**Твердосплавные электроды для наплавки.** Твердосплавные электроды, используемые для наплавки, помогают восстановить геометрию многих видов деталей. Хорошо подходят марки UTP ВМС, UTP 690 и ESAB ОК 84.42 (сняты с производства) для нелегированной стали. Произвести наплавку изделий, сделанных из твердосплавных сталей, подвергающихся абразивному и ударному воздействию, можно используя HilcoHardmelt 600, UTP PUR 600, ESAB ОК 83.53 (сняты с производства). Они подходят и для восстановления режущего измерительного инструмента, механизмов, работающих при высоком износе. Не подлежит механической обработке слой металла, наплавленный при использовании электрода тубулярного марки HRT 60/ХРТ 60. С твердыми сплавами позволяет успешно работать НВ 61 В/ХБ 61 Б, НВА/ХБА. С их помощью ремонтируются поверхности гусениц, резцы,

ковши. У них высокая твердость 55-63 HRC. Они бывают диаметром 3,2-12 миллиметров.

**Особенности сварки некоторыми марками.** Т-620 – часто применяется для работы в нижнем и наклонном положениях. Выпускается диаметром 4-5 мм. Применяется при работе с быстро изнашиваемыми металлическими и чугунными деталями, работающими и при ударных воздействиях, поэтому их можно назвать электродами для износостойкой наплавки. В некоторых случаях требует прокалики при +180-+200 градусов в течение 2 – 3 часов. Не стоит с его помощью создавать более двух слоев на металле и одного на чугуне. Электрод плавиться под переменным током, постоянным прямой полярности. ЦНИИН-4 – часто применяется для наплавки крестовин, при устранении дефектов литья. Работать им рекомендуется в нижнем положении. Выпускается диаметром 4 миллиметра. Иногда требуется проковка перед сваркой при +160-+200°С в течение часа. ЦС-2 – позволяет производить последующую закалку детали для повышения твердости. Им можно работать переменным и постоянным током, короткой дугой. Допускается создать слой до 4 мм, после чего его можно обработать, удалив 1 – 1,5 мм. Это марка железо-хромистых электродов, литой твердый сплав стеллит, типа сормайт. Им можно ремонтировать закаленные детали. ОЗШ-6 – выпускается диаметром 2,5 – 4 миллиметра. Используется для работы в нижнем положении. Твердость 52 – 50 HRC. Применяется при работе с металлургическим, станочным оборудованием, эксплуатируемым при термической усталости +950 градусов. (Подробнее про наплавочные электроды ОЗШ-6).

**Популярные производители.** Популярностью сегодня пользуются электроды таких производителей как Castolin-Eutectic, LINCOLN ELECTRIC, ESAB, ASKAYNAK. Марки этих фирм можно найти практически в любом магазине.

Концерн ESAB (Эсаб) производит весь спектр сварочных материалов, электроды MMA.LINCOLN ELECTRIC — это очень крупный международный холдинг, который выпускает электроды стойкие к абразивному, ударно-

му воздействию Wearshield 15CrMn, Wearshield MI. Компания разработала большой список продукции. Производитель ASKAYNAK выпускает марки электродов для наплавки AS SD ABRA Nb, AS SD ABRA Cr. Они отлично сопротивляются абразивному воздействию. LINCOLN ELECTRIC имеет 50% этой компании. Украинский производитель ПлазмаТек выпускает, к примеру, Т-590 и Т-620 под брендом Монолит.

**Основные моменты по наплавке электродами.** Наплавляемый слой металла по химическим свойствам, состав электрода, должен практически полностью совпадать с характеристиками стали ремонтируемой детали. Это важно учесть при выборе марки, вида. Принцип действия метода наплавки основан на плавлении электрода под воздействием сварочной дуги, на создании одного или нескольких слоев. Сколько их будет, нужно определить, обратив внимание на свойства детали, в зависимости от предъявляемых требований.

Хорошие качественные характеристики создаваемого сварщиком слоя достигаются в зависимости от глубины проплавления металла. Этот показатель должен быть минимальным. Это важно учесть, нужно достичь насколько возможно меньшее перемешивание наплавляемой стали с основной. Сварщик должен стараться получить минимальное остаточное напряжение и избегать деформации обрабатываемой им детали. Это требование можно выполнить, только соблюдая два предшествующих, правильно выбрав электрод и минимальным провариванием. Важно снизить до установленных нормой значения припуска, допустимые при последующей после сварки обработки деталей, не превышать их. Наплавлять электродом слой металла рекомендуется столько, сколько это требуется, а никак ни больше.

Чтобы исключить коробление, наплавление лучше всего производить отдельными участками, а укладку каждого последующего валика советуется начинать с противоположной стороны по отношению к предыдущему. Только благодаря соблюдению этих простых правил достигается защита наплавляемого металла от разрушающего воздействия газов. Получается плотный, не

имеющий пор, любых видов трещин и посторонних включений слой. Важно учесть и то, что поверхность ремонтируемой детали перед началом выполнения работ по наплавке необходимо тщательно очистить от масла, следов коррозии, ржавчины и любых других видов загрязнений.

### **Выводы по главе 1.**

1. Проведенный анализ технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин показал, что для решения задач данной НКР наиболее оптимальным выбором концентрированных потоков энергии является энергия вибродугового разряда. В свете этого поставленные задачи работы следующие:

- Изучение физических процессов при вибродуговой обработке;
- Доработка экспериментальной установки применительно к задачам исследований;
- Выбор методов исследования и исследовательского оборудования;
- Проведение экспериментов по упрочнению поверхностей различных металлов на вибродуговой установке с применением металлокерамических материалов;
- Исследование физико-механических и структурных параметров поверхностного слоя образцов, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов;
- Определение технико-экономической эффективности вибродугового упрочнения культиваторных лап с многостержневыми электродами.

## **Глава 2. Теоретические аспекты исследований технологий вибродуговой обработки**

### **2.1. Физические процессы при вибродуговой обработке**

Вначале рассмотрим физические процессы при вибродуговой наплавке, а затем по аналогии перейдем к рассмотрению физических процессов при вибродуговом упрочнении.

Наплавку применяют в ремонте и в основном производстве. Помимо восстановления размеров изделия, она служит способом повышения стойкости поверхностей деталей, инструмента и рабочих органов машин против абразивного изнашивания, электрохимической коррозии, эрозии, кавитационного разрушения, окалина образования, термической и контактной усталости. Наплавка как процесс отличается большой гибкостью: непосредственно на рабочей поверхности изделия можно получить сплав с различным сочетанием свойств. Предварительный нагрев деталей перед наплавкой и замедленное их охлаждение после наплавки усложняют наплавочные работы. Поэтому для упрощения технологии целесообразно производить легирование наплавляемого металла малым количеством хрома, марганца и кремния, а не повышением содержания углерода.

Для износостойких сплавов важна твердость. Высокой твердостью обладают карбиды: чем они тверже и чем больше содержится их в покрытии, тем тверже последнее. Наибольшей износостойкостью обладают железные сплавы, легированные Mn, Cr, W, Ti и др., карбиды которых находятся в структуре в виде твердых включений. Карбиды железа при высоких температурах сравнительно легко распадаются, переходя в раствор.

Наплавленный металл в силу возможного наличия в нем газовых пор, шлаковых включений, трещин и непроваров имеет более низкий предел выносливости, чем катаный либо кованный металл того же химического состава и структуры. У наплавленной детали могут появиться дополнительные не-

достатки в виде незаполненных кратеров, структурных изменений основного металла и неблагоприятно действующих остаточных напряжений. При виброконтальной наплавке наиболее слабым местом является начало наплавленного слоя, где образуется кратер с острыми кромками глубиной до 0,6 мм. Сопротивление усталости в зависимости от режима наплавки может снизиться до 25 %. Накатывание оказывает благоприятное упрочняющее действие, но даже в совокупности с подбором оптимальных режимов наплавки оно не позволяет повысить предел выносливости до исходного. Снижение сопротивления усталости должно учитываться при наплавке деталей типа валов.

Вибродуговая наплавка (Рис.2.1) отличается тремя особенностями:

- в цепь нагрузки источника питания включена индуктивность  $L$ ;
- напряжение источника питания недостаточно для поддержания непрерывного дугового разряда;
- электродная проволока совершает колебания относительно детали с частотой 50... 100 Гц и амплитудой 1...3 мм с периодическим касанием наплавленной поверхности.

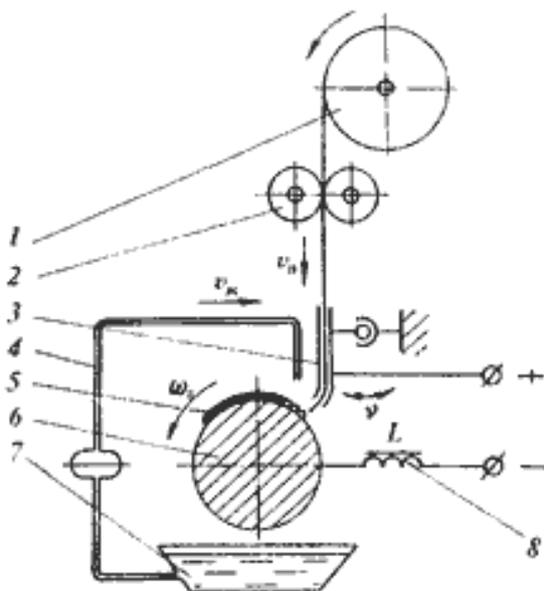


Рисунок 2.1. - Схема вибродуговой наплавки: 1 – кассета для проволоки; 2 – подающие ролики; 3 – качающийся мундштук; 4 – система подачи раствора; 5 – наплавленный слой; 6 – восстанавливаемая деталь; 7 – емкость; 8 – индуктивное сопротивление;  $v_{п}$  и  $v_{ж}$  – скорости подачи проволоки и раствора

соответственно;  $\omega$  – угловая частота вращения детали;  $\nu$  – частота качаний мундштука;  $L$  – индуктивность.

Цикл наплавки (Рис. 2.2) состоит из дугового разряда, короткого замыкания и холостого хода. Введение индуктивности в цепь дуги обеспечивает накопление электрической энергии в индуктивности во время разомкнутого состояния цепи, сдвиг фаз тока и напряжения, поэтому переход тока через нуль происходит при наличии напряжения источника питания и возникновении электродвижущей силы самоиндукции, которая совпадает по направлению с напряжением источника питания. Это обеспечивает повторное возникновение дугового разряда после разрыва сварочной цепи и устойчивое горение дуги.

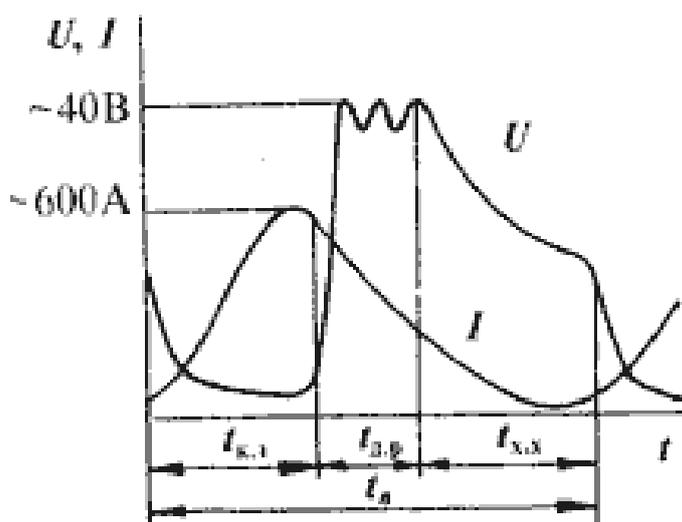


Рисунок 2.2 - Осциллограмма тока  $I$  и напряжения  $U$  при вибродуговой наплавке:  $t_{к.з.}$  – время короткого замыкания;  $t_{д.р.}$  – время дугового разряда;  $t_{х.х.}$  – время холостого хода;  $t$  – текущее время;  $t$  - период

Электрод и деталь оплавляются во время дугового разряда, при этом на конце электрода образуется капля металла. Мелкокапельный перенос металла на деталь происходит преимущественно во время короткого замыкания. Так как длительность существования дуги составляет -20% времени цикла, то провар основного металла неглубокий, с небольшой зоной

термического влияния.

Свойства покрытий при вибродуговой наплавке могут быть улучшены применением: защитных сред (диоксида углерода, флюсов, водяного пара, пены), порошковых проволок, последующей термической обработкой изделий, обкаткой роликами или ультразвуковым упрочнением.

Процесс вибродугового упрочнения от процесса вибродуговой наплавки отличается значительной сложностью, представляя собой совокупность эрозийного, термического и термохимического процессов и контактного переноса материала. При вибродуговом упрочнении осуществляется воздействие на металлические поверхности в газовой среде короткими (10 – 2000 мкс) электрическими разрядами с энергией от сотых долей до десятка и более джоулей и частотой до 1000 Гц. При периодическом, с определённой частотой, контакте электрода (анода) с обрабатываемым изделием (катодом) и его разрыве возникают электрические разряды, создаваемые генератором импульсов. Под действием высокой температуры в зоне разряда (5000 – 11000 °С) происходит следующее: идут процессы преимущественного разрушения материала электрода (анода) и образования вторичных структур в рабочей его части; осуществляется интенсивный перенос продуктов эрозии электрода на деталь (катод); на поверхности обрабатываемого изделия протекают микрометаллургические и плазмохимические процессы; происходит расплавление материала подложки в зоне контакта электродов; частицы материала подложки из расплавленной зоны выбрасываются в окружающую среду; элементы материала электрода (анода) диффундируют в поверхностный слой изделия без существенного нагрева основного материала подложки; поверхность изделия приобретает новый специфичный рельеф; образуется на поверхности изделия измененный слой, включающий белый слой, диффузионную зону и зону термического влияния, при этом изменяются свойства поверхностного слоя; формируется поверхностный слой мелкодисперсного состава, вплоть до наноуровня; происходит изменение размера изделия. Во вновь образованном рельефе отсутствуют протяженные выступы клинооб-

разной в поперечном сечении формы, образованные обработкой резанием, которые заменяются выступами ограниченной длины, по форме близкими к шаровому сегменту, обладающими высокой несущей способностью; рельеф приобретает выпукло-вогнутый характер и его параметры одинаковы во всех направлениях.

Высокие тепловые импульсы на небольших участках поверхности детали вызывают высокий их нагрев и при наличии окружающего холодного металла последующее охлаждение этих участков со скоростью 10 000.,. 100 000 °C/с и, как следствие, сверхскоростную закалку с образованием белого слоя. Под термическим воздействием формируется подслоя. Электрод, контактируя под давлением с упрочняемой поверхностью, переносит металл на нее. Диссоциируемый в разряде и переходящий в атомарное состояние атмосферный азот вступает в соединение с железом и переносимыми на поверхность легирующими элементами. Эти элементы и азот под тепловым воздействием искры диффундируют вглубь материала.

Для упрочняющих электродов применяют твердые сплавы Т15К6, Т30К4 и Т60К6, составляющими которых являются карбиды титана и вольфрама и кобальт, феррохром (80 % Cr, 5 % C), хром-марганец, чистый хром, чистый алюминий, белый чугун, сталь 3 и углеграфит. Графит в качестве электрода цементирует поверхностный слой. Верхний, белый, слой упрочненной поверхности состоит из аустенита и мартенсита, нитридов железа и густо вкрапленных в зерна и расположенных по их границам нитридов и карбидов легирующих элементов. Концентрация легирующих элементов в упрочненном слое снижается вглубь этой поверхности и особенно быстро в подслое.

