

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»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)
ТЕМА: РАЗРАБОТКА И ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ
ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОПЛАМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ

Студент магистратуры _____ Гисматов А.Р.
Научный руководитель,
д. т. н., доцент _____ Калимуллин М.И.
Рецензент
к. т. н., доцент _____ Лукманов Р.Р.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите
(протокол № 19 от 13 июня 2018 г.)

Зав. кафедрой профессор _____ Адигамов Н.Р.
ученое звание подпись Ф.И.О.

Казань-2018

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время отмечаются некоторые положительные изменения, происходящие в агропромышленном комплексе России, которые только начинаются после долгих периодов застоя и разрушения сельскохозяйственных предприятий со времен распада СССР и постперестроечных времен. Положительные изменения обуславливают интенсивную эксплуатацию сельхозтехники, в силу чего требуется обеспечение оперативного и качественного восстановления отдельных ее компонентов, агрегатов и блоков. В качестве наиболее продуктивного и популярного сегодня метода восстановления выступает процесс напыления на поверхность деталей разнообразных металлизированных покрытий в ходе напыления порошковых материалов. Сегодня, из экономических соображений требуется значительно продление сроков эксплуатации сельхозтехники, именно этот фактор обуславливает повышение актуальности рассматриваемой в рамках настоящей магистерской диссертации методики.

В рамках рассматриваемого научного сектора деятельности отмечается большое количество проведенных исследований. Но в данном случае основная деятельность реализуется в направлении изучения различных технологий напыления металлического покрытия. Практически не проводились исследования для создания не трудоемкой, не требующей существенных финансовых затрат и продуктивной методики восстановления металлических деталей сельхозмашин. Именно по этой причине сегодня ученые всё ещё не могут найти решение 3 приоритетных фундаментальных задач:

- не разработан метод вычисления толщины покрытия, которое получают в процессе напыления;
- не разработан метод вычисления рационального расстояния напыления;
- не разработаны методы оценки надежности покрытия.

В силу сокращения объемов средств выделяемых на экспериментальные работы может сместиться центр внимания в данном направлении. Сейчас основные силы нужно бросить на разработку методов и математических моделей, которые предоставят возможность путем использования компьютерных средств и программ прогнозировать возможности и последствия использования метода нанесения покрытий. Могут быть проведены также разнообразные экспериментальные работы, и программы, направленные на поиск новых технологий для наиболее эффективного восстановления деталей.

В рамках настоящего исследования приводятся веские аргументы в отношении того, что наиболее перспективной технологией для восстановления деталей сельхозтехники следует считать сегодня методику газопламенной паплавки напылением.

В силу этого, цель работы заключается в исследовании и разработке компонентов технологии восстановления деталей сельхозтехники при помощи использования способов газопламенной паплавки напылением.

Полученные в результате экспериментальных исследований результаты будут положены в основу разработки простой, сравнительно недорогой и высокоэффективной технологии, применяемой при восстановлении деталей сельхозтехники.

В процессе разработки настоящей работы был реализован ряд исследований, в ходе осуществления которых было наглядно продемонстрировано, что требования предъявляемые к простоте и универсальным методом использования, низкой стоимости расходных средств и материалов, техники, а также в целях соблюдения техники безопасности и требуемого уровня качества при восстановлении деталей и узлов оборудования, наибольшему эффективностью показала способ газопламенной паплавки металла при помощи напыления.

Сущность представленного метода сводится к осуществлению газопламенного напыления покрытия с его дальнейшим оплавлением с

использованием помощи высокочастотных токов (ТВЧ). Также в рамках настоящего исследования было установлено, что учёные проводили множество исследований и научных разработок, но при этом практически не обращалось внимание на необходимость проектирования простой в применении, не требующей существенных финансовых затрат, методики восстановления металлических деталей а, которая могла бы эффективно использоваться в процессе выпуска машин сельскохозяйственного назначения, также учёные практически не исследовали теорию исследуемой деятельности, процессы создания расчетных моделей.

В ходе осуществления своих научных разработок, ученые определили, что наплавка металла методом напыления представляет собой промежуточную стадию между стадии металлизации и наплавке. В результате использования этой методики, на выходе можно получить тончайший, связанный диффузионно слой напыления, но при этом практически исключается смешивание покрытие со слоем основного металла. В результате на выходе получается однородный слой покрытия, в котором полностью отсутствуют трещины. В ходе реализации практических научных разработок также было доказано, что предлагаемые в магистерской диссертации методика газопламенной наплавки металла методом напыления с применением ТВЧ, предоставляет возможность создавать покрытия с повышенной степенью производительности наплавки (7,0 - 10 кг/ч) на достаточно широком ассортиментном перечне автомобильных деталей. Если сравнивать данный метод с методом газопламенного оплавления производительность повышается в 5-7 раз.

В которых отмечается минимальное смешение напыляемого и основного металла, Кроме того удается сохранить перечень основных свойств напыляемых составов. В ходе реализации процесса можно увидеть, что происходит объемный нагрев основного металла до достаточно высоких температур, указанный фактор достаточно значим для чугунных изделий.

Учеными также доказаны высокие физико-механические характе

ристки получаемых в результате использования метода покрытий: показатель прочности сцепления покрытия с главным металлом, высокие параметры твердости покрытия, толщина покрытия и значение коэффициента износостойкости (относительно к закаленной стали 45 параметры имеют значение: 450-650 МПа; 40-70 HRC; 0,1-1,0 мм и 3-10).

Поэтому дальнейшие исследования метода восстановления изношенных деталей газопламенным напылением является актуальной задачей.

Цель работы заключается в исследовании и разработке компонентов технологии восстановления деталей сельхозтехники при помощи использования способов газопламенной наплавки напылением.

Объект исследования разработанная технология газопламенной наплавки напылением, а также процесс нанесения покрытий на поверхности восстанавливаемых покрытий на поверхности восстанавливаемых деталей.

Практическая ценность работы заключается в разработке и внедрении технологии восстановления деталей газопламенным напылением, ориентированной на реальные условия эксплуатации техники, в получении покрытий с высокими физико-механическими характеристиками, в разработке инженерных расчетных методик определения толщины слоя, износостойкости покрытия, в получении экономического эффекта от внедрения разработки.

Основные положения диссертационной работы были доложены на научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов Казанского ГАУ (2016-2018гг.).

Основное содержание диссертации, результаты исследований отражены в 2 статьях в трудах международной конференции.

Работа выполнена на кафедре «Эксплуатация и ремонт машин» ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет».

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках главы 1 проводится анализ состояния вопроса исследования в двух областях, прежде всего в рамках технологии восстановления деталей и в сфере научных исследований восстановительных работ.

1.1 Состояние исследований в области разработки технологий восстановления деталей

По результатам реализованного исследования было доказано, что для повышения ресурса работы технических средств, повышения сроков службы быстро изнашивающихся деталей и узлов сельхозмашин, сокращения объемов расхода запчастей могут быть использованы разнообразные методы.

В перечне указанных методов присутствуют: методы газотермического и электролитического осаждения, наплавки, напеснения полимерных материалов, пайки, сварки, электрофизические методы, метод заливки жидкими металлами. Представленный перечень считаем необходимым дополнить методом газопламенной наплавки, а в частности, методом напыления, он исследован и предложен к внедрению в рамках настоящей научной работы.

Газотермический метод состоит из газопламенного и газорезервного напыления. Способ газопламенного напыления, при этом, можно выполнить как в газокислородном, или газозвушном, а газорезервном как плазменном, или тигельном, или высокочастотном, или электродуговом, или детонационным исполнением [1].

Метод электролитического осаждения состоит из никелирования, железнения, создания электролитических покрытий.

Наплавку осуществляют как в электрошлаковом, газовом, индукционном, плазменном, электродуговом. В данном случае электродуговую наплавку можно выполнить следующими способами: при

помощи ручных электродов, в рамках среды водяного пара, в рамках среды защитных газов, под слоем флюса, при помощи порошковых проволок, в условиях вибродугового или электроимпульсного режимов.

Процесс нанесения полимерных материалов может быть осуществлен: пылением (в т.ч., газопламенным, в рамках псевдооживленного слоя, в рамках электрического поля), лиьем под давлением с применением опрессовки, с использованием синтетических клеев.

Процесс выбора метода создания покрытия обуславливается требованиями эксплуатационной направленности. В частности, покрытие графитового вкладыша ракетного сопла и покрытие детали трактора призваны для реализации разного функционала. Указанный фактор сказывается на технологии пыления, способах контроля и испытаний на степень устойчивости пыления.

Эксплуатация сельхозтехники сопровождается вполне определенными характерными чертами: интенсивность и сезонность характера нагружения, влияние процесса абразивного трения, фактор палитания глины, наличие вибрационных и циклических нагрузок, ударов. Самая существенная черта в данном случае заключается в обязательном требовании к простоте организации процесса восстановления деталей, не высокой стоимости исходных материалов, устройств и аппаратов.

Метод электродуговой наплавки

Нужно указать, что одним максимально простым способом в восстановлении деталей можно назвать электродуговую наплавку электродами. Ее основной положительной стороной является отсутствие необходимости в больших временных затратах, для подготовительных работ. При этом присутствует также недостаток – низкая производительность работы. В частности, в рамках наплавки электродом, диаметр которого 4- 5 мм тя скорости 2-6 м/ч показатель производительности составит 0,5 - 0,7 кг/ч [2].

Более того, данному способу присущи: фактор неоднородности структуры наплавленного металла, присутствие микротрещин в поверхности

паплавка, высокий уровень утара металла и расход электроэнергии, присутствие внутренних напряжений, которые сжигают усталостную прочность в восстанавливаемой детали, коробление деталей [25].

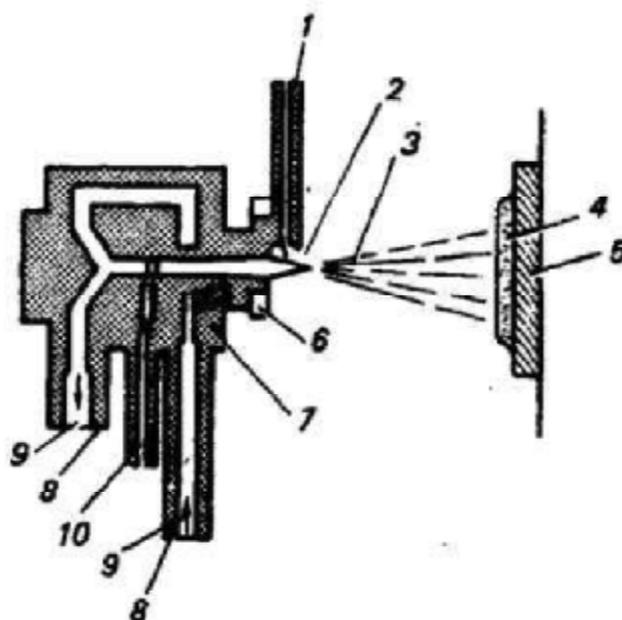
Качественные параметры восстановления деталей могут быть увеличены при использовании автоматической наплавки. Она обладает рядом преимуществ в сравнении с методами ручной электродуговой и вибродуговой наплавки: утара металла не больше 5%, при этом обеспечиваются наиболее рациональные условия труда сварщика, слой наплавленного металла получается однородный, можно получить папавленный слой с определенными качественными параметрами. Как свидетельствуют результаты исследований [7], метод автоматической паплавки под слоем флюса представляет собой наиболее качественный способ для восстановления коленчатых валов двигателей для трактора. Тем не менее, автоматическая паплавка под слоем флюса нуждается в весьма сложном оборудовании, а в отношении деталей, с диаметром меньше 50 мм, ее использование трудоемко. А также, при указанном способе паплавки может появляться существенное количество трещин, как на папавленном металле, так и в детали непосредственно.

Автоматическую паплавку в условиях среды защитных газов, в частности, аргона, гелия, углекислого газа, водяного пара, можно использовать в ситуациях, при которых паплавку под флюсом невозможно использовать или затруднительно. Метод автоматической наплавки в рамках среды защитных газов демонстрирует ряд характерных особенностей: повышенный коэффициент наплавки, достаточно высокие показатели формирования поверхности, экономичный процесс, повышенные показатели производительности. Тем не менее, указанный способ не в состоянии адекватно ответить требованиям простоты в рамках организации технологического процесса. Он требует применять сложное и дорогостоящее оборудование. А также, практическое воплощение способа обуславливает выгорание углерода в слое наплавленного металла, что провоцирует

снижение показателя усталостной прочности.

Метод плазменного напыления покрытий

В случае использования плазменного напыления металлических покрытий в целях расплавки и переноса порошка на поверхность детали применяют плазменную струю, которая получается путем нагрева плазмообразующего газа в рамках электрической дуги, которая горит между катодом и анодом плазменной горелки (плазмотрон). Плазмотрон (рисунок 1.1) оснащен водоохлаждаемым медным анодом и вольфрамовым катодом.



1-подача порошка в потоке газа; 2-плазменный факел; 3-поток напыляемых частиц; 4-покрытие; 5-подложка; 6-анод; 7-катод; 8-постоянное напряжение для электрической дуги; 9-охлаждающая жидкость; 10-подача газа

Рисунок 1.1 – Схема устройства плазмотрона.

Как правило, аргон или какой-либо иной инертный газ будет протекать вокруг катода и через сопло анода. Дугой постоянного тока газ ионизируется, и формируется плазма с температурой 6000-12000°C, выходящая из сопла примерно на 1 см. На расстоянии 10 см от сопла температура снижается до 3000 °C и ниже в силу начала контакта с воздухом [1]. В рамках выхода из сопла параметр скорости газа будет составлять 200-600 м/с, при этом параметр скорости частиц лишь 20 м/с. Частицы, размерами с 18 мкм, разгоняются до

275 м/с на расстоянии 6 см от сопла. Частицы с большим размером достигают меньших скоростей, таким образом, им требуется больше времени для нагрева. Частицы материала с низкими показателями плотности достигают больших скоростей, но при этом они сильнее затормаживаются. Плазменная струя, как правило, используется длиной примерно 5 см, расстояние от подложки до сопла будет достигать примерно 15 см.

В роли плазмообразующих газов обычно пользуются аргоном, азотом, гелием или смесью таких газов. Процесс предварительной обработки поверхности до напыления напыления предполагает осуществление: мойки деталей, процессы дробеструйной обработки. В случае плазменного напыления применяются порошки, в основе которых лежит шихель: ПН 85Ю15 ТУ 14-1-3282-81, ПП 55Т45 ГОСТ 21448-75, ПП 70Ю30 14-1-3282-81 и т.д. Твердость покрытий будет составлять ТРС 25-60. В определенных ситуациях, при которых детали необходимо придать повышенный уровень износостойкости, а также повысить прочность сцепления покрытий с поверхностью детали, осуществляют процесс оплавления покрытия. Настоящее исследование характерных черт плазменной наплавки предоставило возможность доказать, что параметры качества наплавки и свойства наплавленного металла обуславливаются, прежде всего, режимом и техническими характеристиками наплавки, подготовкой поверхности [49].

Плазменное напыление используется в целях получения износостойких покрытий, для увеличения уровня функционирования быстроизнашивающихся узлов и деталей. К примеру, в дизельных двигателях быстрее всего изнашиваются поршни, цилиндрические втулки, шейки коленчатых валов, поршневые кольца. В качестве способа увеличения уровня долговечности шеек коленчатых валов и распределителей двигателей а/м можно назвать метод плазменного напыления самофлюсующихся сплавов категории ПГ-СР с дальнейшим оплавлением [49].

Суть данной методики [48], разработанной относительно восстановления шеек трансмиссий а/м КамАЗ-6520, сводится к

использованию плазменного напыления порошка ПГ-СР2 при помощи установки УМП5-68. Как было доказано в результате наших исследований [43] охлаждение покрытия ТВЧ позволяет обеспечить прочность сцепления 375 МПа, а уровень износостойкости покрытия в 2,5...2,7 раза больше, чем у закаленной стали 45.

Метод плазменного напыления обладает следующими преимуществами: могут быть получены покрытия практически из всех материалов, сравнительно малый уровень теплового воздействия на подложку, изменяющаяся толщина покрытия в обширных диапазонах от 0,1 до 6 мм, можно использовать для плазменной струи разных газов, производительностью (3...8 кг/ч).

Минусы указанного метода: 1. Существенные уровни потерь напыляемого металла в случае напыления покрытия на мелкие детали; 2. Низкий КПД энергии плазменной струи для разогрева порошка; 3. Формирование отрицательно сказывающихся на здоровье летучих соединений, увеличение шума и светового излучения; 4. Высокие уровни сложности, низкий уровень надежности и высокая стоимость используемого оборудования.

Детонационно-газовый способ

За последние несколько лет активно используется детонационно-газовый метод при нанесении покрытия. Указанный способ предполагает применение детонационной пушки. Он выступает в роли разновидности методики термического напыления, с условиями нагрева и направленного выброса частиц порошка на подложку из камеры сгорания потоками газа, возникающими в рамках процесса детонационного сгорания. Преимущества метода [24]:

1. Несложная конструкция детонационной пушки, высокий уровень надежности и длительный срок службы;
2. Покрытия, которые получают при использовании данного метода, обладают низкой пористостью и хорошей связью с подложкой;

3. Предварительно обрабатывать поверхность не обязательно, отсутствует значительное влияние примесей;

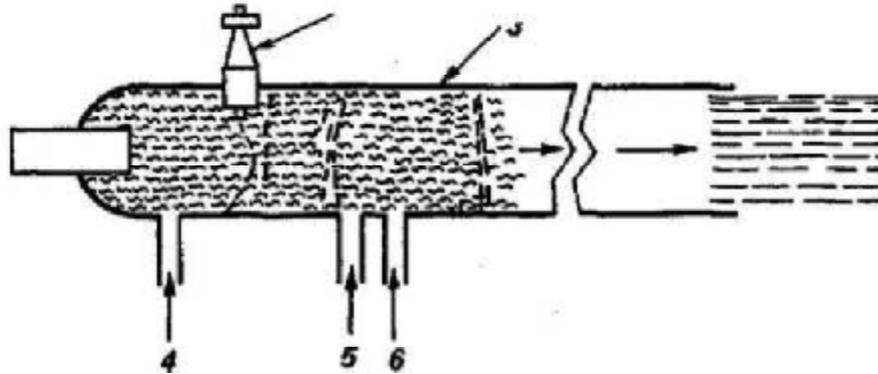
4. Хороший уровень связи с подложкой можно получить в случае ее умеренного нагрева в рамках осаждения;

5. Показатель отношения скорости порошка к значению температуры может изменяться в обширных диапазонах;

6. Обеспечивается высокий параметр скорости роста толщины покрытия.

