

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт Механизации и Технического Сервиса

Кафедра Эксплуатация и Ремонт Машин

Направление подготовки – 35.04.06 Агроинженерия

Магистерская программа – Технический сервис в сельском хозяйстве

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**ТЕМА: Разработка технологического процесса
металлизации с получением заданных физико-
механических характеристик**

Магистрант _____ Гайнутдинов Н.М.

Научный руководитель,
д. т. н., профессор _____ Адигамов Н.Р.

Рецензент, _____ Халиуллин Д.Т.

Обсужден на заседании кафедры и допущен к защите
(Протокол № _____ от _____ 2018 г.)

Руководитель магистерской программы,
д. т. н., профессор _____ Адигамов Н.Р.

Казань – 2018 г.

СОДЕРЖАНИЕ

| | Стр. |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 8 |
| 1.1. Анализ существующих технологий восстановления деталей металлизацией..... | 8 |
| 1.2. Анализ керамических покрытий в ремонтном производстве..... | 14 |
| 1.3. Выводы к главе и формулирование цели и задач исследований..... | 19 |
| ГЛАВА 2 ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ..... | 22 |
| 2.1 Состояние вопроса..... | 21 |
| 2.2 Направление исследований..... | 22 |
| 2.3 Перечень вопросов, подлежащих исследованию..... | 23 |
| 2.4 Объекты исследования и место проведения работы..... | 24 |
| 2.5 Анализ элементов и их соединений для изготовления порошковых составов..... | 24 |
| 2.5.1 Методы исследования..... | 26 |
| ГЛАВА 3. ПРОГРАММА, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ | 28 |
| 3.1. Программа лабораторных исследований | 28 |
| 3.2. Методика лабораторных исследований | 28 |
| 3.3. Оборудование и материалы для нанесения покрытий | 34 |
| 3.4. Методика эксплуатационных исследований | 38 |
| 3.5 Описание установки для электродуговой металлизации | 42 |
| ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ..... | 46 |
| 4.1 Порядок изготовления образцов..... | 46 |
| 4.2 Оценка необходимого числа измерений..... | 47 |
| 4.3 Методика измерения твердости и микротвердости..... | 49 |

| | |
|--|----|
| 4.4 Основные факторы, влияющие на толщину напыленного слоя при электродуговой металлизации | 54 |
| 4.4.1 Воздействие режимов электродуговой металлизации толщину напыленного слоя..... | 55 |
| 4.5 Испытание восстановленных стрельчатых лап методом дуговой металлизации в полевых условиях..... | 59 |
| 4.6 Изучение рынка сбыта научно-технической продукции..... | 62 |
| 4.7 Сфера применения технологии восстановления и оборудования..... | 63 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ..... | 65 |
| БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК..... | 66 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 69 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В настоящее время научный прогресс идет большими шагами вперед и для этого с каждым годом в производство внедряются новые технологические процессы. Главным для научного прогресса в производстве является уменьшение энергоемкости и себестоимости изделий.

Одним из актуальных этапов развития производства является восстановление и последующие упрочнение изношенных деталей сельскохозяйственной техники. Современному производству важно восстанавливать изношенные детали с сохранением их технологических качеств и при максимально низкой допустимой себестоимости восстановления детали. На сегодняшний день доля импортной техники составляет до половины сельхозмашин автотракторных парков страны[16]. Восстановление и упрочнение деталей этих машин, а также импортозамещение запасных частей к ним так же имеет важное значение для ремонтного производства страны.

Современное сельское хозяйство включает в себя почвообрабатывающих СХМ, которые работают в различных трудных условиях, и нагрузка ударяет по рабочим органам данных СХМ [22]. При малейших износах рабочих органов СХМ производительность почвообрабатывающих СХМ уменьшается. Поэтому ремонт этих рабочих органов почвообрабатывающих СХМ является актуальной темой для разработок и усовершенствования. В последние годы повысилось использование технологий для восстановления, которые позволяют повысить относительную износостойкость деталей и соединений в несколько раз, тем самым увеличивая их срок службы. Например, в машиностроении для восстановления изношенных деталей все чаще используют разные неметаллические покрытия: лакокрасочные, гальванические, керамические, пластмассовые и оксидные пленки. Покрытия могут быть как органическими,

так и неорганическими. Защита покрытиями в основном используется для изоляции металла от окружающей среды [27]. Самыми известными и повседневно встречающимися нам в быту являются керамические покрытия.

Покрытия из керамических кристаллов представляют собой достаточно тонкие и хрупкие слои. Однако они многофункциональны и обладают большим сопротивлением к окислению и коррозии, так же они способны увеличивать характеристики металлов, работающих при постоянных статических нагрузках. Керамическое покрытия имеет комбинированное строение, включая в себя сложные силикаты с ZrC₂, Al₂O₃, CeO₂, которые в свою очередь при применении могут защитить материал от высоких температур до 1260°C [5,7]. Недостатками таких покрытий является хрупкость и растрескивание. Однако, эти недостатки можно решить с помощью электродуговой металлизации деталей, повышающей износостойкость деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов в 2-6 раза, с образованием на их поверхности керамических кристаллов. Электродуговая металлизация позволяет получить на поверхности детали прочные оксидно-керамические покрытия с уникальными свойствами, такие как износостойкость, коррозионностойкость, теплостойкость, хорошая изоляция от электричества [11]. Этот метод восстановления актуален при применении к деталям сложной геометрической формы и с ограниченной массой, таким как порши и гильзы двигателей, деталей турбин, и вообще для всех деталей, работающих в тяжелых условиях воздействия высоких температур, агрессивных сред и высоких механических нагрузок. Электродуговая металлизация простой и экологически безопасный способ восстановления поверхностей.

Увеличение ресурса работы рабочих органов почвообрабатывающих машин и обеспечение сохранности их геометрических размеров в заданных пределах является актуальным. Нарушение этих параметров отрицательно сказывается на агротехнических требованиях обработки почвы, которые в свою очередь влияют на урожайность возделываемых культур.

Целью исследования является уменьшение затрат на восстановление стрельчатых лап культиваторов путем применения электродуговой металлизации. Одно из основных особенностей сельского хозяйства - сезонность работ. Следовательно, увеличение производительности, надежности, и увеличение срока службы агрегатов и расходных материалов, в частности стрельчатых лап культиваторов для агрегата, и минимизирование затрат сельхоз предприятий, связанных с простоем техники в период посевных работ являются важнейшими задачами технологии ремонта машин как науки.

Согласно ГОСТам к упрочненным деталям и агрегатам, ремонт считается удачным в том случае, если удастся добиться 70% от ресурса срока службы новой детали или нового агрегата.

Практическая значимость предлагаемой работы заключается в разработке технологии сверхзвуковой металлизации для получения поверхностей с заданными физико-механическими свойствами.

Повышенная износостойкость стрельчатых лап позволит не только повысить ресурс их работы, но и обеспечить заданные агротехнические требования на культивацию на весь период сезонных работ, что в свою очередь является гарантией обеспечения заданной урожайности возделываемых культур.

Рост веса сельхоз техники содействовало как повышению нагрузки на рабочие органы сельскохозяйственных машин (СХМ), так и уплотнению почвы. Исходя из вышенаписанного, проведение работ по восстановлению рабочих органов СХМ в минимальные сроки и по приемлемой стоимости является актуальной задачей. Выполнение этих требований возможно при металлизации износостойких покрытий с использованием металлокерамических порошковых проволок (ПП) с помощью установки для электродуговой металлизации (ЭДМ).

Целью данной работы является увеличение ресурса рабочих органов СХМ на основе улучшения технологии электродуговой металлизации с использованием металлокерамических порошковых проволок.

Задачами исследований являются:

1. Определение лучших режимов электродуговой металлизации износостойких покрытий и состава металлокерамической порошковой проволоки.
2. Изучение зависимости эксплуатационных и физико-механических характеристик покрытий от режимов электродуговой металлизации и состава порошковой проволоки.
3. Разработка технологического процесса восстановления лап культиватора КПС-4.

Объектом исследований является технологический процесс восстановления стрельчатых лап культиваторов.

Предметом исследований в данной работе являются закономерности изменения свойств покрытий от режимов электродуговой металлизации и состава порошковой проволоки.

Методика и методы исследований. Лабораторные изучения выполнены на верифицированном оборудовании по стандартным методикам и состояли из: элементного анализа, испытаний по определению микротвердости, адгезионной прочности, пористости и износстойкости покрытий, электронной микроскопии. Для подтверждения результатов исследования проведены эксплуатационные исследования лап культиватора КПС-4, восстановленных по разработанной технологии.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Анализ существующих технологий восстановления деталей металлизацией

Металлизация – это нанесение металлического слоя на поверхность изделия путём осаждения на ней жидкого металла, распыляемого струёй газа.

Металлизационный слой быстро разрушается, если деталь или агрегат эксплуатировался при значительных нагрузках сжатия и сдвига или без смазки. По причине этого подобного рода детали нельзя восстанавливать металлизацией. Металлизацией лучше всего восстанавливать изношенные поверхности неподвижных деталей (места посадки шарико- и роликоподшипников) и сильно изношенные валы, которые работают при хорошей смазке и при безударной нагрузке (коленвальные коренные шейки, валы тормозов и т.д.).

Одним из наиболее перспективных методов восстановления деталей является электродуговая металлизация порошковых проволок. Технология электродуговой металлизации широко применяется для антакоррозионной защиты металлоконструкций, восстановления изношенных деталей машин, механизмов и т. д. При электродуговой металлизации используется косвенная электрическая дуга, которая горит между двумя токоведущими проволоками. Расплавленные капли электродного металла распыляются в направлении детали потоком сжатого воздуха или защитного газа. По мере плавления проволоки подаются в зону горения электрической дуги двумя парами подающих роликов. Распыление металлических частиц может проводиться на поверхности любых ремонтируемых деталей и агрегатов. При металлизации можно получить слой металла толщиной в пределах 0,05-10 мм.

При нанесении покрытия порошковая проволока плавится электрической дугой, и расплавленные частицы ускоряются в направлении поверхности детали высокотемпературным газовым потоком. На последующее формирование износостойких покрытий существенное влияние оказывают технологические режимы электродуговой металлизации.

Электродуговую металлизацию проводят при давлении сжатого воздуха или защитного газа 0,5-0,6 МПа, напряжение изменяется от 20 до 35 В.

Скорость движения частиц металла в газовом потоке колеблется от 120 до 300 м/с. Это определяет кратковременность их переноса на поверхность детали (время полета составляет тысячные доли секунды) и значительную кинетическую энергию, которая в момент соударения с поверхностью детали переходит в тепловую и вызывает дополнительный разогрев зоны контакта. Удар в момент соприкосновения с поверхностью детали вызывает уплотнение металлизированного слоя и снижает его пористость до 10-20 %.

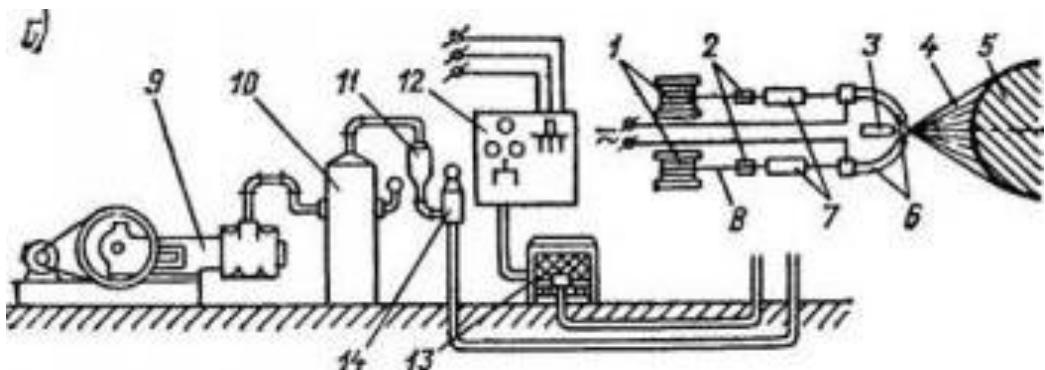
Электродуговой металлизацией можно получить слои в широком диапазоне толщин от 10 мкм до 1,5 мм для тугоплавких металлов и 3,0 мм для легкоплавких. Производительность электродуговой металлизации составляет 3-20 кг/ч.

Металлизированный слой может наноситься на наружные и внутренние поверхности конструкций под углом распыления расплавленного металла по отношению к поверхности детали от 45° до 90° . Уплотнение металлизированных слоев обеспечивают, совмещая процесс напыления и дробеструйной обработки. Дробь направляется так, что ее удары вызывают пластическую деформацию только что напыленного слоя.

Выбор материала для нанесения покрытия зависит от условий эксплуатации и основных изнашивающих процессов, протекающих на поверхностях. Основным видом присадочного материала является непрерывный проволочный электрод. Применяют как проволоки сплошного сечения, так и порошковые диаметром от 1,0 до 2,5 мм. Скорость подачи проволоки варьируется от 220 до 850 м/ч.

Проволоки сплошного сечения используются преимущественно для создания покрытий на поверхностях под неподвижные посадки (из малоуглеродистых сталей Св-08, Св-10ГА) и подвижных соединений (из высокоуглеродистых сталей Нп-50, Нп-85 и легированных сталей Нп-30Х13, Нп-40Х13, Нп-60Х3В10Ф). Для получения покрытий с высокой твердостью используют порошковые проволоки.