## **2.2. Особенности потока плазмы в электрической дуге**

Вибродуговой разряд в отличие от обычной электрической дуги имеет циклический характер, связанный с циклом вибрации электрода вибратора вибродуговой установки. Сущность процесса вибродуговой обработки за-

ключается в повторении циклов замыкания и размыкания электрода с поверхностью детали. Электрод и деталь соединены с источником сварочного тока. Каждый цикл вибрации электрода включает в себя четыре последовательных процесса: короткое замыкание, отрыв электрода от детали, электрический разряд, холостой ход. Механизм процесса вибродугового упрочнения поверхностей изделия от механизма процесса воздействия обычной электрической (сварочной) дуги отличается значительной сложностью, представляя собой совокупность эрозионного, термического и термохимического процессов и контактного переноса материала. Тем не менее, в обоих случаях присутствует дуговой разряд и для них присуще общие законы для плазменного состояния вещества. Поэтому, особенности потока плазмы в электрической дуге и вибродуге аналогичны.

При увеличении тока возникает струйное течение плазмы со скоростями, которые значительно превышают скорости, обусловленные естественной конвекцией. Течение плазмы в таких сильноточных дугах направлено обычно от стержневого катода к плоскому аноду и называется **катодной струей**. Газовый поток входит в зону W-дуги в районе катода и уходит в радиальном направлении вблизи анода (Рис. 2.3).

Рассмотрим более наглядно картину течения газа в электрической дуге для случая прямой полярности напряжения на рисунках 2.4 – 2.6.

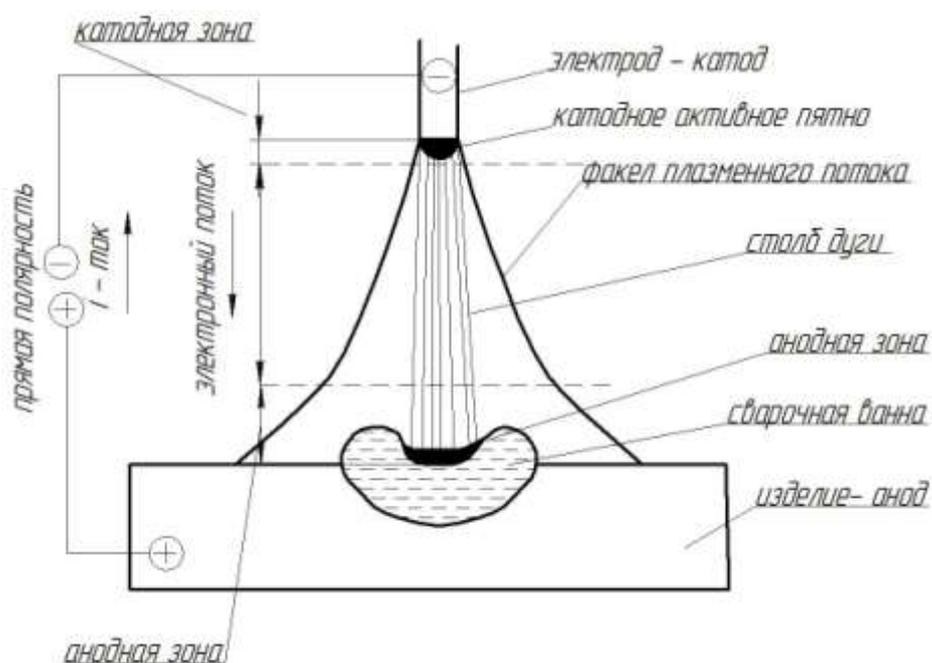


Рисунок 2.3. - Картина электрической дуги при прямой полярности напряжения на электродах с отражением строения и свойств дуги

На рисунке 2.4 представлена картина температурного поля электрической дуги при обратной полярности напряжения. Видно, что вблизи электрода температура 18 тысяч градусов ( $18 \cdot 10^3$ ), а на поверхности подложки на порядок ниже. При вибродуговом упрочнении длина дугового разряда в районе 0,5 мм. Надо полагать, что в этом случае плазменный поток будет воздействовать с температурой порядка 15 тысяч градусов. Исследования показали, что распределение общей теплоты электрической дуги при вибродуговом упрочнении равномерно распределяется в катодной и анодной зонах.

Распределение температуры дуги  
(TIG-сварка в аргоне,  $I=200$  А,  $U=12,1$  В)

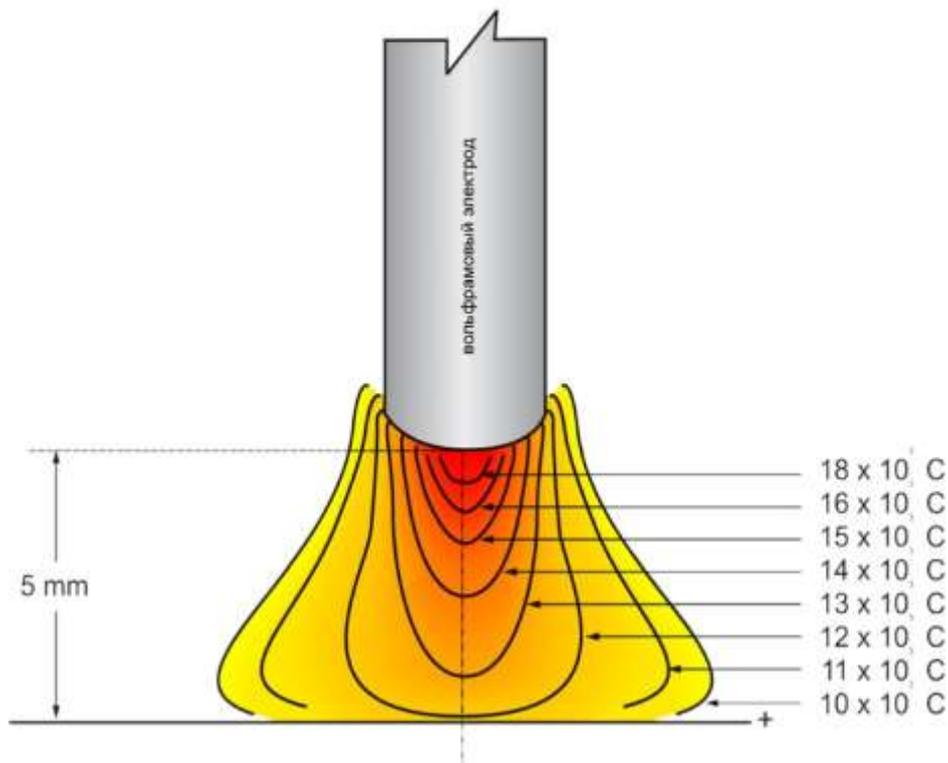


Рисунок 2.4. Картина температурного поля электрической дуги при прямой полярности напряжения на электродах

При напряжениях обратной полярности, т.е. когда электрод является анодом, а деталь (изделие) катодом картина меняется. Сравнение показывает, что при прямой полярности можно добиться более глубокого упрочнения поверхности, чем при обратной полярности. Но при обратной полярности за счет более широкой зоны расплавления можно увеличить производительность технологического процесса упрочнения.

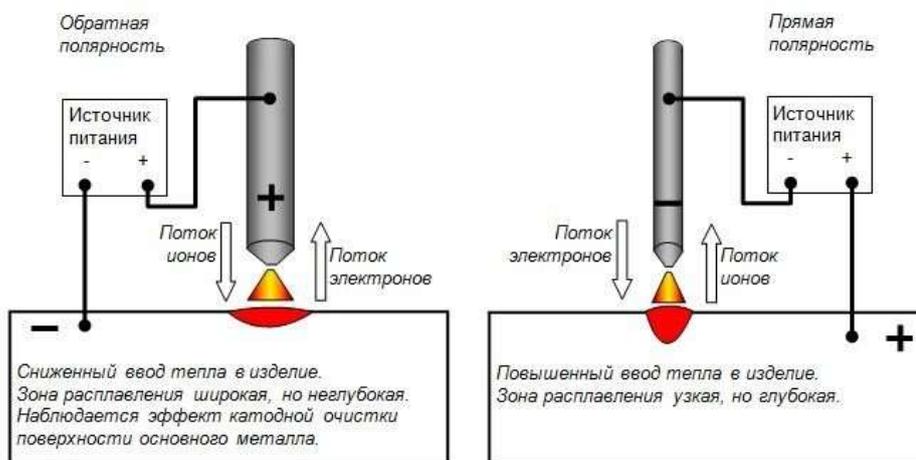


Рисунок 2.5. Сравнительная характеристика электрической дуги при прямой и обратной полярностях напряжения на электродах

## Строение и свойства электрической сварочной дуги

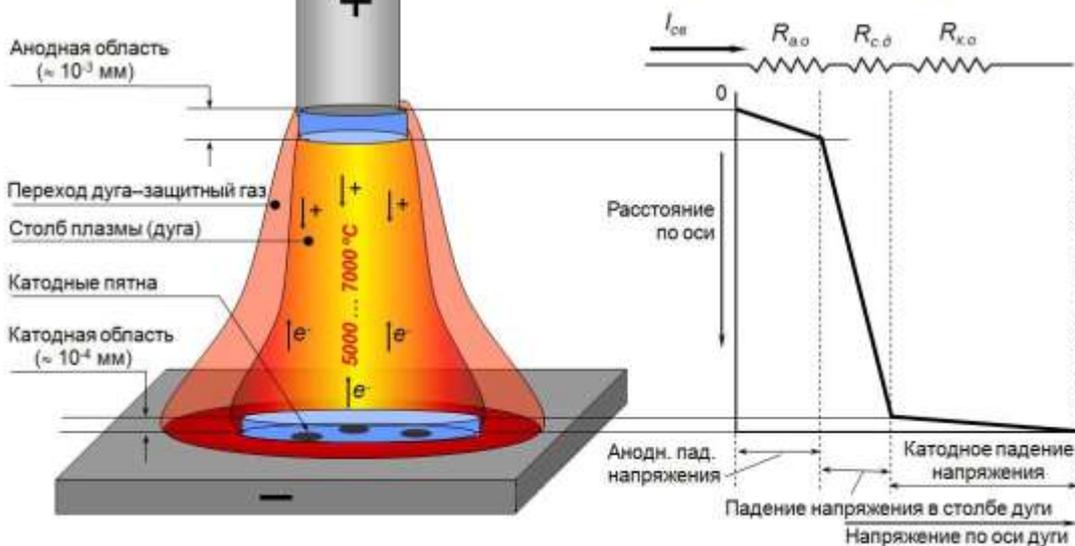


Рисунок 2.6. Картина электрической дуги с отражением ее строения и свойств при обратной полярности напряжения на электродах

### **Глава 3. Экспериментальные установки и исследовательское оборудование**

#### **3.1. Описание экспериментальной установки вибродуговой обработки**

В качестве экспериментальной установки использована установка вибродуговой обработки ВДГУ-2, разработанная Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ФГБНУ ГОСНИТИ). В соответствии с Приказом Федерального агентства научных организаций России (ФАНО России) от 17.05.2016 г. № 230 ФГБНУ ГОСНИТИ присоединён к Федеральному государственному бюджетному научному учреждению «Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства» (ФГБНУ ВИМ). Получившаяся организация переименована в Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ» (ФГБНУ ФНАЦ ВИМ). Установка вибродуговой обработки ВДГУ-2 находится в распоряжении кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ.

##### **3.1.1. Назначение установки вибродуговой обработки**

Установка ВДГУ-2 предназначена для упрочнения дисков, лап культиваторов, лемехов, деталей работающих в условиях абразивного износа, перерабатывающей, строительной, добывающей и другой техники в стационарных и полевых условиях, ручным, механизированным и автоматизированным способом.

**Функциональное назначение установки:** вибродуговое упрочнение наплавкой металлокерамических стальных деталей, работающих в условиях абразивного износа.

**Эксплуатационное назначение установки:** повышение ресурса деталей и увеличение времени между заточками.

Установка ВДГУ-2 изготавливается вида климатического исполнения УХЛ2ИТ2 ПО 10СТ15150 для работы при температуре окружающей среды от -30 до +40С и относительной влажности не более 80%. Установка используется для работы в закрытых помещениях, снабженных приточно-вытяжной вентиляцией и на открытых площадках при отсутствии атмосферных осадков, прямого солнечного излучения, песка и пыли, а так же при условии, что окружающая среда не взрывоопасна, не содержит токопроводящей пыли, агрессивных газов и паров, разрушающих металлы и изоляцию.

### **3.1.2. Устройство и принцип работы**

Минимальные технические и функциональные характеристики установки для вибродугового упрочнения ВДГУ-2:

Критичные параметры:

- Глубина термодиффузионного упрочнения до 1,5 мм;
- Твердость упрочнения до 85 HRC;
- Частота импульсов дугового разряда 100 Гц.

Комплектность:

- Инвертор сварочный типа «Мастер 162» или аналог;
- Блок питания вибратора;
- Электромеханический вибратор ГБФ-2 или аналог;
- Electroды угольные омедненные типа CARBON или аналоги диаметром 8,0 мм.

Характеристики инвертора сварочного:

- Напряжение питающей сети 220В;
- Номинальная частота 50Гц;

- Рабочий ток в диапазоне от 20 до 180А
- Напряжение холостого хода на электродержателе вибратора не более 60 В;
- Потребляемая мощность не более 5кВт;
- Вес не более 8,0 кг.

Характеристики блока питания вибратора:

- Напряжение питающей сети 220 В;
- Номинальная частота 50 Гц;
- Потребляемая мощность не более 50 Вт;
- Выходное напряжение – 30 В, 50 Гц
- Габаритные размеры – 50x140x90 мм ;
- Вес не более 3,0 кг.

Характеристики электромеханического вибратора ГБФ-2:

- Исполнение – ручное
- Вес не более 0,3 кг.

Общий вид установки ВДГУ-2 приведен на рисунке 3.1.



Рисунок 3.1. - Общий вид установки для вибродугового упрочнения ВДГУ-2

Принцип работы вибродуговой установки заключается в повторении циклов замыкания и размыкания электрода с поверхностью детали. Электрод и деталь соединены с источником сварочного тока. Каждый цикл вибрации электрода включает в себя четыре последовательных процесса: короткое замыкание, отрыв электрода от детали, электрический разряд, холостой ход. При вибродуговой обработке материал электрода переносится на деталь, данный процесс называется наращиванием. Выполняется он при одновременном термическом воздействии тока и легировании поверхности детали элементами упрочняющего электрода и азота воздуха.

### **3.1.3. Подготовка установки к работе**

1. Произвести установку силового блока на подготовленное для этого место. Для работы должны быть подготовлены электроды для обработки, упрочняемые детали, необходимые защитные элементы.
2. Проверить затяжку болтов крепления сварочных проводов к силовым разъемам блока.
3. Проверить подключение или подключить корпус силового блока к заземлению. Использование нулевого провода питающей сети в качестве заземления недопустимо.
4. Подключить силовой блок к питающей сети и только после этого включить тумблер питания на лицевой панели силового блока. При этом включается сигнальная лампа красного цвета на лицевой панели силового блока.
5. Включить приточно-вытяжную вентиляцию.
6. Рабочий ток 60-180А в зависимости от технологических требований упрочнения конкретных деталей устанавливается поворотом ручки регулирования рабочего тока на панели инвертора.
7. Процесс упрочнения деталей начинается после установки рабочего тока.

8. По окончании работ следует отключить установку от сети питания, убрать неиспользованные электроды, защитные элементы, произвести уборку рабочего помещения и выключить вентиляцию.

### **3.1.4. Порядок работы**

1. Подготовить заготовку к обработке.