Детонационные покрытия (в сравнении с плазменным напылением) обладают меньшей пористостью, которая достигает 1%. В силу чего, им не обязательно требуется спекание [24]. Это можно объяснить тем, что кинетическая энергия частиц в рамках использования детонационного способа в 25 раз выше, чем в случае плазменного напыления. Детонационные покрытия состава WC-Co обладают показателем твердости 1300 HV, в случае плазменного напыления твердость будет составлять 700 HV, а в случае газоплазменного напыления еще меньшее значение. Детонационные покрытия обладают очень хорошим сцеплением с подложкой (лучшее в сравнении с плазменными покрытиями). Суть метода сводится к следующему (рисунок 1.2). В пушке применяется смесь C_2H_2 и O_2 . Требуемый объем кислорода и ацетилена вводят в камеру сгорания сквозь паружные клапаны, а необходимый объем порошка вводится при помощи струи азота из нагретого сосуда под давлением. Зажальной свечой поджигается смесь. В итоге взрыва порошок начинает разогнаться до 720 м/с и начинает плавиться. Если температура $4200^{\circ}C$ и возникает детонационное сгорание, то расплавится может большинство материалов. Показатель скорости частиц в данном случае намного выше скорости в случае плазменного напыления. За 1с формируется 4-8 взрывных импульсов с промежуточными процессами очистки азотом. За каждый импульс происходит осаждение круга материала диаметр 25 мм и толщина в несколько микрометров, он представляет собой множество перекрывающихся чешуек [1]. Шама бывает окисляющее, науглероживающее

или инертное. Науглероживающее шлам может быть использовано в целях улучшения свойств покрытия. Защиту из инертного газа используют в целях предотвращения окисления в рамках осаждения.



1-ввод порошка; 2-свеча зажигания; 3-корпус пушки; 4 напуск азота; 5-напуск ацетилена; 6-вход для кислорода; 7 подложка

Рисунок 1.2 – Устройство детонационной пушки

Недостатки метода сводятся к следующему:

1. Сложно обеспечить стабильное протекание процесса.
2. Нужно изолировать процесс и обеспечить безопасные условия в силу повышенного шума.
3. В рамках детонационного сгорания образуется многообразие продуктов сгорания, в частности образуются газы CO_2 , CO , H_2O , H_2 , O_2 , N_2 , а также радикалы и атомы, в частности OH , H , O , NO и N , что повышает сложность работы, а также должны быть реализованы дополнительные меры для обеспечения безопасности.
4. Покрываемые детали могут деформироваться, что обуславливает высокие требования к показателям их прочности для выдерживания удара в случае детонационного паталления.
5. Невозможно использовать метод при покрытии деталей сложной формы.

6. Оборудование дорогостоящее, повышенный расход газов.

Лазерная наплавка

Лазерная наплавка это методика по восстановлению изношенных

деталей, она сводится к оплавлению порошковых или других материалов на восстанавливаемой поверхности. Сегодня, как правило, используют лазерную наплавку порошков. Порошковый материал каким-либо способом направляется на поверхность, в которой он расплавляется лазерным лучом, образует жидкую ванну, и частично при этом диффузирует в основной материал. Застывшее покрытие будет представлять ровный наплавленный слой, толщина которого 1-2 мм и твердость 60 HRC. Показатель прочности сцепления наплавленного слоя с подложкой может достигать 300 МПа. Перегрева и деформации деталей не отмечается в силу повышенной скорости наплавки. Максимально эффективные результаты: высокая адгезия, минимум энергозатрат и хорошая обрабатываемость лазерной наплавки обеспечивается в рамках использования порошков СНГН и ПГСР зернистостью 50...150 мкм. Используя обозначенные порошки, могут быть восстановлены детали, с износом 0,1...0,5 мм. В данном случае показатель производительности наплавки может достигать 5...10 см/мин, потери порошка не превышают 1%, поверхность после наплавки может обладать неровностями, не превышающими 0,05 мм, и они могут быть устранены путем шлифования [25].

Минус технологии в сложности и высокой стоимости оборудования.

Метод контактной приварки

Контактная приварка порошков сводится к тому, что в расстояние между роликом и деталью направляется порошок, привариваемый к изношенной детали, при этом появляется возможность восстановить ее до номинального размера. На стадии развития сегодня также способ восстановления деталей при помощи армированных твердых сплавов, он представляет собой контактную приварку к изношенным поверхностям стальной ленты и зернистого твердого сплава. Зерна сплава с размерами 200-600 мкм закрепляются толстым клеевым слоем на стальной ленте либо на поверхности детали в один слой. В рамках приварки армированного слоя деталь охлаждают при помощи жидкости, в силу чего исключается ее деформация. В целях восстановления деталей методом контактной приварки

используются порошки ПГХП80-СР6, сормайт, С 27, ФБХ-2 [27].

Минус в ограниченной сфере применения метода для восстановления деталей сельхозтехники.

Метод электродугового напыления

Здесь две проволоки выступают в роли электродов, между ними происходит загорание электрическая дуга постоянного тока. Расплавленные дугой капли сдуваются на подложку при помощи струи сжатого воздуха. Указанный метод в состоянии обеспечить высокий показатель скорости осаждения толстых покрытий и может использоваться при нанесении их на крупные изделия. В случае электродугового напыления алюминия на сталь и в некоторых других случаях отмечается локальная межфазная сварка. Дуговой метод не обеспечивает такое тонкое напыление, как газопламенный. Метод восстановления деталей машин при использовании электродуговой металлизации демонстрирует высокую производительность нанесения покрытий (до 21 кг/ч), получение покрытий, толщина которых всего несколько миллиметров, высокие параметры износостойкости восстанавливаемых поверхностей (до 1,5...2 раза больше износостойкости новых деталей), простота и технологичность процесса, возможность наносить покрытие на поверхности деталей, произведенных из разных материалов. Область рационального использования электродуговой металлизации сводится к антикоррозионной защите металлами алюминия и цинкнуб, цистерн, деталей выхлопной системы а/м, металлоконструкций животноводческих предприятий, кормоприготовительных заводов, штицефабрик [15].

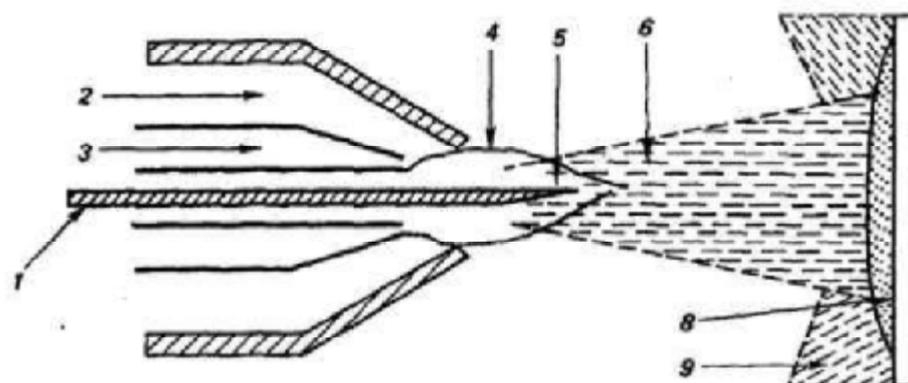
В целях нанесения покрытий применяется проволока диаметром 1,5...2 мм. Стальные и чугунные детали металлизуются при помощи проволоки Св-0,8А, Св-0,8Г2С, Пп-65Г. В целях увеличения уровня прочности сцепления, покрытия с основным металлом поверхность подлежащей восстановлению детали могут обработать разными способами: нарезания рваной резьбы и кольцевых канавок, пескоструйной обдувкой, нанесением

подслоя дробеструйной обдувки. Металлизационный слой демонстрирует высокие показатели твердости. В частности в случае содержания углерода в проволоке 1,1 -1,2% может быть обеспечен HB540 [15].

Минусы метода: 1. Низкий уровень прочности сцепления покрытия с деталью; 2. Существенное выгорание легирующих компонентов, повышенный уровень окисления металла; 3. Присутствие в папссепшом покрытии существенного количества окислов, в силу чего он становится хрупким и неоднородным, а также снижается усталостная прочность восстанавливаемой детали примерно на 30-50% [1].

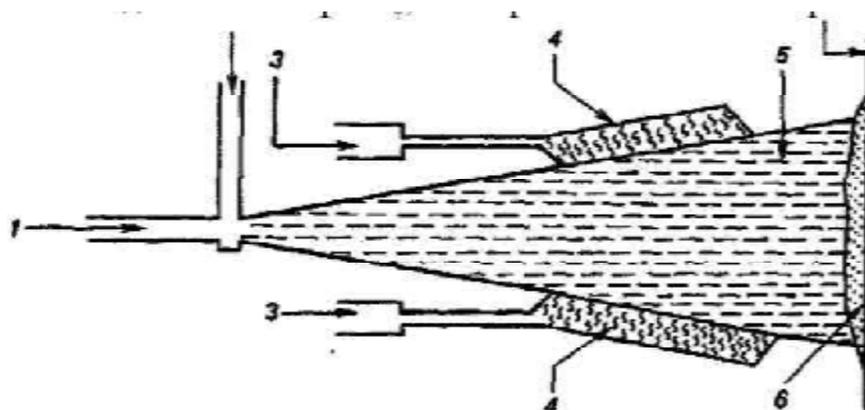
Метод газопламенного напыления

В данном случае материал покрытия направляют в пламя кислорода и горючего газа C_2H_2 или C_3H_8 в форме проволоки (рисунок 1.3), либо порошка (рисунок 1.4). Проволоку податот с контролируемой скоростью, которая обеспечивает расплавление конца проволоки и распыление расплава при помощи струи сжатого воздуха. Напыление с применением проволоки несколько экономичнее, чем с применением порошка [16]. Тем не менее, техническая реализация проволочной методики сложнее. Толщина покрытий в случае газопламенного напыления может достигать 50 мкм и более [16].



1-подача проволоки по центральной оси; 2-вход сжатого воздуха; 3-смесь кислорода с горючим газом; 4-пламя; 5-конец проволоки; 6-конус напыления; 7-подложка; 8-покрытие; 9-потери напыляемого материала.

Рисунок 1.3 – Схема процесса газопламенного напыления с использованием проволоки



1-подача рабочего газа; 2-подача порошка; 3-подача горючего газа; 4-горячий газ; 5-конус напыления; 6-покрытие; 7-подложка

Рисунок 1.4 – Схема процесса газопламенного напыления с использованием порошка

Покрытия применяются в целях защиты от коррозии в случае обычных и повышенных температур, восстановления изношенных частей, а также покрытий, стойких к явлениям износа, эрозии и истирания. В целях защиты от окисления сжатый воздух можно заменить на инертный газ. В целях обеспечения лучшей адгезии подложку можно обеспечить независимым нагревом.

В рамках настоящего проекта предлагается методика нагрева подложки при помощи ТВЧ, что предоставило возможность разработать инновационную высокоэффективную технологию для восстановления деталей сельхозтехники [41].

Применение проволоки состава Ni-Al обуславливает высокий разогрев пламени в силу экзотермической реакции, что позволяет обеспечить адгезию и снизить пористость в сравнении с обычными покрытиями. Кадры киносъемки показали, что температура частиц, которые покидают пламя, повышаются [1].

Покрытия, созданные при газопламенном напылении, обладают большей пористостью, в сравнении с детонационными покрытиями. Покрытия, которые были получены по рассматриваемому методу газопламенного напыления, в большинстве параметров не уступают

детонационным покрытием. В газопламенных покрытиях содержится большое количество круглых частиц (не чешуйчатых), не расплавившихся до соударения с подложкой [13]. Показатель пористости газопламенных покрытий можно снизить при пропитке их смолой в вакууме, тем не менее смола в данном случае проникает лишь на 0,1 мм. При покраске смолой обеспечивается пропитка только на 0,02 мм [13].

Положительные стороны метода:

1. Высокие показатели производительности (до 40 кг/ч).
2. Можно получать слои в широком диапазоне толщины (0,1...3 мм) с расширенным спектром свойств.
3. Претворяются на практике технические свойства: простое нанесение покрытия на детали разнообразных геометрических форм и размеров; универсальный характер применяемых материалов как в зависимости от формы (порошки, проволоки), так и по физико-механическим параметрам (металлы, сплавы, окислы, карбиды, пластмассы и т.д.).
4. Можно использовать дешевые энергоносители в роли источника тепловой энергии (пропан), а также можно создавать любую атмосферу в случае паяльного (окислительная, нейтральная, восстановительная).
5. Не высокая степень газонасыщения и выгорания легирующих добавок в сплавах; невысокие остаточные напряжения в покрытиях.
6. Положительные организационные свойства: реализуется процесс нанесения покрытия в разнообразных производственных условиях (крупносерийное производство или единичное восстановление).
7. Присутствует возможность механизировать процесс, в силу чего повышается качество покрытия. Напыление с дальнейшим оплавлением ТВЧ по рассматриваемой технологии [41] существенно увеличивает качество покрытия.

Минусы технологии: в небольших деталях метод малоэффективен в силу существующих потерь напыляемого материала. А также, в рамках подготовки поверхности основы используется песко- и дробеструйная

обработка, с использованием кварцевого песка, корунда, стальной крошки и иных материалов, загрязняющих рабочее место и ухудшающие условия деятельности персонала. В рамках пыления частицы пыляемого материала могут составлять разные вредные соединения с воздухом, для чего требует использовать мощную вентиляцию.

В соответствии с реализованными исследованиями [41–52], а также принимая во внимание представленный выше краткий обзор специфики технологий восстановления изношенных узлов машин, можно резюмировать.

С позиции условий простоты и универсальности использования и сравнительно невысокой стоимости исходных материалов, оборудования, а также в соответствии с критерием обеспечения необходимого уровня качества восстановления деталей сельхозтехники, существенными преимуществами обладает метод газопламенной наплавки пылением, предложенный в настоящем выпускной работе. Метод заключается в газопламенном пылении покрытия с его оплавлением с помощью индуктора ТВЧ.

1.2 Состояние исследований в области разработки количественных методов изучения процессов пыления

В рассматриваемом научном направлении реализовано множество научных исследований. В частности, в работе [1] представлен список литературы из 1840 источников. Тем не менее, внимание было сконцентрировано в экспериментальном изучении процессов пыления и качественном, описательном анализе процессов. Проблемы формулировки теории процесса, проектирования количественных расчетных моделей практически не рассматривались. В силу чего, в настоящее время ученым и специалистам-практикам все еще не удалось решить три основные задачи:

1. не разработан метод вычисления толщины покрытия, которое получают в процессе пыления;

2. не разработан метод вычисления рационального расстояния пыления;

3. не разработаны методы оценки надежности покрытия.

В силу сокращения объемов средств выделяемых на экспериментальные работы может сместиться центр внимания в данном направлении. Сейчас основные силы нужно бросить на разработку методов и математических моделей, которые предоставят возможность путем использования компьютерных средств и программ прогнозировать возможности и последствия использования метода нанесения покрытий. Могут быть проведены также разнообразные экспериментальные работы, и программы, направленные на поиск новых технологий для наиболее эффективного восстановления деталей.

Отсутствие работ, в которых осуществляется решение задач 1...3 не говорит о том, что исследований в направлении формирования количественных моделей нанесения покрытий совсем не осуществлялось. Такого рода исследований сравнительно немало. В частности, монографии [36.37] приводят факторы, оказывающие влияние на процессы пыления и устанавливающие уровень прочности его сцепления с ключевым материалом. В этом заключается первый основной, но важный этап для дальнейшего факторного анализа процесса. В трудах [2.8] проведен анализ тепловых процессов на поверхностях основы с определением температуры контакта и критериев удара частиц порошка в случае плазменного пыления. В роли исходной теоретической модели принимается уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad (1.1)$$

в случае задания начального условия $T(0, x) = f(x)$.

Так определяли температуру $T(t, x)$ основу и температуру контакта T_k между расплавленной, деформирующейся в рамках удара частицы и твердой основой. Указанные результаты предоставляют возможность дать оценку тому, какие присутствуют уровни остаточного напряжения в покрытии.

В исследовании [9] аналогичная задача решена в форме постановки двух краевых задач диффузии принимая во внимание равновесное состояние твердой и жидкой металлических фаз в случае паявки. В данном случае также применяется уравнение теплопроводности в случае дополнительного учета специфики краевых условий. В итоге получаются явные соотношения в целях осуществления расчета концентраций рассматриваемых фаз и их перераспределение по толщине покрытия.

Нужно указать, что в области газопламенной обработки металлов теоретических исследований проводилось гораздо меньше. В частности в [14,29], обращено внимание на изучение газодинамики истечения струй газа из горелки. В рамках адиабатического приближения в [14,29] представлены соотношения для вычисления оптимального диаметра расширяющегося выходного участка сопла.

Ключевой показатель качества покрытия - прочность его сцепления с основой. В этом направлении проводились [14,36], установлены значения для действующих напряжений на площади соприкосновения покрытия и основы, а также показатели остаточного напряжения. Как пример, представим известную формулу Стокса [36]:

$$\sigma_r = \frac{E_2 h_2^3}{6\rho h_1}, \quad (1.2)$$

где σ_r - показатель остаточного напряжения,

E_2 - значение модуля продольной упругости основы,

h_1, h_2 - значения толщины покрытия и основы,

ρ - значение радиуса кривизны образца.

Такого рода методики можно применить в целях оценки параметров качества покрытия. Но они не исчерпывающие, в силу того, что качество покрытия определяет не только прочность сцепления. Наиболее общий показатель качества функционирования покрытия - надежность. Методы оценки данного показателя сегодня не разработаны.

Выводы по разделу

С позиции требований простоты и универсальности использования, доступности и приемлемой стоимости расходных материалов, оборудования, а также в соответствии с критерием обеспечения необходимого уровня качества восстановления деталей, существенными преимуществами обладает метод газопламенной наплавки напылением, который был спроектирован при участии автора. Метод заключается в газопламенном напылении покрытия с его оплавлением с помощью индуктора ТВЧ.

Анализ состояния научных трудов в сфере исследования процессов нанесения покрытий установил следующее. Внимание было сконцентрировано в экспериментальном изучении процессов напыления и качественном, описательном анализе процессов. Проблемы формулировки теории процесса, проектирования количественных расчетных моделей практически не рассматривались. В силу чего, в настоящее время ученым и специалистам-практикам все еще не удалось решить три основные задачи: не разработан метод вычисления толщины покрытия, которое получают в процессе напыления; не разработан метод вычисления рационального расстояния напыления; не разработаны методы оценки надежности покрытия.