Рассмотрим схему электродуговой металлизационной установки. Установка, которая показана на рисунке 1.1, состоит из металлизационного блока, который закреплен на суппорте токарного станка. В устройстве есть четыре ролика, которые с определенной скоростью передают проволоку с катушек по наконечникам для наплавления в зону горения дуги, где расплавляются электроды. Электрический ток от трансформатора подведен к электродным проволокам. В то же время инертный газ подается через трубку под давлением 0,6-0,7 МПа (6-7 кгс/см²), который распыляет из сопла расплавленный металл и наносит его на поверхность ремонтируемой детали.



1 - барабаны с электродной проволокой; 2 - тянувшие ролики; 3- сопло; 4-струя распыленного металла; 5 -деталь; 6 - приемные трубы; 7 -направляющие; 8 - электродная проволока; 9 - компрессор; 10 - редуктор воздушный; 11 – отделитель масла; 12 - электрощит; 13 - трансформатор; 14 - редуктор с манометром.

Рисунок 1.1 – Схема дуговой металлизационной установки

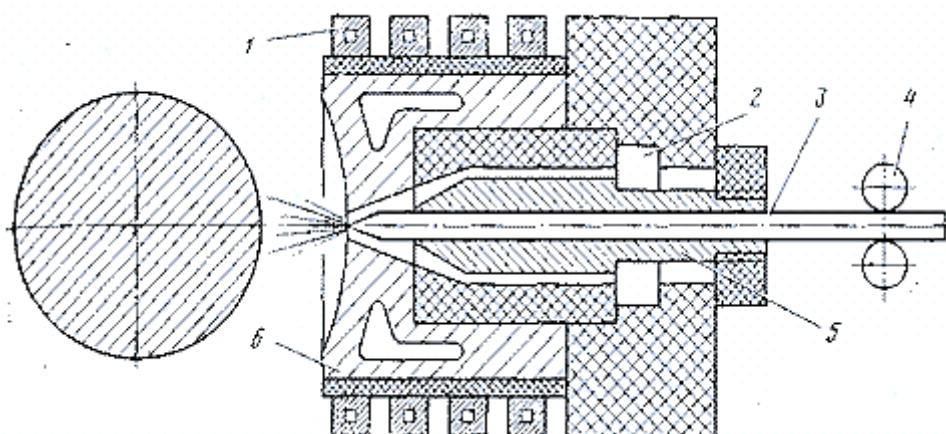
Более рациональным способом металлизации является высокочастотная, для которой применяют специальные распылительные головки (рисунок 1.2). Металл проволоки плавится в специальном индукторе под действием

высокочастотных токов, а дальше наносится на поверхность восстановляемой детали сжатым воздухом или инертным газом.

Металлизаторы электродугового типа могут работать как на постоянном токе, так и на переменном.

Электрод при металлизации выбирают по требуемой твердости и износостойкости слоя распыленного металла и качеству материала ремонтируемой детали. Скажем, для ремонта деталей из стали используют проволоки марок Св-ГА, Св-08, Св-08ГС, Св-18ХГСА и другие.

Диаметр электрода выбирают по требуемой толщине слоя распыленного металла и типу используемого металлизатора. В практике часто используется электрод диаметром равным 1-3 мм.



1 – индуктор; 2 -камера сжатого инертного газа; 3 – электродная проволока;
4 –механизм подачи; 5 – направляющий мундштук; 6 –вихревоковый концентратор с водяным охлаждением

Рисунок 1.2 – Схема распылительной головки металлизатора

Процесс восстановления деталей путем металлизации состоит из 3-х ступеней:

- подготовка поверхностей деталей для металлизации;
- нанесение металлизирующего покрытия;
- обработка деталей после металлизации.

Подготовка поверхности деталей для металлизации состоит из следующих операций: очистка и обезжикивание деталей от грязи, масел,

оксидов, мойка и сушка; создание шероховатости; защита поверхностей, не подверженных металлизации.

На металлизируемой поверхности детали шероховатости создаются следующими способами: пескоструйной обработкой, выдувание металлическим песком или выстрелом, разрезая круглую или «рваную» резьбу накатывание и т. д.

Наиболее эффективными методами приготовления являются пескоструйная обработка и продувка металлическим песком или дробью. Чтобы получить прочное сцепление с основным металлом, толщина покрытия изделия диаметром 20-100 мм должна быть не менее 0,6- 0,9 мм. Поверхности деталей, не подверженных металлизации, защищены плотной бумагой, картоном или тонкой листом стали. Отверстия, пазы, шпоночные канавки закрывают резиновыми или деревянными пробками. Период между подготовкой поверхности заготовки к металлизации и металлизацией не должно превышать 2-ух часов.

В зависимости от требуемой шероховатости и точности, цилиндрические поверхности деталей после металлизации обрабатываются на токарных и шлифовальных станках, а плоские поверхности — на станках или вручную.

После напыления в образце могут возникнуть следующие недочеты: отслоения, трещины, крупные раковины. Внешним осмотром, замерами твердости, просвечиванием рентгеновскими лучами и прочими методами контролируют качество напыленного слоя.

Установка для электродуговой металлизации деталей состоит из токарного станка, станочного металлизатора, компрессорной установки (или баллона с инертным газом), сварочного трансформатора (или сварочного), воздухорегулирующей и масловлагоотделяющей аппаратуры с трубопроводами, катушки для проволок.

А при металлизации плоских деталей токарный станок заменяют специальной камерой, а станочный металлизатор — ручным. Остальное

оборудование остается таким же, как и при металлизации цилиндрических деталей.

Установка для высокочастотной металлизации состоит из токарного станка, металлизатора, компрессорной установки (или баллона с инертным газом), воздухорегулирующей и масловлагоотделяющей аппаратурой с трубопроводами, катушки для проволок, генератора мощностью 12...14 кВт и частотой тока 350 кГц.

Установки для газопламенной металлизации состоит также из токарного станка, ацетиленового генератора, кислородного баллона с газорегулирующей аппаратурой и шлангами, компрессорной установки (или баллона с инертным газом), газового металлизатора марок МГИ-1-57, МГИ-2, МГИ-5, катушки для проволок.

Специальные установки марок УПУ-3, УПУ-3М, УМП-4- 64 применяют при плазменной металлизации.

Согласно действующим нормам в специально отведенных помещениях располагают производственный инвентарь и оборудование. Кроме вышеперечисленного оборудования, на участке металлизации должны быть поставлены шкафы для приспособлений и инструментов, стеллажи для деталей и хранения проволок, а ещё вертушки для разматывания проволок. Рабочее место надлежит оборудовать приточно-вытяжной вентиляцией. Все кабели и трубопроводы (шланги) должны размещаться таким способом, чтобы они мешали выполнению ремонтных работ. Ручные металлизаторы для облегчения работы рекомендуется подвешивать на подвесках.

Ремонт деталей данным методом благополучно применяется в практике ремонтных заводов. Одним основных отличий металлизации от сварки является то, что восстанавливаемая деталь не подвержена нагреву, а значит, металл теряет своих свойств.

После напыления металл подвергается значительным изменениям физического и структурного состояния распыливаемого металла и его химического состава. В результате этого металлическое покрытие имеет

своеобразное строение и физико-механические свойства, которые существенно отличаются от начальных свойств металла.

Существенными преимуществами металлизации по сравнению с другими методами ремонта деталей являются:

- 1) нагрев во время металлизации ремонтируемой детали не более 70° , вследствие чего после металлизации термообработка детали, механические свойства и структура металла не изменяются;
- 2) вероятность получения больших слоев наращиваемого металла (до 10 мм), что дает возможность ремонтировать детали с большим износом;
- 3) вероятность получения покрытия из различных металлов и напыление его на детали из всякого материала (алюминия, чугуна, бронзы, стали и другие), произвольных габаритов и форм;
- 4) вероятность получения псевдосплавов (например, меди и свинца, алюминия и свинца и т.д.)
- 5) он благодаря пористости металлизированного слоя может поглощать масло (до 14-16%) и хорошо удерживать смазку, которая обеспечивает неплохую износостойкость детали.

Металлизация имеет рядом недостатков:

- невысокая прочность сцепления покрытия с основным металлом,
- низкая механическая прочность металла покрытия,
- возникают крупные потери металла при восстановлении мелких деталей.

1.2 Анализ керамических покрытий в ремонтном производстве

Производство современных изделий требует новые подходы для решения проблем ремонта и восстановления изношенных изделий, для восстановления их прежней работоспособности. Для получения инновационных решений по созданию нового или восстановления и совершенствования устаревших технологий и деталей в производстве перебирают все возможные варианты решения данной проблемы. В процессе

таких подборов однажды и нашлось применение керамики в крупной промышленности. Применение керамики существенно подтолкнуло современную науку вперед, открыло новые направления для развития человечества. Материал, который «сгорел», «прокорродировал» и, будучи продуктом данных реакций, уже не подвержен разрушению подобного типа, называется керамикой. Само слово керамика взяло свое название от греческих слов *keramike* - гончарное искусство, от *keramos* - глина. Так как многие керамические материалы состоят из оксидов, то дальнейшее их окисление, обычно, невозможно. В нынешнее время её применяют в промышленности (приборостроение, авиационная промышленность, машиностроение и т.д.), искусстве, строительстве, обширно используется в науке, медицине. Высокие температуры плавления, твердость и жесткость обусловливаются прочностью связей между атомами в керамических материалах. Самым основным недостатком керамики является ее хрупкость. Вследствие этого старания ученых устремлены на ликвидацию таких микроскопических недостатков, как агломераты, поры, химические примеси, являющимися источниками зарождения трещин. Практически недавно, с помощью научных исследований разных структурах промышленности, были созданы новые материалы из керамики, в частности для использования в полупроводниковой индустрии, а также из них сделали высокотемпературные сверхпроводящие материалы [15].

Керамику делят на грубую и тонкую. Грубая керамика имеет крупнозернистую структуру с пористостью 5-35 % к таким относят множественные строительные керамические материалы, например, лицевой кирпич. Тонкая имеет однородную мелкозернистую структуру пористостью менее 5% (фарфор, пьезокерамику и другие). 19

Самым основным критерием различия является их химический состав. Именно химический состав материала имеет главную роль при применении на производстве. По химическому составу бывают оксидные, карбидные, нитридные, силицидные и другие различные керамики. Часто всего в

ремонтном производстве при упрочнении и восстановлении применяется оксидная керамика. Так как они имеют структурную возможность применения в различных сферах современной индустрии, особенно в нанотехнологиях.

Присущими чертами для металлокерамики является ее высокое удельное электрическое сопротивление, около 1000 Ом.см и предел прочности на сжатие до 7 ГПа[25]. Самой значительной является ее выносливость в окислительных средах в широком промежутке температур, значительная огнеупорность, а также высокотемпературная сверхпроводимость, например, иттрий-бариевая керамика.

Керамика – уникальный материал, которую мы можем делать практически из всех известных нам материалов в мире и поэтому он востребован как уникальный продукт в производстве. Среди оксидной керамики, применяемой в промышленности наиболее распространены [5]:

1. Алюмосиликатная керамика бывает на основе $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ или в отдельности в каждом из оксидов. Кремнеземистая керамика содержит более 80% SiO_2 и подразделяется на кварцевую и динасовую керамику. Первую изготавливают из кварцевого стекла, вторую - спеканием кварцита в присутствии Fe_2O_3 и $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кварцевая керамика обладает высокой радиационной стойкостью и термичностью, высокой кислотостойкостью, радиопрозрачностью и огнеупорностью. По мере повышения содержания Al_2O_3 в керамических материалах повышается содержание муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$, которое приводит к увеличению прочности, термостойкости керамики и уменьшению ее кислотности. К керамике, содержащей около 28% Al_2O_3 , относят "полукислые" материалы (огнеупоры, фарфор, фаянс, гончарные изделия), а также каолиновую вату, теплоизоляционные материалы на ее основе, шамотные огнеупоры и другие. Корундовая керамика, содержащая >90% Al_2O_3 , характеризуется высоким электрическим сопротивлением при температурах до 1500°C , высокими пределами прочности при сжатии (3-4 ГПа) и изгибе (1 ГПа). Из алюмосиликатной

керамики изготавлиают посуду, детали и футеровку коксовых и мартеновских печей, ракет, космических аппаратов и ядерных реакторов и множество других подобных нужных для человечества вещей.

2. Керамика на основе SiO_2 и других оксидов. К этому типу материалов относят керамику состава $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ (кордиеритовая), ZrSiO_4 (цирконовая), $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Li}_2\text{O}$ (сподуменовая), $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-BaO}$ (цельзиановая керамика). Для изготовления такой керамики обычно используют тальк, глину, карбонаты Ba, Li и Ca, MgO, каолин, эвкриптил, минералы, сподумен, известняк ашарит, петалит, трепел. Применяют в производстве радиотехнических деталей, огнеупоров, теплообменников, изоляторов автосвечей и т.д.

3. Керамика на основе TiO_2 , титанатов и цирконатов Ba, Sr, Pb, а также керамика на основе ниобатов и tantalатов Pb, Ba, K и Na. Такая керамика характеризуется высоким электрическим сопротивлением, высокой диэлектрической проницаемостью и применяется в электронике и радиотехнике.