1.1. Очистить заготовку от загрязнений, видимых невооруженным взглядом (частиц земли, пыли, и т.д.).

1.2. Очистить заготовку от ржавчины шлифовальной шкуркой или в камере струйно-абразивной обработкой.

1.3. Надёжно заземлить заготовку.

1.4. Нанести пасту МКП на упрочняемую поверхность.

2. Подготовить установку к работе.

2.1. Установить электрод в оправку вибратора. Конструкция должна предусматривать надёжное крепление оправки к вибратору через резьбовое отверстие на конце электрододержателя. Электрод должен быть надёжно зафиксирован в оправке.

2.2. При вибродуговом упрочнении электродами являются стержни металло-керамических сплавов или омедненные графитовые стержни. Электрод для упрочнения может быть и многостержневым.

2.3. Во избежании поломки оборудования при включении установки вибратор должен находиться в руке оператора.

3. Произвести включение установки клавишным переключателем «Сеть». При этом должна загореться зелёная лампочка. Выбор режима осуществляется переключением клавишного переключателя «Режим».

4. Произвести обработку поверхности изделия согласно технологическому процессу. Обработка поверхности должна проводиться квалифицированным специалистом.

5. По окончании работ отключить установку от источника питания, очистить рабочее место от пыли и продуктов сгорания.

### **3.2. Методы исследования и исследовательское оборудование**

Исследования морфологии поверхности, толщины и элементного состава образцов можно проводить на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) “EVO 50 XVP” фирмы “Zeiss” с элементными анализаторами “INCA Energy-350” и “INCA Wave-500”. При облучении поверхности образца электронами происходит возбуждение характеристического рентгеновского излучения. Энергия возбуждаемого излучения определяется химическим элементом. Анализируя излучение по энергиям с помощью элементных анализаторов “INCA Energy-350” или “INCA Wave-500” и сравнивая полученные спектры с имеющимися эталонами можно определить элементный состав исследуемого образца. Интенсивность измеренных спектров определяется концентрацией того или иного элемента в образце.

Исследования морфологии поверхности образцов проводится в двух режимах: SE и QBSD. В первом режиме изображение поверхности формируется за счет регистрации вторичных электронов, которые формируются при облучении поверхности образца первичным электронным пучком микроскопа. Во втором режиме изображение поверхности формируется за счет регистрации отраженных от поверхности электронов первичного пучка. В данном режиме коэффициент отражения электронов существенно зависит от атомного номера элементов, которые входят в состав образца. Например, в данном режиме будет наблюдаться существенный контраст между областями с высоким содержанием углерода или кислорода и железа.

Исследования кристаллической структуры и фазового состава можно проводить на рентгеновском дифрактометре “Дрон-7” с рентгеновским источником  $\text{CuK}\alpha$  (0.154178 нм). Спектры снимаются в геометрии Брэгга. Межплоскостные расстояния рассчитываются исходя из положений дифракционных максимумов на рентгенограммах по известному соотношению:

$$d = \lambda/2 \sin \theta, \quad (3.1)$$

где  $\lambda$  -длина волны рентгеновского излучения (0,154178 нм),

$\theta$  - угол дифракции.

Такой метод позволяет получить наиболее точную оценку фазового состава материала поверхности исследуемого образца.

## **Глава 4. Экспериментальные исследования влияния вибродугового разряда на физико-механические свойства поверхностного слоя изделия**

### **4.1. Планирование эксперимента и режимы обработки**

Эксперименты по обработке поверхностей образцов вибродуговым разрядом планируется проводить как с одностержневыми, так и многостержневыми электродами. В технологическом процессе обработки предусмотрено и применение упрочняющих порошков. В качестве стержней электродов выбраны: омедненный графитовый пруток диаметром 8 мм, вольфрамово-кобальтовые прутки диаметрами 4 и 3 мм и сварочная проволока Св-12Х13 диаметром 2 мм. Упрочняющим порошком являлся гранулированный активированный уголь диаметром 2 мм и длиной от 2-х до 4-х мм. Образцы для вибродуговой обработки изготовлены из диска сошника сеялки. Материал диска сталь 65 Г. Размер образцов 40x40 мм, толщина 2 мм. Многостержневой электрод представлял собой связку из нескольких стержней по технологическому процессу.

Изначально одними из видов электродов планировалось выбрать электроды для наплавки поверхностей слоев с особыми свойствами, электроды для наплавки, стойкие к абразивному износу, и электроды для наплавки, стойкие к ударным нагрузкам. Наиболее подходящими в нашем случае являлись электроды ОЗН-6 и Т-590, которые предназначены для получения легированного или высоколегированного углеродистого наплавленного металла со свойствами высокой стойкости к ударным нагрузкам в условиях абразивного трения. Однако их приобретение явилось проблематичным, т.к. они по-

ставлялись только через Интернет-магазины и партиями, что экономически было нецелесообразным. Поэтому вместо них использовали сварочную проволоку Св-12Х13, имеющую аналогичные элементы, что и в вышеназванных электродах, но в меньшем количестве. Для сравнения приведем основное содержание легирующих элементов в электродах ОЗН-6 и в сварочной проволоке Св-12Х13.

Таблица 4.1. Химический состав электродов

Химический элемент электрода ОЗН-6	Относительное содержание, %
Углерод	1
Марганец	2,6
Кремний	3,7
Титан	4,4

Таблица 4.2 Химический состав сварочной проволоки

Марка	Химический состав, %							
	С	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	S	P
							Не более	
Св-12Х13	0,09- 0,14	0,30- 0,70	0,30- 0,70	12,0- 14,0	До 0,60	-	0,025	0,03

Из анализа данных таблиц видно, что в обоих случаях в материалах электродов имеются такие элементы, как углерод, марганец и кремний. Однако их процентное содержание в сварочной проволоке Св-12Х13 на порядок меньше, чем в электродах ОЗН-6. Но в данном случае вопрос не в значениях их процентного содержания, а в том, как их присутствие в технологическом процессе влияет на физико-химические и физико-механические свойства поверхностного слоя образца.

Одним из новшеств в данной работе является то, чтобы не только исследовать физико-химические и физико-механические свойства поверхностного слоя образца при воздействии на него вибродуговым разрядом с использованием различных видов электродов, а в том, чтобы в технологическом процессе обработки одновременно присутствовали легирующие элементы различных видов электродов. Для реализации такого процесса электроды изготовились многостержневыми. Каждый стержень имел свои легирующие элементы.

Было изготовлено 9 образцов. В качестве источника тока был применен инвертор на 220 В, 50Гц с выходным напряжением постоянного тока в 60 В. Использовали обратную полярность напряжения: плюс на электроде, минус на детали. Обработка производилась при минимальном токе в 25 А. Вибратор питался от источника с напряжением 30 В, 50 Гц. Частота колебаний электрода составляла 100 Гц. Обработку поверхности образцов производили таким образом, чтобы охватить всю площадь. Для некоторого выравнивания шероховатости поверхности образца после вибродуговой обработки использовали болгарку (угловая шлифовальная машина). Удаление нагара после обработки производили стальной щеткой с применением электродрели.

Применяемые электроды для обработки по образцам:

- № 1 – исходный образец;
- № 2 – обработка с омедненным графитовым электродом;
- № 25 – обработка с омедненным графитовым электродом в среде гранулированного активированного угля;
- № 3 – обработка свольфрам-кобальтовым электродом с диаметром 4 мм;
- № 10 – обработка с вольфрам-кобальтовым электродом с диаметром 4 мм в среде гранулированного активированного угля;
- № 4 – обработка электродом из связки 6 стержней сварочной проволоки Св-12Х13;
- № 5 – обработка электродом из связки омедненного графитового электрода и 6 вольфрам-кобальтовых стержней диаметром 3 мм;

№ 6 – обработка электродом из связки омедненного графитового электрода и 12 стержней сварочной проволоки Св-12Х13 диаметром 2 мм;

№ 11 – обработка электродом из связки омедненного графитового электрода и 6 вольфрам-кобальтовых стержней диаметром 3 мм в среде гранулированного активированного угля.



Рисунок 4.1 Фотография образцов после обработки

#### 4.2. Топография обработанной поверхности вибродуговым разрядом

На рис. 4.2 приведена фотография закрепленных образцов перед тем, как их поместили в камеру растрового электронного микроскопа JSM-6510 LV JOEL. Кроме того приведена нумерация исследованных образцов. На рис. 4.3 приведена микроструктура поверхности исходных образцов, снятых методом СЭМ при различных увеличениях и режимах.

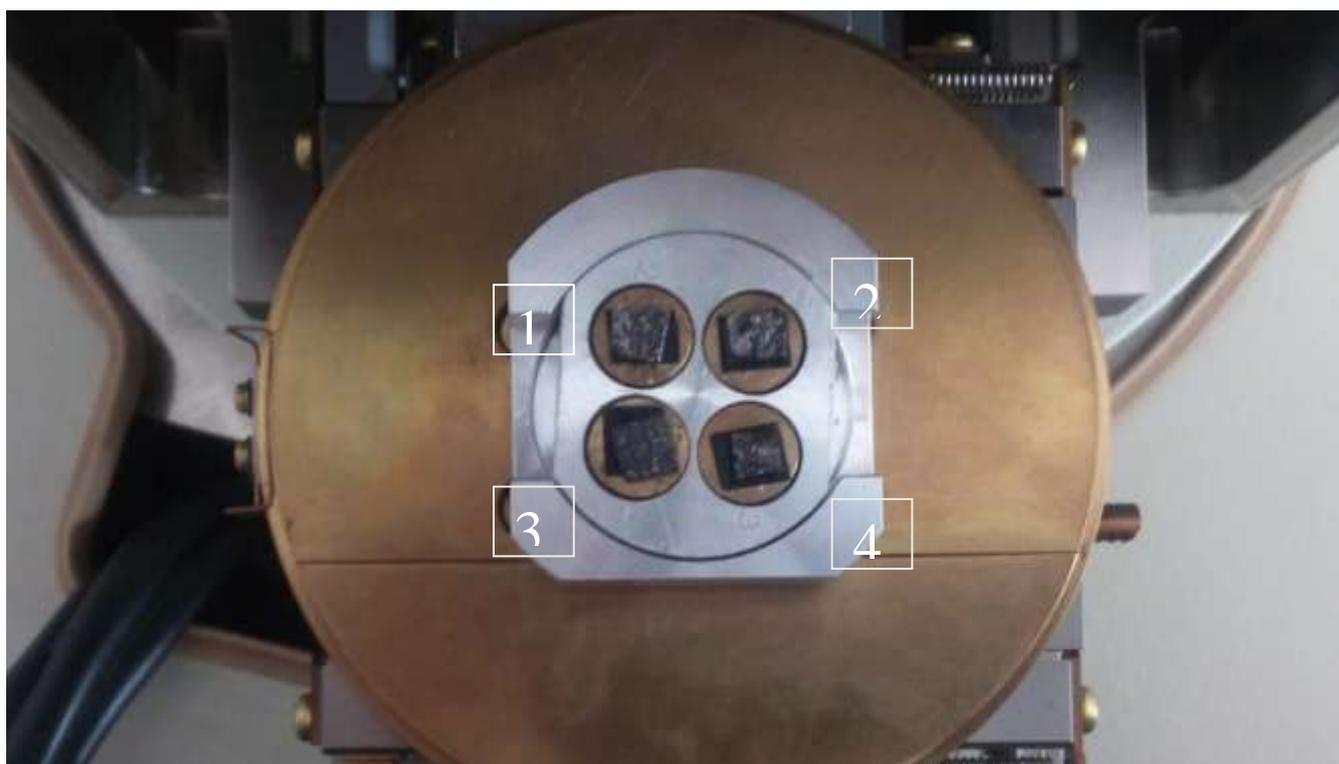


Рисунок 4.2 - Фотография закрепленных образцов перед тем, как их поместили в камеру микроскопа

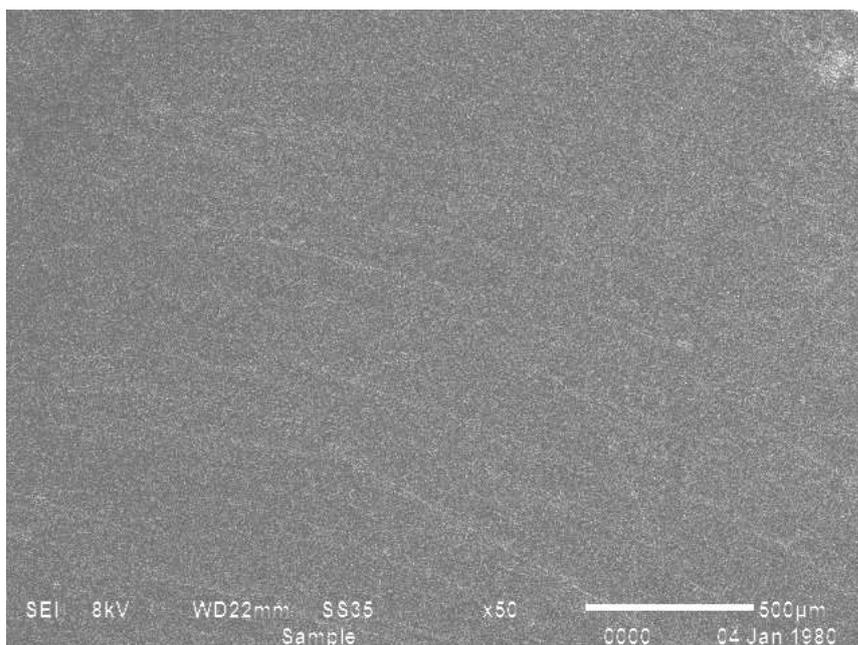


Рисунок 4.3- Морфология поверхности исходного образца (масштаб приведен на фото)

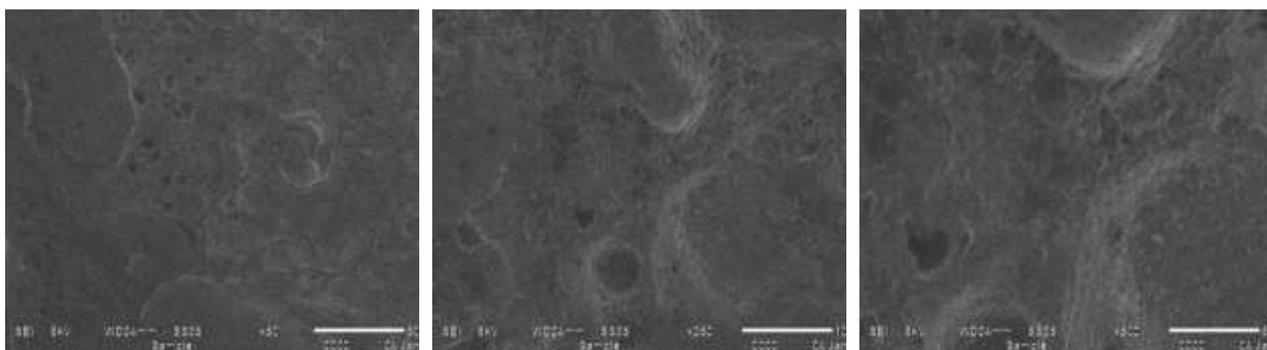


Рисунок 4.4- Морфология поверхности 2 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