Цель настоящей работы проистекает из результатов осуществленного анализа состояния работ в сфере теории и практики восстановления деталей сельхозтехники и заключается она:

- в разработке компонентов технологии восстановления деталей при использовании способа газопламенной плавки напыления при использовании ТВЧ;

- в постановке и решении трех основных задач:

1. Разработать метод расчета толщины покрытия, который получается в процессе напыления.

2. Разработать метод вычисления оптимального расстояния напыления.

3. Разработать методы для оценки надежности покрытия.

Полученные результаты преследуют цель разработать простое, относительно дешевую и эффективную технологию для восстановления деталей сельхозтехники, адаптированной к условиям ее эксплуатации.

2 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬХОЗТЕХНИКИ ГАЗОПЛАМЕННОЙ НАПЛАВКОЙ НАПЫЛЕНИЕМ

Доказано [1], что покрытие, которое получают использованием метода напыления, должно демонстрировать следующие свойства:

высокий порог устойчивости к окислению и горячим коррозионным явлениям;

- способность к образованию пленки защитных оксидов;

- устойчивость к процессам охрупчивания, к примеру, в случае паутлероживания;

- высокий уровень устойчивости к формированию легкоплавких эвтектик; устойчивость к формированию летучих продуктов;

- хороший уровень адгезии; пластичности;

- высокий уровень устойчивости к термо- и механическим ударным нагрузкам, высокие пределы термо- и механической усталости;

совместимость в материалах покрытия и подложки в соответствии с хим.составом, коэффициентами термического расширения и температурами вязко-хрупкого перехода:

- низкий уровень пористости;

малая взаимная диффузия компонентов между покрытием и подложкой;

- отсутствует деградация свойств, связанных с переносом компонентов и фазовыми трансформациями;

- способности к самозалечиванию повреждений;

- отсутствует деградация механических свойств подложки после ТОО как будто нанесены покрытия;

- возможности восстановления поврежденных покрытий и их сварки;

- доступные материалы покрытия и возможности осуществления эквивалентной замены применяемых материалов;

оптимальность в соотношении между экономическим и техническим

параметром эффективности применения покрытий.

Сельхозтехника действует при повышенных нагрузках, подвергается негативному влиянию факторов износа и старения. Таким образом, отдельные узлы и агрегаты быстро изнашиваются. Изнашивание – это постепенное разрушение материала детали или иного элемента машины, происходящее в случае трения или иных видах контакта компонента с внешней средой и что сопровождается изменением его свойств (твердость, пластичность, структуры, хим. состав и т.д.). Износ является результатом изнашивания, он проявляется в форме изменения геометрических размеров и иных критериев детали или иного элемента машины [28].

Основная масса (до 70%) основных изнашивающихся элементов, которые могут быть восстановлены, функционирует в рамках сопряжений типа вал-подшипник [25].

Технологии газопламенной наплавки при напылении порошковых сплавов можно использовать в другом направлении. В частности, детали, изготовленные из дорогих легированных сталей, можно заменить аналогичными деталями, изготовленными из не дорогих мало и среднеуглеродистых сталей, которые были упрочнены при помощи газопламенной наплавки напылением. Можно использовать тонкослойные покрытия (0,1...0,5 мм) с минимальным уровнем сцепивания (5...7%) с основным металлом, сохранив при этом свойства напыляемых материалов, и получить вследствие этого покрытия с заданными физико-химическими и механическими параметрами [1].

Технологии газопламенной наплавки напылением обуславливают повышенную производительность (5...10 кг/ч) и не нуждаются в сложном оборудовании и специальных источниках питания. Это качество рассматриваемой технологии, а также иные ее плюсы, приведенные в главе 1, максимально ценны в реальных условиях работы сельхозтехники.

2.1 Технологические особенности предлагаемого метода газопламенной наплавки напылением

При написании работы [41] предложена схема газопламенной наплавки напылением при использовании ТВЧ, реализующую принципиально инновационный технологический процесс, в котором синтезируются оптимальные качества металлизации и наплавки. Метод используется при упрочнении и восстановлении деталей тракторов, а/м и сельхозмашин напылением покрытий из порошковых твердых сплавов. Для осуществления наплавки при помощи метода напыления не требуется оснащать производственный цех специальным оборудованием и специальными программами. Согласно представленной схеме на рисунке 1, твердосплавный порошок из питателя 1, который соединен с ротаметром 2, одновременно с газами, направляющимися из баллонов 5 и 6, направляется в пистолет 3 и реализуется процесс нанесения металла на деталь 4.

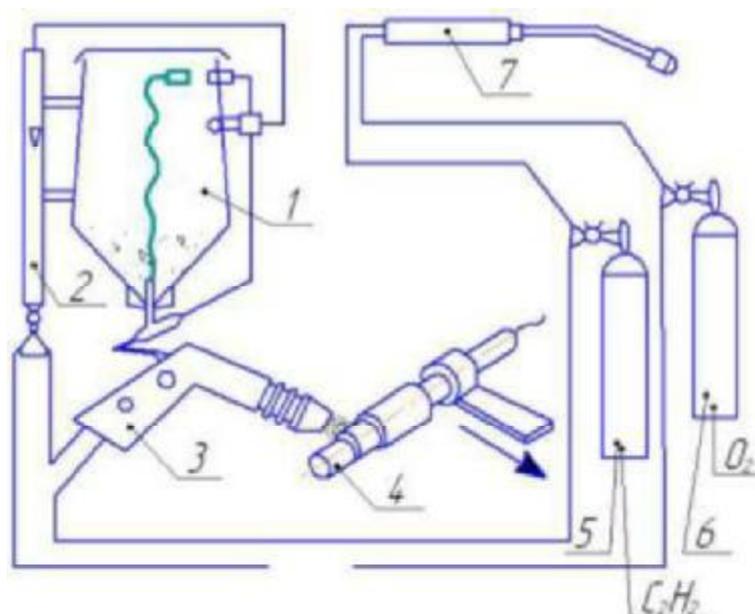


Рисунок 2.1 – Схема установки

Оплавка напыляемого металла реализуется при помощи индуктора 7 ТВЧ. Как ходе реализации предложенной методики происходит формирование тонкослойных покрытий в которых отмечаются минимальное смешивание напыляемого металла с основным металлом, таким образом,

можно получить покрытия демонстрирующие требуемые физические и механические характеристики. В целях папыления используют самофлюсующиеся композиционные сплавы ПГ-ХН80СР2, СНГН, ВСНГН и др. Для увеличения сцепления с основным металлом и создания структуры сплава применяют последующее оплавление, осуществляемое ТВЧ, газовыми горелками и в печах с защитной атмосферой в интервалах температуры 850-1050°С. Присутствие в составе сплава боросиликатов с разнообразным составом обуславливает интенсивное раскисление пленок на элементах папыляемого сплава и получение беспористых покрытий. Процесс оплавления ТВЧ обладает высоким КПД и более высоким уровнем производительности, свыше 5...7 раз больше газопламенного. Для реализации технологической процедуры оплавления покрытия ТВЧ используют установки ЛПЗ-67В и ИПН-100/0067 на частотах до 70 кГц.

Полученные покрытия из сплавов ПГ-ХН80СР2 обладают сложной структурой, которая состоит из мелкодисперсных высокопрочных упрочняющих фаз карбидов хрома, их твердость $H_{100}=13500$ МПа (72 НРС), бориды хрома $H_{100}=15000$ МПа (84 НРС), равномерно распределенные в прочной металлической матрице, которая включает в себя легированные твердые растворы и сложную эвтектику на пикелевой основе. Сплавы имеют высокий показатель текучести, высокое деформационное упрочнение, низкие скорости ползучести при температурах приближенных к температуре плавления сплава.

В целях механической обработки покрытий рекомендовано применять абразивные круги из зеленого карбида кремния на керамической связке, твердость которых СМ1-СМ2, зернистость 16-25 структура 6-8; состоящих из кубического нитрида бора; из синтетических алмазов. Технические параметры:

| | |
|--|------------|
| - значение толщины папыляемого слоя, мм | 0,1...1,0. |
| - значение твердости покрытий, НРС | 40...70, |
| - коэффициент износостойкости относительно закаленной стали 45 | 3...10 |

| | |
|--|---------------|
| показатели прочности сцепления покрытия с основным металлом, МПа | 500...600, |
| - уровень производительности наплавки, кг/ч | 7,0...10, |
| - габаритные параметры установки, мм | 1500x800x500. |

Существуют также некоторые недостатки. В частности, в случае нанесения покрытий на маленькие детали метод неэффективен в силу перациоальных потерь напыляемого материала. Предварительная подготовка поверхности основы до напыления осуществляется песко- и дробеструйной обработкой кварцевым песком, корундом, стальной крошкой и иными материалами, сильно загрязняющими рабочую территорию, что снижает качество условий работы персонала. При напылении частицы напыляемого материала могут вступать в соединения с воздухом, вредные для здоровья сотрудников, что требует использования мощных вентиляционных установок.

Указанные недостатки не сокращают практическое значение предложенной технологии, в силу того, что их можно устранить в рамках дальнейших модернизаций.

При этом подготовка поверхности – ключевое звено технологической цепочки, определяющее уровень прочности связи между деталью и напыленным покрытием. Вид и характер состава обрабатываемых частиц, а также угол обдува воздействуют на показатели прочности сцепления.

Представим детальное описание и анализ предлагаемой технологии.

Нужно указать, что для нанесения покрытий в соответствии со способом газопламенной наплавки напылением можно воспользоваться российской установкой УПН-8-68 на режимах, продемонстрированных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Режимы нанесения покрытия

| Газы | Мощность, кВт | Температура, К° | Напряжение, В | Расстояние от сопла, мм | Расход газа, м³/ч |
|---------------------------------|---------------|-----------------|---------------|-------------------------|-------------------|
| Аргон | 48 | 14700 | 40 | 150-200 | 2,00 |
| Азот | 60 | 7500 | 65 | 150-200 | 2,55 |
| Кислород + ацетилен (1.2 к 1.7) | 48 | 14700/3470 | 40 | 150-200 | 1,70 |

Написались самофлюсуемые композиционные сплавы, производимые в России в частности ПГ-ХП80СР2, СИПЦ, ВСИПЦ и др.

2.2 Процесс напыления и применения ТВЧ при оплавлении покрытия

Метод газопламенного напыления в рассматриваемой технологии осуществляется поэтапно: стадия распыления и полета частиц порошка, стадия удара частиц о поверхность напыления, стадия соединения частиц с поверхностью и друг с другом. До момента напыления, частицы порошка обладают практически сферической формой. При ударах частиц порошка, которые пребывают в процессе полета в пластическом или частично в расплавленном состоянии, происходит их сильнейшее деформирование.

Размеры частиц для рассматриваемых сплавов выбираются в интервале от 40 до 120 мкм. Напыленным покрытиям присуща макропористость и неоднородность структуры.

Для получения хорошей адгезии между частицами и напыляемой поверхностью огромное значение имеет качество ее подготовки.

Процесс подготовки поверхности до напыления при помощи пескоструйной обработки либо обработки металлической дробью обуславливают существенное повышение потенциала энергии поверхности. С течением времени показатель активности поверхности снижается, в силу того, что окружающая среда при адсорбции или реакции провоцирует снижение уровня свободной энергии. По этой причине напыление целесообразно осуществлять сразу за предварительной обработкой.

При запыленности поверхности используется метод отсасывания пыли.

Если присутствует твердая грязь, плохо сцепленная с поверхностью, применяется метод зачистки жесткой, либо мягкой щеткой и отсасывания.

Если присутствует твердая грязь, хорошо сцепленная с поверхностью, используется абразивная, пескоструйная или дробеструйная обработка частицами различных размеров. В данном случае применяют: металлическую

дробь, стеклянные бусины, керамические гранулы.

При наличии органических загрязнений поверхности, в частности жира и масла, осуществляется промывка с использованием органического растворителя.

В случае присутствия неорганических загрязнений, в частности окалина с известным составом, к примеру, паличие ржавчины, используют шлифовку; травливание в соответственной кислоте и (или) щелочи с промежуточным промыванием; электроочистку катодную (или анодную).

При смоченной подложке осуществляется промывка в чистой или деионизированной воде.

В случае паличия неплотной окалины производится травление в кислоте, либо щелочи и промывка.

В случае паличия мелких частиц, либо мусора применяется метод ультразвуковой очистки.

При высоком уровне шероховатости поверхности детали может быть произведена соответственная обработка давлением.

Окончательное обезжиривание поверхности предполагает проведение очистки парами органического растворителя в случае приятия необходимых мер безопасности; растворитель: трихлорэтилен, ксилол и т.п. [1].

При недостаточной силе сцепления напыляемого слоя с основным металлом, неполной реализации физико-механических параметров сплавов после стадии их напыления возникает необходимость в операции оплавления.

В рамках предлагаемого способа палищения покрытия данная операция осуществляется в поле токов высокой частоты (ТВЧ), а также с использованием газовых горелок и в печах с защитной атмосферой в пределах температур 950...1050°C;

Присутствие в составе самофлюсующихся сплавов боросиликатов разнообразного состава обуславливает интенсивное раскисление пленок на элементах напыляемого сплава. Они же обеспечивают хорошее смачивание поверхности и не допускают окисления.

А также о данном случае не происходит сильного перемешивания покрываемого металла и основного материала полученное в результате покрытие демонстрирует достаточную однородность и полное отсутствие трещин.

В силу перегрева сплава в рамках оплавления происходит сильное округление формирующихся фаз, что обуславливает существенное снижение физико-механических качеств покрытий. В силу чего нужно правильно выбрать способ выполнения данного процесса для исключения перегрева.

Принципиальный момент предложенной технологии заключается в регламентированном применении ТВЧ в целях оплавления покрытия.

Реализованные исследования установили [42...47], что примененное ТВЧ – самый перспективный способ оплавления как с позиции обеспечения необходимого уровня качества покрытий, так и с позиции обеспечения высокого уровня производительности процесса. Нужно указать, что если в случае газопламенного наплавления тепло подводится с поверхности и продвигается вглубь в силу теплопроводности, то в случае оплавления ТВЧ тепло генерируется в рамках детали на расчетной глубине, что особенно значимо для оплавления тонкослойных покрытий.

Нагрев ТВЧ обладает более высоким тепловым КПД, превышающим в 5...7 раз КПД при газопламенном нагреве[43].

Применяя технологи газопламенного напыления с процессами оплавления ТВЧ, можно с успехом упрочнить и восстановить большую категорию автотракторных деталей, в частности: вал трансмиссии, кулачковый вал, клапан, поршневой палец, и технологическую оснастку.

В целях реализации технологического процесса оплавления можно применить установки ТВЧ ЛПЗ-67В и ИИИ-100/0067 с частотой до 70 кГц.

На рисунок 2.2 продемонстрированы графические зависимости электрических и технологических критериев, которые позволяют избрать выбрать режимы оплавления ТВЧ для разнообразных толщин покрытий.

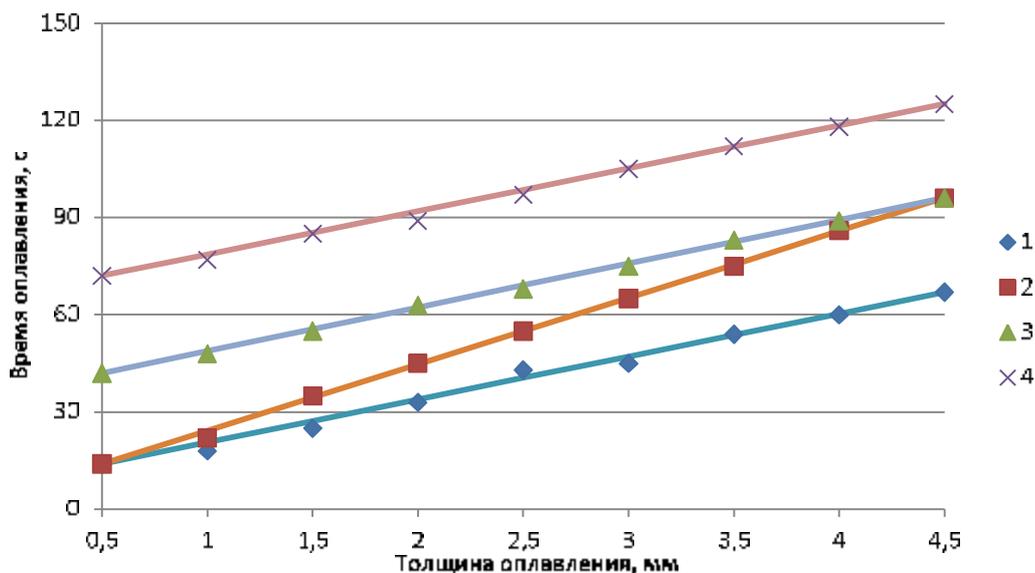


Рисунок 2.2 – Экспериментальная зависимость времени оплавления [с] и толщины [мм] при различных значениях перепада давления

Физически оплавление ТВЧ порошковых сплавов реализуется поэтапно, скорости нагрева здесь составляют от 50 до 500°/сек. Первая стадия характеризуется стремительным нагревом порошкового сплава до точки Кюри и существенно меньшей параметр скорости нагрева основного металла. Это можно объяснить низким показателем точки Кюри для порошковых сплавов: 480°С и повышенном коэффициентом их теплопроводности.

На второй стадии происходит нагрев основного металла (детали) до точки Кюри T_c 780°С (для среднеуглеродистой стали) до глубины развития вихревых токов. В данном случае происходит выделение примерно 85% совокупной тепловой энергии.

Если две первых стадии реализуются последовательно, то дальнейшие этапы, при которых основной металл нагревается до значения температуры выше 850°С, а порошковый сплав до температур оплавления – они должны протекать одновременно. При несоблюдении данного условия может произойти отслаивание покрытий.

Физически природа индукционного нагрева сводится к тому, что в

электропроводящих телах, которые помещаются в переменное электромагнитное поле, индуцируются ЭДС, вызывающие электрические токи. Основные электрофизические свойства материалов для вычисления индукционных нагревательных устройств заключаются в удельном сопротивлении и магнитной проницаемости. Данные параметры в основном определяют глубину проникновения тока и поглощаемую телом мощность.

В случае индукционной наплавки основная масса электродинамических сил прикладывается к жидкому металлу, вследствие этого форма его поверхности может измениться. В силу чего, в рамках наплавки лучше применять сравнительно высокие частоты. Также нужно помнить, что при повышении частоты степень интенсивности растворения основного металла в жидкой фазе сокращается.

2.3 Структура сплавов и пути повышения их прочности

Полученные в соответствии с предложенной технологией покрытия из сплава типа ПГ-ХН80СЯ обладают сложной структурой, это мелкодисперсные высокопрочные упрочняющие фазы: карбиды хрома, твердость $H_{100}=15000 \dots 18000$ МПа, бориды хрома $H_{100}=15000 \dots 25000$ МПа, равномерно распределенные в рамках прочной металлической матрицы, из легированных твердых растворов $H_{100}=4200 \dots 4700$ МПа и сложной эвтектики на основе из никеля $H_{100}=9000 \dots 10000$ МПа.