4. Керамика на основе MgO. Получают из магнезита, доломита, известняка, хромомагнезита, синтетич. MgO; в качестве добавок используют CaO, Cr_2O_3 , Al_2O_3 . Магнезиальную керамику, содержащую 80% MgO, применяют для изготовления огнеупоров. Керамика из чистого MgO используют для производства изоляторов МГД генераторов, иллюминаторов летательных аппаратов, в качестве носителей для катализаторов. Магнезиально-известковую (содержит более 50% MgO, 10% CaO), магнезитохромовую (60% MgO, 5-18% Cr₂O₃), хромомагнезитовую (40-60% MgO, 15-30% Cr₂O₃) и хромитовую (40% MgO, 25% Cr₂O₃) керамику применяют для изготовления огнеупоров. Керамика из хромитов La и Y 21 используют в качестве высокотемпературных электронагревателей (выдерживают нагрев до 1750 °C), работающих в окислительной среде.

5. Шпинельная керамика на основе ферритов главным образом Ni, Co, Mn, Ca, Mg, Zn. Обладает, как правило, ферримагнитными свойствами и

способна образовывать твердые растворы замещения. Применяют такую керамику для изготовления магнитопроводов, сердечников катушек и др. деталей в устройствах памяти и тому подобное.

6. Керамика на основе оксидов BeO, ZrO₂, HfO₂, Y₂O₃, UO₂. Химически стойка и термостойка. Так, керамика из BeO (бронемеллитовая керамика), полученная спеканием BeO с добавками других оксидов (оксиды 0,5%), например Al₂O₃, ZrO₂, обладает наибольшей теплопроводностью среди керамических материалов и способна рассеивать нейтроны. Предел прочности при изгибе для керамики из BN составляет 75-80 МПа, для керамики из AlN-200 - 250 МПа, для керамики из Si₃N₄ - до 1000 МПа. Керамические нитридные материалы применяют для изготовления инструментов в металлообрабатывающей промышленности, тиглей для плавки некоторых полупроводниковых материалов, СВЧ изоляторов и др. Керамика из Si₃N₄ - конструкционный материал, заменяющий жаропрочные сплавы из Co, Ni, Cr, Fe. Среди силицидной керамики наиболее распространена керамика из дисилицида Mo. Она характеризуется малым электрическим сопротивлением (170-200 мкОм.см), стойкостью в окислительных средах (до 1650°C), расплавах металлов и солей

Самым основным недостатком керамики является ее хрупкость. Вследствие этого старания ученых устремлены на ликвидацию таких микроскопических недостатков, как агломераты, поры, химические примеси, являющиеся источниками зарождения трещин. Из-за хрупкости характеристики керамической матрицы отличаются от характеристик остальных типов матриц. В композитах с металлическими и полимерными матрицами существенная упрочняющая роль приходится волокнам, а матрица придает материалу ударную вязкость.

Сама по себе керамическая матрица довольно жестка и прочна, но чтобы целиком осуществить ее потенциальные возможности, необходимо повысить ее ударную вязкость. Увеличение ударной вязкости керамической матрицы достигают путем создания керамических композитов.

1.3 Выводы к главе и формулирование цели и задач исследований

Исходя из проведенного обзора и анализа состояния вопроса, можно сделать следующие выводы:

1. До настоящего момента, несмотря на многочисленные исследования, нет ни единого мнения о доминирующем виде износа стрельчатых лап и закономерности изнашивания стрельчатых лап.
2. Определено, что при использовании почвообрабатывающих СХМ встречается в нескольких случаях ударно-абразивный характер изнашивания, который вызван контактом с камнями и частицами почвы. Факторы, которые влияют на износстойкость: твердость, давление, влажность и механический состав почвы.
3. Ресурс стрельчатых лап можно существенно повысить путем использования технологий сверхзвуковой дуговой металлизации.
4. Представлено, что со стороны технико-экономических величин для восстановления рабочих органов почвообрабатывающих СХМ рационально использовать методы газотермического напыления, а именно электродуговую металлизацию износостойких покрытий из металлокерамических порошковых проволок
5. В качестве износостойких эффективны покрытия из порошковых проволок экономной системы легирования типа Fe-Cr-B. Однако ударный характер износа может привести к отслоению покрытий, а их ламеллярная структура с включениями оксидов вызвать снижение абразивной износстойкости в соответствии с механизмом внутреннего износа с возникновением и развитием микротрешин по оксидным пленкам.
6. Способ сверхзвуковой дуговой металлизации обработки позволяет проводить восстановление любой твердости с малыми затратами времени и средств.

В связи с этим целью данной работы является снижение затрат на восстановление и повышение ресурса рабочих органов почвообрабатывающих машин путем применения сверхзвуковой дуговой металлизации износостойких покрытий из металлокерамических порошковых проволок как способа восстановления стрельчатых лап культиватора и совершенствование данной технологии.

Основными задачами нашего исследования являются:

1. Определить наилучшие режимы электродуговой металлизации износостойких покрытий и составы порошковых проволок.
2. Изучить зависимость эксплуатационных и физико-механических свойств покрытий от режимов дуговой металлизации и состава порошковых проволок.
3. Разработать методику и провести опыты по определению целесообразных значений параметров дуговой металлизации.
4. Разработать технологии сверхзвуковой дуговой металлизации с использованием металлокерамических порошков износостойких покрытий.

ГЛАВА 2 ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

2.1 Состояние вопроса

Рабочие органы почвообрабатывающих машин работают в высокоизностной абразивной среде. В этих условиях особое значение приобретают различные металлокерамические материалы в виде порошков и пластин, стойких к абразивному износу.

В состав таких материалов нами предлагается использовать недорогие и доступные композиционные металлокерамические составы (МКС), включающие оксид кремния (SiO_2), оксид алюминия (Al_2O_3), а также алюминий (Al) или бемид (AlOOH), боронитридные соединения, матричный компонент – стальной порошок.

В зарубежной практике металлокерамические материалы применяются при изготовлении и восстановлении деталей двигателей (гильзы цилиндров, седла клапанов, поршни) и других сельскохозяйственных машин, а также рабочих органов почвообрабатывающей и другой сельскохозяйственной техники.

За рубежом отработана технология применения износостойких керамических пластин для лап культиваторов. Изготовленная опытная партия стрельчатых лап восстановленных керамическими пластинами, была представлена на испытание в Россию. Испытания показали следующие результаты. На черноземных почвах в Тамбовской области применение лап с такими керамическими пластинами является перспективным. Однако на суглинистых почвах эта керамика оказалась менее эффективна из-за выкрашивания и сколов пластин вследствие недостаточной ударной вязкости их материала для условий с более высокими динамическими нагрузками, чем на мягкой черноземной почве.

Поэтому в настоящее время продолжаются испытания новых металлокерамических материалов с повышенной износостойкостью в условиях суглинистых и супесчаных почвах.

Однако зарубежные металлокерамические материалы весьма дорогие (в среднем около 80 долл. США за 1 кг).

Необходимо создание более дешевых и эффективных металлокерамических соединений (МКС).

Поэтому, опираясь на имеющийся в ГОСНИТИ экспериментальный задел поэтому методу восстановления с использованием указанных недефицитных, в 3...4 раза дешевле зарубежных исходных материалов и разработку на их основе ультрадисперсных нанокомпозиционных порошков, обеспечит более высокий уровень качества упрочняющих покрытий и их физико-механических свойств до уровня твердости 80...85 HRC. []

2.2 Направление исследований

Цель – разработка инновационной технологии восстановления деталей почвообрабатывающей техники стрельчатых лап, с использованием композиционных наноструктурных высокотвердых порошков, обеспечивающей повышение ресурса деталей в 3...3,5 раза.

Теоретическое обоснование использования композиционных наноструктурных материалов для восстановления деталей, которые работают в условиях больших нагрузок абразивного износа. Теоретическое обоснование создания композиционных составов основывается на истолковании современной физикой металлов, причины их прочности, пластичности ее повышение. Работоспособность упрочняющего слоя зависит от твердости, и способности противостоять другим нагрузкам, поэтому данные качества композиционных материалов очень важны. Причиной этому является хрупкость (недостаток прочности) сверхтвердых компонентов. Этую

проблему прочности композиционного покрытия решают композиционные материалы с металлической, более мягкой, а значит, эластичной матрицей.

В целом можно отметить, что прочность и твердость наноматериалов значительно выше таковых обычных материалов до их ультрадиспергирования, например металлических наноматериалов примерно в 4...6 раз, но параметры пластичности ниже.

- Задачей исследования по теме является также анализ химических составов композиционных материалов, обеспечивающих покрытия без образования больших внутренних напряжений, вызывающих трещины, а также имеющих эластичную стальную матрицу, объединяющую твердые, износостойкие компоненты, например Al и Na₃Al₆ (корундообразующие фазы), образующиеся карбиды и нитриды В₄C и другие.

- Научно-экспериментальная задача заключается в отработке производительности и токовых режимов, обеспечивающих получение покрытий порядка 1300...1500 HV, что даст возможность приблизиться к нижнему пределу критерия равно прочности восстановленных деталей и техники, а также сделать их конкурентно способными с зарубежными технологиями восстановления деталей почвообрабатывающей техники.

2.3 Перечень вопросов, подлежащих исследованию

- Определение твердости по толщине напыленного слоя.
- Микроструктурный анализ напыленного слоя.
- Проведение сравнительной износостойкости.
- Сравнительные исследования влияния на твердость напыленного слоя и общую толщину восстановления.
- Исследование влияния на твердость и износостойкость процентного содержания материалов, входящих в композит (таблица 2.1).

Таблица 2.1 - Материалы, входящие в композит

| 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|----|----|-------------------------|----|----|----------------------------------|----|----|--------------|----|----|
| Na ₃ AlF ₆ криолит 10% | 67 | 77 | B ₄ C 40% | 67 | 77 | Na ₂ AlF ₆ | 72 | 82 | ПГ10Н-01-40% | 72 | 82 |
| B ₄ C | 20 | 10 | Al 2% | 20 | 10 | Al 2% | 20 | 10 | | | |
| **Связка | | | Связка | | | Связка | | | Связка | | |

* В (таблице 2.1) долевое содержание материалов указано в процентах.

**Связка – 25 – процентный водный раствор жидкого стекла(Na₂SiO₄).

2.4 Объекты исследования и место проведения работы

Объекты исследования: стрельчатые лапы

Место проведения работы: лаборатория кафедры эксплуатации и ремонта машин (разработка, изготовление оснастки для изготовления пластин и их испытание дуговой металлизацией; замер твердости поверхностного слоя до и после восстановления образцов; отработка токовых и вибрационных параметров; изготовление образцов для исследований; измерения микротвердости, сравнительной износстойкости).

2.5 Анализ элементов и их соединений для изготовления нанопорошковых составов

В состав металлокерамических наноматериалов входят стальные порошки типа ПР-Н67Х18С5Р4, ПГ-С-27, ПГ-СР4 или ПГ-10Н-01. Стальные порошки используются, как матричный материал в композите, содержащем керамические компоненты Al₂O₃ и SiO₂, а также легирующие боронитридные вещества и алюминий (Al) или бемит AlOOH.

Оксид алюминия Al₂O₃ при расплавлении образует высокотвердую фазу – корунд (микротвердость 4113 кгс/мм²).

При расплавлении смеси порошка Al_2O_3 с добавлением Fe и FeC, W, Ti получаются износостойкие интерметаллиды.

Двуокись кремния SiO_2 при расплавлении образует высокотвердую фазу – карборунд (микротвердость $2714 \text{ кгс}/\text{мм}^2$).

Кремний Si образует карбиды с углеродом SiC с микротвердостью $3340 \text{ кгс}/\text{мм}^2$, с бором – бориды SiB_3 , SiB_6 , SiB_{12} , а также соединения почти со всеми металлами – силициды, например силицид железа Fe_3Si , образуя металлокерамический композит.

Муллит $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ – комплексное керамическое соединение, представляющее практический интерес как эффективный компонент для восстановления деталей в композиционном составе нанопорошков.

Бор (B) – входит в состав буры $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$. В результате термодиссоциации буры выделяется бор в самостоятельный элемент, образуя высокотвердые армирующие соединения: карбиды бора B_4C , бориды FeB , FeB_2 и нитриды бора BN. Температура плавления бора 2075°C , твердость по минералогической шкале 9, микротвердость $3400 \text{ кгс}/\text{мм}^2$. Одним из самых эффективных методов повышения абразивной износостойкости, как известно, является насыщение углеродистых сталей бором является, как известно,

Азот (N) входит в состав карбамида (мочевины технической) NH_2CONH_2 . При термодиссоциации азот образует нитриды Fe_4N , Fe_3N , Si_3N_4 , AlN , BN, которые также являются значительными упрочняющими компонентами.

Алюминий и бемид (Al , AlOOH) добавляются в нанопорошковый комплексный состав по двум причинам. Первая – алюминий выполняет роль как раскислитель железа в металлотермическом процессе, превращаясь в оксид Al_2O_3 , который далее используется как упрочняющий керамический компонент.

2.5.1 Методы исследования

Испытание металлокерамических покрытий (МКП) на твердость, используя твердомер «РОКВЕЛЛА ТК – 2М». Для восстановления применяются формованные пластины из металлокерамических порошков (МКП). Поэлементный состав композиционных материалов из МКП указан в (таблице 2.1), на основании которой для исследований изготавливается 4 пластин с разным химическим составом, которые наплавляются виброискровым методом с вольфрамовыми электродами на 4 образцов из Ст.65Г.