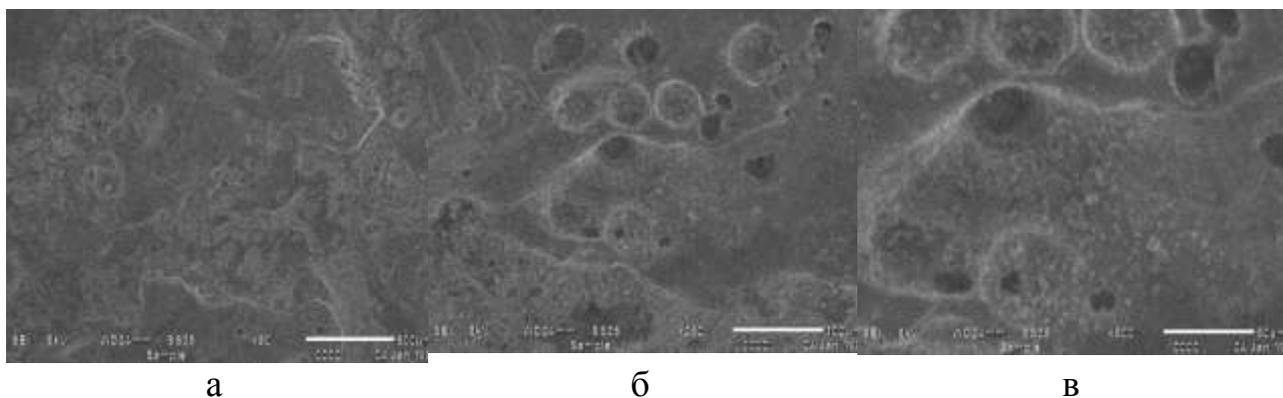


Рисунок 4.5- Морфология поверхности 25 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

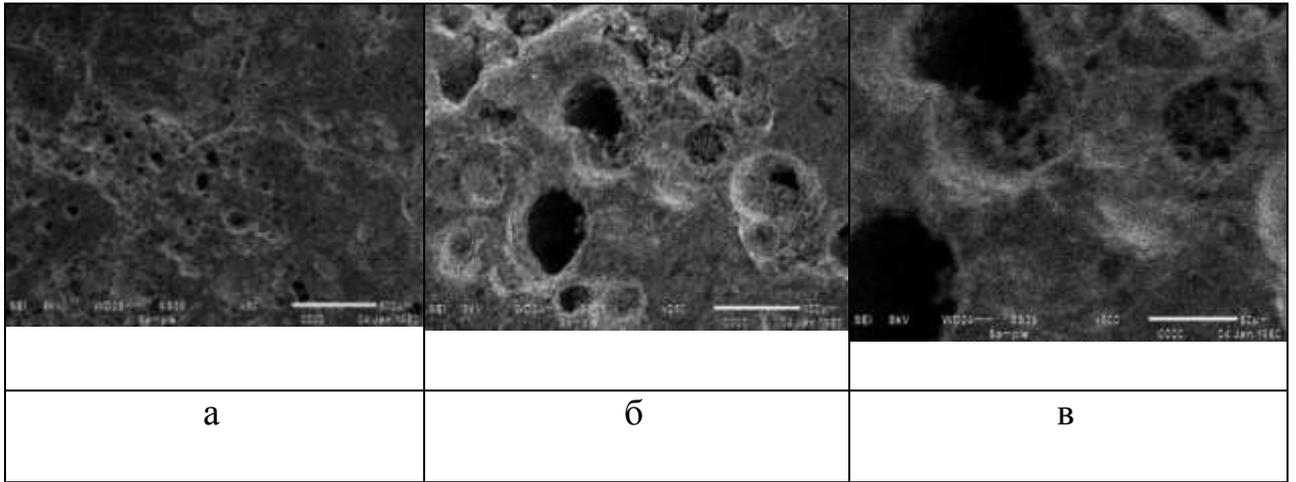


Рисунок 4.6- Морфология поверхности 3 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

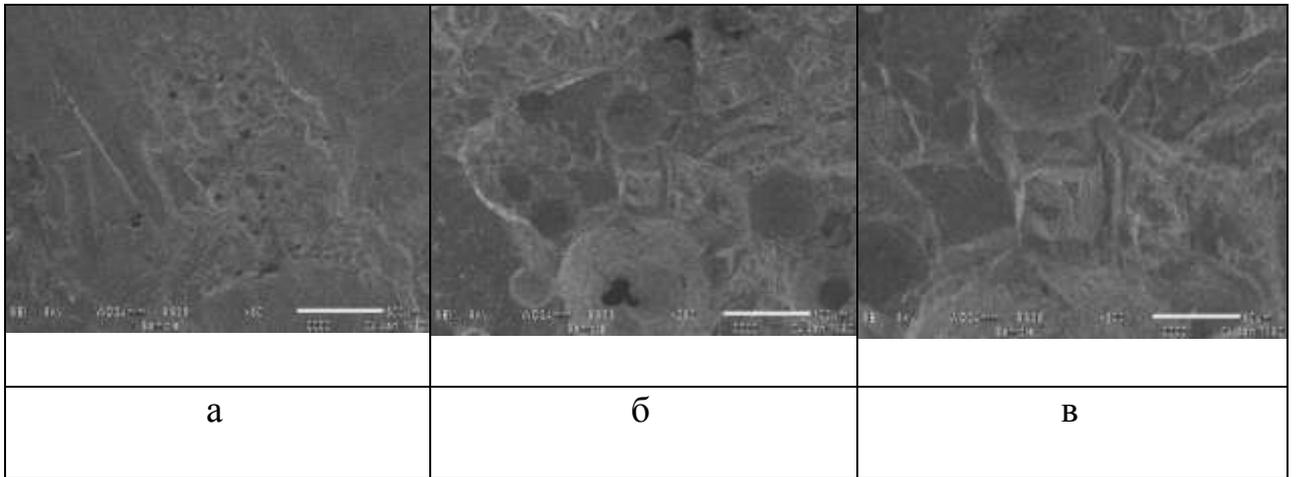


Рисунок 4.7- Морфология поверхности 10 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

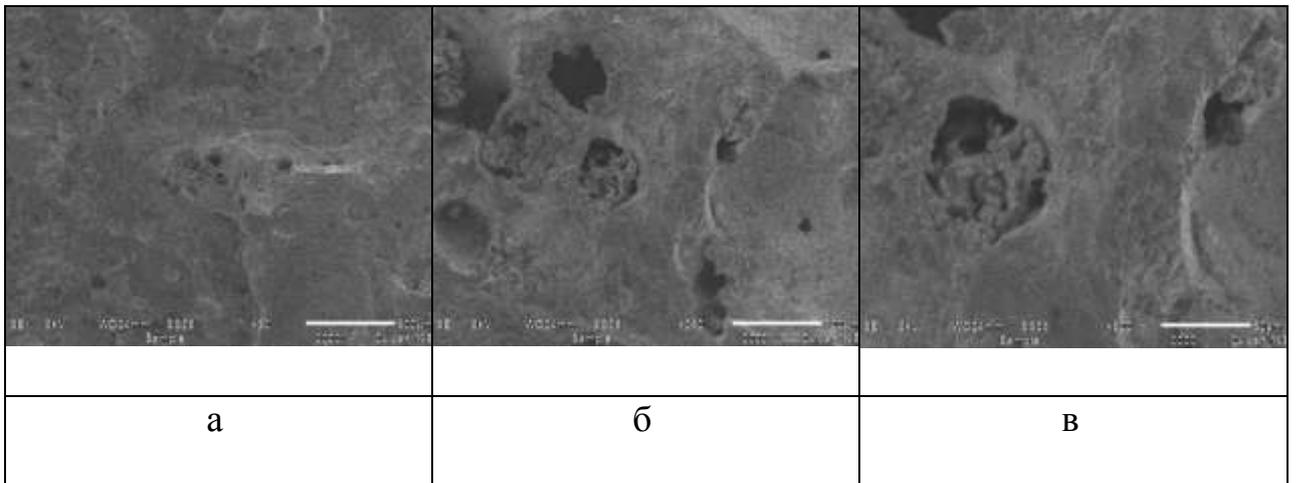


Рисунок 4.8- Морфология поверхности 4 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

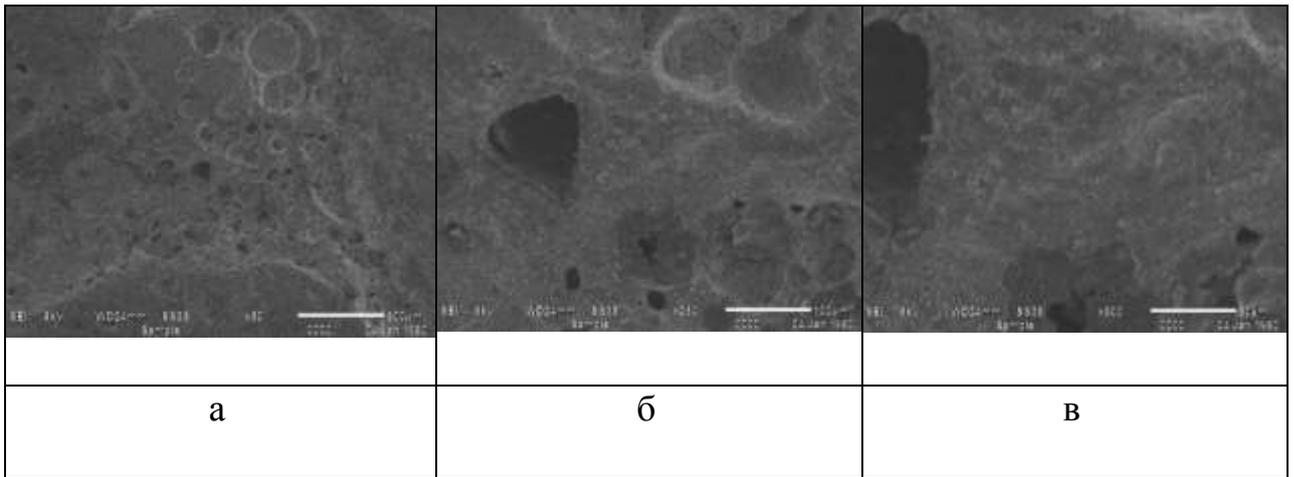


Рисунок 4.9- Морфология поверхности 5 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

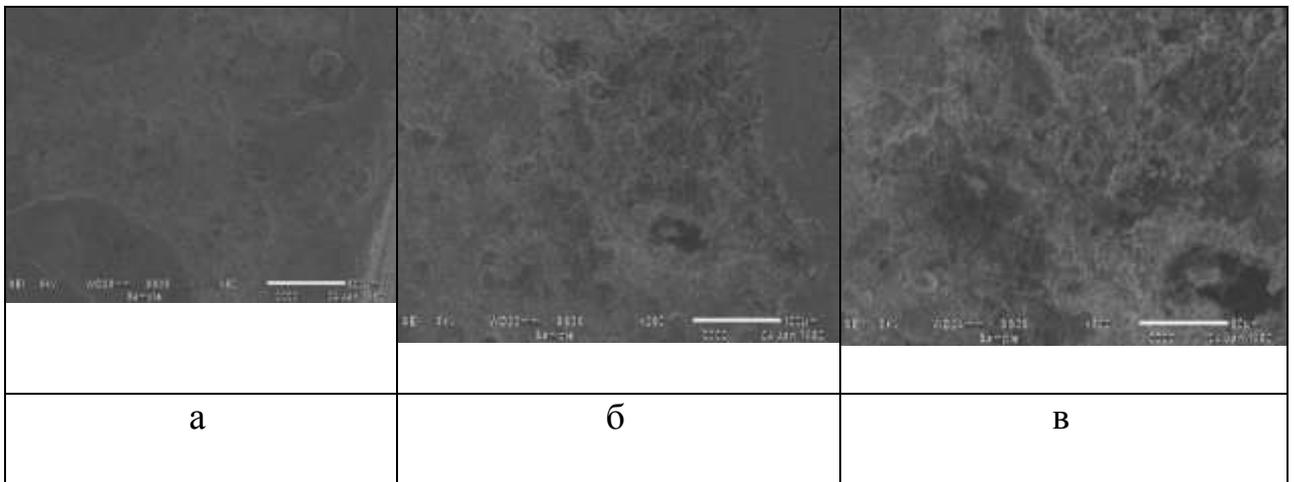


Рисунок 4.10- Морфология поверхности 6 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

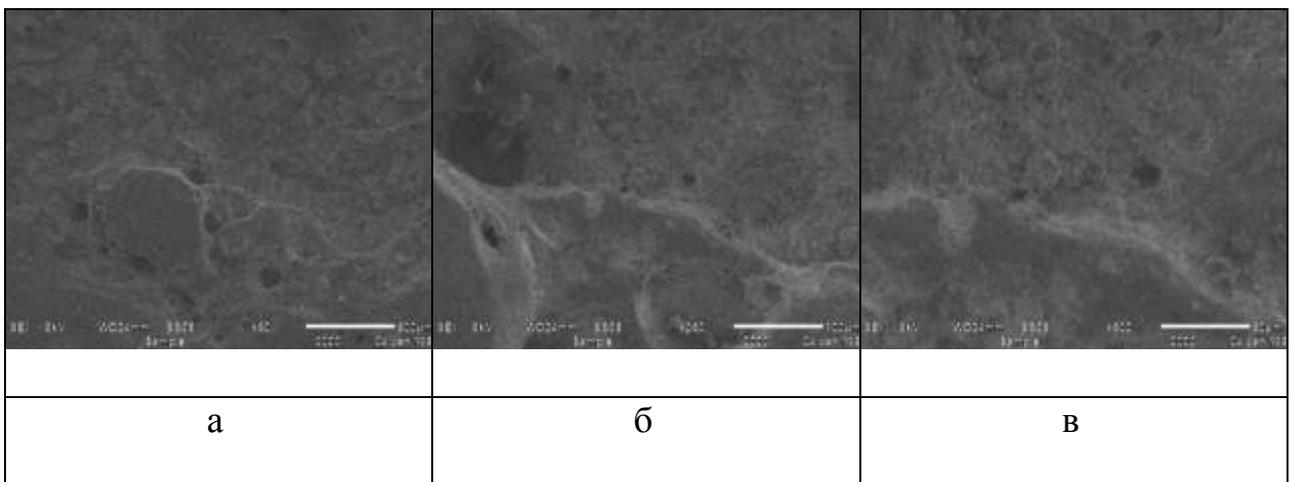


Рисунок 4.11- Морфология поверхности 1 образца, снятая при различных увеличениях (соответствующие масштабы приведены на фото)

### 4.3. Результаты качественного анализа

Качественный анализ проводился на аналитическом приборе рентгенофлуоресцентным спектрометре Спектроскан МАКС GF2E, Кызылординском государственном университете имени Коркыт Ата