Созданные покрытия из порошковых твердых сплавов входят в категорию дисперсионно-упрочненных сплавов, в которой в роли упрочняющей фазы могут выступать: оксид, карбид, интерметаллические соединения. Указанные сплавы имеют ряд специфических особенностей: высокий предел текучести, высокая степень деформационного упрочнения, высокая жаропрочность, коррозионная стойкость.

Механические параметры данных сплавов обуславливаются микроструктурой и взаимодействием дислокации с компонентами

микроструктуры.

Структура покрытия, которая получается при оплавлении ТВЧ, имеет резкие отличия от структуры, которую получают газопламенным оплавлением: высокая дисперсность и равномерность перераспределения упрочняющих фаз и более высокие (на 25-30%) прочностные характеристики, в т.ч. усталостная прочность.

Твердость покрытия отражает степень его способности к сопротивлению пластической деформации, а вязкость разрушения выступает в роли меры его сопротивления к распространению трещин и разрушениям. Твердые покрытия, позволяют обеспечивать высокие функциональные параметры и стойкость в соответствии с критерием несущей способности к влиянию пластической деформации. Тем не менее, они представляют собой слишком жесткие сплавы и плохо сопротивляются изгибным нагрузкам и ударам. В случае оптимального сочетания твердости и сопротивления к разрушениям сроки службы покрытия устанавливает его эрозией и износом.

Износ может быть следующий:

1. Адгезионный износ (заедания, срабатывания, схватывания) как правило, возникает между парами с взаимной растворимостью, даже если они паходятся в скользящем контакте, а также часто выявляется в инертной окружающей среде, при отсутствии даже тонких оксидных пленок, разделяющих проскальзывающие детали. Следствие данного износа заключается в микросварке (прихватывании) поверхностей. В ситуации, когда подобная сварка протекает на неровностях поверхности, то вследствие сдвига и дальнейшего срыва в случае повторного скольжения отмечается сильное обрушение более слабой поверхности [33].

2. Абразивный износ, протекающий в рамках вращательного или линейного проскальзывания, как правило, в случае приложения нагрузки, попадания на поверхности деталей твердых частиц, резания, биений.

3. Фреттинг-износ (процесс истирания при трении) ему присуща малая амплитуда внешней нагрузки и незначительное перемещение, вызывающее

локализованные точечные коррозии (эрозии); износ в силу распространения подповерхностных усталостных трещин – расслаивающий износ [33].

4. Коррозионный износ – продукты коррозии в силу процессов химического и механического взаимодействия обуславливают возникновение одного из указанных ранее видов износа.

5. Диффузионный износ, протекает в условиях высоких температур в силу локальной диффузии, обуславливающей образование ослабленных секторов и кратеров.

При малой толщине покрытия в сравнении с толщиной подложки, то его деформацию будет определять, в первую очередь, деформация основного материала. При повышенных температурах качества покрытия будут определять совместные действия факторов, в частности взаимная диффузия, критерии старения и циклическая усталость. Объемная деформация ползучести обуславливается приложенной нагрузкой, явление усталости взаимосвязано с локальным уровнем концентрации дефектов. В случае износа поверхности под влиянием мягкого абразива тонкие покрытия недостаточно надежны в виду локального отслаивания в случае пересечения бороздок, оставляемых частицами абразива, а в утолщенных происходит накапливание контактных упругих напряжений. Износ под влиянием жесткого абразива обуславливает когезионное разрушение толстого покрытия. В эрозионной среде в силу влияния на поверхность остроугольных компонентов большая долговечность присуща толстым покрытиям [33].

Твердость в существенной мере обусловлена стойкостью покрытия к адгезионному и абразивному износу. При этом, мягкие материалы могут выступить в роли хороших смазочных материалов, и не изнашиваются.

Оптимальное значение толщины покрытий для получения максимальной износостойкости сравнительно мала (к примеру, для MoS_2 это 2 мкм), так как нужно обеспечить достаточный теплоотвод с поверхности, который для покрытия MoS_2 через слой связующего покрытия затрудняется [1]. В ситуации когда материал наплавки является твердым сплавом на основе

Fe, Ni или Co, то в том, как правило, включаются также C, Cr, W и Mo. Повышение их содержания обуславливает образование карбидов и увеличивает износостойкость покрытия.

Сцепляемость

При использовании методики напыления порошковых сплавов не осуществляется процедура ошавки. Не может быть обеспечен достаточный уровень сцепляемости 20...40 МПа. При осуществлении последующей процедуры оплавления при помощи ацетилено-кислородного пламени или ТВЧ повышается уровень сцепляемости до 450...650 МПа, что обеспечивает эксплуатацию высокую надежность покрытий.

Износостойкость

Структура сплавов в существенной мере удовлетворяет требования, предъявляемые к антифрикционным покрытиям, что увеличивает их износостойкость и в 3-5 раз для закаленной стали 45 (в нормальных условиях работы), а при коррозии и высоких температурах в 10...15 раз. Также отмечается малый износ сопряженных деталей.

Усталостная прочность

Проведен специальный эксперимент усталостной прочности покрытий [47]. Эксперименты, реализованные для изучения усталостной прочности на образцах и деталях, которые были покрыты сплавами СНГН и ПГ ХН80СР2, обусловили ряд выводов:

1. Усталостная прочность в случае симметричных изгибающих нагрузках при применении газопламенного оплавления сокращается на 14...16%.
2. Усталостная прочность в случае симметричных изгибающих нагрузках при применении оплавления ТВЧ не сокращается, а увеличивается на 15...25%.

Этот результат обусловлен пониженными значениями растягивающих напряжений и возможностями изменения знака сжимающих напряжений.

Предложенная в проекте технология газопламенной наплавки

напылением и использовании ТВЧ позволяет обеспечить получение покрытий с повышенными физико-механическими параметрами, а также высокий уровень производительности на большой номенклатуре деталей для а/м.

2.4 Расчетный метод определения толщины покрытия при газопламенной наплавке напылением

В целях формирования расчетного метода установления толщины покрытия в случае газопламенной наплавки напылением могут применяться два подхода или их сочетание. Описание подходов приводится ниже. Основная идея исследования в разработке нового комбинированного способа. Итоговая задача в определении зависимости

$$y=f(t, x, q) \quad (2.1)$$

Здесь y – значение толщины покрытия на момент времени t напыления, x – расстояние от центра напыления (пятно распыла порошка принято за круг). А также, в (3.1) обозначено:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} \text{ и } q = \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_m \end{pmatrix}$$

– комплекс (вектор) факторов, воздействующих на показатель y , и вектор коэффициентов согласования – параметры модели (2.1).

Ранее уже было сказано, расчетная модель (2.1) процесса напыления еще не осуществлена, но процесс изучен достаточно. Такое явление не случайно и объясняет его значительная сложность процесса напыления.

Сегодня в рамках построения модели технологических процессов применяется два подхода: статистический и детерминированный.

2.4.1 Статистический подход

Здесь предполагается, что вид зависимости (2.1) известен, и нужно

только дать оценку вектору q , параметров модели. Так, в сущности, задачу можно считать решенной с точностью до вектора параметров. Указанное базовое предположение чаще всего неприемлемо, так как сущность задачи как раз и сводится к поиску вида функции (2.1).

Так как в настоящем проекте реализуется попытка построения математической модели роста толщины покрытия, то здесь будут применяться все возможности анализа, в т.ч. и статистический подход. Но он будет только вспомогательным согласно смешанной модели, предложенной нами.

В группу основных факторов x , воздействующих на показатель y процесса напыления, а также на характеристики получаемых покрытий и их технико-экономические параметры, в соответствии с [36] относятся:

1. Факторы, которые связаны с источниками теплоэнергии для напыления: горючее, объем кислорода в смеси, расходы горючего и кислорода.

2. Факторы, которые связаны с напыляемым материалом: состав, физические параметры, формы и грануляции.

3. Факторы, которые связаны с материалами, на который осуществляется напыление: состав, метод предварительной подготовки поверхности и уровень обработки; температура материала, на него производится напыление.

4. Факторы, которые связаны с процессом напыления: длина от горелки до напыляемой поверхности (расстояние напыления), скорости перемещения горелки или напыляемой поверхности, углы наклона горелки к напыляемой поверхности, составы атмосферы напыления.

Если посчитать, что согласно статистическому подходу искомая зависимость $y = f(t, r, x, q)$ известна и обладает видом:

$$y = f(t, r, x, q) = y_0 + q_1 g_1(x) + q_2 g_2(x) + \dots + q_n g_n(x), \quad (2.2)$$

где $g_j(x)$ - заданные функции от вектора x факторов x_j , а y_0 и q_i - неизвестные коэффициенты, которые нужно определить (оценке) по опытным параметрам.

Затем примем, что коэффициенты $y_0, q_1, q_2, \dots, q_n$ в модели (2.2) постоянные. Так, в случае их определения можно рассмотреть любой момент

времени t , для которого фиксируются значения y_i показателя y , а также значения x_{ij} факторов x_j , где i - № опыта, j - № фактора. Принято считать, что в каждом опыте вместе с y_i фиксируются значения x_{ij} каждого из N факторов x_j . Соотношение (2.2) называют функцией регрессии вектора x на параметр y , а также формула прогноза. При исполнении указанных допущений формула прогноза (2.2), может быть записана для каждого из n реализованных опытов. Так, получают n уравнений с $m + 1$ неизвестными $q_0, q_1, q_2, \dots, q_m$ вида

$$y_i = y_0 + q_1 g_1(x^i) + q_2 g_2(x^i) + \dots + q_m g_m(x^i), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.3)$$

где $x^i = \begin{pmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ \dots \\ x_{in} \end{pmatrix}$ - значение набора (вектора) x факторов в i -м опыте. Систему

уравнений (3.3) запишем в матричной форме $Aq = y$, где

$$q = \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \dots \\ q_m \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} 1 & g_1(x^1) & g_2(x^1) & \dots & g_m(x^1) \\ 1 & g_1(x^2) & g_2(x^2) & \dots & g_m(x^2) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & g_1(x^n) & g_2(x^n) & \dots & g_m(x^n) \end{pmatrix},$$

где q - вектор неизвестных коэффициентов модели (3.3),

y - это вектор опытных значений параметра y ,

A - это функциональная матрица опытных параметров x^i вектора x факторов.

Искомая наилучшая оценка \hat{q} вектора q может быть найдена [4] в соответствии с методом наименьших квадратов (по МНК) в форме

$$q = \begin{pmatrix} \hat{q}_0 \\ \hat{q}_1 \\ \dots \\ \hat{q}_m \end{pmatrix} = A^+ y, \quad (2.4)$$

где A^+ - т.н. псевдообратная матрица для A , которая выражается в $A^+ = (A^T A)^{-1} A^T$, если присутствует обратная матрица $(A^T A)^{-1}$, где A^T - транспонированная матрица для A . Общес соотношения для определения A^+ , представлены в [4], где также осуществлен поиск остаточной дисперсии

вектора оценок \hat{q} и иные параметры точности оценки (4).

После того, как будет найдена по МНК вектора оценок при помощи формулы прогноза (3.2) получим опытно (эмпирическую) формулу прогноза в форме

$$y = f(x, t, q) \approx y_0 + q_1 g_1(x) + q_2 g_2(x) + \dots + q_m g_m(x). \quad (2.5)$$

Основной недостаток представленного статистического метода формирования модели процесса в форме (3.5) заключается в необходимости принятия допущения о том, что неизвестная зависимость (3.1) известна и нужно только отыскать оценки коэффициентов модели. Также здесь нужно получить опытные значения y_i анализируемого параметра y процесса, т.е. получение значений y_i толщита покрытия, что бывает трудоемко. Дополнительные сложности могут возникать еще и в случае оценки точности формулы прогноза (3.5). По этой причине решение поставленной задачи при помощи только статистического подхода не эффективно. Так, далее будет описан способ применения данного подхода в целях уточнения формул прогноза, полученных в соответствии с предложенным нами методом.

2.4.2 Детерминированный подход

Указанный подход выступает в роли основного в рамках изучения процессов при помощи средств научного анализа. Он заключается в определении причинных связей, которые лежат в основе процесса с дальнейшим описанием его в виде дифференциального уравнения или в форме системы этих уравнений. Искомую модель процесса определяют в виде решения дифференциальных уравнений с дальнейшей оценкой в соответствии с опытными данными входящих в их состав коэффициентов.

В работе [4] предлагается общая структурная модель формирования произвольной системы. Множественные использования на практике доказали ее повышенную эффективность. Подтверждение правильности формирования данной модели заключается в том, что свыше 20 законов из разных секторов

знаний выступает в роли ее частного случая. В количественном виде данная общая модель выражает стандартный принцип развития, который можно сформулировать в виде.

Показатель скорости (интенсивности) w' изменения параметра $w = w(t)$ системы выступит в роли результата противодействия 2 факторов:

1) параметр скорости (интенсивность) $v = v(t)$ торможения либо сдерживания процесса развития;

2) интенсивность $u = u(t)$ инвестиционные вложения в развитие.

Совокупная модель может выразить указанный принцип в следующем виде [4]:

$$w' = u - v \quad (2.6)$$

Она справедлива как в скалярном, так и в векторном случае, при котором $w(t)$, $u(t)$, $v(t)$ – это векторы с элементами, зависящими от времени.

Нужно указать, что в основном соотношении (2.6) отсутствует указание на то, как определяются функции $w(t)$, $u(t)$ и $v(t)$, в силу того, что их вид обуславливается условиями и спецификой определенной задачи. При этом, в соответствии с построением модели четко обуславливается смысл каждой из ее частей.

2.4.3 Разработка детерминированной модели процесса роста толщины покрытия

В роли параметра процесса напыления будем рассматривать толщину $y(t)$ наносимого слоя покрытия, которую определяет время $t \in [0, T]$, где T период времени напыления. Производная $y(t)'$ обладает смыслом скорости формирования слоя $y(t)$ покрытия.

Фактор, способствующий росту $y(t)$, это приход $u(t) = u(x, t)$ вещества на поверхность. Он обуславливается не только временем, но и набором n факторов в частности: x_1 – расстоянием от горелки до напыляемой поверхности, x_2 – объемом расхода порошка, x_3 – параметр скоростью

перемещения горелки, либо напыляемой поверхности, α_4 – значение угла наклона горелки к напыляемой поверхности и др.

Если принять, что параметр скорости сдерживания процесса формирования поверхностного слоя пропорционален достигнутой толщине слоя, т.е. $v = ay$, где a – значение коэффициента пропорциональности, указанное допущение диктует сам способ нанесения и свидетельствует о том, что при увеличении толщины покрытия показатель скорости ее образования сокращается. В данном случае в соответствии с (2.6) получим линейное дифференциальное уравнение

$$y' = u - ay. \quad (2.7)$$

Если принять, что коэффициент a – является постоянным, а объем прихода вещества на поверхности тоже постоянный: $u=b$, при этом доказано, что начальное значение $y(0) = y_0$ параметра $y(t)$. Из (3.7) можно определить, что формула прогнозного значения толщины поверхностного слоя $y(t)$ в рамках напыления принимает вид:

$$y(t) = y_0 e^{-at} + \frac{b}{a} (1 - e^{-at}),$$

или

$$y(t) = y_1 + (y_0 - y_1) e^{-at} \quad (2.8)$$

где $y_1 = b/a$ – предельное (в случае $t \rightarrow \infty$) значение параметра $y(t)$.

Если коэффициент a постояен, то для всякой функции $u(x, t)$ объем прихода вещества на поверхности из рассматриваемой модели (2.7) найдем:

$$y(t) = y_0 e^{-at} + e^{-at} \int_0^t e^{a\tau} u(x, \tau) d\tau. \quad (2.9)$$

Так, примем, что приход вещества на поверхность выполняется периодически. В таком случае из последнего соотношения, предположив, что $u = b + c \sin(\omega t)$, получим

$$y(t) = C e^{-at} + \frac{c}{a^2 + \omega^2} (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) + \frac{b}{a} (1 - e^{-at}), \quad (3.10)$$

где $C = y_0 + \frac{c \tau}{a^2 + \omega^2}$,

Таким образом, если $y_0 = 0$ и в случае применения обозначений

$c = c\omega a/(a^2 + \omega^2)b$, $y(t)^- = y(t)/y_1 = ay(t)/b$ получим формулу прогноза в отношении безразмерной толщины покрытия при периодическом напылении с круговой частотой $\omega = 2\pi/T_0$, где T_0 значение периода процесса напыления:

$$y(t)^- = 1 - (1 - c)c^m + c \left(\frac{a}{\omega} \sin \omega t - \cos \omega t \right). \quad (2.11)$$

Рассмотренный метод предоставляет возможность в явной форме выстроить прогнозируемый вариант зависимости толщины слоя покрытия от периода напыления и метода нанесения покрытия. Тем не менее, в данном случае несколько факторов не принимается во внимание. Так, не учитывается расстояние r от центральной точки напыления.

В силу того, что в случае вывода соотношений (2.8–2.10) значение величины r не определялось, то это говорит о том, что анализировался случай $r=0$, который соответствует напылению в точке центра круга. Примем, что распределение толщины покрытия по отношению к центру круга симметрично. Указанное допущение предоставляет возможность применить зависимость

$$Y(t, r) = f(r)y(t), \quad (2.12)$$

где $f(r)$ является симметричной относительно прямой $r=0$ функцией плотности распределения, для которой $f(0) = 1$ (функция распыла). Здесь $y(t, r)$ и $y(t)$ значения толщины слоя покрытия на расстоянии r от центральной точки круга и толщина покрытия в центре плоскости, так это ранее было указано в работе [36].

Отсюда, в (2.12) можно предположить

$$f(r) = \exp(-r^2/2\sigma^2), \quad (2.13)$$

где σ^2 значение экспериментального коэффициента (критерий нормального распределения - дисперсия). При уменьшении параметра σ^2 пятно распыла (круг) начинает все ближе стягиваться к центру.

Отсюда полученные зависимости (2.8–2.10) учитывая (2.12) и (2.13) могут принять вид

$$y(t, r) = \exp(-r^2/2\sigma^2)(y_1 + (y_0 - y_1)e^{-at}), \quad (2.14)$$

где $y_1 = b/a$ — предельное (при $t \rightarrow \infty$) значение показателя $y(t)$.