Дополнительное оборудование: оснастка для формования металлокерамических пластин. Исследование фазового состава порошков в формованных пластинах, а также изучение напряженно-деформированного состояния наплавленного слоя.

Таблица 2.2 - Варианты композитов НМКП

| * Варианты композитов НКП | ** ТОК, А | | |
|---------------------------------|-----------|-----|-----|
| | 150 | 200 | 250 |
| Дистанция восстановления, мм | | | |
| 1 | 3 | 4 | 5 |
| | 5 | 6 | 7 |
| | > 5 | > 6 | > 7 |
| 2 | 3 | 4 | 5 |
| | 5 | 6 | 7 |
| | > 5 | > 6 | > 7 |
| 3 | 3 | 4 | 5 |
| | 5 | 6 | 7 |

| | > 5 | > 6 | > 7 |
|---|---------------|---------------|---------------|
| 4 | 3 5 > 5 | 4 6 > 6 | 5 7 > 7 |

* Варианты композитов МКП в (табл. 2.2).

** Оптимальность величины тока оценивается скоростью расплавления ($\text{см}^2/\text{мин}$), качеством наплавленного слоя (шероховатость, отсутствие перегрева подложки).

ГЛАВА 3. ПРОГРАММА, МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ

3.1. Программа лабораторных исследований

При изучении композиционных наноструктурных материалов нас интересовали получаемые свойства покрытий, а именно износстойкость, твердость, остаточные напряжения, шероховатость покрытий после периода приработки. Чтобы определить данные физико-механических свойств нужно подобрать такие режимы электродуговой дуговой металлизации, которые рационально выбирать из условия обеспечения большой прочности рабочего органа стрельчатых лап. Чем больше сила и продолжительность тока, тем выше и прочность стрельчатых лап. Следовательно, нужно задаться оптимальным интервалом прочности стрельчатых лап, при котором хорошо работают восстанавливаемые детали.

Целью исследований предусматривалось подробное изучение технологических способов восстановления стрельчатых лап культиваторов КПС-4, с применением сверхзвуковой электродуговой металлизации, и установить закономерности образования керамических покрытий и механизм регулирования процессов для направленного формирования керамических покрытий деталей, полученных ЭДМ.

Экспериментальные исследования мы разделили на следующие этапы:

- исследование прочности диска с покрытий композиционных материалов;
- исследование износстойкости покрытий и эксплуатационная проверка деталей, восстановленных с электродуговой металлизацией.
- исследование остаточных напряжений в покрытиях;

3.2. Методика лабораторных исследований

Покрытия наносили металлизатором ЭДМ11. В качестве базовой

использовали металлокерамические порошковые проволоки (МКПП) диаметром 1,8 мм. При исследовании влияния состава покрытий на их износостойкость изменяли соотношение между компонентами в шихте МКПП или вводили в ее состав дополнительные. Режимы металлизации в экспериментах изменяли в пределах, позволяющих получить покрытие без трещин и отслоений: ток дуги 150...300 А; напряжение на дуге 32...33 В; давление сжатого воздуха 0,3...0,6 МПа, дистанция напыления 30...100 мм. Металлографические исследования покрытий проводили на микроскопе «Neophot-2» с вмонтированной цветной цифровой видеокамерой. Для определения микроструктуры использовали смесь азотной и пикриновой кислот. Испытания абразивной износостойкости покрытий проводили по двум методикам: стандартной — Бринелля–Хауорта (незакрепленным абразивом) и абразивным кругом — закрепленным абразивом.

При испытаниях по методике Бринелля–Хауорта в зону контакта между резиновым диском и исследуемым образцом с помощью дозирующего устройства постоянно подается новая порция абразива. Особенностью этой методики является то, что изменение усилия прижатия резинового диска к поверхности образца изменяет степень закрепления абразивных частиц и является главным параметром, который отличает данный вид изнашивания от изнашивания закрепленным абразивом. Уровень усилия прижатия определяет будет ли абразивная частица прочно удерживаться резиновым диском, производя микрорезание и пластическую деформацию поверхности, или она будет перекатываться между резиновым диском и изнашиваемой поверхностью, приводя к усталостному разрушению последней. Режим испытаний по методике Бринелля–Хауорта следующий: нагрузка $P = 2,40$ МПа, диаметр диска 50 мм, ширина 12 мм, скорость вращения 160 об/мин, время испытаний 15 мин. В качестве абразива использовали кварцевый песок с размером зерен до 200 мкм и влажностью не выше 0,16 %. Резиновый диск перед испытаниями притирали на шлифовальной бумаге типа 2 (ГОСТ 6456–

75) зернистостью № 8П (ГОСТ 3647–71), закрепленной на плоской пластине, после чего ролик промывали спиртом. В качестве эталона использовали образец из стали У8 с твердостью *HRC* 60. Для испытаний износостойкости закрепленным абразивом было изготовлено специальное приспособление, смонтированное на малогабаритном фрезерном станке. Вместо фрезы абразивный круг и электрокорунда средней твердости СМ-2 крепили на керамической связке 7К15 диаметром 150 мм и шириной 6 мм. Зернистость электрокорунда составляла 250...315 мкм. Образцы крепили на одном плече рычага, а на другом — груз массой 0,55 кг. Соотношение плеч составляло 2,5:1, скорость вращения абразивного круга 120 об/мин, время испытаний 120 мин.

Для испытаний по обеим методикам использовали образцы в виде пластин размером 40×40×8 мм. Перед нанесением покрытия поверхность образцов площадью 40×40 мм подвергали дробеструйной обработке и за несколько проходов наносили покрытие толщиной приблизительно 1 мм с использованием порошковых проволок соответствующих составов.

Исследование влияния режимов напыления на структуру покрытий.
Влияние давления сжатого воздуха. При проведении экспериментов давление сжатого воздуха изменяли в пределах 0,3...0,6 МПа. При малых значениях (0,3 МПа) его диспергирующее воздействие незначительно и капли расплава ПП имеют довольно большой размер — около 500 мкм. Скорость полета таких частиц невысока и составляет около 20 м/с. При соударении с напыляемой поверхностью такие капли деформируются незначительно, образуя грубодисперсное и гетерогенное покрытие с пористостью 5...7 %. Благодаря высокой тепловой энергии капель во время кристаллизации происходит их частичное микросваривание. В некоторых участках покрытия, микротвердость которых достигает *HV* 6000 МПа, обнаружены микротрешины, обусловленные появлением в процессе металлизации растягивающих напряжений. При возрастании давления сжатого воздуха до 0,6 МПа размер капель жидкого

металла уменьшается до 80 мкм [2], одновременно до 100 м/с увеличивается их скорость, что способствует измельчению структуры покрытия. Капли металлического расплава с большей силой ударяются в напыляемую поверхность, сильно расплющиваются и образуют ламели, соотношение длины к ширине которых изменяется от 3:2 при давлении сжатого воздуха 0,3 до 5:1 при 0,6 МПа. Покрытие, сформировавшееся из мелких капель, более гетерогенно и имеет больше границ раздела — оксидных пленок. Согласно данным фазового анализа эти пленки в основном состоят из оксидов , и .

Основными фазами покрытия независимо от давления сжатого воздуха являются твердый раствор алюминия и хрома в α -Fe с дисперсными выделениями борида В [3].

Влияние силы тока. При дуговой металлизации ПП диаметром 1,8 мм минимальный ток составляет $\text{min} = 150$, максимальный $\text{max} = 300$ А. В связи с тем, что капли, формирующие покрытие, имеют более высокую начальную температуру, и покрытие формируется более плотным и с меньшим содержанием оксидов, с увеличением силы тока от 150 до 300 А гетерогенность покрытия уменьшается. Тем не менее, нанесение покрытий на повышенных токовых режимах может вызывать перегрев деталей и, как следствие, способствовать интенсивному окислению и отслоению покрытия.

Влияние дистанции напыления. При дуговой металлизации пучок распыленных капель имеет вид конуса с углом расхождения 15...20°. Уменьшение дистанции напыления способствует повышению концентрации расплавленных частиц, попадающих и кристаллизующихся на напыляемой поверхности, что обусловливает меньшую скорость их кристаллизации и дальнейшего охлаждения. Размер образующихся боридов В при этом намного больше, чем при напылении на меньшем расстоянии.

Исследование влияния режимов напыления на абразивную износостойкость покрытий. *Влияние давления сжатого воздуха.* При исследованиях изнашивания закрепленным абразивом установлено, что

увеличение давления сжатого воздуха с 0,3 до 0,6 МПа способствует возрастанию износстойкости покрытий в 1,6 раза. Это объясняется тем, что при высоком давлении сжатого воздуха покрытие имеет более дисперсную структуру и содержит большее количество оксидов хрома и алюминия, а также более дисперсные выделения боридов в ламелях. В комплексе это обеспечивает более высокую микротвердость покрытия, а так как изнашивание в данном случае идет в основном в результате микрорезания, то и износстойкость покрытия увеличивается. При испытаниях по методике Бринелля–Хауорта износстойкость покрытий, наоборот, уменьшается. Это обусловлено реализацией иного механизма изнашивания — покрытие в основном разрушается в результате многократной пластической деформации абразивными частицами и частично за счет резания. В этом случае более высокую износстойкость будут иметь покрытия с большим запасом пластичности. Нанесение покрытий при малом давлении сжатого воздуха (0,3 МПа) приводит к увеличению размера капель металлического расплава, которые, кристаллизуясь, остаются дольше, чем мелкие частицы и, как следствие, в крупнозернистом покрытии растягивающие остаточные напряжения намного меньше. При многократных нагрузлениях покрытия частицами абразива микротрешины в них зарождаются труднее и износстойкость таких покрытий при испытаниях незакрепленным абразивом выше. Металлографическими исследованиями установлено, что после испытаний закрепленным абразивом на изношенных поверхностях образцов видны следы от микрорезания частицами абразива. Кроме того, в результате микрорезания вскрываются поры, причем в покрытиях, сформированных при малом давлении сжатого воздуха, они крупнее. Поверхности трения образцов после изнашивания незакрепленным абразивом имеют другой вид, что подтверждает иной механизм изнашивания по этой методике испытаний — следов от микрорезания частицами абразива на изношенной поверхности практически нет. В мелкозернистом покрытии разрушение идет

преимущественно по границам ламелей, а в грубозернистом оно более равномерное.

Влияние силы тока. Как отмечено выше увеличение силы тока при напылении уменьшает в покрытии количество границ раздела между структурными составляющими, что негативно влияет на износостойкость при испытаниях закрепленным абразивом. При испытаниях по методике Бринелля–Хауорта износостойкость покрытий практически не зависит от силы тока.

Влияние дистанции напыления. При изучении влияния дистанции напыления на абразивную износостойкость покрытий установлено, что при изнашивании закрепленным абразивом минимальный износ зафиксирован у покрытий, полученных на дистанции напыления 100 мм. С ее увеличением частицы, формирующие покрытие, дольше пребывают в атмосфере воздуха, в результате чего увеличивается толщина оксидных пленок на их поверхности, а соответственно и в покрытии. Это способствует увеличению износостойкости покрытий. При изнашивании незакрепленным абразивом износостойкость не зависит от дистанции напыления, а определяется размером ламелей, на величину которых дистанция напыления не влияет. С целью изучения возможности увеличения абразивной износостойкости покрытий, полученных при использовании ПП ФМИ-2, в состав ее шихты добавляли карбид бора В4С. Установлено, что увеличение количества боридов в структуре покрытия способствует повышению твердости с 40 до 54 HRC . Однако когезионная прочность покрытия при этом уменьшается от 130 до 90 МПа в результате возникновения микротрещин в процессе формирования слоя. Испытания на износостойкость покрытий закрепленным абразивом показали, что несмотря на существенное повышение твердости его износостойкость возрастает лишь на 25, а при испытании незакрепленным абразивом, наоборот, уменьшается на 30 %, поскольку во время шлифования в покрытии возникают поверхностные трещины, способствующие преобладающему межзеренному разрушению, о

чем свидетельствует рельеф поверхности.

С целью изучения влияния количества алюминия в шихте ПП (50 % ФХБ + 8 % В4С + 42 % Cr) на абразивную износостойкость покрытия хром частично заменяли алюминием. Установлено, что при изменении количества алюминия в шихте ПП твердость покрытий не изменяется, а износостойкость (при испытаниях по двум методикам) возрастает лишь на 30 % при полной замене хрома на алюминий. Абразивную износостойкость покрытия системы Fe–Cr–В–Al сравнивали с износостойкостью закаленной стали У8 (*HRC* 60) при аналогичных условиях испытаний. Выявлено, что износ закаленной стали в 1,5 раза больше, чем покрытия. Кроме того, следы от износа абразивным диском для стали более однородны, чем для покрытия.

Таким образом, проведенные испытания показали, что более высокую износостойкость имеют покрытия, полученные при большем давлении сжатого воздуха, и характеризующиеся более мелкодисперсной структурой. Износостойкость покрытий, сформированных из ПП с шихтой на основе феррохромбора, на 50 % выше, чем закаленной стали У8 (*HRC* 60). Введение в шихту ПП карбида бора повышает твердость покрытий, но уменьшает их пластичность. При испытаниях закрепленным абразивом износостойкость покрытий возрастает, а незакрепленным уменьшается.