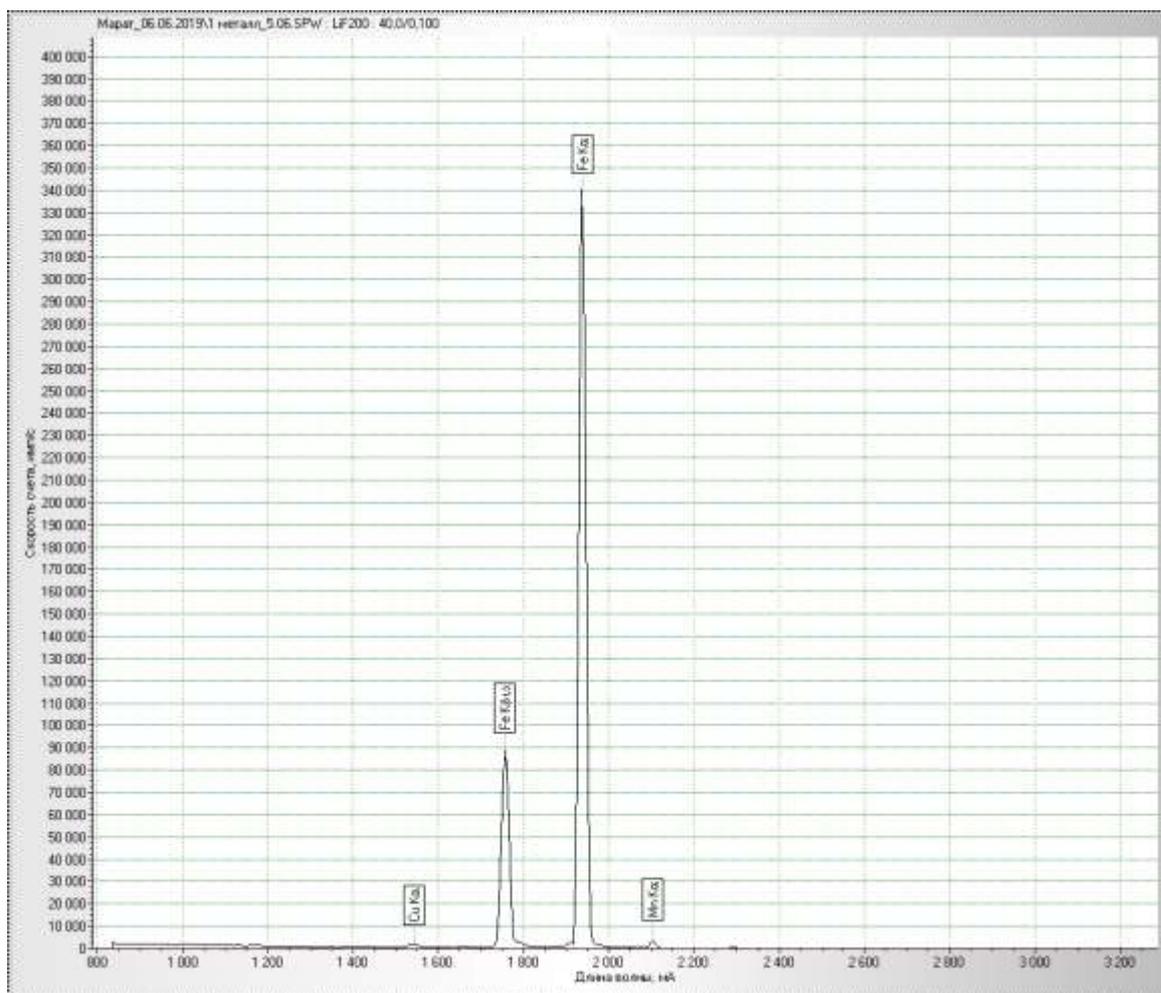


Рисунок 4.12 График исходного образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "1 металл\_5.06"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\1 металл\_5.06.SPW

Элемент Кристалл Режим Отр. Линия Дл. волны Ск. сч. Фон

Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,5	340682	154
				K $\beta_{1,3}$	1757,0	88386	268
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2103,0	3614	90,3
Cu (29)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1544,0	1735	496
				2	K $\alpha$	1541,3	171

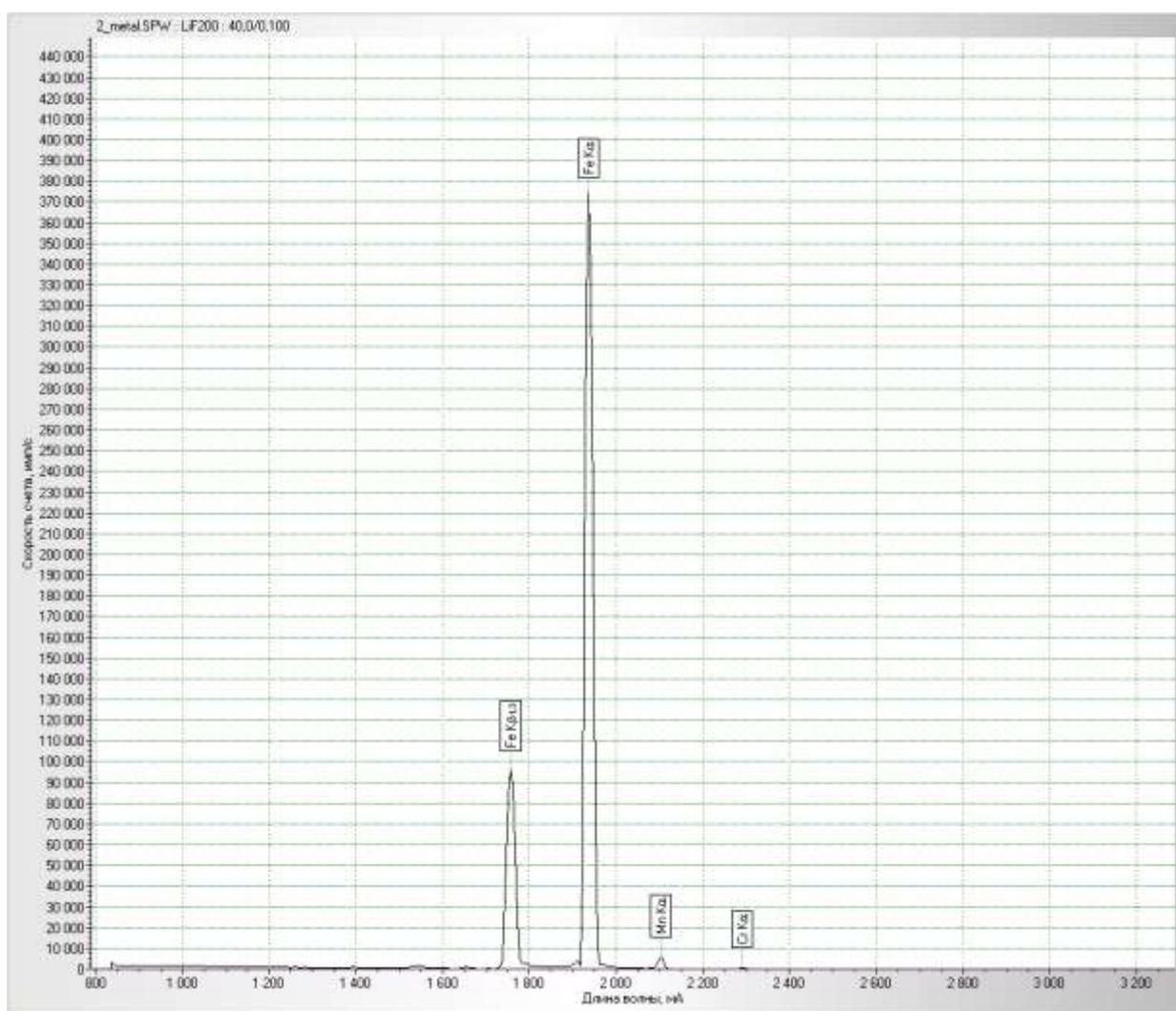


Рисунок 4.13 График 2 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "2\_metal"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\2\_metal.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Ск. сч.	Фон
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,5	374740	1065
				K $\beta_{1,3}$	1758,0	95959	580
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2104,0	5577	212
Cr (24)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2291,5	658	40,0

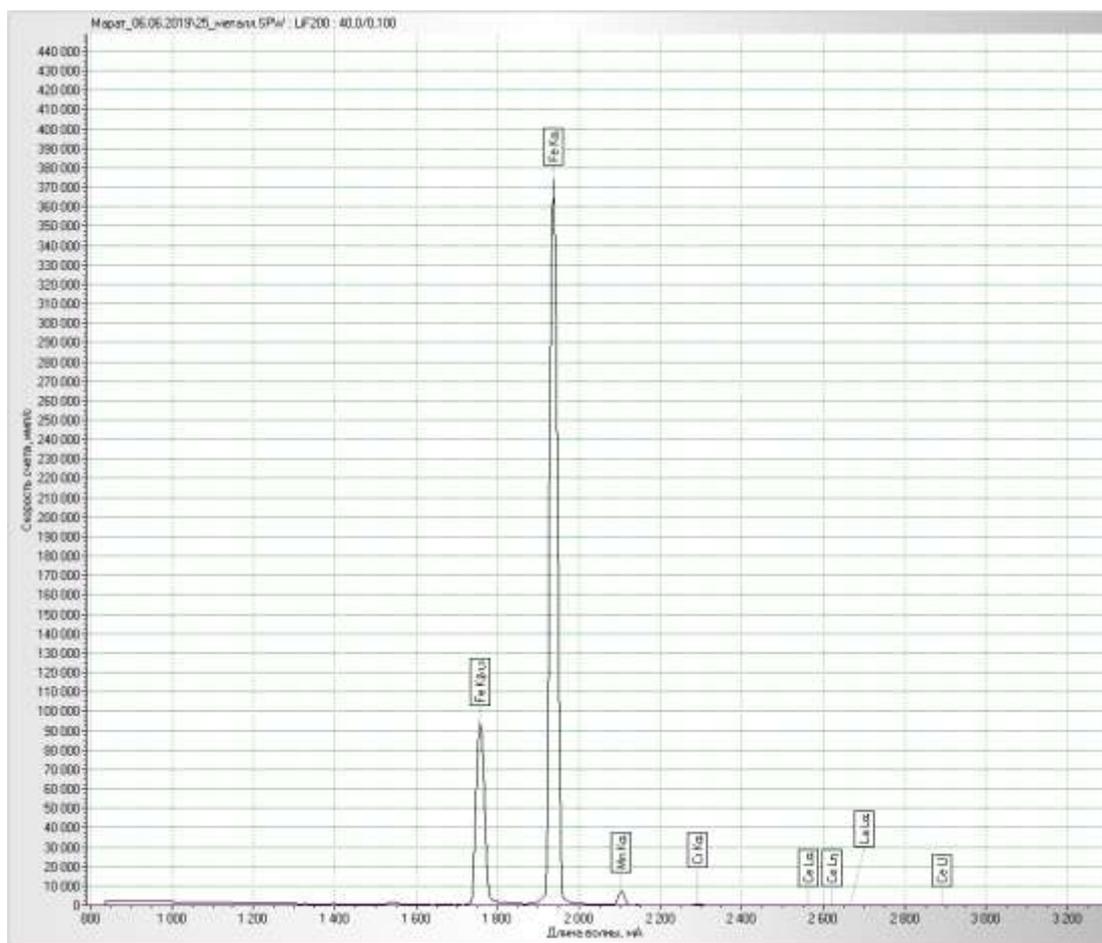


Рисунок 4.14 График 25 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "25\_металл"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\25\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Ск. сч.	Фон
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,5	374343	1000
				K $\beta_{1,3}$	1758,0	94110	493
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2104,0	7535	284
Cr (24)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2289,5	695	87,0
Ce (58)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	2561,5	121	0,2
				L $\eta$	2626,5	58,5	0,2
					2884,5	1,4	0,2
La (57)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	2662,0	69,3	0,2

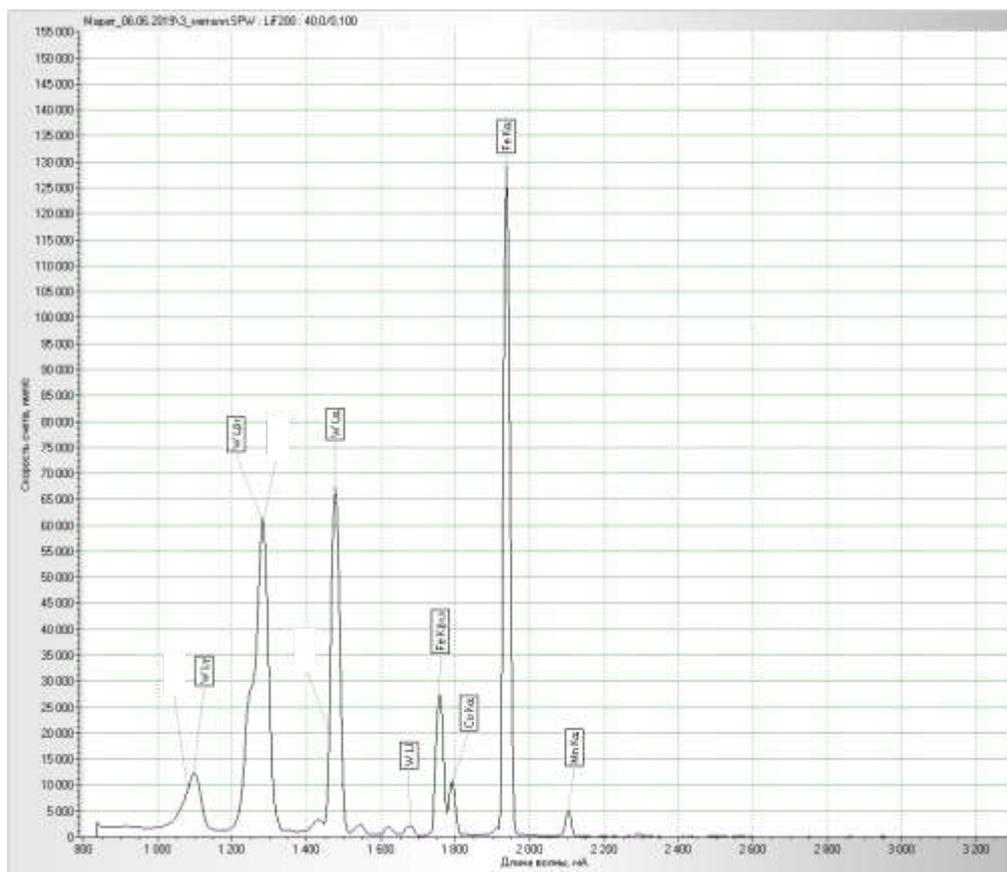


Рисунок 4.15 График 3 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "3\_металл"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\3\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Ск. сч.	Фон	
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,5	129435	322	
				K $\beta_{1,3}$	1758,5	27450	541	
Co (27)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1791,0	10797	493	
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2103,5	5187	190	
W (74)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	1477,5	67270	1063	
				L $\beta_1$	1282,0	61381	1567	
				L $\gamma$	1098,0	12314	2065	
					1678,5	2143	664	
				2	L $\alpha_1$	1476,7	4233	88,3
					L $\beta_1$	1282,0	3848	89,3
					L $\beta_2$	1245,2	1329	89,3
Nb (41)	LiF200	40,0/0,100	2	L $\gamma_1$	1099,2	1028	88,7	
				L $\beta_2$	1264,3	618	89,3	
				K $\alpha$	743,9	711	83,2	