Если коэффициент a — постояен, то для всякой функции $u(x, t)$ приход вещества на поверхность из папы модели (2.7) определим что

$$y(t, r) = \exp(-r^2/2\sigma^2)(y_0 e^{-at} + e^{-at} \int_0^t e^{a\tau} u(x, \tau) d\tau). \quad (2.14)$$

Так, пусть приход вещества на поверхность выполняется периодическим способом. То из последнего соотношения, считая $u = b \cdot c \sin(\omega t)$, получим

$$y(t, r) = \exp(-r^2/2\sigma^2) \left(C e^{-at} + \frac{c}{a^2 + \omega^2} (a \sin \omega t - \omega \cos \omega t) + \frac{b}{a} (1 - e^{-at}) \right),$$

где $C = y_0 - \frac{c\omega}{a^2 + \omega^2}$.

2.4.4 Разработка смешанной модели роста толщины покрытия

Примем, что приход $u(x, f)$ вещества на поверхность постояен во времени и его обуславливает комплекс факторов. В данном случае для u можно выстроить функцию регрессии, посчитав, к примеру, что она представляет собой линейную по каждому фактору x_i , т.е. посчитаем, что

$$u = b + q_1 x_1 + q_2 x_2 + \dots + q_n x_n$$

где коэффициенты b, q_1, q_2, \dots, q_n можно определить экспериментальным способом в соответствии с методом наименьших квадратов. Посчитаем, что все представленные факторы не зависимы от времени. Отсюда из (14) можно получить, смешанную модель

$$y(t, r) = \exp(-r^2/2\sigma^2) \left(y_0 e^{-at} + \frac{b - q_1 x_1 + q_2 x_2 - \dots + q_n x_n}{a} (1 - e^{-at}) \right). \quad (2.15)$$

Предложенная смешанная модель впервые предоставляет возможность учитывать в ходе расчета роста толщина покрытия в рамках его папыления, как выявленную выше детерминированную зависимость, так и дополнительные параметры технологической природы.

Аналогично можно преобразовать и другие полученные в проекте

формулы прогноза. Отсюда можно заключить:

1. Реализованное исследование продемонстрировало возможное сочетание двух подходов (статистический и детерминированный) к формированию модели процесса напыления.

2. Если применять метод настоящей работы можно определить закономерности изменения толщины покрытия во времени и при этом одновременно учесть те факторы, которые не принимаются во внимание в детерминированном подходе.

3. Выявленное в работе дифференциальное уравнение в целях выявления толщины слоя напыления и отысканные решения данного уравнения предоставляют возможность отыскать изменения толщины покрытия в случае различных режимов напыления и в зависимости от разных технологических параметров.

Выводы по разделу

1. Осуществлена разработка технологии восстановления деталей сельхозтехники способом газопламенной наплавки напылением. В сравнении с другими методами газопламенного напыления предлагается использовать в технологии процесс оплавления при помощи ТВЧ.

Ученые смогли доказать что напыление металла представляют собой стадию находящегося между этапом металлизацией и наплавки таким образом, может быть получен связанный диффузионный слой, показатели прочности сцепления которого достигать 450-650 МПа.

В данном случае также отмечается, что уровень перемешивания напыляемого металла и основного материала имеет значение на уровне минимального армированное покрытие получается однородным и на нём отсутствует трещины.

2. Проведён экспериментальный опыт доказывающий, что при локализации нагрева основного металла в ее точном слое при использовании

предлагаемой методики можно формировать тонкослойные покрытия, в которых отмечается минимальный уровень смещения напыляемого и основного металла, при этом отмечается также сохранение качественных характеристик напыляемого состава. В ходе процесса не происходит объёмного нагрева основного металла до высоких показателей температур, данные условия весьма существенно при обработке детали из чугуна.

3. Продемонстрировано, что предложенная технология газопламенной наплавки напылением при использовании ТВЧ позволяет получить покрытия с повышенными физико-механическими качествами: высокая прочность сцепления покрытия и основного металла, твердость покрытия и коэффициент износостойкости (относительно к закаленной стали 45) они будут составлять 450...650 МПа; HRC 40...70 и 3...10.

4. Предложенная технология обладает высокой производительностью наплавки (7,0...10 кг/ч) на большой номенклатуре а/м деталей. Процессу наплавки не нужно сложное оборудование, специальные источники питания и его можно внедрить в любом цехе и специальных мастерских, где осуществляется наплавка разнообразных материалов.

3 МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Выше доказано, что предложенная технология газопламенной наплавки пылением наиболее приемлема при восстановлении деталей сельхозмашин в реальных условиях их функционирования.

Для последующей модернизации технологии пыления, увеличения ее ключевых технико-экономических параметров потребуется дополнить реализованные исследования теоретическими поисками на основе методик математического моделирования. Это эффективно в силу того, что в литературных источниках по общим вопросам газопламенного пыления большинство теоретических задач еще не решено. Основное внимание обращается на экспериментальное исследование процессов пыления, что оправдывает повизта самого научного направления. Вопросы формулировки теории процесса, проектирования расчетных моделей не исследованы достаточно. В силу чего в настоящее время ученым и специалистам-практикам все еще не удалось решить три основные задачи.

1. не разработан метод вычисления толщины покрытия, которое получают в процессе пыления;
2. не разработан метод вычисления рационального расстояния пыления;
3. не разработаны методы оценки надежности покрытия.

Нужно указать, что математическая модель процесса в любом случае будет включать в себя коэффициенты (параметры модели), для определения которых могут быть необходимы недостающие опытные параметры. Это говорит о том, что полностью исключить необходимость реализации экспериментов нельзя. При этом у таких исследований узконаправленное, целевое назначение, а объемы их велики в сравнении с проведением опытных работ общей направленности.

3.1 Исследование износостойкости полученных покрытий

Сила трения скольжения одного тела по поверхности другого тела (опоры) равна и направлена тангенциально к общей границе между двумя телами в сторону, противоположную перемещению:

$$F = \mu N, \quad (3.1)$$

где μ — коэффициент трения для данных поверхностей (зависит от материала трущихся поверхностей, качества обработки их поверхностного слоя, в меньшей степени — от температуры и относительной скорости перемещения и не зависит от площади соприкасающихся поверхностей),

— сила нормальной реакции опоры (зависит от площади пятна контакта и давления).

Согласно третьему закону Ньютона, указанная выше сила трения действует и со стороны опоры на тело, и со стороны тела на опору.

В настоящее время установлено, что коэффициент трения в разной степени зависит от трех факторов:

1. материала трущихся тел и характера смазки, плёнки, имеющейся на поверхности;
2. конструкции фрикционного сочленения: размера поверхности, геометрического очертания, в основном от отношения площадей трения контактирующих деталей — коэффициента взаимного перекрытия;
3. режима работы: температуры, скорости, нагрузки, в основном температурного поля, возникающего в тонком поверхностном слое.

Впервые понятие о коэффициенте трения ввел Леонардо да Винчи (1508), позже Амонтон (1699). Часто приведённую выше формулу называют законом (формулой) Кулона (или Амонтона Кулона). Шарль Кулон в 1785 году подтвердил закон и предложил обобщённую формулу:

$$F = \mu \cdot N \cdot \lambda, \quad (3.2)$$

где λ — характеристика сцепления (за счёт молекулярного сцепления), не зависящая от нагрузки.

Это была первая формула, в которой учитывалось два вида тангенциального сопротивления – зависящее и не зависящее от внешней нагрузки.

Методика определения абразивной износостойкости наплавленных материалов состоит из нескольких последовательных этапов [84].

1. Изучение принципа действия и устройства машины трения 77 МТ-1 (рисунок 3.1). Техническая характеристика представлена в таблице 3.1

Установка (рисунок 3.2) имеет следующее устройство. Станина установлена на основании 1. На станине расположен электропривод, состоящий из двигателя постоянного тока 3 и редуктора 4.

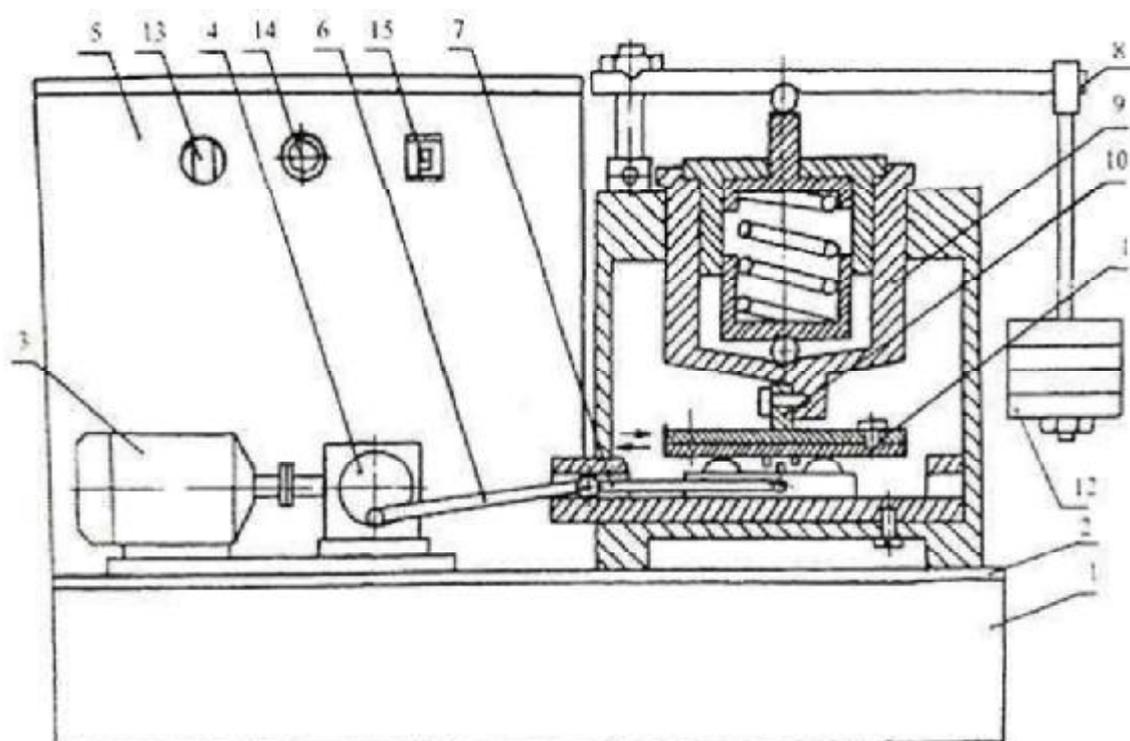


Рисунок 3.1 – Конструкция машины трения

Образцы приводятся в относительное возвратно-поступательное движение, скорость которого регулируется изменением частоты вращения электродвигателя посредством ручки регулятора 13.

1. Подготовка наплавленных материалов к испытанию.

Таблица 3.1 – Техническая характеристика

| | |
|---|---------------------------------------|
| Частота вращения вала эксцентрика | -28...280 мин |
| Длина хода нижнего образца | -52 мм |
| Масса и количество гирь нагружающего устройства | -1 кг 3шт. -2 кг 2шт -5 кг 5шт. |
| Нагрузка на образцы | -50...750 Н |
| Максимальная относительная погрешность частоты вращения вала эксцентрика | - \pm 3% |
| Максимальная относительная погрешность интенсивности изнашивания эталонных образцов, нормированная по среднему значению | - \pm 30% |
| Потребляемая мощность не более | - 1.3 кВт |
| Напряжение переменного тока трехфазной силовой цепи | - 380 В |
| Частота переменного тока силовой цепи | - 50 Гц |
| Габаритные размеры: Длина | -910 Гц |
| Ширина | - 410 мм |
| Высота | - 860 мм |
| Максимальная масса магниты | -190 кг |



Рисунок 3.2 Общий вид магниты трения 77 МТ-1.

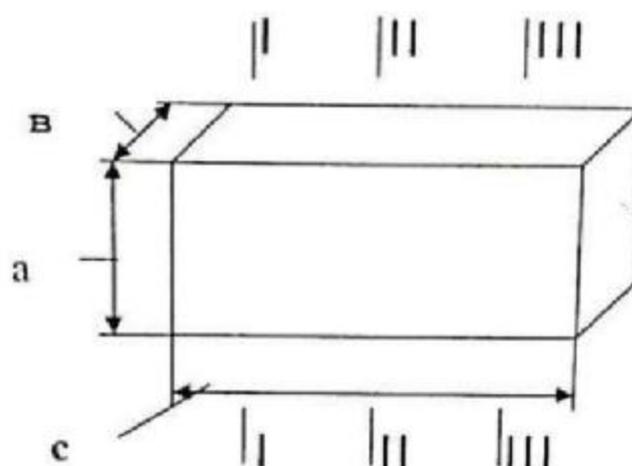


Рисунок 3.3 Схема замера образца

2. Замера наплавленных образцов с точность до 0,01 мм (рисунок-3.3). Размер «а» измеряем в сечетия (I - I, II - II, III - III) и вычисляем среднее значение. Аналогичным образом определяем размеры «в» и «с».

3. Взвешиваем образцы с точностью до 0,01 г.

4. Подбор необходимой нагрузки.

5. Производим испытание на износостойкость в течение не менее 1 часа. Время испытания замеряем точносью до 1 секунды. В процессе испытания трижды измеряем частоту двойных ходов тележки в минуту и при необходимости корректируем частоту двойных ходов путем регулирования частоты вращения двигателя посредством ручки 13 (рисунок 3.1).

6. После окончания эксперимента и спятия образцов, определяем интенсивность линейного изнашивания

$$j_i = \frac{h_i}{S} = \frac{1000 \cdot (a - a_i)}{4 \cdot r \cdot n} \quad (3.3)$$

где h_i - величина линейного износа (толщина износительного слоя), мм;

r - радиус эксцентрика (кривошипа), м;

a, a_i - высота образца до и после испытания, мм;

n - число двойных ходов ползуна за время испытания.

7. Определяем интенсивность изнашивания по массе

$$j_m = \frac{h_m}{S} = \frac{m - m_t}{S} \quad (3.4)$$

где h_m – величина износа по массе, мг;

m – масса образца до испытания, мг;

m_t – масса образца после испытания, мг.

8. Определяем скорость линейного изнашивания и скорость изнашивания по массе:

$$i_l = \frac{h_l}{t} = \frac{1000 \cdot a - a_t}{t} \quad (3.5)$$

$$i_m = \frac{h_m}{t} = \frac{m - m_t}{t} \quad (3.6)$$

где t – время испытания, ч.

3.2 Экспериментальные исследования микротвердости покрытия

Твёрдость — это способность материала сопротивляться проникновению в него другого, более твёрдого тела индентора во всем диапазоне нагружения: от момента касания с поверхностью и до вдавливания на максимальную глубину. В нашем примере, будет определяться твердость наплавленных слоев на почвообрабатывающие рабочий органы. Для этого мы воспользуемся портативным ультразвуковым твердомером ТКМ-459 (Рисунок 3.4).

Принцип действия твердомера основан на методе измерения ультразвукового контакта импеданса.

Поскольку глубина вдавливания наконечника в материал, является показателем твердости, то существует зависимость между изменением резонансной частоты стержня F и твердостью материала H :

$$H=f(\Gamma) \quad (3.7)$$

Электронный блок твердомера осуществляет прием частоты сигнала с датчика прибора, преобразование его в единицы твердости, вывод результатов измерений в дисплей, статистическую обработку и другие функции данного твердомера.



Рисунок 3.4 - Твердомер ТКМ-459

Нами были проведены исследования микротвердости на границе слоя и по всему сечению. Микротвердость определяли двумя приборами: прибором ПМГ-3, позволяющим получать 2 увеличения: $\times 487$ и $\times 135$, а также портативным твердомером. Настройку прибора производили с увеличением $\times 135$, а измерялась микротвердость $\times 487$ с увеличением $\times 487$. Для обеспечения сравнимости полученных результатов все испытания осуществлялись с нагрузкой на индикатор 1Н. Уколы алмазной пирамиды осуществляли через 1...1.5 диагонали алмазной пирамиды, отступив от края шлифа на расстоянии 1...1.5 диагонали.

Количество твердости определяли по формуле

$$H = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (3.8)$$

где P – параметр нагрузки на пирамиду, d – среднее арифметическое длин

диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, α – значение угла между противоположными гранями пирамиды, равное 136° .

В роли образца выступила пластишка, которая состоит из 2 слоев: 1 – подложка толщина 4 мм – материал сталь 45; 2 – напыленный и оплавленный слой порошкового твердого сплава СТПТ толщина 2 мм. В соответствии с результатами измерения микротвердости был сформирован график (рисунок 4.3) перераспределения твердости по сечению пластины.

3.3 Оптимальный выбор расстояния напыления

Уровень эффективности использования данной технологии обуславливают многие факторы. Так, она обуславливается выбором расстояния S между соплом горелки и зеркалом напыляемой поверхностью. Певзирая на то, что вопросы напыления рассматриваются во многих работах (см., например, [1...3, 6...41]), сегодня все еще не решена задача отбора оптимального расстояния. Отсюда при опытах приходят к тахождению данного расстояния с использованием метода подбора. Полученные рекомендации будут весьма распывчатыми. В частности, в [36] рекомендовано избрать S из обширного диапазона значений: 75-250 мм. При этом, указанный фактор оказывается достаточно существенным. В случае чрезмерно малого расстояния напыления, частицы не разогреваются до нужного значения температуры. В случае слишком большого расстояния параметр скорости частиц спижается, и качественное покрытие не получается.

В нашей работе впервые приводится простой аналитический метод решения задачи расчетного вычисления оптимального расстояния напыления. Так, оптимальное расстояние напыления можно найти из соотношения

$$S = \frac{v_0}{\alpha} \left(1 + \left(\frac{v_0^2}{c \alpha \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \right), \quad (3.16)$$

где $\lambda = \frac{\beta}{\alpha} > 2$. При $S > 0$, то из (9) можно заключить, что оптимальное решение

задачи о поиске оптимального расстояния напыления присутствует, если начальное значение скорости частицы не слишком велико, то есть при выполнении условия

$$v_0 < c \delta^{1/2} \lambda^{1/2}.$$

Выше было отмечено, что принимается допущение о том, что параметр скорости частицы напыляемого порошка в случае приближения к поверхности напыления снижается по времени. Указанное допущение верно в случае довольно больших расстояний сопла от поверхности. В силу чего, выражение (26) можно применять в случае такого выбора начальной скорости $v_0 = v_0^*$, для того оптимальное значение S расстояние представляет собой наибольшее. Параметр скорости v_0^* примем за оптимальное.