3.3. Оборудование и материалы для нанесения покрытий

В качестве оборудования для напыления применялась установка электродуговой металлизации, которая предназначена для нанесения антикоррозионных и износостойких покрытий из проволочных материалов методом термического напыления.

Питание установки осуществляется от трёхфазной сети переменного тока напряжением 380/220 В, частотой 50 Гц. Для работы установки необходимо

сварочного источника питания с жесткой характеристикой ВДУ-506, а также наличие сетей подвода сжатого воздуха, пропана.

В основе работы установки лежит плавление порошковых проволок электрической дугой и распыление расплавленного металла высокоскоростной струей газа. Сущность данного процесса состоит в том, что на две проволоки, которые выполняют роль электродов, подается напряжение. Порошковые проволоки с неизменной скоростью поступают в распылительную головку металлизатора. Там в результате сближения этих проволок возникает электрическая дуга и совершается плавление. Транспортирующий газ (пропан и сжатый воздух) сдувает частицы расплавленного металла с торцов проволок, подхватывает и разгоняет их до высокой скорости, обеспечивая доставку частиц расплавленного металла к поверхности восстанавливаемой детали.

Для работы установки необходим подвод напряжения от сварочного источника питания, пропана и сжатого воздуха. Металлизатор состоит из электродвигателя (ЭД) с цилиндрическим редуктором, который крепится к корпусу червячного редуктора; кронштейна механизма прижима роликов; рычагов; передних и задних направляющих; поддона картера, на котором размещаются токоподводы; ручки; распылительной головки; плиты; подающих роликов; крана; прижимных роликов; пружин; гаек и рычагов.

Для снижения массы и габаритных размеров устройства токоподводы выполнены в виде трубок для подачи сжатого воздуха, образовав транспортирующий поток и в то же время для охлаждения составляющих металлизатора.

К поддону прикреплен кронштейн, с помощью которого металлизатор может крепиться или на который надевается ручка. Головка распылителя металлизатора располагается на промежуточной распределительной плите (панели), которая закреплена на токоподводах поддона картера.

Червячный редуктор предназначен для передачи вращения от вала ЭД к подающим роликам металлизатора. На корпусе данного редуктора крепятся

большинство составляющих металлизатора.

Распылительная головка предназначается для создания струи расплавленного металла. Распылительная головка состоит из корпуса, направляющего и токоподводящего узла и сопловой части. Сжатый воздух передается в сопло, через промежуточную распределительную плиту, по правому и левому токоподводам поддона.

Прижимные ролики, расположенные в пазах прижимных рычагов, прижимают порошковые проволоки к подающим роликам. Текстолитовые втулки изолируют оси вращения прижимных роликов от рычага. Пружины обеспечивают прижатие роликов, а усилие прижатия регулируют гайки, расположенные на кронштейне механизма прижима. Для снижения проскальзывания проволоки у прижимных роликов имеется зубчатый венец. При помощи дополнительных шестерен получают принудительное, синхронное с подающими роликами вращение. Поворотом рычагов с эксцентриками осуществляют отжатие рычагов.

Чтобы работать с установкой, нужно иметь следующие оборудования: устройство для установки кассет, которая исключает возможность соприкосновения проволок при разматывании для избежания короткого замыкания, кассеты с электродной проволокой, сеть (баллон) пропана, сеть сжатого воздуха.

Перед тем, как начать работу нужно обследовать затяжку всех резьбовых соединений. На участок, куда наносится покрытие, необходимо установить в рабочее положение и закрепить металлизатор, подключить газовый блок к сети сжатого воздуха, к металлизатору и пульту управления. Далее необходимо поставить источник тока «ВДУ-506», в удобном для работы месте, на расстоянии 3-4 м от металлизатора и подготовить его к использованию. После этого нужно соединить металлизатор, пульт управления, газовый блок и источник тока между собой и подсоединить к контуру защитного заземления. Кроме этого, ещё надо обследовать надёжность подсоединения

трубопроводов и наличие/отсутствие повреждений рукавов, проводников и кабелей. Утечек газов быть не должно.

В качестве материалов для нанесения исследуемых покрытий были использованы: сплошная проволока (СП) марки 20Х13 системы легирования Fe-Cr-Cr и металлокерамические порошковые проволоки (МКПП) базовой системы легирования

Fe-Cr-B различных марок: № 1 – системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y; № 2 – системы легирования Fe-Cr-B-C-Y; № 3 – системы легирования Fe-Cr-B-Si-Y диаметром 2,0 мм (таблица 3.1).

Таблица 3.1 - Fe-Cr-B различных марок

| Марка проволоки | Массовая доля элементов, % | | | | | | |
|-----------------|----------------------------|---------|-----|-----|--------|-----|--------|
| | C | Cr | B | Al | Si | Y | Fe |
| СП 20Х13 | 0,15...0,3 | 10...12 | - | - | До 0,7 | - | Основа |
| МКПП №1 | 0,5 | 11,0 | 6,0 | 0,3 | 2,0 | 1,5 | Основа |
| МКПП №2 | 0,1 | 10,0 | 6,0 | 0,3 | 4,0 | 1,5 | Основа |
| МКПП №3 | 0,1 | 10,0 | 6,0 | 4,0 | 2,0 | 1,5 | Основа |

Напыление покрытий толщиной 2 мм производилось на поверхность образцов, которые изготовлены из стали 20 по ГОСТ1050-88. Подготовку поверхностей пластин под напыление выполняли в соответствии с ГОСТ9.304. Поверхности образцов перед напылением были подвержены обезжириванию ацетоном по ГОСТ2768-84, струйно-абразивной обработке (САО) и продувке сжатым воздухом. Работы по подготовке поверхностей образцов под напыление проводились при температуре воздуха не ниже плюс 6°C , чтобы исключить конденсацию влаги на образцах. Струйно-абразивную обработку совершили пистолетом инжекционного типа (диаметр сопла 8 мм) при рабочем давлении сжатого воздуха в пределах 0,5-0,6 МПа и его расходе 174-216 /ч. В качестве абразива использовали чугунную колотую дробь (марка ДЧК 2,0) по ГОСТ11964-81 при ее расходе 0,06-1,3 кг/с. Угол наклона струи абразива к

поверхности пластины была около $90\pm10^\circ$. Дистанция от сопла до поверхности образца варьируется в пределах 100-150 мм. Шероховатость поверхности образцов после струйно-абразивной обработки принимали не ниже Ra 12,6, проверяли при помощи набора образцов шероховатости поверхности сравнения (ОШС) по стали – степень очистки 1 по ГОСТ9.402, дробеструйная обработка (ДС) по ГОСТ9378.

Слой наносили не позднее, чем 2 часа после струйно-абразивной обработки с помощью установки сверхзвуковой электродуговой металлизации ЭДМ-11ШД.

Подготовка макро- и микрошлифов пластин для изучения структуры, эксплуатационных и физико-механических свойств пластин покрытий исполнялась при использовании этилового технического спирта (C_2H_5OH) – ГОСТ 18300-87, азотной кислоты (HNO_3) – ГОСТ 4461-77, пасты ГОИ № 2 (ТУ 6-18-36), алмазной пасты НОМ 60/40 (ГОСТ 25593) и дистиллированной воды (H_2O) – ГОСТ 6709.

3.4. Методика эксплуатационных исследований

При проведении эксплуатационных обследований рабочие органы почвообрабатывающих машин получены от производителя сельскохозяйственной техники: лапы культиватора (КПС-4), которые были объектом нашего исследования. Экспериментальные лапы поставили на культиватор КПС-4 (рисунок 3.2)



Рисунок 3.2 – Культиватор КПС-4

Для работы с тракторами, не имеющими систем автоматической регулировки глубины обработки почвы, культиватор снабжен опорными колесами , регулируемых по высоте, которые совместно с прикатывающими опорными катками, служат ограничителями глубины хода рабочих органов.

Культиватор работает следующим образом: плоскорежущие лапы крыловидной формы рыхлят обрабатываемый слой почвы на установленной глубине 8…16 см; регулируемые по глубине сферические диски измельчают и перемешивают растительные остатки, удобрения с верхним слоем почвы, разравнивают гребни образуемые рыхлящими лапами; прикатывающие опорные катки поддерживают необходимую глубину обработки, выравнивают поверхность поля, прикатывают почву, создавая уплотненное ложе.

К рабочим органам КПС-4 относятся плоскорежущие лапы с лемехами крыловидной формы, оснащенные механизмами защиты от поломок; сферические диски; прикатывающие опорные катки.

Лапы с лемехами крыловидной формы (рисунок 3.3) состоит из: стойки , лемеха крыловидной формы, долота. Долото и лемех крепятся к стойке лапы при помощи двух лемешных винтов (болтов) М12x70 с гайками.



Рисунок 3.3 – Рабочий орган (лапа) культиватора КПС-4

При наезде на камень (препятствие) лапа сжимает пружину и отклоняется, предохраняя рабочие органы от поломок. Под действием силы пружины лапа возвращается в обратное положение.

Подготовка агрегата к работе включала подготовку трактора, присоединение культиватора к трактору, предварительную регулировку культиватора и регулировку агрегата в поле.

Предварительную установку глубины обработки почвы рабочими органами - плоскорежущими лапами с лемехами крыловидной формы, сферическими дисками и прикатывающими опорными катками, производили на ровной горизонтальной площадке с твердым покрытием в следующей последовательности.

1. Под задние колеса трактора подкладывали деревянные бруски толщиной 5...6 см (имитируя продавливание почвы колесами трактора под воздействием веса агрегата);
2. Опорные колеса культиватора вывешивали на высоту «Б» до опорной поверхности (на 2...3 см меньше необходимой глубины обработки «hp»);
3. Под прикатывающие катки подкладывали деревянные бруски на 2...3 см тоньше, чем установленная величина B опорного колеса. Положение катка фиксируется пальцем .
4. Сферические диски настраивали на размер «А», равный, примерно, половине заданной глубине обработки «hp», при заданной глубине обработки 12...16 см.

Стойку диска фиксировали в заданном положении установкой пальца в соответствующие отверстия на установочном кронштейне.

При таком положении рабочих органов и путем регулировки длины верхней тяги механизма навески трактора, рама занимала при работе горизонтальное положение.

Окончательную регулировку производили в поле после пробного прохода, которая зависит от состояния обрабатываемой почвы и ее влажности и механических свойств.

Рама культиватора при работе занимала горизонтальное положение, настройка по высоте опорных колес и опорных прикатывающих катков обеспечивала требуемую заданную глубину обработки, сферические диски разравнивали гребни, образуемые рыхлящими лапами, измельчали и перемешивали растительные остатки, удобрения с верхним слоем почвы, прикатывающие катки - выравнивали поверхность поля, прикатывали почву, создавая подповерхностное уплотненное посевное ложе.

Параметры проведения эксплуатационных исследований следующие: обработка среднесуглинистых почв при глубине 8...12 см. Влажность почвы за период исследований варьировалась (15...28 %). Ее определяли гигрометром (влагомер) ЭПА-103. Скорость движения агрегата составила в среднем 7...9 км/ч. Для восстановленных рабочих органов наработка составила 40 га, серийных – 25 га.

Эксплуатационные исследования проводили для восстановленных рабочих органов с нанесенными металлизационными покрытиями из порошковой проволоки марки-3 системы легирования Fe-Cr-B-Al-Y. Одновременно с упрочненными деталями устанавливали серийные рыхлящие лапы, изготовленные из стали 28MnB5.

Параметром, определяющим текущее состояние рабочего органа, являлась потеря массы. Контроль износа проверяли с шагом 3 га до наработки 15 га, затем через 6 га до наработки 50 га, при этом рабочие органы снимали с машины и очищали от остатков почвы. Износстойкость

лап культиватора с нанесенными покрытиями определяли относительным методом, приняв за 1,0 износостойкость серийных. Органолептическим методом оценивали состояние покрытий: сколы, трещины, отслаивание, равномерность износа.

3.5 Описание установки для металлизации.

Общий вид установки для электродуговой металлизации представлен на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Установка для дуговой металлизации стрельчатых лап

Наименование комплекта оборудования для сверхзвуковой дуговой металлизации восстановления деталей почвообрабатывающей техники:

Металлизатор;

Компрессор;

Пульт управления;

Генератор;

Комплект кабелей.

Комплект оборудования для электродуговой металлизации восстановления деталей почвообрабатывающей техники - предназначен для восстановления лемехов, ножей, лап культиваторов, деталей, которые работают в условиях абразивного износа, строительной, добывающей, перерабатывающей и других видов техники в стационарных и полевых условиях, ручным, автоматизированным и механизированным способами.

Функциональное назначение установки: установка дуговой металлизации восстановление предназначена, для повышения износостойкости металлокерамических стальных деталей, которые работают в условиях абразивного износа.

Эксплуатационным назначением установки являются повышение времени между заточками и увеличение ресурса деталей.

Элементы конструкторской разработки относятся к сварке и могут быть использованы при восстановлении изношенных деталей лежачим электродом.

Известен способ сварки лежачим электродом, который предусматривает наплавку деталей с криволинейными поверхностями. В способе подвод тока к электроду осуществляют в нескольких точках, детали врашают приводом, а его прижимание к поверхности наплавки осуществляют медными роликами, которые связаны со сварочным кабелем. Тем не менее, в способе к лежачему электроду привариваются контакты, что, в свою очередь, нарушает режим сварки и уменьшает качество металлизации.