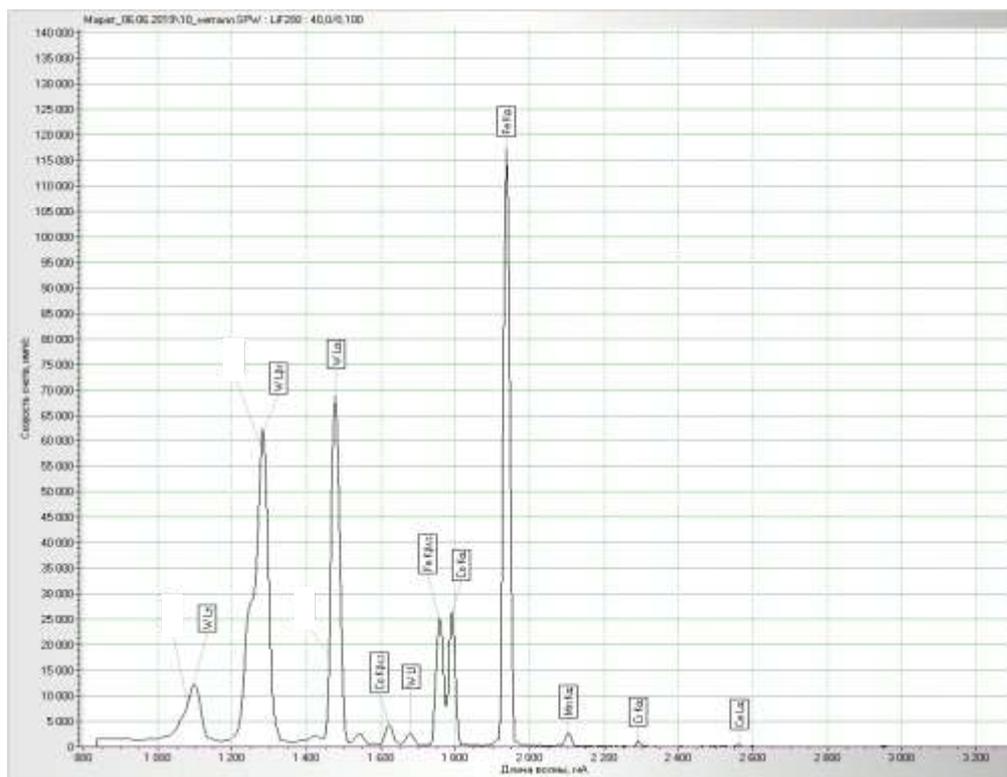


Рисунок 4.16 График 10 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "10\_металл"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\10\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Ск. сч.	Фон		
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1938,5	118190	360		
				K $\beta_{1,3}$	1758,5	24966	425		
Co (27)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1790,0	27204	409		
				K $\beta_{1,3}$	1621,5	4352	601		
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2102,5	2728	82,1		
Cr (24)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2290,0	1079	37,8		
W (74)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	1477,0	68842	1006		
				L $\beta_1$	1282,5	62069	1473		
				L $\gamma$	1098,5	12195	1746		
					1679,5	2520	498		
					2	L $\beta_1$	1282,0	3957	52,1
					L $\alpha_1$	1476,4	3929	37,4	
	L $\beta_2$	1244,7	1655	55,0					
	L $\gamma_1$	1099,9	787	66,1					
Ce (58)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	2559,5	363	0,2		
Nb (41)	LiF200	40,0/0,100	2	K $\alpha$	744,1	746	85,8		

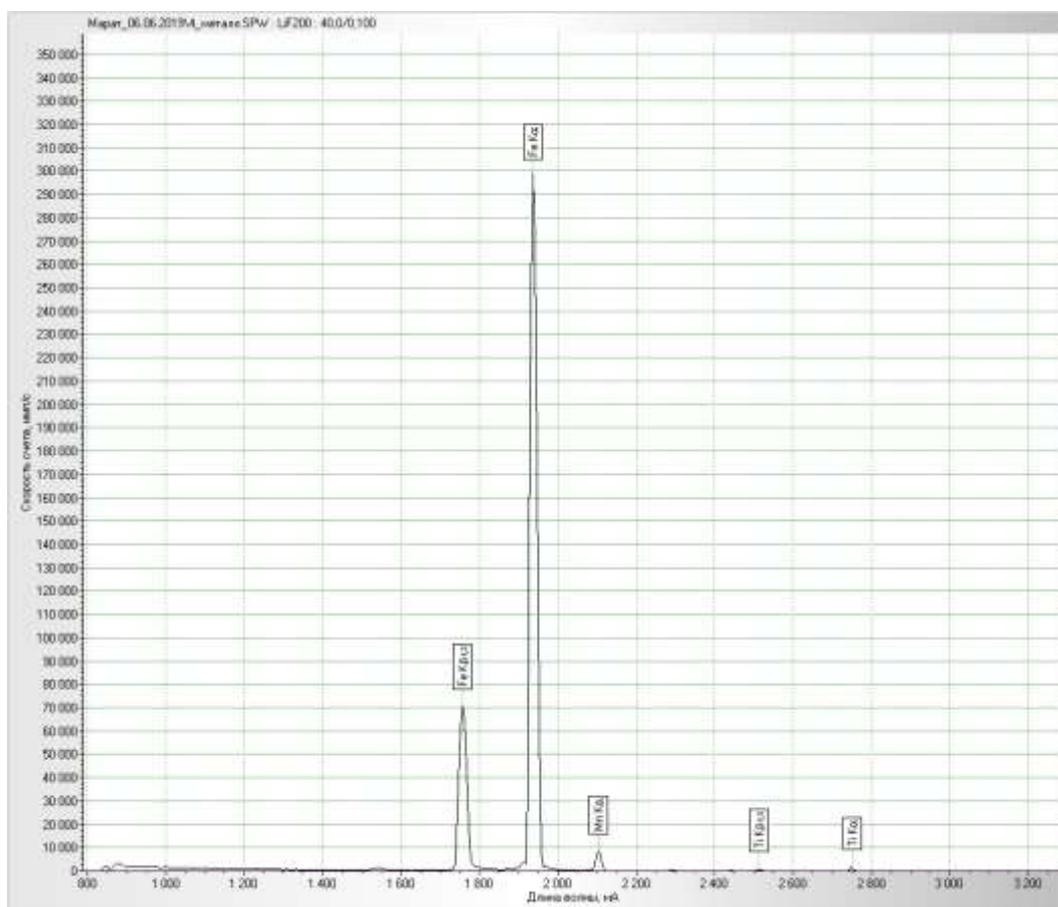


Рисунок 4.17 График 4 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "4\_металл"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\4\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Сч. сч.	Фон
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1938,0	299970	153
				K $\beta_{1,2}$	1758,0	70524	252
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2103,5	8490	93,5
Ti (22)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2749,0	1571	8,8
				K $\beta_{1,2}$	2514,5	518	22,9

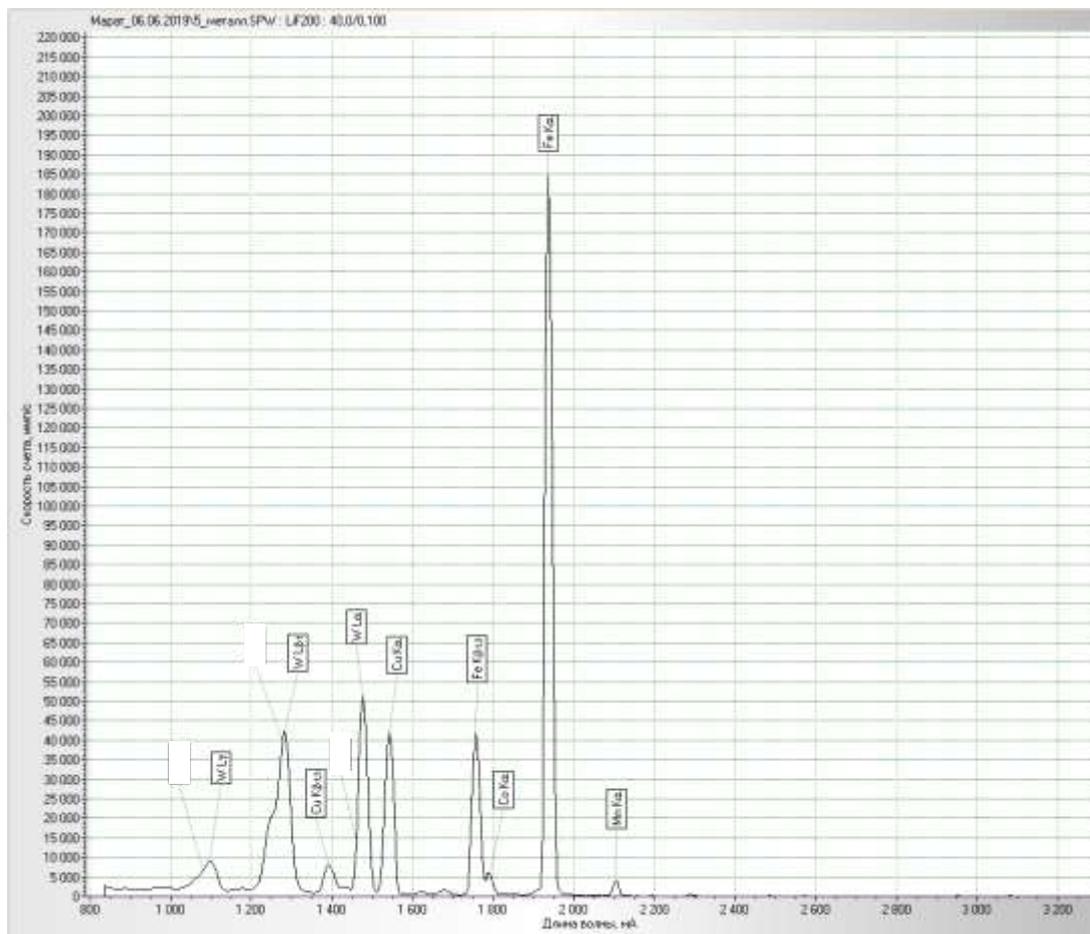


Рисунок 4.18 График 5 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "5\_металл"

С:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\5\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Сч. сч.	Фон
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,0	184472	280
				K $\beta_{1,3}$	1758,0	41613	513
Cu (29)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1542,5	42070	936
				K $\beta_{1,3}$	1392,5	8261	1238
			2	K $\alpha$	1541,6	2317	0,2
				K $\beta_{1,3}$	1391,4	417	0,2
Co (27)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1790,5	6355	460
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2104,5	3922	158
W (74)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	1478,0	51373	1076
				L $\beta_1$	1283,0	42011	1476
				L $\gamma$	1099,0	8871	2025
			2	L $\beta_1$	1281,7	2807	116
				L $\alpha_1$	1476,7	2597	0,2
				L $\beta_2$	1244,9	963	92,7
				L $\gamma_1$	1098,2	543	24,0
Zn (30)	LiF200	40,0/0,100	2	K $\alpha$	1436,1	114	0,2

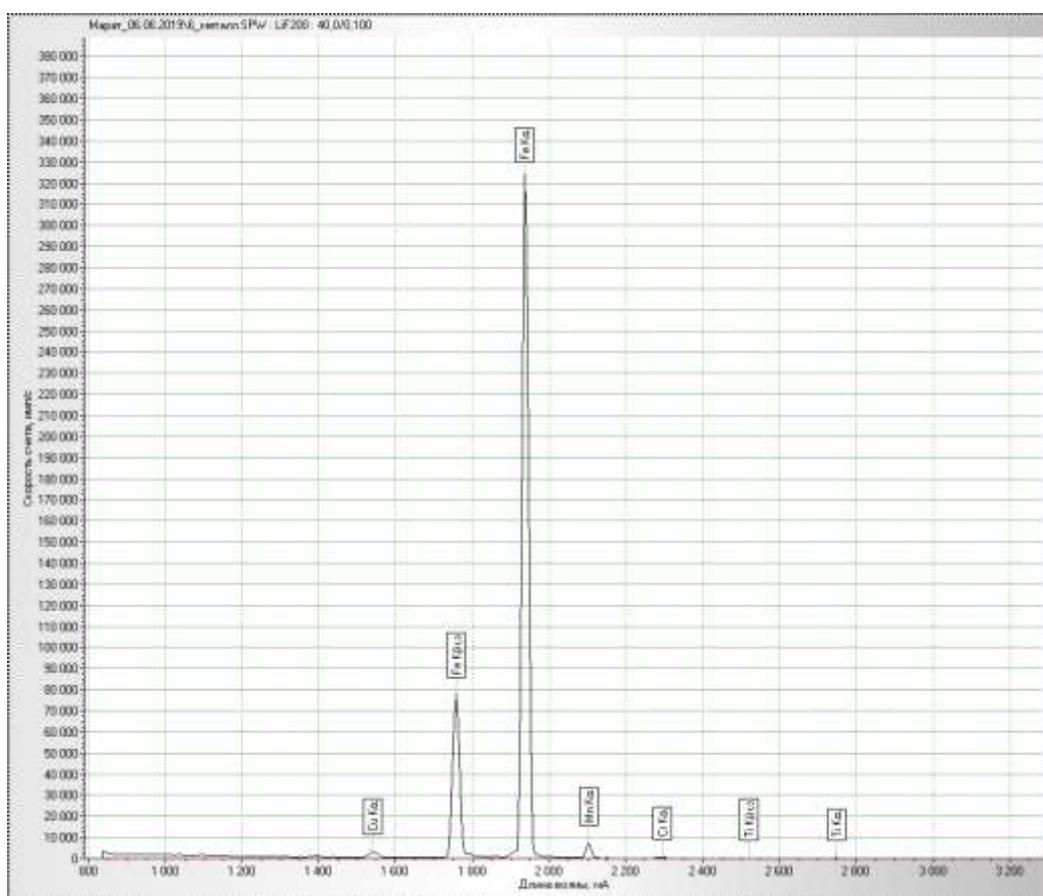


Рисунок 4.19 График 6 образца

## Результаты качественного анализа

Номер аппарата: "6502"

Образец: "6\_металл"

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\6\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Сч. сч.	Фон	
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1937,5	324341	688	
				K $\beta_{1,2}$	1758,0	77953	578	
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2102,5	7350	262	
Ca (29)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1538,5	2966	535	
				2	K $\alpha$	1540,8	246	0,2
					K $\beta_{1,2}$	1391,6	115	0,2
Cr (24)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2293,5	567	55,4	
Ti (22)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2748,0	181	0,2	
				K $\beta_{1,2}$	2522,0	60,4	0,2	

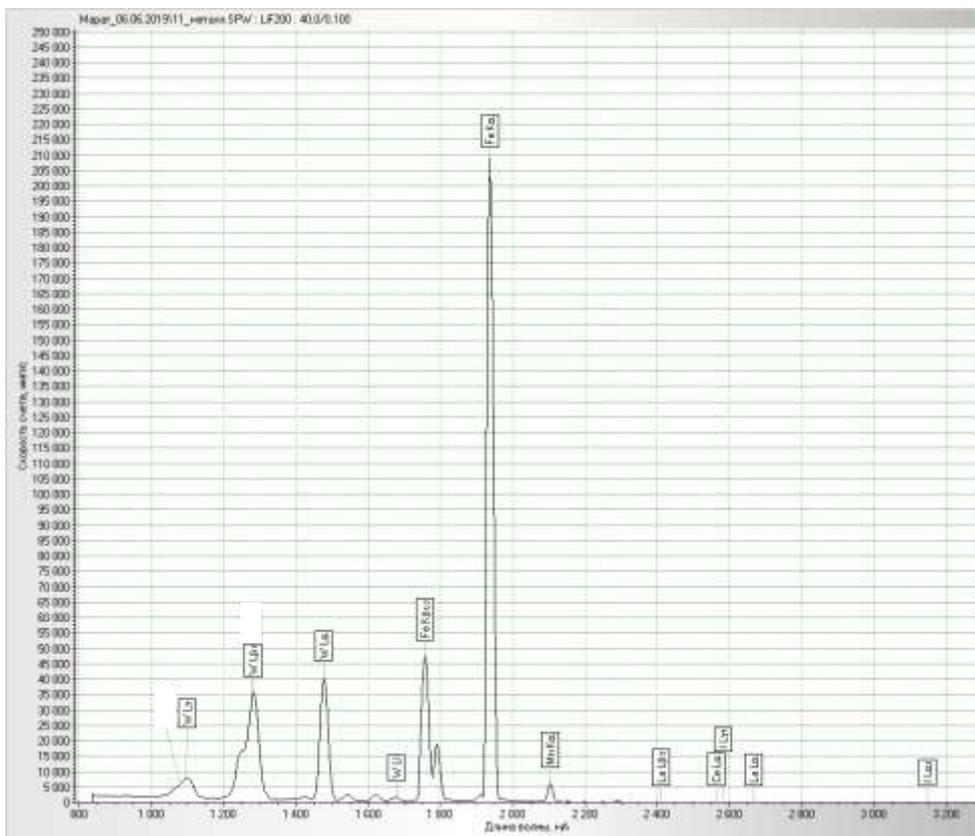


Рисунок 4.20 График 11 образца

## Результаты качественного анализа

**Номер аппарата: "6502"**

**Образец: "11\_металл"**

C:\Program Files\SpG-6502\SPC\Марат\_06.06.2019\11\_металл.SPW

Элемент	Кристалл	Режим	Отр.	Линия	Дл. волны	Ск. сч.	Фон
Fe (26)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	1936,5	208261	556
				K $\beta_{1,3}$	1758,0	47543	470
Mn (25)	LiF200	40,0/0,100	1	K $\alpha$	2103,0	6190	166
W (74)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	1478,5	40191	955
				L $\beta_1$	1283,0	35564	1516
				L $\gamma$	1098,0	7849	2086
			2		1677,5	1579	441
				L $\beta_1$	1282,0	2398	0,2
				L $\alpha_1$	1476,2	1994	0,2
				L $\gamma_1$	1099,5	484	0,2
L $\beta_4$	1302,4	326	0,2				
Ce (58)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\alpha$	2559,5	121	0,2
I (53)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\gamma_1$	2587,5	2,7	0,2
				L $\alpha_1$	3149,5	66,8	0,2
La (57)	LiF200	40,0/0,100	1	L $\beta_3$	2407,0	76,5	0,2
				L $\alpha$	2665,5	60,4	0,2

## Глава 5. ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ РАБОЧИХ ОРГАНОВ СХМ НА ПРИМЕРЕ ЛЕМЕХА

### 5.1. Экономическая эффективность упрочнения лемеха

Экономическая эффективность от внедрения разработанной технологии определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_B = \left( \frac{C_{\text{б.т.}} - C_{\text{обт.}}^{\text{б.т.}}}{P_{\text{б.т.}}} - \frac{C_{\text{н.т.}} - C_{\text{обт.}}^{\text{н.т.}}}{P_{\text{н.т.}}} \right) \cdot P_{\text{н.т.}}, \quad (5.1)$$

где -  $\mathcal{E}_B$  - экономическая эффективность от внедрения разработанной технологии, руб.