3.4 Разработка метода оценки надежности покрытия при газопламенной наплавке напылением

В рамках гл.1 уже было сказано, что покрытие, которое получается при использовании метода газопламенного напыления наплавкой, должны быть присущи следующие качества:

- высокий показатель стойкости к окислению и явлениям горячей коррозии;
- способности к образованию пленки защитных оксидов;
- стойкость в отношении охрупчивания, к примеру, в случае паутилероживания;
- стойкость к формированию легкоплавких эвтектик; стойкость к формированию летучих продуктов;
- хорошие показатели адгезии; пластичности;
- стойкость к термо и механическим ударам, высокие пределы термо и механической усталости;
- совместимость материалов покрытия и подложки в соответствии с химическим составом, коэффициентами термического расширения и

температурами вязко хрупкого перехода;

- низкий уровень пористости;

- малый уровень взаимной диффузии компонентов между покрытием и подложкой;

- отсутствие деградации параметров, в отношении переноса элементов и фазовыми трансформациями;

- способности к самозалечиваниям повреждений;

- отсутствие деградации механических параметров подложки после того как будут нанесены покрытия;

- возможности к восстановлению поврежденных покрытий и их сварке;

- доступности материалов покрытия и возможности эквивалентной замены применяемых материалов;

- оптимальное пропорциональное отношение между уровнем экономической и технической эффективности применения покрытий.

В роли общего показателя отвечающего уровень технологического и эксплуатационного действия, можно выбрать параметры надежности, под ним в настоящей работе принимается вероятность R безотказной работы покрытия на заданном интервале $[0, t_0]$ времени при исполнении условий.

Сегодня работ в сфере оценивания уровней надежности покрытий, создаваемых методом газопламенного напыления, не существует. В настоящей диссертации осуществлена первая попытка решить проблему

Методика оценивания надежности покрытия должна базироваться на характерных чертах процесса напыления. Методу присуща определяющая общность и может применяться также в иных схемах напыления покрытий.

3.4.1 Условия безотказной работы покрытия

Уровень надежности покрытия в рамках его эксплуатации по большей части определяет прочность сцепления напыленного слоя с поверхностями детали. При этом на параметр прочности сцепления оказывает влияние

множества факторов, в частности: показатель температуры металлизированных поверхностей; режим функционирования аппарата; показатель давления кислорода (пропана); длина от точки распыла до напыляемой поверхности, параметр скорости подачи порошка; параметр скорости перемещения горелки по отношению к покрываемой поверхности. Особое значение имеет группа факторов, которые определяют параметры качества подготовки поверхности. Помимо механического сцепления, показатель прочности сцепления обуславливается другими факторами. В частности поверхностная обработка обусловлена диффузией легирующих компонентов в поверхностном секторе материала. Углерод и азот стремительно диффундируют через междоузлия кристаллической решетки, и процесс азотирования ферритных сталей может осуществляться уже при низкой температуре 500 °С. Диффузия Al и Si – медленный процесс, и для него потребуются повышенные температуры [1].

Так как частицы напыленного материала обладают обычно оксидной пленкой, их сцепление с поверхностями основного материала на некоторых микро-участках протекает через оксидные пленки.

Увеличение прочности сцепления покрытия может быть достигнуто также путем образования физических связей под влиянием ван-дерваальсовых сил. Указанные силы, как связи межмолекулярного притяжения могут появляться только в случае сближения частиц покрытия с поверхностями металла на расстояние, приближенное к параметрам кристаллической решетки.

Уровень надёжности покрытия в рамках его эксплуатации в существенной мере обеспечивается параметром его износостойкости.

Параметры твёрдости и пористости материала обуславливаются глубиной поверхности, то в случае установления зависимости прочности покрытия и уровня его износостойкости в общей ситуации требуется принимать во внимание как временную, так и пространственную координату.

Способности P_i покрытия к противостоянию действующей на него нагрузке H_i обозначим как несущая способность относительно H_i .

Несущая способность P_i покрытия – это параметр нагрузки H_i , в случае которого отмечается отслаивание покрытия, разрушения или его растрескивания, провоцирующие ситуацию, при которой соответствующая деталь не исполняет свои функции в рамках системы.

Основные типы нагрузок: H_1 – нагрузки на растяжение, H_2 – нагрузки на отрывы, H_3 – нагрузки на сдвиги, H_4 – циклические нагрузки механической природы, H_5 – термо-циклические нагрузки, H_6 – ударные нагрузки и др. Указанные нагрузки могут оказывать свое влияние как по отдельности, так и в определенных комбинациях.

Выводы по разделу

1. В ходе написания квалификационной работы был осуществлён процесс проектирования расчетные методики определения толщины покрытия при использовании метода газопламенной наплавки металла способом напыления. Сформулированная в ходе реализации этого процесса уравнение позволяющее определить толщину напыляемого слоя, а также найдены и способы решения указанного уравнения впервые предоставляют возможность определить изменение толщины покрытия при использовании разных режимов напыления и в зависимости от разнообразных технологических параметров.

2. В рамках работы впервые найдено решение задачи об оптимальном отборе расстояния напыления. Доказано, что оптимальный начальный параметр скорости частиц напыляемого порошка и значение оптимального расстояния напыления находятся в прямой пропорциональной зависимости корня квадратного из удельной энергии, требуемого для нагрева частицы от значения ее начальной температуры до параметра температуры нагрева поверхности.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В настоящей главе представлен ряд полученных экспериментальных результатов, направленных на разработку технологии газопламенной наплавки методом напыления. Указанные результаты одновременно применяются в целях проверки обоснованности теоретических положений и выводов проекта.

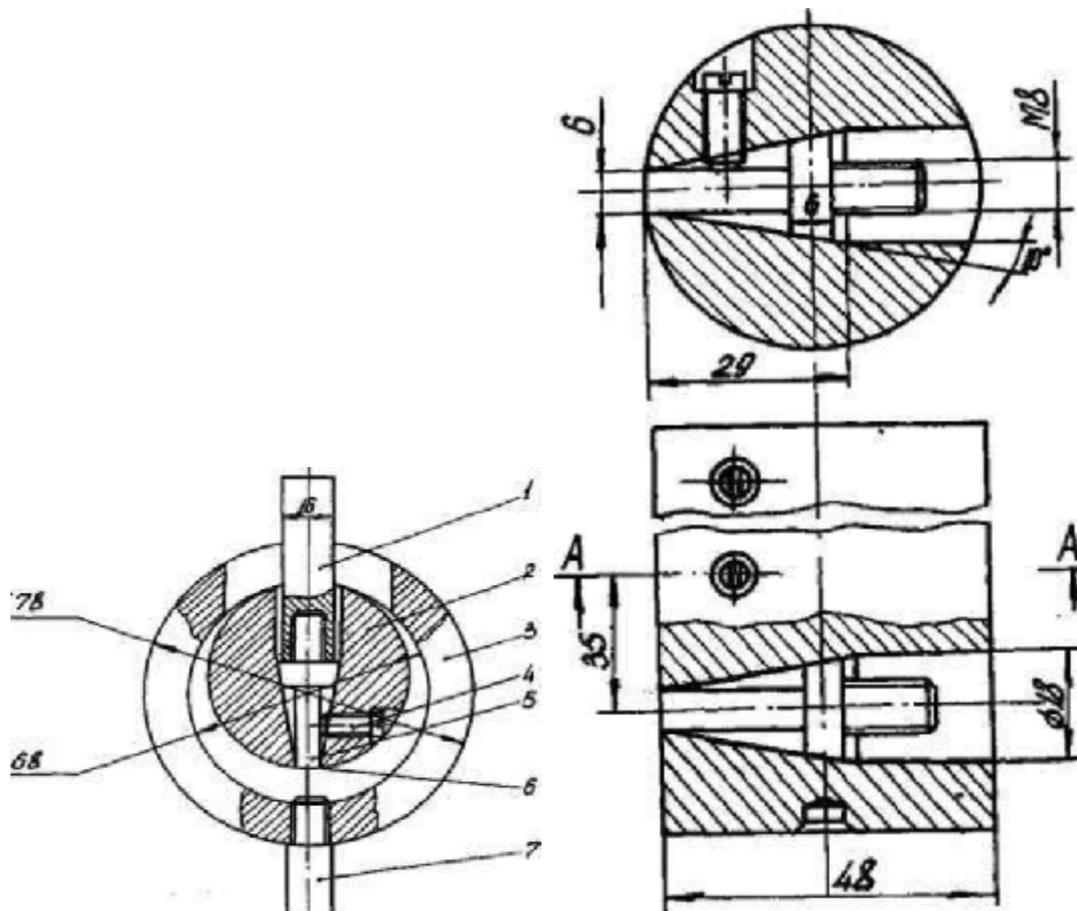
4.1 Экспериментальные исследования прочности сцепления покрытия

Одна из ключевых характеристик покрытия заключается в прочности его сцеплений с основными материалами восстанавливаемого изделия.

Предложено специальное устройство для установления прочности сцепления (рис.1).

До напыления осуществлялся процесс пескоструйной подготовки поверхности детали (шанки со штифтом) в режимах: давления сжатого воздуха $4 \cdot 10^2$, размер чугунной крошки 200...500 мк. Показатель давления кислорода и ацетилена $4 \cdot 10^2$ кПа и $0,5 \cdot 10^2$ кПа соответственно. Расход газов составил 2100 л/час и 1900 л/часа расстояние до напыляемой поверхности 180 мм. Испытания осуществлялись на толщине покрытия 2 мм и с расстоянием (от отверстия под отрывной штифт) до бокового участка поверхности планки 6мм. Выбор обусловлен необходимостью избежания концевых эффекта и возможного среза. В целях проведения испытаний применялся аппарат ИМ-4Р, предварительно подвергнутый тарировке. Параметр прочности сцепления устанавливался методом отрыва штифта и определялся по формуле $\sigma = P_0/F$. В данном случае P и F – показания прибора на момент отрыва штифта и площади поперечного сечения контактов штифта с наплавленным металлом. Указанную методику утвердил международный институт сварки и помогает в одних и тех же условиях осуществлять отрыв поочередно один за другим

Зшифта, что позволяет обеспечить увеличение точности измерений.



1 - винт; 2 - обойма; 3 - кольцо; 4 - стопорный винт; 5 - штифт; 6 - нанесенный слой;
7 - патец.

Рисунок 4.1 Устройство для определения прочности сцепления

Значение Π_0 P является начальным значением несущей способности покрытия (к моменту времени $t=0$, предшествующему началу использования). Если считать, что в рамках эксплуатации покрытие будет пребывать под влиянием постоянной нагрузкой H_0 . При выполнении допущений, принятых в гл. 3, то в соответствии с (63) параметр несущей способности покрытия к моменту времени эксплуатации можно отыскать по формуле

$$H(t) = \Pi_0 e^{-bt} + H_0 \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}), \quad (4.1)$$

или

$$\eta(t) = \eta_0 e^{-bt} + \frac{a}{b} (1 - e^{-bt}). \quad (4.2)$$

Здесь $\eta(t) = P(t) / H_0$ – значение текущего запаса прочности, $\eta_0 = P_0 / H_0$ – его начальный параметр. А также a и b – опытные коэффициенты, методика оценки которых – отдельная задача.

Параметр прочности сцепления покрытия в соответствии со способом газопламенной наплавки напылением обуславливается: подготовкой поверхности, режимом оплавления (для сплавов ПП-ХП80СР-2 температурой оплавления 980...990°C), от хим.состава порошка. Параметр прочности сцепления колеблется в диапазоне значений от $26 \cdot 10^4$ кПа до $30 \cdot 10^4$ кПа.

4.2 Экспериментальные исследования износостойкости покрытия

Параметр прочности сцепления покрытия с основным материалом не может исчерпать все свойства покрытия. Его важный показатель заключается также в износостойкости, которая в большой степени обуславливается структурой в рамках наплавки, микротвердостью и чистоты поверхности. Наплавленным порошковым твердым сплавам присуща пластичная и упругая основа, а также различные упрочняющие фазы. Реализованные микрометаллографические анализы установили, что высокотвердые структурные параметры (карбиды, бориды и т.д.) равномерно распределяются в основе. В силу чего можно было ожидать высокому износостойкость анализируемых покрытий.

В целях проведения испытаний на уровень износостойкости был выбран аппарат трения 77МТ-1М (рисунок 4.2), создающий условия трения скольжения и имитирует износ наплавленной восстановленной шейки коленвала и подшипника. Испытания уровня износостойкости осуществлялись на образцах-роликах в паре с чугунными колodками, формы и размер которых приведены в литературном источнике [46].

Машина трения типа 77 МТ1 (Методы испытания на трение и износ, Л.И.Куксенова, В.Г.Лаштева, А.Г.Колмаков, Л.М.Рыбакова - М.: Интермет Инжиниринг, 2001, стр.104) для испытания пар трения «поршневое кольцо -

«гильза цилиндра» и «юбка поршня - гильза цилиндра», воспроизводящих возвратно поступательное движение одной из деталей пары относительно другой.



Рисунок 4.2 – Исследования на машине трения 77МТ-1

Машина трения 77 МТ1 содержит корпус с расположенным на нем приводом возвратно-поступательного движения образца. На корпусе располагается узел статического нагружения, выполненный в виде рычага с грузом. Узел статического нагружения жестко связан с контрообразцом. Образец приводится в движение приводом возвратно-поступательного движения. Статическая нагрузка задается грузом, через рычаг, жестко связанный с контрообразцом. Недостатком данной машины является ограничение помешклатуры пар трения, возможных для испытания, вследствие отсутствия динамической составляющей нагрузки.

Известна установка испытания на трение и износ при возвратно поступательном скольжении шара по плоскости (Методы испытания на трение и износ, Л.И.Куксенова, В.Г.Лаптева, А.Г.Колмаков, Л.М.Рыбакова - М.: Интермет Инжиниринг, 2001, стр.122). Установка содержит корпус с закрепляемым на нем плоским образцом, приводом возвратно поступательного движения образца. На корпусе располагается узел

статического нагружения, жестко связанный с контробразцом. Контробразец приводится в движение приводом возвратно поступательного движения. Узел статического нагружения жестко связан с контробразцом. Недостатком данной машины является ограничение номенклатуры пар трения, возможных для испытания, вследствие отсутствия динамической составляющей нагрузки.

Наиболее близким техническим решением к предлагаемому является устройство, которое состоит из корпуса, привода вращения образца, узла статического и динамического нагружения. Узел динамического нагружения выполнен в виде траверсы, узел статического нагружения выполнен в виде рычага с грузом (см. SU 1635067 A1, 15.03.1991 г.). Недостатком данного изобретения являются перекосы в узлах и трение в сопряжениях, дающих погрешность в определении нормальных составляющих статической и динамической нагрузок. Задача изобретения - устранить вышеуказанных недостатков, повысить точности определения нормальных составляющих статической и динамической нагрузок за счет исключения погрешностей на трение в сопряжениях при передаче нагрузок.

Поставленная задача достигается тем, что узел динамического нагружения состоит из кулачка привода, рычага с грузом, пальца, размещенного соосно с контробразцом с возможностью взаимодействия между собой и рычагом узла статического нагружения, который жестко связан с контробразцом, и кулачок привода имеет форму, определяющую закон динамической нагрузки.

Вся вышперечисленная совокупность существенных признаков, приведенных в формуле изобретения, направлена на решение поставленной задачи, а именно на повышение точности определения нормальных составляющих статической и динамической нагрузок.

Устройство для испытания на износ содержит корпус 1 с расположенным на нем приводом возвратно-поступательного движения 2 образца 3. На корпусе 1 расположена стойка рычагов 4, к которой прикреплены узлы статического 5 и динамического нагружения 6. Узел

статического нагружения 5 выполнен в виде рычага, жестко связанного с контробразцом 7, на котором закреплен груз 8. Узел динамического нагружения 6 выполнен в виде рычага, на котором закреплен груз 9, палец 10, передающего нормальную составляющую динамической нагрузки на образец 3, кулачка привода 11, задающего закон изменения динамической нагрузки, вращающегося со скоростью w , и винта 12.

Устройство для испытания на износ работает следующим образом. Образец 3 приводится в движение приводом возвратно-поступательного движения 2. Статическая нагрузка задается грузом 8 через рычаг, жестко связанный с контробразцом 7. Динамическая нагрузка задается грузом 9 по закону, определяемому профилем кулачка привода 11, и воздействует на образец 3 через палец 10 и рычаг статической нагрузки по оси x . Кулачок привода 11 приводится в движение приводом вращательного движения со скоростью w .

Методика напыления порошкового сплава с осуществлением процедуры дальнейшего оплавления с использованием ТВЧ, позволяет создать тонкослойные покрытия, в которых отмечается минимальное смещение между присадочным и основным материалом. При реализации процедуры не отмечается объемного нагрева основного металла до высоких значений температуры, данное условие имеет значение при восстановлении чугуных изделий и деталей. Изделия из чугуна демонстрирует высокий уровень чувствительности к перегреву, при нагревании чугуна в его составе может быть сформирован переходный слой, имеющий хрупкую, достаточно сложную для обрабатывания структуру. Такой металл демонстрирует повышенную склонность к появлению в его структуре и пор.

В ходе капремонта тракторов и а/м можно восстановить только детали, действующие в условиях трения. У двигателей таких машин 20...25 % подлежащих восстановлению деталей из чугуна.

В таблице 4.1 представлена номенклатура и параметры деталей а/м КамАЗ-6520, восстанавливаемых данным способом. Восстановление

осуществляется в рамках экспериментального стенда. Были применены режимы: расходы ацетилен 1100...1300 л/час, давление 50...70 кПа, кислород 2000...2200 л/час, давление 450...500 кПа. Длина от среза сопла пистолета до детали 140...160 мм. Оплавление выполнялось на аппарате ЛПЗ-2-67 перерывно-последовательным способом с удельной мощностью от 250 до 650 Вт/см². Напыление производилось порошком марки ПГХП80СР 3. Его хим.состав: С - 0,4...0,8%, Сг - 12...16%, В - 2...3%, Si - 4...5%, Ni - основой. Поверхности деталей до напыления было подвергнуто дробеструйной обработке и процессу обезжиривания. Прочности сцепления с чугуном СЧ 15-32 - 1,8 - 0,3 МПа, а с чугуном ВЧ 60-2 - 2,6±0,2 МПа, при этом твердость -HRC43...47.

Таблица 4.1 – Номенклатура и параметры деталей а/м КамАЗ-6520

| Деталь | Марка чугуна | Размер | Твердость |
|--|--------------|-------------|--------------|
| Гнезда подшипника вала ведущей цилиндрической шестерни | КЧ 35-10 | 135 | НВ163 |
| Шкив коленчатого вала | СЧ 15-32 | 62 | HRC45 |
| Муфта подшипника выключения сцепления | СЧ 15-32 | 53 | НВ 163...229 |
| Нажимной диск сцепления 170...229 | СЧ 18-36 | 36, толщина | НВ 170...229 |

Критерий, в соответствии с которым отбирались режимы напыления и оплавления – прочность сцепления. На рисунке 4.3 представлены кривые степени интенсивности изнашивания образцов в случае трения их с колодками из чугуна КЧ 35-10.