Наиболее применимым способом является способ восстановления деталей, при котором деталь закрепляют, расположив горизонтально изношенные участки, устанавливают лежачий электрод с зазором над изношенным участком с образованием электрической дуги и выполняют напыление.

Однако эти два способа предназначены только для напыления деталей одного типа и не рассчитаны на восстановление таких деталей, у которых изнашиваемые поверхности расположены в различных плоскостях и имеют ограниченный доступ для напыления. Также, в данном способе восстановления зазор между электродом и напыляемой поверхностью регулируют с помощью мерных прутков, что не даёт достаточной точности установки электрода и уменьшает качество напыления.

Задачей конструкторской разработки является повышение точности установки зазора между порошком и напыляемой поверхностью при одновременном повышении качества напыления, увеличении сроков эксплуатации и снижении затрат на ремонт, повышение удобства напыления при восстановлении деталей со сложными поверхностями износа.

Чтобы решить данную задачу предложено устройство для восстановления изношенной детали, при котором восстанавливаемую деталь закрепляют, расположив горизонтально изношенные участки, устанавливают металлизатор с зазором над изношенным участком с образованием потока частиц, вследствие чего осуществляют металлизацию.

При восстановлении изношенных участков стрельчатую лапу закрепляют с помощью держателей. При металлизации рабочих поверхностей стрельчатых лап устанавливают в горизонтальном положении. Металлизацию выполняют двумя электродами, которые располагаются в металлизаторе. Электроды закрепляют соответственно в электродуговой металлизации и располагают с зазором над изношенной поверхностью. Данный зазор выставляют надетыми на электрод разрезными кольцами из электроизоляционного материала с низкой огнестойкостью. При металлизации формируются поверхности с заданными физико-механическими свойствами, направленными на повышение износостойкости.

Технический результат предложенного нами метода состоит в создании экономичного, простого, удобного в использовании и мобильного способа металлизации, который позволяет в условиях небольших монтажных

площадок и мастерских восстановить детали, которые имеют сложные поверхности износа и повысить сроки их применения.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Порядок изготовления образцов

Для проведения лабораторных исследований были подготовлены специальные металлические пластины размером 50x50 мм из стали 65Г. Поверхность этих пластин была обработана по специальной методике, чтобы создать необходимые зоны искусственной шероховатости для обеспечения качественного сцепления основного и присадочных материалов. Подготовленные поверхности пластин были тщательно обезжирены с перекрытием границ металлизации 10...15 мм. Непосредственно перед самой металлизацией эти лабораторные пластины были просушенены в печи при температуре 180°C для удаления влаги из микронеровностей. Для каждого из четырех образцов были подготовлены смеси из металлокерамической композиций, порядок приготовления этих смесей приведен на рисунке 4.1.



Образец №1 с нанесением карбид бора (B4C), криолита (Na2AlF6).

Образец №2 с нанесением карбид бора (B4C), алюминиевого порошка (Al).

Образец №3 с нанесением алюминиевого порошка (Al), криолита (Na2AlF6).

Образец №4 с нанесением матричного порошка ПГ10Н-01.

Рисунок 4.1. Порядок подготовки смесей металлокерамических композиций

Использование этих порошков в определенной мере должно задавать определенные характеристики по износостойкости. В процессе напыления лабораторных пластин металлокерамический порошок механическим путем подавался непосредственно в зону горения дуги. После чего в процессе распыления равномерно перемешивался струей сжатого воздуха с частицами расплавленного металла, тем самым образуя потоки полета частиц в однородную массу, которая закреплялась на заранее подготовленных поверхностях лабораторных пластин.

Общий вид всех образцов(№1,№2,№3,№4) после восстановление сверхзвуковой дуговой металлизации приведен на рисунке 4.2. Разность состава вносимых металлокерамических порошков определяло различные физико-механические свойства полученных поверхностей.



Рисунок 4.2. Общий вид всех образцов после сверхзвуковой металлизации с различными составами металлокерамических порошков.

Полученные пластины прошли специальную обработку для последующих исследований на предмет контроля твердости и износостойкости.

4.2. Оценка необходимого числа измерений

Одной из задач планирования лабораторных исследований является нахождение такого числа экспериментов, которое позволило бы получить

достоверные результаты. Эта операция выполняется по принятой (известной) методике, изложенной ниже.

Распределение полученных данных чаще всего подчиняется нормальному закону распределения, потому что вариабельность результатов определяется высоким количеством различных причин.

Средняя арифметическая всех измерений даёт представление о наиболее вероятном значении выхода, если причиной вариабельности итогов измерений является гетерогенность свойств объектов совокупности.

Для оценки выхода на практике используют среднюю арифметическую из ограниченного числа измерений n , степень вариабельности которых можно оценить на основании размахов варьирования.

Таблица 4.1 - Уровни достоверности

| Число степеней свободы | Уровень достоверности | | Число степеней свободы | Уровень достоверности | | Число степеней свободы | Уровень достоверности | |
|------------------------|-----------------------|-------|------------------------|-----------------------|------|------------------------|-----------------------|------|
| | 95% | 99% | | 95% | 99% | | 95% | 99% |
| 1 | 12,71 | 66,66 | 12 | 2,18 | 3,06 | 23 | 2,07 | 2,81 |
| 2 | 4,30 | 9,92 | 13 | 2,16 | 3,01 | 24 | 2,06 | 2,80 |
| 3 | 3,18 | 5,84 | 14 | 2,14 | 2,98 | 25 | 2,06 | 2,79 |
| 4 | 2,78 | 4,60 | 15 | 2,13 | 2,95 | 26 | 2,06 | 2,78 |
| 5 | 2,57 | 4,03 | 16 | 2,12 | 2,92 | 27 | 2,05 | 2,77 |
| 6 | 2,45 | 3,71 | 17 | 2,11 | 2,90 | 28 | 2,05 | 2,76 |
| 7 | 2,36 | 3,50 | 18 | 2,10 | 2,88 | 29 | 2,04 | 2,76 |
| 8 | 2,31 | 3,36 | 19 | 2,09 | 2,86 | 30 | 2,04 | 2,75 |
| 9 | 2,26 | 3,25 | 20 | 2,08 | 2,84 | 40 | 2,02 | 2,70 |
| 10 | 2,23 | 3,17 | 21 | 2,07 | 2,83 | 60 | 2,00 | 2,66 |
| 11 | 2,20 | 3,11 | 22 | 2,06 | 2,82 | 120 | 1,98 | 2,62 |

Число степеней свободы f определяли, используя формулу:

$$f = l(n-1),$$

где n – число вариантов в группах повторных определений, проведенных в одинаковых условиях,
 l – количество таких групп.

В нашем случае l равен 1, а $n = 8$, отсюда следует, что $f = 1(8-1)=7$.

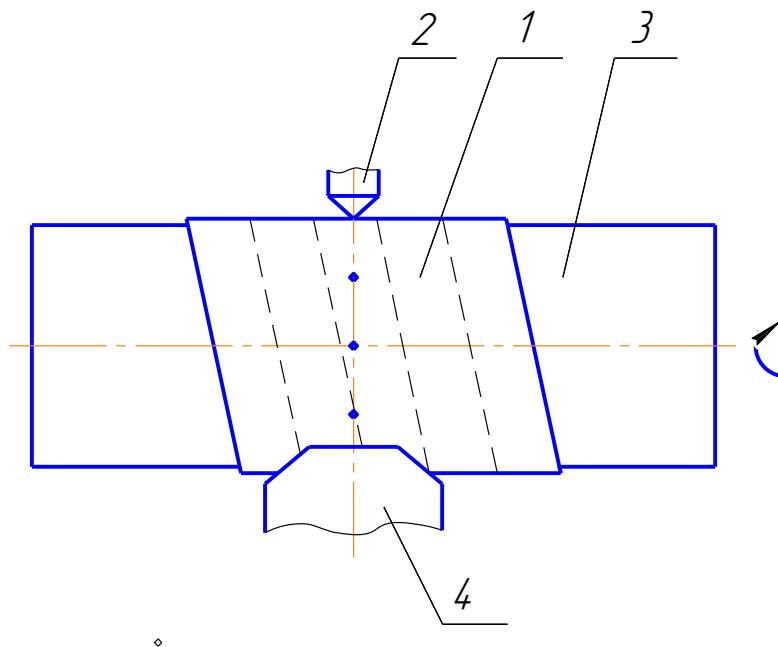
Используя таблицу, при уровне достоверности 95% и $f_2=3,5$ при достоверности 99% находим коэффициент Стьюдента $f_1=2,36$.

Произведение $t_p[n-1]$ это доверительный интервал, на величину которого с вероятностью p истинное значение может отличаться. Исходя из этого, выходит, что чем меньше величина этого доверительного интервала, тем средняя арифметическая определенное отражает истинное значение.

Для решения задачи об установлении необходимого числа измерений, обеспечивающую заданную экспериментатором величину отклонения средней арифметической от истинного значения, выражение можно преобразовать.

4.3. Методика измерения твердости и микротвердости

Твердость измеряли с помощью твердомера Роквелла ТК-2 алмазным конусом при нагрузке 150 кг по схеме, которая представлена на рисунке 4.3. Данная методика позволила нам замерять твердость по ширине приваренного валика и получить значения твердости по его ширине. Измерения делались согласно известной методике.



1 - покрытие; 2 - алмазный наконечник твердометра; 3 – образец; 4 – стол – призма твердометра.

Рисунок 4.3 – Схема определения твердости поверхности



Рисунок 4.4 Твердомер Роквелла ТК-2

Твердость покрытий, полученных восстановлением образцов сверхзвуковой дуговой металлизацией.

Перед замером твердости контролируемые участки тщательно зачищались. Измерения производились на трех участках каждого образца с

пятикратной повторностью. При этом необходимо было обеспечить условием горизонтального расположения контролируемых образцов.

Твердость является весьма важным показателем качества восстановленной поверхности и характеризует не только сопротивляемость металла, но и однородность поверхности упрочняемой детали.

Измерение твердости производилась на ультразвуковом твердомере ТКМ-459 алмазным конусом по принципу Роквелла, который представлен на (рисунке 4.5). Данная методика позволила нам провести замеры твердости по ширине приваренного валика и получать значения твердости по его ширине.

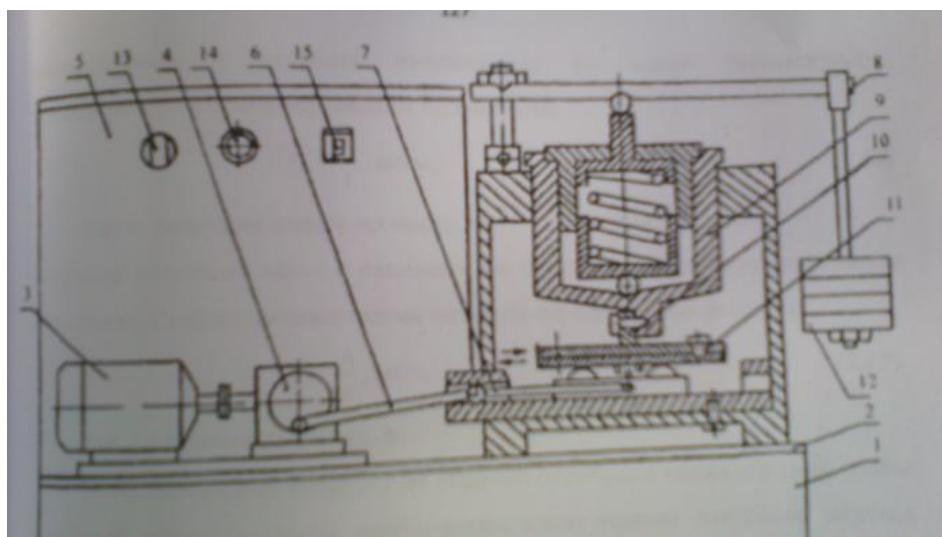


Рисунок 4.5 Ультразвуковой твердомер ТК-459

В исследованиях по определению сравнительных свойств износостойкости покрытий, которую проводили на машине трения 77МТ-1 методом сухого трения, в качестве износового инструмента использовалась плитка 50x50 мм.

Принцип действия машины трения приведен на рис. 4.7. На входном вале редуктора (4) расположен эксцентрик кривошипно-шатунного механизма (КШМ). Ползун (7) приводится в возвратно-поступательное движение шатуном (6). На тележке ползуна закреплена подвижная тарелка (11) с испытуемыми образцами. Брусков ЧАЗ-38-12С1НБ (10) закрепляется в

нижней части стакана (9) в качестве износового инструмента, нагрузка обеспечивается навеской с гилями (12) через рычаг (8) которые давят на стакан, скорость возвратно-поступательного движения регулируется изменением частоты вращения электродвигателя (3) посредством ручки регулятора (13).



1 – основание, 2 – станина, 3 – электродвигатель, 4 – редуктор, 5 – корпус машины, 6 – шатун эксцентрика, 7 – ползун, 8 – рычаг для нагрузки, 9 – стакан, 10 – неподвижный образец, 11 – подвижная тарелка, 12 – навеска с гилями, 13 – регулятор скорости, 14 – индикатор, 15 – сетевой выключатель.