$C_{\text{б.т.}}$  и  $C_{\text{обт.}}^{\text{б.т.}}$  - себестоимость восстановления детали по базовой и новой технологиям соответственно, руб.

$P_{\text{б.т.}}$  и  $P_{\text{н.т.}}$  - наработка детали, восстановленной по базовой и новой технологиям соответственно, тыс.км.

$C_{\text{н.т.}}$  и  $C_{\text{обт.}}^{\text{н.т.}}$  - остаточная стоимость после эксплуатации детали, восстановленной по базовой и новой технологиям соответственно, руб.

Себестоимость операций восстановления определяется по формуле:

$$C = Z_3^O + Z_3^D + N_{\text{фот}} + C_{\alpha} + C_{\text{тро}} + C_{\text{э}} + C_{\text{м}} + C_{\text{пр}} + C_{\text{оу}}, \quad (5.2)$$

где -  $Z_3^O$  – оплата труда рабочего руб.;

$Z_3^D$  – дополнительная оплата, руб.;

$N_{\text{фот}}$  – налог с оплаты труда, руб.;

$C_{\alpha}$  – амортизация оборудования, руб.;

$C_{\text{тро}}$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание установки, руб.;

$C_{\text{э}}$  – энергетические затраты, руб.;

$C_m$  – расходы на материалы, руб.;

$C_{пр}$  - прочие затраты, руб.;

$C_{оу}$  – организационные расходы, руб.

Оплата рабочего:

$$З_3^o = \frac{t_y \cdot C_ч}{60}, \text{ руб} \quad (5.3)$$

где -  $t_y$  – операционное время, мин.;

$C_ч$  – ставка оплаты труда.

Штучно-калькуляционное время выполнения операции определяется по формуле:

$$t_y = \frac{(t_o + t_{вп}) \cdot K_{по}}{\eta_n \cdot П_d}, \text{ мин} \quad (5.4)$$

где -  $t_o$  - основное время операции, мин.;

$t_{вп}$  - вспомогательное непрерывное время, мин.;

$K_{по}$  - коэффициент, учитывающий дополнительное и подготовительно-заключительное время ( $K_{по} = 1,20$ );

$\eta_n$  - коэффициент использования установки ( $\eta_n = 0,75 \dots 0,85$ );

$П_d$  - количество деталей, одновременно подвергающихся обработке шт.

Основная и дополнительная оплата труда (ОТ):

$$ОТ = З_3^o + З_3^d, \text{ руб} \quad (5.5)$$

Налог на оплату труда:

$$Н_{от} = K_c \cdot ОТ, \text{ руб} \quad (5.6)$$

где -  $K_c$  – коэффициент социальных отчислений ( $K_c = 0,385$ ).

Таблица 5.1–Оплата труда по операциям

Наименование операции	Время , мин	Ставка, руб	Основная заработная плата за операцию, руб	Дополнительная заработанная плата, руб	Налоговые отчисления, руб

Шлифовальная	15	26,4	15,18	4,55	7,59
Упрочнение	45	47	15,6	16,2	11,4
Притирка	40	27,7	4,84	1,45	2,42

Амортизация:

$$C_a = \frac{B \cdot a}{100 \cdot A}, \quad (5.7)$$

где - B - стоимость оборудования, руб.;

a – амортизационные затраты.

A - годовой объем ремонта, шт. (A=350 шт.)

Затраты на ремонт и техническое обслуживание установки составляют 3,0% от ее стоимости:

$$C_{\text{тпо}} = \frac{B \cdot 0,03}{A}. \quad (5.8)$$

Энергетические расходы:

$$C_3 = \frac{\Pi_3}{A} \cdot \frac{P \cdot \Phi_d \cdot K_b \cdot K_p}{\eta}, \quad (5.9)$$

где - P - мощность оборудования, кВт;

$\Phi_d$  – фонд времени оборудования, ч;

$K_b$  - коэффициент загрузки оборудования ( $K_b=0,5...0,75$ );

$K_p$  - коэффициент загрузки по мощности ( $K_p=0,5...0,8$ );

$\eta$  - средний коэффициент полезного действия. Принимается по паспорту ( $\eta=0,75...0,85$ );

$\Pi_3$  - стоимость 1 кВт/ч электроэнергии, руб. ( $\Pi_3=4,5$  руб.)

Таблица 5.2–Эксплуатационные затраты

Наименование операции	Балансовая стоимость установки, руб.	Амортизационные отчисления, руб.	Затраты на ремонт и ТО установки, руб.	Затраты на силовую энергию, руб/час.
-----------------------	--------------------------------------	----------------------------------	--	--------------------------------------

Шлифовальная	75000	12,69	8,65	19,30
Наплавка твердых сплавов	500000	35,7	65	94,6
Притирка	21400	3,62	2,46	17,23

Оплата материалов:

$$C_M = \sum_{i=1}^{\lambda} g_i \cdot C_i, \quad (5.10)$$

где -  $\lambda$  - количество наименований материалов, используемых при операции восстановления;

$g_i$  - норма расхода  $i$ -ого материала, кг;

$C_i$  - цена 1 кг  $i$ -ого материала, руб.

Нормативный расход материалов:

$$g_i = 0,01 \cdot S \cdot h \cdot \gamma \cdot K, \quad \text{кг} \quad (5.11)$$

Где -  $S$  — площадь упрочняемой поверхности детали,  $\text{дм}^2$ ;

$h$  - толщина покрытия с учётом припуска на обработку, мм;

$\gamma$  - плотность материала,  $\text{г/см}^3$  ( $\gamma = 8,9 \text{ г/см}^3$ );

$K$  -коэффициент, учитывающий неизбежные потери материала( $K=1,4$ ).

Полученные результаты сводим в таблицу 5.3.

Таблица 5.3—Стоимость ремонтных материалов

Наименование операции	$S, \text{см}^2$	$h, \text{мкм}$	$G, \text{кг}$	$C, \text{руб.}$
Наплавка твердых сплавов	25,43	2	0,2	143

Цеховые затраты:

$$C_{\text{пр}} = 0,05 \cdot (\Phi OT + N_{\Phi OT} + C_a + C_{\text{тр}} + C_3 + C_M). \quad (5.12)$$

Управленческие расходы:

$$C_{\text{оу}} = \frac{200 \cdot \Phi OT}{100}, \quad \text{руб.} \quad (5.13)$$

Себестоимость восстановления по базовой технологии будет равна:

$$C_{б.т.} = C_{шлиф} + C_{друг.техн} + C_{притирка}, \text{ руб.} \quad (5.14)$$

Себестоимость восстановления по разработанной технологии будет равна:

$$C_{н.т.} = C_{шлиф} + C_{нап.твер.слав} + C_{притирка} + K, \text{ руб.} \quad (5.15)$$

где - K - удельные капитальные вложения, связанные с приобретением нового оборудования.

$$K = \frac{C_k}{A}, \text{ руб} \quad (5.16)$$

где -  $C_k$  - сумма капитальных вложений.

Сумма капитальных вложений, связанных с приобретением нового оборудования определяются по формуле:

$$C_k = \sum_1^i (C_o + \mu_n + T_d), \text{ руб} \quad (5.17)$$

где  $C_o$  - стоимость приобретения оборудования;

$\mu_n = (0,2 \dots 0,25) \cdot C_o$  - затраты на монтаж и наладку оборудования;

$T_d = (0,1 \dots 0,25) \cdot C_o$  - затраты по доставке.

Остаточную стоимость детали определяют по цене металлолома:

$$C_{ост.}^{б.т.} = C_{ост.}^{н.т.} = C_{л} \cdot M, \text{ руб} \quad (5.18)$$

где  $C_{л}$  - цена 1 кг металлолома, руб. ( $C_{л} = 31$  руб.);

M - масса изношенной детали, кг ( $M = 0,175$  кг).

$$C_{ост.}^{б.т.} = C_{ост.}^{н.т.} = 31 \cdot 0,175 = 4,42 \text{ руб}$$

Экономическая эффективность от внедрения разработанной технологии при программе ремонта 350 шт. составит:

$$\Delta_B = \left( \frac{66337 - 5,42}{100} - \frac{47665,2 - 5,42}{100} \right) \cdot 100 = 18712,22 \text{ тыс.руб.}$$

Таблица 5.4 – Показатели технико-экономической эффективности использования новой технологии

Показатели	Единица измерения	Значение	
		базовый вариант	новый вариант
Годовой объем восстанавливаемых деталей	шт.	300	350

Дополнительные капитальные вложения, связанные с приобретением нового оборудования	руб.		24000
Удельные капитальные вложения для восстановления деталей	руб.	5018	3159
Себестоимость восстановления детали	руб.	663,72	476,6
Наработка	мото/час	150	150
Сравнительный экономический эффект внедрения новой технологии восстановления деталей	руб.		18712,22

Экономические расчеты показали, что использование предлагаемой технологии при изготовлении и восстановлении рабочих органов машин, позволит повысить эффективность эксплуатации почвообрабатывающих машин в целом.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. В главе 1 НКР проведен обзор технологий поверхностного упрочнения деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин. Рассмотрены традиционные технологии упрочнения поверхностей деталей и рабочих органов сельскохозяйственных машин. Показано, что на сегодня наиболее перспективными технологиями являются технологии упрочнения поверхностей изделий концентрированными потоками энергий. Одной из них для повышения ресурса работы многих рабочих органов сельскохозяйственных машин, взаимодействующих с обрабатываемым материалом и видоизме-

няющих его, является технология упрочнения методом вибродуговой обработки. Рассмотрена сущность метода вибродугового упрочнения. Обращено внимание на то, что существенные результаты обработки можно получить с применением твердосплавных электродов и металлокерамических порошков.

2. Глава 2 посвящена теоретическим аспектам исследований технологий вибродуговой обработки. Рассмотрены физические процессы при вибродуговой обработке и особенности потока плазмы в электрической дуге. Показано, что вибродуговой разряд в отличие от обычной электрической дуги имеет циклический характер, связанный с циклом вибрации электрода вибратора вибродуговой установки. Сущность процесса вибродуговой обработки заключается в повторении циклов замыкания и размыкания электрода с поверхностью детали. Особенностью потока плазмы в электрической дуге является возможность изменения его схемы течения за счет, так называемых, прямой и обратной полярности напряжения. Сравнение показывает, что при прямой полярности можно добиться более глубокого упрочнения поверхности, чем при обратной полярности. Но при обратной полярности за счет более широкой зоны расплавления можно увеличить производительность технологического процесса упрочнения.

3. В главе 3 описаны экспериментальные установки и исследовательское оборудование. Рассмотрены назначение установки вибродуговой обработки, устройство и принцип работы, подготовка установки к работе и порядок работы.

В качестве экспериментальной установки использована установка вибродуговой обработки ВДГУ-2, разработанная Федеральным государственным бюджетным научным учреждением «Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка» (ФГБНУ ГОСНИТИ). Установка вибродуговой обработки ВДГУ-2 находится в распоряжении кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Института механизации и технического сервиса Казанского ГАУ.

Исследование морфологии поверхности, толщины и элементного состава образцов предложено проводить на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) “EVO 50 XVP” фирмы “Zeiss” с элементными анализаторами “INCA Energy-350” и “INCA Wave-500”. Излучение по энергиям с помощью элементных анализаторов “INCA Energy-350” или “INCA Wave-500” позволяет сравнивая полученные спектры с имеющимися эталонами определить элементный состав исследуемого образца. Интенсивность измеренных спектров определяется концентрацией того или иного элемента в образце.

Для исследования параметров износостойкости деталей машин и механизмов сельскохозяйственной техники наиболее интересным является микротвердомер КМТ-1. Он предназначен для измерения микротвердости различных металлов и сплавов выдавливанием алмазных наконечников. Автоматизированно обрабатывает результаты контроля и выводит их на ПК.

4. В четвертой главе произведено планирование эксперимента и выбраны режимы обработки. Эксперименты по обработке поверхностей образцов вибродуговым разрядом проводились как с одностержневыми, так и многостержневыми электродами. В технологическом процессе обработки было предусмотрено и применение упрочняющих порошков. В качестве стержней электродов выбраны: омедненный графитовый пруток диаметром 8 мм, вольфрамово-кобальтовые прутки диаметрами 4 и 3 мм и сварочная проволока Св-12Х13 диаметром 2 мм. Упрочняющим порошком являлся гранулированный активированный уголь диаметром 2 мм и длиной от 2-х до 4-х мм. Образцы для вибродуговой обработки изготовлены из диска сошника сеялки. Материал диска сталь 65 Г. Размер образцов 40х40 мм, толщина 2 мм. Многостержневой электрод представлял собой связку из нескольких стержней по технологическому процессу.

Одним из новшеств в данной работе являлось то, чтобы не только исследовать физико-химические и физико-механические свойства поверхностного слоя образца при воздействии на него вибродуговым разрядом с использованием различных видов электродов, но и то, что в технологическом про-

цессе обработки одновременно присутствовали легирующие элементы различных видов электродов. Для реализации такого процесса электроды изготавливались многостержневыми. Каждый стержень имел свои легирующие элементы. Исследована топография обработанной поверхности вибродуговым разрядом. Показано, что топография поверхности после обработки существенно изменяется. Рентгеноструктурный анализ показал, что при обработке поверхности с многостержневыми электродами происходит легирование поверхности элементами материала электрода с образованием поверхностном слое различных твердосплавных соединений, типа нитридов, карбидов, оксидов.