Минимальный износ у образца из высокопрочного чугуна ВЧ 60-2 покрытие из сплава ПГХП80СР-3. Показатель его на пути трения 20 км, приблизительно в 5 раз меньше, в сравнении с образцом из закаленной стали 45. Максимальный износ представлен в образце из чугуна СЧ 15-32, что объясняет большая пористость покрытия [43].

Степень интенсивности изнашивания серого, ковкого и высокопрочного чугуна с аналогичным покрытием в случае трения с колодками из чугуна СЧ

15-32 продемонстрирована на рисунке 4.4. Уровень износостойкости покрытия из порошкового сплава 61 ПГХН80СР 3 в 2.8...3.2 раза больше, чем у стали 45, закаленной в случае нагрева ТВЧ.

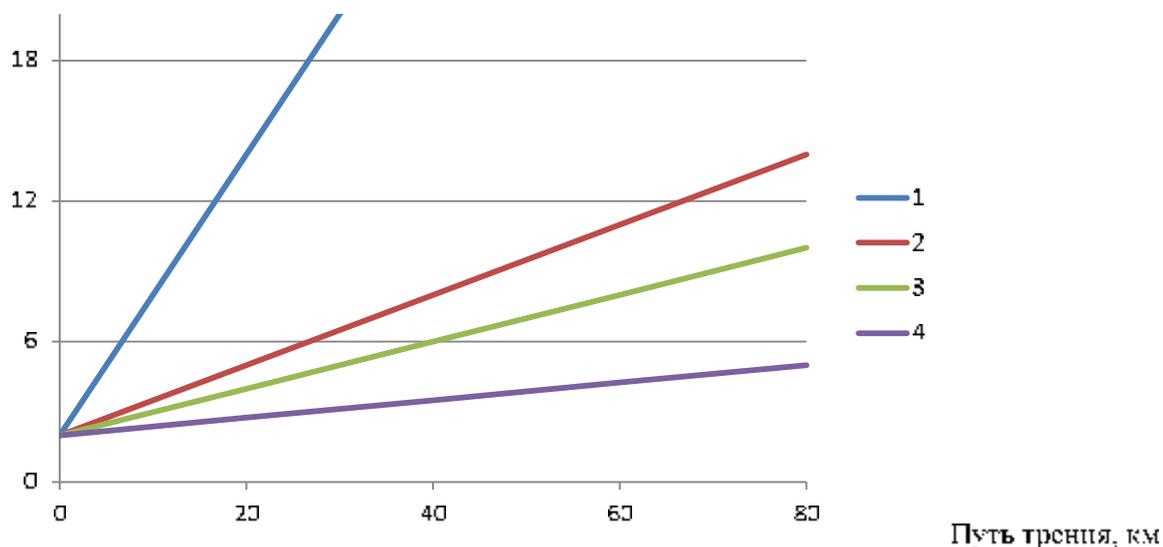


Рисунок 4.3 Экспериментальная зависимость интенсивности изнашивания покрытия от пути трения (сопрягаемый металл-чугун КЧ 35-40): 1 – сталь 45, 2 – чугун СЧ 15-32, 3 – чугун КЧ 5-10, 4 – чугун ВЧ 60-2

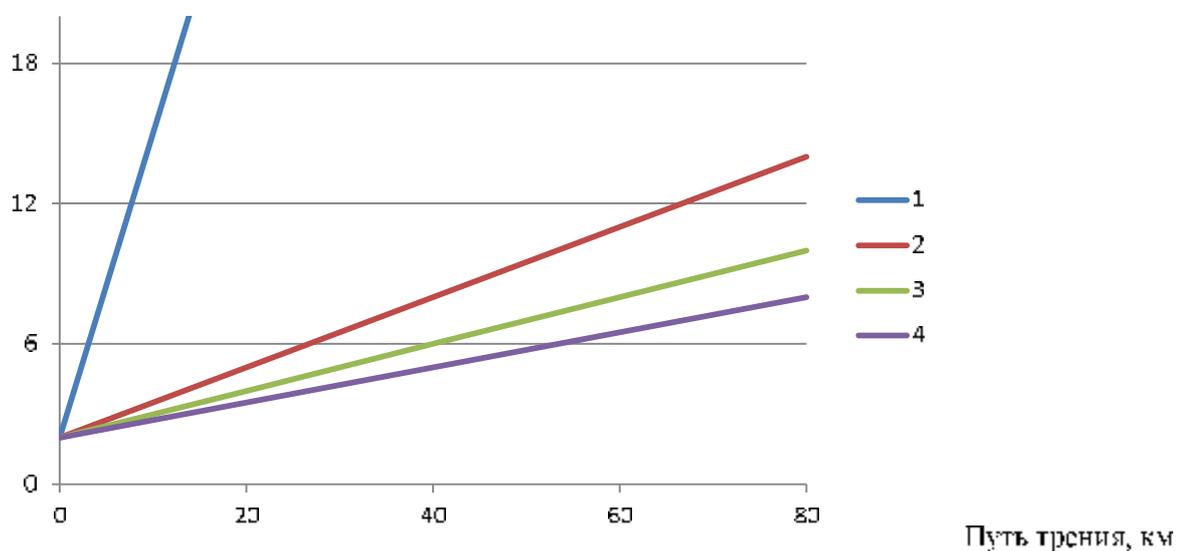
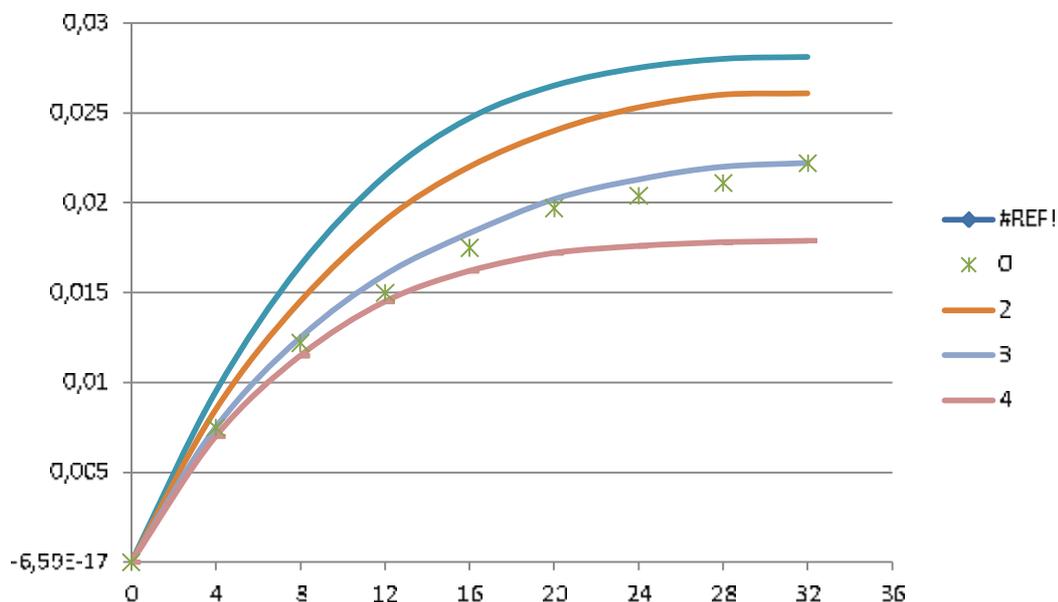


Рисунок 4.4 Экспериментальная зависимость интенсивности изнашивания покрытия от пути трения (сопрягаемый металл-чугун СЧ 15-32): 1 – сталь 45, 2 – чугун СЧ 15-32, 3 – чугун КЧ 5-10, 4 – чугун ВЧ 60-2

Металлографическое исследование выявило хорошее состояние

переходной зоны в покрытии и основном металле. Восстановленные детали смогли проработать на а/м КамАЗ-6520 в течение 2 лет. Пробег за указанный период – 96... 108 тыс. км. Отказов узлов с данными деталями не выявлено. Размер восстановленных поверхностей – в пределах нормы.

На рисунке 4.5 продемонстрирован график, который показывает характер износа ролика в паре с чугунными колодками. Ролики были изготовлены из стали 45, а состав истирающихся колодок – серый чугун СЧ-18-36. Шероховатости их определяли профилографом-профилометром Калибр ВЭН мод 201. Она пребывала в границах от 0,16 до 0,32 мкм, 9-й класс. Поверхность трения колодок при полировании после расточки была обеспечена на уровне 8-го класса. Вырезку роликов после шлифовки и полировки осуществляли в условиях обильного охлаждения так, что температура не повышалась более 60-70° С. В роли эталона, с уровнем износостойкости которого сравнивали износостойкость наплавленного металла, принималась сталь 45, закаленная ТВЧ на аппарате ЛПЗ-67В.



1. Сталь 45; 2. Сплав ПГ-Х180СР-2; 3. Сплав ФБХ (* – точка расчетной кривой);
4. Сплав ПП1

Рисунок 4.5 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по износу покрытия в зависимости от времени

На рисунке 4.6 помимо опытных кривых представлены точки расчетной кривой, которая была получена из следующих соображений. В целях определения зависимости $Q(t)$ износа от времени в соответствии с предложенным в диссертации методом, воспользуемся основным уравнением динамики произвольной системы, сформулированное в работе [4]. Уравнение динамики представлено как $x_1' = u - v$. Здесь x_1' – выходной параметр системы (процесса), зависящий от времени, v – параметр скорости сдерживания (торможения) процесса, u – параметр скорости восстановления развития (инвестиция в развитие) системы. Указанное уравнение структурное и не может определить способ задания его элементов, диктуемый условиями определенной задачи.

Осуществим запись основного уравнения износа Q в форме

$Q_1' = u - v$, приняв параметр скорости u постоянной и применив обозначение $u = \alpha$.

В данном случае производная Q_1' обладает смыслом скорости изменения износа $Q(t)$. В роли фактора, который способствует стабилизации либо росту $Q(t)$, примем интенсивность (параметр скорости) трения u пары ролик – чугунные колодки. Посчитаем, что параметр скорости сдерживания процесса изменения $Q(t)$ пропорционален достигнутой степени износа, т.е. $v = \beta Q$, где β – значение к-та пропорциональности. Отсюда получим дифференциальное уравнение

$$Q_1' = \alpha - \beta Q \quad (4.3)$$

Если β – постоянный, положительный к-т обозначить через $Q_0 = Q(0)$ начальный параметр износа. Решив уравнение (4.3), получаем формулу, которая определяет зависимость изменения износа от времени:

$$Q_t = Q_0 e^{-\beta t} + Q^* (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.4)$$

где $Q^* = \alpha/\beta$ – опытный коэффициент, который имеет смысл предельного (при $t \rightarrow \infty$) износа покрытия. Если $Q_0 = 0$ из (4.4) получим следующую формулу прогноза величины износа:

$$Q_t = Q^* (1 - e^{-\beta t}) \quad (4.5)$$

На рисунке 4.5 представлены точки расчетной кривой (4.5) в виде

$$Q_s = 0.022 \cdot 10^{-6} \cdot e^{0.1v} . \quad (4.6)$$

Расхождение значений опытных данных и расчетной кривой (4.6) не выше 4%.

Металлографический анализ позволил установить, что закаленный слой поверхности роликов обладает структурой мелкоигльчатого мартенсита. Твердость данного слоя колебалась в интервале HRC 52...56, глубиной закаленного слоя 2,0 мм.

Величина и характер износа обусловлены большим количеством факторов. При этом основные из них, определяющие процесс износа при установленных физико-механических параметрах металла, а также качестве трущихся поверхностей, заключаются в удельном давлении, температуре, параметр скорости относительного перемещения трущихся пар и способы смазки. В соответствии с литературными данными удельное давление на шатунную шейку коленвала двигателей а/м составляет $10...20 \cdot 10^5$ кПа. В силу чего, а также отталкиваясь от условий получения стабильного трения в отсутствие заедания истирающих образцов и температуры, не выше $90...100^\circ\text{C}$, удельное давление избирается $50 \cdot 10^5$ Па. Параметр скорости относительного перемещения трущихся поверхностей определяется на основе конструкции машины достигает 0,5 м/сек при 200 об/мин. В роли смазки использовалась смесь из масла ДП-11 и пылевидного кварца (15 г кварца на 1 кг масла). Смазку производили путем погружения частиц образца ролика в ванночку. В целях устранения воздействия на величину износа продуктов истирания суспензию сменяли через каждые 5 часов эксплуатации.

4.3 Экспериментальные исследования микротвердости покрытия

Нами были проведены исследования микротвердости на границе слоя и по всему сечению. Микротвердость определяли двумя приборами: прибором ПМТ-3, позволяющим получать 2 увеличения: $\times 487$ и $\times 135$, а также

портативным твердомером (рисунок 4.6). Настройку прибора производили с увеличением $\times 135$, а измерялась микротвердость 487 с увеличением $\times 487$. Для обеспечения сравнимости полученных результатов все испытания осуществлялись с нагрузкой на индикатор 1Н. Уколы алмазной пирамиды осуществляли через 1...1.5 диагонали алмазной пирамиды, отступив от края шлифа на расстоянии 1...1.5 диагонали.



Рисунок 4.6 Исследования твердости

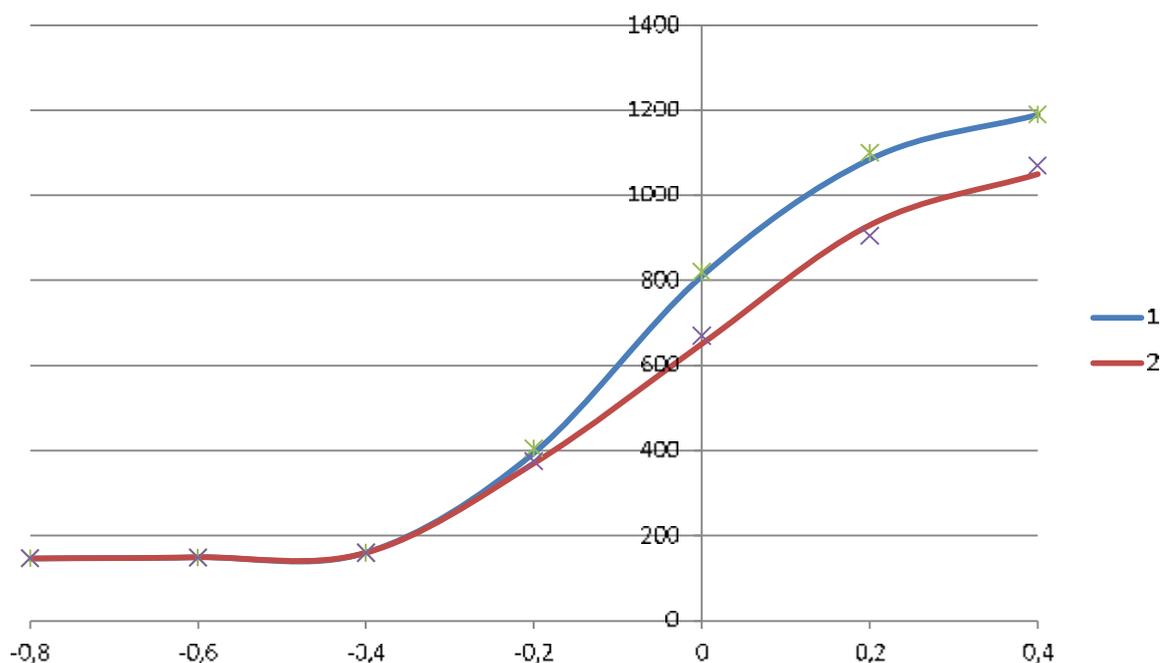
Количество твердости определяли по формуле

$$H = \frac{2P}{d^2} \sin \frac{\alpha}{2}, \quad (4.7)$$

где P – параметр нагрузки на пирамиду, d – среднее арифметическое длин диагоналей отпечатка после снятия нагрузки, α – значение угла между

противоположными гранями пирамиды, равное 136° .

В роли образца выступила пластишка, которая состоит из 2 слоев: 1 подложка толщиной 4 мм - материал сталь 45; 2 – напыленный и оплавленный слой порошкового твердого сплава СНГН толщина 2 мм. В соответствии с результатами измерения микротвердости был сформирован график (рисунок 4.3) перераспределения твердости по сечению пластины.



1. Сплав СНГН 2. Сплав ПГ ХН80СР-2 (* - точка расчетной кривой)

Рисунок 4.7 Сравнение экспериментальных и расчетных данных по твердости покрытия в зависимости от толщины слоя

Наивысшая твердость присутствует у боридных и карбидных фаз. В частности борид хрома обладает микротвердостью $1400...1500 \cdot 10^1$ кПа, а его твердость $HRC84$. Соответственные параметры карбида хрома $1336 \cdot 10^4$ кПа и $HRC84$. Доказано, что высокий уровень микротвердости позволяет обеспечить и высокую износостойкость.

В соответствии с опытными данными по измерению твердости нагретых образцов одновременно с графиком рисунок 4.7 был сформирован график (рисунок 4.8) изменения твердости по температуре.

На рисунке 4.7 вместе с опытными кривыми представлены точки

расчетной кривой, которая была получена из следующих соображений. В целях определения зависимости $H(x)$ твердости покрытия от толщины x в соответствии предлагаемому в диссертации подходу воспользуемся основным уравнением динамики произвольной системы, сформулированное в работе [4]. Уравнение динамики представляется как $x_t' = u - v$. Здесь x_t' – уровень интенсивности изменения выходного параметра x_t системы (процесса), которая зависит от времени, v – уровень интенсивности сдерживания (торможения) процесса, u – уровень интенсивности восстановления развития системы. Указанное уравнение структурное и не позволяет определить способ задания его элементов, диктуемый условиями конкретной задачи.

Величина $H(x)' = H' = (\ln H)'$ будет принята нами как логарифмический параметр скорости или интенсивности изменения твердости (интенсивность обладает размерностью 1/с).

Применив основное уравнение, осуществим его запись для интенсивности изменения твердости в виде $(\ln H)' = u - v$, считая интенсивность u как постоянной и используя обозначение $u = \alpha$.