Рисунок 4.6 – Схема машины трения

Перед опытами образцы подвергались микроприработке, из-за которой достигается равномерное распределение следов изнашивания по всей рабочей поверхности образцов. Далее образцы промыли, высушили (при температуре 60°C в течение 8-10 минут) и взвесили (на специальных аналитических весах с точностью до 0,000005 г), а ещё измерили площадь контакта. []

После подготовительных работ начинаются ресурсных испытаний. Перед использованием подвижный образец смазывается солидолом,. Нагружение осуществляли постепенно (0,3-3 МПа)*5, где 5 – коэффициент, который показывает рост давления благодаря длине рычага, чтобы предотвратить появление задиров. Перед тем, как приступить к работе

необходимо включить вольтметр и после его прогрева, который продолжается 60 минут, снять показания: минимальное значение (-), и максимальное значение (+) с учетом реверсивного движения. После эти значения суммировали по модулю и делили на пополам. По тарировочным кривым оценивали коэффициент трения.

После завершения ресурсных испытаний машину трения останавливали, образцы промывали, просушивали, завешивали и замеряли площадь контакта, для изучения зоны трения использовали световой микроскоп. Испытания проводили на 11 образцах по аналогичной методике.

Величины линейного износа нашли пересчетом по потерям массы. По размерам линейных износов определили интенсивность износа каждого образца. Для образца 1 интенсивность износа, за время опытов с числом n циклов, находили по следующей формуле:

$$I_1 = \Delta q_1 / 2\gamma_1 n H A$$

где $\gamma_1 = 1 * b$ - номинальная площадь контакта (площадь поверхности трения образца);

- ход подвижного образца;
- плотность материала образца;
- потеря массы образца на n циклов.

Интенсивность износа для 2-го образца за время проверок с числом n циклов находили по формуле:

$$I_2 = \Delta q_2 / 2\gamma_2 n H A,$$

где H – ход подвижного образца;

$2\Delta q_2$ - потеря массы 2го образца на n циклов;

γ_2 - плотность материала 2го образца;

$A = 1 * b$ – номинальная площадь контакта пары (площадь поверхности трения 2го образца).

Проведенные исследования в лабораториях кафедры «Эксплуатация и ремонт машин» Казанского ГАУ восстановления деталей виброродуктовым способом с использованием металлокерамических порошков показали

следующие результаты. Опыты на образцах с различными режимами обработки выявили влияния на глубину структурных изменений материалов образцов. Также варьируя различными составами металлокерамических порошков и режимами обработки можно получать планируемые физико-механические свойства обработанных поверхностей.

4.4 Основные факторы, влияющие на толщину напыленного слоя при сверхзвуковой дуговой металлизации

Опытным путем было определено, что самое крупное воздействие на толщину напыленного слоя оказывают следующие параметры: скорость потока частиц и сила тока. Предельные значения установили, чтобы узнать уровень воздействия любого из вышеназванных условий с учётом проведённых исследований. Наиболее хорошие результаты толщины напыленного слоя для стрельчатых лап получили при дуговой металлизации при следующих режимах: силы тока $\Delta I = 200$ А, скорость потока частиц $P = 250$ м/сек, скорость обработки $v_d = 1,2$ м/мин. При выборе глубины восстановления было немаловажно, чтобы закалённый внешний слой сохранил начальную структуру и качества внутренних слоев металла, кроме того, было особо рассмотрен вопрос о формировании текстуры волокон сплава для повышения усталостной прочности.

Начальная твердость применяемого материала была равной около Нм 3000 Мпа. Толщину напыленного слоя устанавливали на шлифах по микротвердости. Для точности результатов исследования опыты проводились трижды на разных режимах.

Использовали математический метод планирования опыта, чтобы определить объективный уровень воздействия каждого из ранее названных факторов, а также для получения максимального количества информации при наименьших затратах. Благодаря этому методу при можно сделать математическую модель процесса наименьшем числе опытов. Этую

математическую модель используют, если необходимо найти наилучшие режимы технологического процесса и управления им.

Математическую обработку делали, используя ПЭВМ с применением специальной программы для нахождения криволинейной многочисленной корреляции полнофакторного опыта и критерия Кохрена. Также использовали прикладные программы «Excel» и «Statistica 6.0».

Таблица 4.2 Интервалы и степени варьирования самостоятельных факторов

| Название факторов | Обозначение факторов | Ед. изм. | Интервал варьирования | Уровни факторов | | |
|----------------------------|----------------------|----------|-----------------------|-----------------|----------|---------|
| | | | | нижний | основной | верхний |
| 1. Сила тока, ΔI | X_1 | A | 50 | 150 | 200 | 250 |
| 2. Скорость потока воздуха | | м/сек | 50 | 200 | 250 | 300 |
| 3. Скорость обработки, | | м\мин | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 |

С целью прогноза направления градиента была подобрана нелинейная квадратическая форма:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{1,2} X_1 X_2 + \\ + b_{1,3} X_1 X_3 + b_{2,3} X_2 X_3 + b_{1,2,3} X_1 X_2 X_3 + b_1 X_1^2 + b_2 X_2^2 + b_3 X_3^2. \quad (4.1)$$

4.4.1. Воздействие режимов электродуговой металлизации на толщину напыленного слоя

В таблице 4.3 показан полный план матрицы трёхфакторного опыта в трёх уровнях для натуральных и кодированных чисел.

Матрица планирования – очередь исполнения всех вероятных комбинаций факторов. Знак «-» показывает то, что в данном опыте это условие находится на нижнем уровне, а знак «+» - что фактор расположится на верхнем уровне. Осуществление опыта вели в случайной последовательности, которую выбрали из таблицы равномерно

распределённых случайных чисел. Полученные реальные значения параметра оптимизации (отклики) записывали в графах , , .

Согласно итогам активного эксперимента установлены критерии Стьюдента ($T_r=16,84$), Кохрена, Фишера ($F_r=47,23$). Дисперсии по всем экспериментам однородны, итоги повторямы, потому что табличный критерий Кохрена больше расчётного.

$$G_{(расч.)}=0,1186 < G_{(табл.)} = 0,2167$$

После обработывания результатов испытаний получено уравнение регрессии процесса, обрисовывающее воздействие силы тока (), скорость потока воздуха () и скорость обработки .

Таблица 4.3 Полный план матрицы 3-хфакторного эксперимента в 3-х уровнях для кодированных и натуральных чисел (параметр оптимизации – толщина напыленного слоя δ)

| № п\п | Сила тока-ΔI (150...250), А | Скорость потока воздуха (200...300), м/с | Скорость обработки (0,7...1,7), м\мин | Реальные значения параметра оптимизации δ по реализации эксперимента, мм |
|-------|--------------------------------|--|--|---|
| | | | | , , |
| 1 | 150(-1) | 200(-1) | 0,8 (-1) | 0,19; 0,15; 0,17 |
| 2 | 150(-1) | 200(-1) | 1,2 (0) | 0,1; 0,14; 0,13 |
| 3 | 150(-1) | 200(-1) | 1,6 (+1) | 0,12; 0,11; 0,15 |
| 1 | 150(-1) | 250(0) | 0,8 (-1) | 0,16; 0,17; 0,16 |
| 2 | 150(-1) | 250(0) | 1,2 (0) | 0,12; 0,18; 0,12 |
| 3 | 150(-1) | 250(0) | 1,6 (+1) | 0,11; 0,1; 0,12 |
| 1 | 150(-1) | 300(+1) | 0,8 (-1) | 0,14; 0,17; 0,15 |
| 2 | 150(-1) | 300(+1) | 1,2 (0) | 0,13; 0,14; 0,14 |

| | | | | |
|-------|---------|---------|----------|------------------|
| 3 | 150(-1) | 300(+1) | 1,6 (+1) | 0,1; 0,13; 0,14 |
| <hr/> | | | | |
| 1 | 200(0) | 200(-1) | 0,8 (-1) | 0,17; 0,19; 0,14 |
| 2 | 200(0) | 200(-1) | 1,2 (0) | 0,16; 0,18; 0,2 |
| 3 | 200(0) | 200(-1) | 1,6 (+1) | 0,14; 0,16; 0,15 |
| 1 | 200(0) | 250(0) | 0,8 (-1) | 0,21; 0,18; 0,2 |
| 2 | 200(0) | 250(0) | 1,2 (0) | 0,2; 0,19; 0,19 |
| 3 | 200(0) | 250(0) | 1,6 (+1) | 0,18; 0,21; 0,19 |
| 1 | 200(0) | 300(+1) | 0,8 (-1) | 0,24; 0,19; 0,22 |
| 2 | 200(0) | 300(+1) | 1,2 (0) | 0,18; 0,21; 0,23 |
| 3 | 200(0) | 300(+1) | 1,6 (+1) | 0,24; 0,17; 0,2 |
| <hr/> | | | | |
| 1 | 250(+1) | 200(-1) | 0,8 (-1) | 0,23; 0,21; 0,24 |
| 2 | 250(+1) | 200(-1) | 1,2 (0) | 0,21; 0,17; 0,22 |
| 3 | 250(+1) | 200(-1) | 1,6 (+1) | 0,23; 0,21; 0,18 |
| 1 | 250(+1) | 250(0) | 0,8 (-1) | 0,23; 0,25; 0,22 |
| 2 | 250(+1) | 250(0) | 1,2 (0) | 0,22; 0,21; 0,24 |
| 3 | 250(+1) | 250(0) | 1,6 (+1) | 0,23; 0,2; 0,21 |
| 1 | 250(+1) | 300(+1) | 0,8 (-1) | 0,25; 0,28; 0,24 |
| 2 | 250(+1) | 300(+1) | 1,2 (0) | 0,25; 0,23; 0,26 |
| 3 | 250(+1) | 300(+1) | 1,6 (+1) | 0,24; 0,23; 0,23 |

$$y = -0,114 + 2,01X_1(\text{kA/mm}^2) + 0,326X_2(\text{kH}) - 0,0671X_3(\text{м/мин}) - 2,81X_1^2 - 0,148X_2^2 + 0,015X_2^2.$$

Уравнение регрессии, которое характеризует влияние сила тока и скорость потока на толщину напыления в натуральных и кодированных значениях факторов соответственно:

$$y = 0,0121 + 0,0011\Delta I - 0,0004P_u - 2,8148\Delta I^2 + 3,6667\Delta IP_u - 1,4815P_u^2, \quad (4.2)$$

$$y = 0,1908 + 0,0421X_1 + 0,0104X_2 - 0,0085X_1^2 + 0,0062X_1 X_2 - 0,0026X_2^2. \quad (4.3)$$

Графическое изображение поверхности отклика от взаимодействия силы тока и скорости потока воздуха представлено на рисунке 4.7.

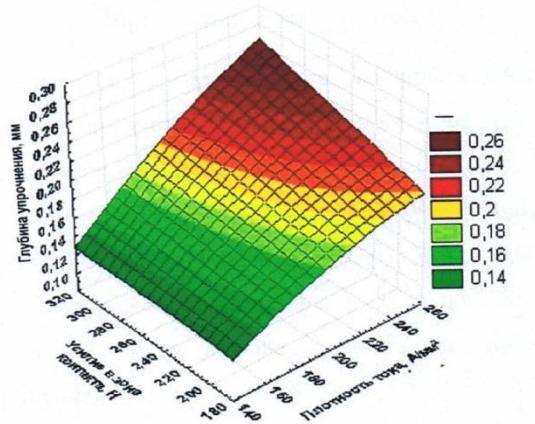


Рисунок 4.7 – Поверхность отклика от взаимодействия сила тока и скорости потока воздуха

Уравнение регрессии, которое характеризует влияние скорости обработки и силы тока на толщину напыления в натуральных и кодированных значениях факторов соответственно:

$$y = 0,0214 + 0,0017v_d - 0,1199\Delta I - 2,8148v_d^2 + 0,0003v_d\Delta I + 0,015\Delta I^2, \quad (4.4)$$

$$y = 0,1861 + 0,0434X_3 - 0,0148X_1 - 0,0041X_3^2 + 0,0043X_3 X_1 - 1,7052X_1^2. \quad (4.5)$$

Графический рисунок поверхности отклика от взаимодействия силы тока и скорости обработки показано на рисунке 4.8

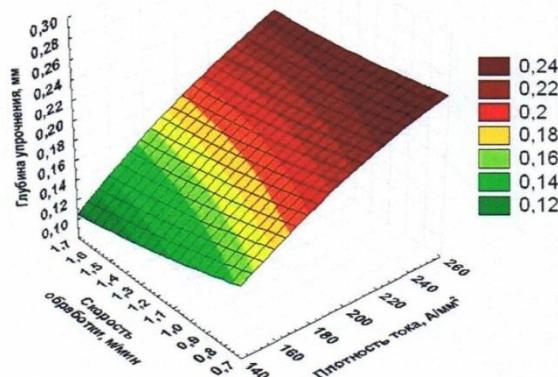


Рисунок 4.8 – Поверхность отклика от взаимодействия силы тока и скорости обработки

Уравнение регрессии, которое характеризует влияние скорости обработки и скорости потока на толщину восстановления в натуральных и кодированных значениях факторов соответственно.

$$y = 0,1869 + 0,0003v_d - 0,081P_i - 1,4815v_d^2 + 5,5556v_d P_i + 0,015P_i^2 \quad (4.6)$$

$$y = 0,1836 + 0,0126X_3 - 0,0124X_2 - 0,0004X_3^2 + 0,0011X_3 X_2 + 0,0024X_2^2. \quad (4.7)$$

Графический рисунок поверхности отклика от взаимодействия скорости потока воздуха и скорости обработки показан на рисунке 4.9.