К сожалению, физико-механические и физико-химические свойства поверхностного слоя образцов, обработанных вибродуговым разрядом с применением металлокерамических материалов, не смогли исследовать по техническим причинам на предложенном оборудовании в параграфе 3.2 главы 3 НКР. Поэтому качественный анализ проводился на аналитическом рентгенофлуоресцентном спектрометре Спектроскан МАКС GF2E Кызылординского государственного университете имени КоркытАта. Однако данное оборудование не может определить наличие углерода в поверхностном слое и процентное соотношение легируемых элементов.

### **Список использованных источников**

1. Зобнев В.В. Упрочнение рабочих органов сельскохозяйственных машин путем нанесения многокомпонентных диффузионных покрытий в условиях ТВЧ-нагрева /В.В. Зобнев, А.М. Марков, С.Г. Иванов, Ю.П. Аганаев, Б.Д. Лыгденов, А.М. Гурьев //Ползуновский альманах, 2013. – № 2. – С. 111–113.
2. Хитрюк В.А. Восстановление рабочих органов сельскохозяйственных и мелиоративных машин: методические указания по выполнению лабораторной работы /В. А. Хитрюк, В. И. Коцуба, С. Н. Ничипорук. – Горки: БГСХА, 2015. – 28 с.

3. Пучин Е.А. Технология ремонта машин /Е. А. Пучин, В. С. Новиков, Н. А. Очковский и др.; Под ред. Е. А. Пучина. – М.: Колос, 2007. – 488 с.
4. Иванов, В. П. Технология и оборудование восстановления деталей машин : учебник /В. П. Иванов. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 458с.
5. Аулов В.Ф. Результаты полевых испытаний упрочненных рабочих органов почвообрабатывающих машин /В.Ф. Аулов, П.В. Лужных, А.В. Кирейнов //Труды ГОСНИТИ, 2013. – Т. 113. – С. 300 – 309.
6. Титов Н.В. Упрочнение рабочих органов машин, эксплуатируемых в абразивной среде /Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2012». – Выпуск 4. Том 2. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012. – С. 46 – 48.
7. Литовченко Н.Н. Вибродуговая наплавка графитовым электродом нанометаллических композиционных материалов /Н.Н. Литовченко, В.Н. Куликов, Н.В. Титов. – М.: Сварочное производство, 2013. – № 2. – С. 51 – 53.
8. Sharifullin S.N. Surface hardening of cutting elements agricultural machinery vibro arc plasma /S. N. Sharifullin, N. R. Adigamov, N. N. Adigamov, R. Y. Solovev, K. S. Arakcheeva //IOP Publishing Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – V. 669. doi:10.1088/1742-6596/669/1/012049.
9. Investigation of plasma metal-ceramic coatings on cutting surfaces of working bodies of machines and mechanisms /N V Titov, A V Kolomeichenko, Yu A Kuznetsov, L V Kalashnikova, O OBagrintsev, S NSharifullin //IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 412 (2018) 012075 doi:10.1088/1757-899X/412/1/012075.
10. Титов Н.В. Исследование плазменных металлокерамических покрытий на режущих поверхностях рабочих органов машин и механизмов /Н.В. Титов, А.В. Коломейченко, Ю.А. Кузнецов, Л.В. Калашникова, О.О. Багринцев, С.Н. Шарифуллин //Материалы VIII Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2017». – 2017. – С. 334 – 338.

11. Бахмудкадиев, Н.К. Технология упрочнения дисковых рабочих органов сельскохозяйственных машин электроконтактной приваркой: Автореф. Дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03 /Бахмудкадиев Нухкади Джалалович. – М., 1998. – 16 с.
12. Бухараев А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) /А.А. Бухараев, Д.Б. Овчинников, А.А. Бухараева //Заводская Лаборатория. – 1996. – № 1. – С. 10 – 27.
13. Калинин Е.Ю. Исследование физико-механических свойств поверхностных слоев, формируемых газотермическим напылением /Е.Ю. Калинин, И.О. Соколов //Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия В73. – 2013. – С. 73 – 79.
14. Иванов В.И. Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом [Текст] /В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов //Труды ГОСНИТИ. – 2012. – Т.109. – Ч. 2. – С. 127–139.
15. Лялякин В.П. Состояние и перспективы ремонта машин в АПК [Текст] /В.П. Лялякин //Труды ГОСНИТИ. – 2008. – Т. 101. – С. 33–37.
16. Черноиванов В.И. Ресурсосберегающие восстановительно-упрочняющие технологии – основа вторичного производства деталей [Текст] /В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин, Н.Н. Литовченко //Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2009. – Т. 16. – № 1. – С. 2–5.
17. Dallaraire S. Hard arc-sprayed coating with enhanced erosion and abrasion wear resistance /Dallaraire S. //roc. of the ITSC'2000. Montreal, Quebec, Canada, 8–11 May, 2000. – ASM International. – Pp. 575–582.
18. Похмурский В. И. Влияние режимов электродуговой металлизации и составов применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную стойкость покрытий [Текст] /В. И. Похмурский, М. М. Студент, И. А. Рябцев и др. //Автоматическая сварка. – 2006. – № 7. – С. 31 – 36.
19. Литовченко Н.Н. Пути совершенствования оборудования и технологии электродуговой металлизации /Н.Н. Литовченко, В.Н. Логачев[Текст] //Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 11. – С. 60 – 62.

20. Борисов Ю.С. Исследование диспергирования разнородных проволочных материалов в процессе электродугового напыления [Текст] /Ю. С. Борисов, Н. В. Вигилянская, И. А. Демьянов и др. //Автоматическая сварка. – 2013. – № 2. – С. 25 – 31.
21. Бороненков В. Н. Основы дуговой металлизации. Физико-химические закономерности [Текст] /В.Н. Бороненков, Ю.С. Коробов. – Екатеринбург: Изд-во УрГУ. – 2012. – 265 с.
22. Окладников С.И. Повышение эксплуатационных свойств покрытий при электродуговой металлизации [Текст]. Дисс... канд.техн. наук. – Комсомольск-на-Амуре. – 2002. – 121 с.
23. Бурумкулов Ф.Х. Электроискровые технологии восстановления и упрочнения деталей машин и инструментов (теория и практика) [Текст] /Ф.Х. Бурумкулов, П.П. Лезин, П.В. Сенини др. – Саранск: Красный Октябрь. – 2003.–504 с.
24. Иванов В. И. Повышение ресурса разделительных штампов путем упрочнения и восстановления их электроискровым легированием [Текст] / Автореф. дисс. на соиск. уч. степ.канд. техн. наук. – Саранск. – 2000. – 27 с.
25. Михайлюк А.И. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении [Текст] /А.И.Михайлюк, Р.П. Житару.– Электронная обработка материалов. – 2008. – № 5. – С. 49–56.
26. Михайлюк А.И. Возможности электроискровой обработки в улучшении пластических свойств деформируемых поверхностей [Текст] /А.И. Михайлюк, Р.П. Житару, А.Е. Гитлевич. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 115 – 119.
27. Верхотуров А.Д. Зависимость химического, фазового состава и свойств электроискровых покрытий от состава легирующих материалов [Текст] /А.Д. Верхотуров, В.П. Лунева. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 128 – 121.

28. Парамонов А.М. Нанесение электроискровым способом коррозионно-стойких покрытий [Текст] /А.М. Парамонов, С.П. Паршутин, А.В. Коваль, Н.С. Шолтоян. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 91 – 93.
29. Бурумкулов Ф.Х. Восстановление и легирование сплавов на медной основе электроискровой обработкой в газовой среде /Ф.Х. Бурумкулов, Р.Н. Задорожний, А.В. Потапов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 25 – 30.
30. Михайлюк А.И. Применение графита в электроискровых технологиях [Текст] /А.И. Михайлюк, А.Е. Гитлевич. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 120 – 124.
31. Грачев М.В. Фазовый и элементный состав поверхностного состава после электроискрового легирования [Текст] /М.В. Грачев, Л.В. Денисов, А.Г. Бойцов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 47 – 49.
32. Иванов В.И. Классификация объектов, методологические и технологические особенности электроискрового упрочнения и увеличения ресурса [Текст] /В.И. Иванов. – Труды ГОСНИТИ. – 2010. – Т. 106. – С. 31 – 41.
33. Михайлов В.В. Электроискровое легирование титана и его сплавов, физико-технологические аспекты и возможность практического использования. Краткий обзор. Часть I. Особенности массопереноса, структурные и фазовые превращения в поверхностных слоях, их износо- и жаростойкость /В.В. Михайлов, А.Е. Гитлевич, А.Д. Верхотуров и др.– Электронная обработка материалов.– 2013. –№ 49(5). –С. 21 – 44.
34. Верхотуров А. Д. О физической природе эрозии и формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании молибдена пористыми электродами железа[Текст] /А.Д. Верхотуров и др. //Порошковая металлургия. – 1983. – №. 12. – С. 51 – 54.
35. Михайлюк А. И. Особенности механизма пластической деформации электроискровых покрытий и пути повышения их прочностных характеристик при трении [Текст] /А.И. Михайлюк, Р.П. Житару //Электронная обработка материалов. – 2008. – №. 5. – С. 49 – 56.

36. Журавлев М.В. Очистка и модификация поверхности нелегированной низкоуглеродистой стали электроискровым методом в газе атмосферного давления [Текст]. Дисс... канд. техн. наук. – Томск. – 2015. – 104 с.
37. Алимбаева Б.Ш. Разработка и оптимизация износостойких покрытий на стальной подложке, синтезируемых методом электроискровой обработки [Текст]. Дисс... канд. техн. наук. – Омск. – 2014. – 124 с.
38. Кудинов, В. В. Нанесение плазмой тугоплавких покрытий [Текст] /В. В. Кудинов, В. М. Иванов. – М.: Машиностроение, 1981. – 192 с.
39. Урюков, В. А. Проблемы взаимодействия частиц с поверхностью [Текст] /В. А. Урюков //Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия частиц с поверхностью: Сб. науч. тр. – Киев: Ин-т сверхтвёрдых материалов АН УССР, 1988. – С. 4-14.
40. Исследование зависимостей между подводимой мощностью, эффективностью нанесения и прочностью сцепления плазмонапыленных покрытий из порошкообразных сплавов на основе Ni и Fe [Текст] / ВЦП. – № КМ-91553. – Киев, 01.03.87. – 10 с. – Пер. ст. :BinshiXu, Zhonghiang Hu изб. : Advances in Thermal Spraying. – 1986. – P. 315-321.
41. Тушинский, Л. И. Методы исследований материалов: Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий [Текст] /Л. И. Тушинский, А. В. Плохов, А. О. Токарев, В. И. Синдеев. – М. : Мир, 2004. – 384 с.
42. Хасуй, А. Техника напыления. Пер. с японского [Текст] /А. Хасуй. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
43. Кудинов, В. В. Нанесение покрытий плазмой [Текст] /В. В. Кудинов, П. Ю. Пекшев, В. Е. Белашенко и др. – М. : Наука, 1990. – 480 с.
44. Гоц, А. В. Физико-химические процессы окисления и плавления порошка в плазменной струе [Текст] /А. В. Гоц, В. А. Ахатов //Вопросы производства и обработки стали: Темат. сб. науч. тр. – Челябинск: ЧПИ, 1983. – С. 69-74.
45. Черноиванов, В. И. Организация и технология восстановления деталей машин [Текст] / В. И. Черноиванов. – М. :Агропромиздат, 1989. – 336 с.
46. Харламов, Ю. А. Влияние скорости и температуры частиц на динамику и

теплофизику их взаимодействия с поверхностью детали при газотермическом нанесении покрытий [Текст] /Ю. А. Харламов //Теоретические и экспериментальные проблемы взаимодействия частиц с поверхностью: Сб. науч. тр. – Киев : Ин-т сверхтвердых материалов АН УССР, 1988. – С. 25 – 33.

47. Харламов, Ю. А. Влияние скорости соударения на термический цикл в контакте между расплавленной частицей и поверхностью твердого тела [Текст] /Ю. А. Харламов //Физика и химия обработки материалов. – 1987. – №6. – С. 82 – 87.

48. Кадырметов, А. М. Воздушно-плазменное напыление при модуляции электрических и газодинамических параметров: Обзор по данным отечественной и зарубежной печати за 1957-1995 г.г. [Текст] / А.М. Кадырметов; ВГЛТА. – Воронеж, 1996. – 60 с.: ил. – Библиогр.: с. 51 – 59. Деп. в ВИНТИ 30.05.96, N1799–В96.

49. Харламов, Ю. А. Особенности тепловых расчетов при газотермическом нанесении покрытий [Текст] /Ю. А. Харламов //Сварочное производство. – 1988. – №9. – С. 30 – 32.

50. Лазаренко Б.Р., Лазаренко Н.И. Электроискровой способ изменения исходных свойств металлических поверхностей [Текст] / Б.Р. Лазаренко, Н.И. Лазаренко. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 177 с.

51. Верхотуров А.Д. Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании [Текст] / А.Д. Верхотуров – Владивосток: Дальнаука. – 1995. – 323 с.

52. Коротаев, Д.Н. Технологические возможности формирования износостойких наноструктур электроискровым легированием [Текст] / Д.Н. Коротаев. – Омск: СибАди, 2009. – 256 с.

53. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии [Текст] /В.Л. Миронов. – М.: Техносфера. – 2009. – 144 с.

54. Гоулдстейн, Дж. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: в 2 т. [Текст] /Дж. Гоулдстейн, Д. Ньюбери, П. Эчлин и др. – М.: Мир, 1984.

55. Weilie Zhou. Scanning Microscopy for Nanotechnology (Techniques and Applications). /Weilie Zhou (Ed.) Zhong Lin Wang (Ed.) Springer. – 2006. – 522 p.
56. Бухараев А.А. Диагностика поверхности с помощью сканирующей силовой микроскопии (обзор) [Текст] /А.А. Бухараев, Д.Б. Овчинников, А.А. Бухараева //Заводская Лаборатория. Исследование структуры и свойств. Физические методы исследования и контроля. – 1996. – №1. - С.10 – 27.
57. Калинин Е.Ю. Исследование физико-механических свойств поверхностных слоев, формируемых газотермическим напылением [Текст] /Е.Ю. Калинин, И.О. Соколов //Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия В73. – 2013. – С. 73 – 79.
58. Абжаев М.М., Адигамов Н.Р. Использование порошковых технологий при восстановлении деталей машин. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», г.Казань, 2016г. 3-7 срт
59. Абжаев М.М., Адигамов Н.Р. Получение однородной поверхности при восстановлении деталей методом металлизации с использованием металло-керамических порошков. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», г.Казань, 2016г. 8-10 стр
60. Рахматуллин Н.Р., Гайнутдинов Н.М., Абжаев М.М., Адигамов Н.Р. Восстановление деталей сельскохозяйственной техники электрометаллизационными покрытиями с использованием порошковых смесей. Сборник трудов Международной научно-практической конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития механизации технического сервиса агропромышленного комплекса», г.Казань, 2018г.
61. Адигамов Н.Р., Гайнутдинов Н.М., Абжаев М.М. Повышение физико-механических свойств покрытий, нанесенных методом электродуговой металлизации. Сборник трудов 76-ой Международной студенческой научной конференции «Студенческая наука- аграрному производству» 2018г.

62. Адигамов Н.Р., Садыков М.Р., Абжаев М.М. Повышение износостойкости в процессе восстановления элементов корпусных деталей сельскохозяйственной техники гальваническим цинко-железным покрытием. Сборник трудов 76-ой Международной студенческой научной конференции «Студенческая наука- аграрному производству» 2018г.