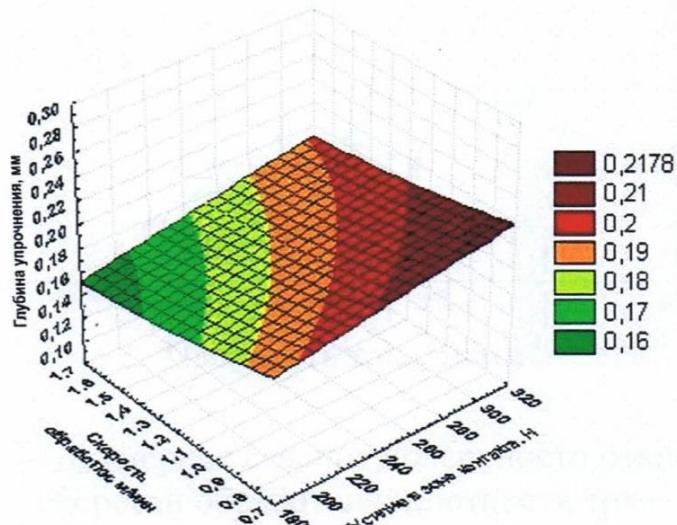


Рисунок 4.9 – Поверхность отклика от взаимодействия скорости потока воздуха и скорости обработки

Графические рисунки поверхностей откликов и двумерное сечение от взаимодействия независимых факторов дают возможность наиболее приемлемо выбирать режимы сверхзвуковой дуговой металлизации разного состава материала стрельчатых лап с учетом, предъявляемых требований.

4.5. Испытание восстановленных стрельчатых лап методом сверхзвуковой дуговой металлизации в полевых условиях

Исследования стрельчатых лап в полевых условиях проводились на базе передового хозяйства «Урал» Кукморского района РТ по заданию

Министерства сельского хозяйства и продовольствия РТ. Полевые исследования проводились с использованием двух культиваторов КПС-4. На эти культиваторы были установлены как серийные новые стрельчатые лапы

Общий вид культиватора с экспериментальными лапами приведен на рисунке 4.10. Восстановленные лапы методом дуговой металлизации устанавливались рядом с серийными новыми лапами для того, чтобы наглядно убедиться в скорости износа восстановленной и серийной лап.



Рисунок 4.10 – Экспериментальный культиватор КПС-4

Полевые испытания образцов восстановленных методом дуговой металлизацией стрельчатых лап с использованием металлокерамических порошков показали, что в зависимости от составов металлокерамических порошков и режимов обработки износостойкость восстановленных поверхностей может быть увеличена в 2-3 раза по сравнению с исходной.

Для подтверждения результатов лабораторных исследований в 2018 году были проведены полевые исследования напыленных стрельчатых лап на сельскохозяйственном предприятии «Урал» Кукморского района. Для

испытания было упрочнено 20 новых стрельчатых лап для культиваторов КПС-4 типоразмера 330.

Перед весенними полевыми работами на базе СХП «Урал» было скомплектовано два культиватора КПС-4 с новыми рабочими органами: стрельчатыми лапами с восстановлением и без восстановления. Фотография новых и восстановленных стрельчатых лап на культиваторе КПС-4 приведена на рисунке 4.11.



a) серийная новая лата; б) серийная напыленная лата

Рисунок 4.11 – Лапы, установленные на культиватор

Опытные культиваторы выполнили весь запланированный объем весенних полевых работ на полях СХП «Урал». Один культиватор КПС-4 обработал 600 га пашни, второй культиватор КПС-4 обработал 650 га пашни.

После эксплуатационных исследований видно, что стрельчатые лапы, восстановленные дуговой металлизацией с использованием подобранных составов металлокерамических порошков полностью сохранили свои геометрические размеры и могут быть использованы в дальнейшем. Полевые испытания в СХП «Урал» показали, что за период наработки стрельчатые лапы КПС-4 не изменили своих геометрических размеров в отличие от серийных лап. Таким образом, использование технологии дуговой металлизации восстановления с использованием металлокерамических

порошков позволяет не только повысить износостойкость и ресурс работы стрельчатых лап, но и сохранить их геометрические размеры в процессе культивации, что весьма важно для поддержания заданных агротехнических требований, что в свою очередь напрямую связано с урожайностью.

Применение технологий сверхзвуковой дуговой металлизацией восстановления позволит в значительной степени обеспечить импортозамещение дорогостоящих запасных частей, обеспечивая рациональное соотношение цены и качества.

4.6. Изучение рынка сбыта научно-технической продукции

В качестве научно-технической продукции предлагается инновационный метод восстановления деталей, работающих в условиях абразивного износа, наплавкой косвенной дугой и графитовыми электродами металлокерамических пластин, состоящих из порошков в стальной матрице.

Разрабатываемое оборудование и технологии восстановления предназначаются для использования:

- в сельхозмашиностроении, РТП, МТС и в сфере эксплуатации почвообрабатывающей сельскохозяйственной техники;
- в строительной, добывающей, перерабатывающей, машиностроительных отраслях.

В настоящее время на заводах-изготовителях восстановление деталей почвообрабатывающей техники в основном ограничивается термической закалкой с твердостью 48-52HRC, что недостаточно, по отзывам эксплуатационников. Поэтому практикуется в отдельных случаях закупка стрельчатых лап зарубежного производства, восстановленных дуговой металлизацией твердых сплавов, которые содержат борид и карбид хрома, карбид бора (сплав «Элкефем», что обеспечивает повышение ресурса дисков в 3,5-4 раза). Но зарубежная продукция примерно в 2 раза дороже отечественно.

4.7. Сфера применения технологии восстановления и оборудования

- транспортное оборудование по очистке животноводческих ферм;
- почвообрабатывающая техника (плуги, культиваторы, дисковые бороны, сеялки и др.);
- строительные, мелиоративные и по внесению удобрений машины;
- свеклорежущие ножи сахарных заводов;
- мясоперерабатывающее оборудование;
- горнодобывающая, буровая и дорожно-транспортная техника;
- штампы для строительства силикатного кирпича и др.;
- металло- и дереворежущий инструмент;
- молотковые дробилки;
- детали измельчителей кормоприготовительных машин;
- лопастные винты судов;
- лопатки турбин теплоэлектростанций.

Надежность – это комплексное свойство, которое характеризует такими параметрами как долговечность, безотказность, ремонтопригодность и сохраняемость. Из них все характеризуется своими количественными показателями, но они носят вероятностный характер. Это разъясняется тем, что сельхоз техника и их детали из-за разнородности исходных материалов и сырья, отклонений в технологии разработки и сборки получаются с различными характеристиками. Кроме того, сельскохозяйственная техника попадает в разнообразные условия при использовании, где она подвергается не только переменным воздействиям, но и случайным. Всё это приводит к износу деталей и такие показатели как наработка на отказ, срок службы, ресурс и прочие являются случайными величинами. Следственно, для контроля и анализа надежности нужны математическая статистика теория и вероятностей, которая вооружающая нас способами сбора, обрабатывания и разбора статистического лабораторного материала, способами получения

количественных показателей надежности на основании статистических данных.

Общие выводы

1. Произведен анализ существующих методов восстановления деталей сельскохозяйственных машин, которые выявил преимущество использования сверхзвуковой дуговой металлизации обработанных деталей типа стрельчатые лапы культиваторов.

2. Обоснована необходимость использования различных составов металлокерамических порошков, при восстановлении рабочих органов почвообрабатывающих машин.

3. Разработана методика лабораторных исследований, позволяющая оценить физико – механические свойства восстановленных рабочих органов сельскохозяйственных машин.

4. Результаты лабораторных исследований по разработанной методике показали, что микротвёрдость образцов восстановленных с использованием металлокерамических порошков составов: Na_3AlF_6 , B_4C , Al , ПГ10Н-01 и водный раствор жидкого стекла(Na_2SiO_4), позволило получить твердость пределах от 58-75 HRC.

5. Экспериментальные исследования на машине трения МТ-1 показали, что износостойкость лабораторных образцов в зависимости металлокерамических порошков по сравнению с контрольным образцом возрастает в 2,5...3,5 раза.

6. Разработан технологический процесс восстановления режущей части стрельчатых лап культиваторов для использования в производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Адигамов Н.Р. Исследование износостойкости деталей восстановленных методом вибродуговой обработки/ Кастелл Сантьяго., Материалы международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», Казанский ГАУ,2016.
2. Адигамов Н.Р. Обоснование составов металлокерамических порошков при вибродуговом упрочнении деталей машин/ Кастелл Сантьяго., Материалы международной научно-практической конференции «Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», Казанский ГАУ, 2016.
3. Гайнутдинов Н.М. Влияние режимов электродуговой металлизации и составов применяемых порошковых проволок на структуру и абразивную износостойкость покрытий / Н.М. Гайнутдинов, А.Т. Байниязова, Н.Р. Адигамов // АГРОИНЖЕНЕРНАЯ НАУКА XXI ВЕКА: научные труды региональной научно-практической конференции.— Казань: Казанский ГАУ, 2018.—С. 308—312.
4. Адигамов Н.Р. Перспективные технологии восстановления изношенных деталей в современных условиях сельскохозяйственного производства / Н.Р. Адигамов, А.Н. Адигамова, С.Н. Шарифуллин // Инновационное развитие агропромышленного комплекса: материалы Всероссийской научно-практической конференции.— Казань: Казанский ГАУ, 2007.—С. 94—98.
5. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Определение весомости технологических операций и уровня расхода ресурса агрегатов и систем трактора / И.Г. Галиев, Р.К. Хусаинов // Вестник Казанского государственного аграрного университета.— Казань; Казанский ГАУ, 2012.Т.7.№3 (25). С. 74-77.

6. Галиев И.Г., Хусаинов Р.К. Оценка условий функционирования тракторов в аграрном производстве / И.Г. Галиев, Р.К. Хусаинов//Техника и оборудование для села.—2015. №10. С.13-15.
7. Андриевский Р.А. Наноструктурные материалы — состояние разработок и перспективы / Андриевский Р.А., Перспективные материалы, №6, 2001, с.7-8.
8. Андриевский Р.А. Наноматериалы: концепция и современные проблемы / Андриевский Р.А., Российский химический журнал, №5, 2002, 10с.
9. Андриевский Р.А. Состояние разработки и перспективы в области | порошковых наноструктурированных материалов / Андриевский Р.А., Порошковая металлургия, №22, Минск, 1999, с.18-19.
10. Алимов В.И., Химико-термическое восстановление сплавов с использованием плазмы дугового разряда./ Алимов В.И., Крымов В.Н. «Сварочное производство», №3,2002, с.9.
11. Ашмарин И.П., Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов / Ашмарин И.П., Васильев Н.Н., Амбросов В.А. Ленинград, 1975, с.27-33
12. Бабаев И.А. Исследование и разработка технологии восстановления деталей порошковыми композиционными покрытиями / Бабаев И.А, Дисс. ... канд. техн. наук. – М,1982.
13. Бокштейн С.З. Строение и свойства металлических сплавов / Бокштейн С.З.,М., 1971.
14. Гусев А.И., Нанокристаллические материалы / Гусев А.И., Ремпель А.А., М.: ФИЗМАТЛИТ, 2000, 38с.
15. Интернет: <file:///E/> / Нанопорошки
16. Матюнин В.М. Исследование зависимости ударной вязкости от других механических характеристик / Матюнин В.М., Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. М, МЭИ, 1969, 23с.

17. Мишустин Н.М., Структура и некоторые свойства боридных покрытий для почвообрабатывающих органов сельхозтехники / Мишустин Н.М., Кривогуров Н.Т., Иванайский В.В., Шиков А.В., Труды Алтайского государственного аграрного университета 2012.
18. Соловей А.Г., Прогрессивные технологии – в производство / Соловей А.Г., Дубровский В.А., Тяжелое машиностроение, 1996.- №10. – С. 5-6.
19. Стороженко П.А. Российские нанотехнологии./Стороженко П.А. Т.2009
20. Тененбаум М.М. Сопротивление абразивному изнашиванию / Тененбаум М.М. М., Машиностроение, 1976, с.23-30.
21. Тараков Ю.С. Восстановление и восстановление деталей машин металлическими порошками/Тараков Ю.С.- М.: Россельхозиздат, 1985, С. 22-24.
22. Физическое металловедение. Под редакцией Р. Кана, перевод с английского т. 1-3, М., 1967, 1968.
23. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов / Фридман Я.Б., М., Машиностроение, 1974, 54с.
24. Хокинг М., Металлокерамические и керамические покрытия / Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. М., «Мир», 2000, с.34-37.
25. Хокинг М., Металлокерамические и керамические покрытия / Хокинг М., Васантаэрн В., Сидки П., М. «Мир», 2000.с.25-29.
26. Шанг Ф.А. Структуры двойных сплавов / Шанг Ф.А., Перевод с английского. Мю, 1973.
27. . Технологические процессы: учебник для студентов высших учебных заведений. / Под ред. В.А. Вагнера. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006 - 592 с

ПРИЛОЖЕНИЯ