В роли фактора, который способствует стабилизации или росту $H(x)$, выберем параметр интенсивности u образования слоя покрытия. Посчитаем, что уровень интенсивность сдерживания процесса изменения $H(x)$ пропорционален достигнутому уровню твердости, т.е. $v = \beta H$, где β – к-нт пропорциональности. Отсюда получим дифференциальное уравнение

$$(\ln H)' = \alpha - \beta H,$$

откуда следует, что

$$H' / H = \alpha - \beta H, \quad H' = H(\alpha - \beta H),$$

или

$$\frac{dH}{dx} = H(\alpha - \beta H),$$

$$\frac{dH}{H(\alpha - \beta H)} = dx,$$

Так, мы вывели уравнение с разделяющимися переменными, при

интегрировании которого получим следующую формулу прогноза:

$$H(x) = \frac{H_0}{1 + \left(\frac{H_0}{H_\infty} - 1 \right) e^{-\alpha(x-x_0)}} \quad (4.8)$$

где $H_0=H(x_0)$ – начальный (при $x=x_0$) уровень твердости покрытия; $H_\infty=\alpha/\beta$ – значение опытного коэффициента, имеющего смысл параметра предельной (при $x \rightarrow \infty$) твердости покрытия.

Выражение (4.8) является известной логистической моделью. Тем не менее, ее обычно используют только в целях аппроксимации опытных данных. Нами же была выведена формула (4.8) из физических предпосылок и используем ее аргументировано, а не в виде предполагаемого соотношения.

На рисунке 4.8 представлены точки расчетной кривой (4.8) в виде

$$H(x) = \frac{1100}{1 + 7.3e^{-3.5x - 6.4}}$$

Расхождение в опытных данных и расчетной кривой (4.8) не более 5%.

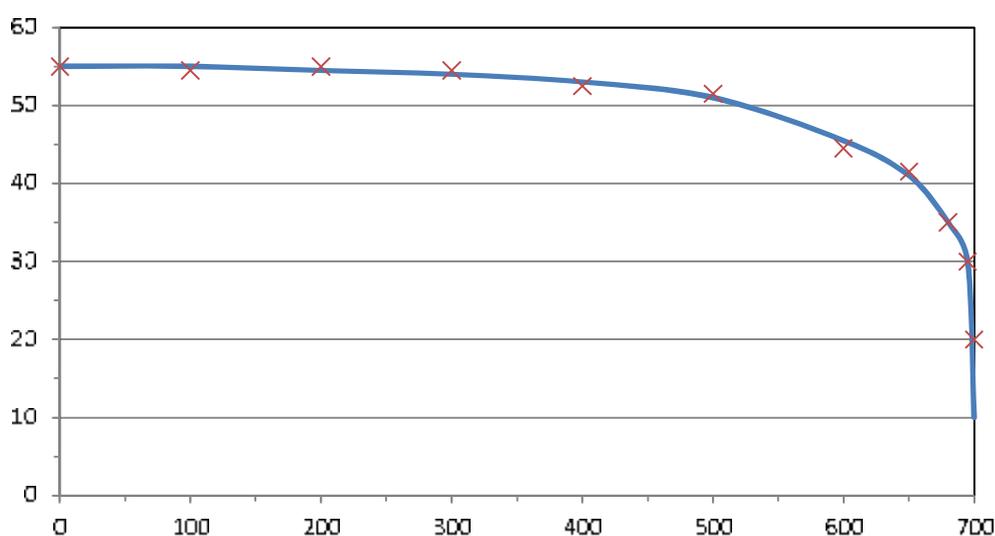


Рисунок 4.8 – Опытная зависимость твердости от температуры

Из графика рисунка 4.7 можно заключить, что сплавы типа СМГН могут с успехом использоваться при восстановлении деталей, функционирующих в повышенных температурах: клапанных гнезд, клапанов, поршневых пальцев.

4.4 Металлографические исследования

Структура покрытия имеет важное значение для обеспечения уровня его износостойкости. Анализ структуры осуществлялся на образцах инструментами металлографического анализа. Образцы вырезали под микроскопом из восстановленных деталей (поршневые пальцы) в процессе интенсивного охлаждения тонкими абразивными крупами (температура не более 60-70°). С помощью специального аппарата, который состоит из цилиндрической плитки, форм для прессования, пуансона и прессы, образцы запрессовывали в полистирол. Указанный процесс требуется во избежание завалов в шлифовке. Затем образцы шлифовали на наждачной бумаге, а после полировались окисью хрома по стандартной методике. Микроплиты програвливали царской водкой (3 части соляной кислоты и 1 часть азотной кислоты). В целях изучения микроструктуры применялся микроскоп МИ-7, который позволяет фотографировать структуру.

На металлографических исследованиях напыленного сплава (x600) можно увидеть крупнозернистые частицы, которые сохранили первоначальную сферическую форму, не доведенные до температуры плавления в рамках переноса частицы. Частицы, которые имеют при переносе температуру плавления, начинают деформироваться и приобретают округлую форму. Между частицами можно легко увидеть легкоплавкую эвтектику (боросиликат), придающую сплаву самофлюсующиеся параметры. можно увидеть также поры и мелкодисперсные карбиды в рамках частиц.

На металлографических исследованиях структуры покрытия (x600), который был получен при газопламенном напылении с дальнейшим газопламенным оплавлением, отмечается сложная никелевая эвтектика, карбиды хрома, бориды никеля. Карбиды обладают различной геометрической формой, и соответственно, они имеют им присущее сложное химическое строение $M_7C_3(CrFe)_7C_3$, или $(FeCr)_7C$, Cr_7C_3 .

На механизмы изнашивания оказывает влияние также матрица, иными

словами основа, в которой пребывают крупные карбиды (высокотвердые элементы). В нашей ситуации сплавы обладают аустенитной высокоточной матрицей, чему, бесспорно, способствует содержание никеля.

В районе, который примыкает к границе сплавления в наплавленном слое, присутствует полоса твердого раствора, сформировавшегося в силу диффузии железа из главного материала в наплавленный. Рядом с указанной границей отмечается объединение однородных зерен хромом и иными легирующими компонентами. Затем эта полоса, разделяется на две зоны. Первая из них обладает твердостью порядка $400 \cdot 10^1$ кПа и прямо прилегает границе сплавления со сталью, имеет эвтектическое строение с прожилками аустенита. Вторая зона – светлая и обладает структурой легированного аустенита с твердостью $310 \cdot 10^1$ кПа. У нее доля железа ниже, чем в первой зоне. От основного материала в районе границы сплавления присутствуют зоны, обогащенные перлитом. В сплавах железа с углеродом, которые практически не содержат других примеси, чистый перлит формируется с содержанием 0.8% С. В сталях и чугунах, которые содержат кремний и иные компоненты, перлит получается с меньшим количеством углерода.

Характер полученной структуры обуславливается как способом оплавления, так и его режимами. На рис.9 и 10 приведены структуры покрытия, получаемого с применением метода газопламенного оплавления и оплавления при помощи ТВЧ. Из сравнения указанных параметров выходит, что структура с оплавлением при помощи ТВЧ обладает рядом особенностей:

- 1) более мелкой зернистостью в силу кратковременного влияния теплового фактора;
- 2) отсутствует большое число вторичных карбидов, которые выделяются из твердого раствора;
- 3) малая область эвтектики;
- 4) высокотвердые элементы (карбид, борид, карборид) пребывают в твердом растворе и имеют статус упрочняющих фаз.

С позиции дислокационной теории – это самая совершенная структура: упрочняющие фазы являются дислокационными порогами, затрудняющими движение дислокаций и в силу этого улучшающие физико-механические параметры покрытий.

Выводы по разделу

1. Параметры прочности сцепления твердосплавных покрытий, нанесенных методом газопламенного напыления с дальнейшим оплавлением ТВЧ составляет $50 \cdot 10^4$ – $60 \cdot 10^4$ кПа и выполняет требования для восстановления деталей сельхозтехники.

2. Твердосплавные покрытия в случае оплавления ТВЧ обладают высокой микротвердостью, достигающей значения $1300 \cdot 10^4$ кПа, то есть в 1,6 раза выше микротвердости покрытия, нанесенного вибродуговой шпавкой.

3. В микроструктуре нанесенного покрытия присутствуют высокотвердые структурные компоненты: карбидно боридные фазы, расположенные в высокопрочной аустенитной матрице, что позволяет обеспечить высокую износостойкость покрытий.

4. Опыт подтверждает достоверность ключевых теоретических выводов работы:

4.1. В рамках экспериментальных исследований параметров прочности сцепления покрытия доказана эффективность и возможность применения предложенного в проекте обобщенного параметра – вероятность обеспечения надежного сцепления. Приводится методика расчета и числовые ее использования.

4.2. В рамках экспериментальных исследований износостойкости покрытия выведена формула прогноза $Q_t = 0,022(1 - e^{-0,1t})$ износа покрытия для начальных данных эксперимента. Ее нашли в соответствии с предложенным в работе общим подходом к анализу процессов нанесения покрытий. Расхождения между опытными данными и представленной расчетной кривой

не более 4%.

4.3. В рамках экспериментальных исследований параметров микротвердости покрытия была выявлена формула прогноза микротвердости покрытия для базовых данных эксперимента. Ее нашли на основе предлагаемого в работе общего подхода при анализе процессов нанесения покрытий. Расхождение опытных данных и указанной расчетной кривой не более 5%.

Реализованная проверка предложенного подхода к анализу процессов нанесения покрытий подтверждает верность и достоверность полученных теоретических параметров работы, т.к. они основываются на данном подходе.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Экономическую эффективность восстановления изношенных деталей определяют по формуле:

$$\mathcal{E}_в = \left(\frac{Ц_н \cdot C_{ост}^н}{P_н} - \frac{Ц_в \cdot C_{ост}^в}{P_в} \right) \times P_в, \quad (5.1)$$

где $\mathcal{E}_в$ - экономическая эффективность восстановления деталей, руб.;

$Ц_н, Ц_в$ - цены соответственно новой и восстановленной деталей, руб.;

$P_н, P_в$ - ресурсы соответственно новой и восстановленной деталей, ч;

$C_{ост}^н, C_{ост}^в$ - остаточная стоимость после эксплуатации

соответственно новой и восстановленной деталей, р.

Из этой формулы следует, что экономически целесообразно восстанавливать детали, для которых $\mathcal{E}_в > 0$. Если принять, что $C_{ост}^н = C_{ост}^в$

, а отношение $\frac{P_в}{P_н}$ представить как коэффициент долговечности K_d

восстановленной детали, соотношение цен новой и восстановленной деталей должно удовлетворять выражению:

$$Ц_н - \frac{Ц_в}{K_d} > 0, \quad (5.2)$$

В условиях рыночной экономики как новые, так и восстанавливаемые детали реализуются потребителю по договорной цене. Однако для предприятия очень важно определить возможные максимальную и минимальную цены на восстановленную деталь, при которых, с одной стороны, потребитель был бы заинтересован приобрести ее вместо новой детали, а с другой стороны, восстановление ее обеспечивало бы ремонтному предприятию хотя бы нормативную рентабельность.

Потребитель будет заинтересован приобрести восстановленную деталь

вместо новой в случае, если затраты на единицу ресурса при использовании восстановленной детали будут меньше, чем при использовании новой детали, т.е.:

$$\frac{U_v}{K_D} < U_n, \quad (5.3)$$

тогда максимальная цена восстановленной детали может быть определена из выражения:

$$U_{vmax} < U_n \times K_D, \quad (5.4)$$

где K_D — коэффициент долговечности восстановленной детали.

Минимальную цену для производителя можно определить по формуле:

$$U_{vmin} = C_{zi} + П, \quad (5.5)$$

где C_{zi} — заводская себестоимость восстановления детали с i -м сочетанием дефектов, р.;

$П$ — планируемая балансовая прибыль, руб.

В зависимости от числа дефектов и их сочетаний заводская себестоимость восстановления конкретных деталей одного наименования будет различной.

В общем случае заводская себестоимость восстановления детали с определённым сочетанием дефектов C_{zi} определяется из выражения, р.:

$$C_{zi} = \sum_1^n C_{vi} + U_n + C_{\phi}, \quad (5.6)$$

где C_{vi} — себестоимость устранения i -го сочетания дефектов без учета затрат на очистку и дефектацию детали, руб.;

U_n — стоимость дополнительных работ, которые необходимо выполнить

при восстановлении детали с любым сочетанием дефектов (очистка,

дефектация), руб.;

C_{ϕ} затраты на приобретение ремонтного фонда (стоимость

изношенной детали). руб.;

n количество дефектов.

Значение μ_n принимается равным 0,1 от себестоимости устранения

всех возможных дефектов:

$$\mu_n = 0,1 \sum_{i=1}^n C_{Bi} \quad (5.7)$$

Стоимость изношенных деталей, получаемых от поставщиков ремонтного фонда (предприятий, торговых баз, обменных пунктов), на практике обычно устанавливается равной 0,1 от цены новой детали или по цене металлолома плюс 20 %;

$$C_{\phi} = 0,1 \times C_n \quad (5.8)$$

Прибыль Π определяется из выражения

$$\Pi = \frac{N_{np} \times C_{zi}}{100}, \quad (5.9)$$

где N_{np} норма прибыли, в процентах.

Величина нормы прибыли должна быть не ниже коэффициента эффективности вложений, равного процентной ставке за кредит, установленной Центральным банком РФ и увеличенной на коэффициент гарантии получения положительного эффекта.

При упрощенных расчетах значение N_{np} может приниматься в пределах 10...30%.

Цена новой детали автомобиля $C_n = 6390$ р.

Исходя из коэффициента долговечности вала масляного насоса $K_d = 0,8$ его максимальная цена может быть установлена не более

$$C_{B \max} < C_n \times K_d = 6390 \text{ р.} \times 0,8 = 5112 \text{ р.}$$

По формуле 30 определяем значения заводской себестоимости восстановления оси с различными сочетаниями дефектов, по формуле (5.9) - величину прибыли, по формуле (5.5) - соответственно минимальную расчетную цену восстановленной детали.

Результаты расчетов сводятся в таблицу 5.1.

Себестоимость устранения отдельных дефектов:

дефект 1 – 565 руб.; дефект 2 – 2249,2руб.;

Стоимость дополнительных работ:

$$I_{II} = 0,1 \times (565 - 2249,2) = 281,5 \text{ руб.}$$

Стоимость изношенной детали: $C_{II} = 0,1 \times I_{II} = 0,1 \times 6390 = 639 \text{ руб.}$

Исходя из нормы прибыли $I_{II} = 20\%$ определяем величину прибыли

для деталей с различными сочетаниями дефектов.

Определяем заводскую себестоимость восстановления $C_7 = C_{во} + D_{II} + C_{II}$

Только для дефекта 1

$$C_7 = 565 \text{ руб.} - 281,5 \text{ руб.} + 639 \text{ руб.} = 1485,5 \text{ руб.}$$

Только для дефекта 2

$$C_7 = 2249,5 \text{ руб.} - 281,5 \text{ руб.} + 639 \text{ руб.} = 3170 \text{ руб.}$$

Для дефекта 1 и дефекта 2 вместе

$$C_7 = 565 \text{ руб.} + 2249,5 \text{ руб.} + 281,5 \text{ руб.} + 639 \text{ руб.} = 3735 \text{ руб.}$$

Расчетная цена восстановленной детали $C_8 = C_7 - П$

Только для дефекта 1

$$C_8 = 1485,5 + 20\% = 1782,6 \text{ руб. ;}$$

Только для дефекта 2

$$C_8 = 3170 + 20\% = 3804 \text{ руб. ;}$$

Для двух дефектов вместе

$$C_8 = 3735 + 20\% = 4482 \text{ руб.}$$

Ремонтному предприятию экономически выгодно восстанавливать со всеми сочетаниями дефектов $X_1, X_2, X_{1,2}$, и реализовывать их по цене от

1782,6 до 5112 руб.

Таблица 5.1 Технико-экономические показатели восстановления детали с различными сочетаниями дефектов

| Сочетания дефектов (изношенных поверхностей) | Коэффициент повторяемости сочетания дефектов | Заводская себестоимость восстановления C_1 , руб. | Расчетная цена восстановленной детали $C_в$, руб. |
|--|--|---|--|
| Только дефект 1 | 0,026 | 1485,5 | 1782,6 |
| Только дефект 2 | 0,686 | 3170 | 3804 |
| Сочетание дефектов 1 и 2 | 0,094 | 3735 | 4482 |

Экономический эффект определяется из сопоставления приведённых затрат на восстановление по базовой и предлагаемой технологиям:

$$\Theta = \left[(Cб_0 + E_n \cdot K_0) \frac{Pc_0 + E_n}{Pc_1 + E_n} - (Cб_1 + E_n \cdot K_1) \right] \cdot N \quad (5.10)$$

где $Cб_1, Cб_2$ – себестоимость восстановления, соответственно по базовому и новому способам, руб.;

K_1, K_2 – удельные капитальные вложения, необходимые для базового и нового способов восстановления, руб./шт.;

Pc_1, Pc_2 – величины, обратные срокам службы соединения, восстановленного базовым и новым способами;

$$Pc_1 = \frac{T_c}{Wp_1}; \quad Pc_2 = \frac{T_c}{Wp_2} \quad (5.11)$$

где T_c – средняя годовая паработка, 1900 ч.;

Wp_1, Wp_2 – средние межремонтные ресурсы соединений, восстановленных соответственно базовым и новым способами;

E_n – коэффициент эффективности капитальных вложений, $E_n = 0,15$;

N – программа восстановления, шт.

Себестоимость восстановления по базовому и новому способам восстановления рассчитывается по формуле, руб.:

$$Cб_1 = C_{эл} + C_{дэл} + C_{об} + C_m + C_{тр} + C_{п} + C_{в} + C_{шт} + C_{экз} \quad (5.12)$$

где $C_{\text{оз}}$ – основная зарплата производственных рабочих, руб.;

$C_{\text{доп}}$ – дополнительная зарплата, руб.;

$C_{\text{со}}$ – начисление по соцстраху, руб.;

$C_{\text{м}}$ – стоимость материалов, руб.;

$C_{\text{тм}}$ – транспортно-заготовительные расходы на материал, руб.;

$C_{\text{ц}}$ – цеховые расходы, руб.;

$C_{\text{об}}$ – расходы на содержание оборудование, руб.;

$C_{\text{вп}}$ – внепроизводственные расходы, руб.;

$C_{\text{обз}}$ – общезаводские расходы, руб.

Одной из перспективных технологий восстановления деталей, обеспечивающей средний ресурс агрегатов на уровне новых, является газопламенная наплавка напылением.

Основная зарплата на восстановление одной золотниковой пары:

$$C_{\text{оз}} = K_{\text{в}} \cdot T_{\text{в}}, \quad (5.4)$$

где $K_{\text{в}}$ – норма времени на восстановление одной детали (по хронометражу $K_{\text{в0}}=1,32$; $K_{\text{в}}=2,15$ ч.);

$T_{\text{в}}$ – часовая тарифная ставка слесаря IV разряда, руб./ч.

$$C_{\text{оз0}} = 1,83 \cdot 150 = 274,5 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{оз1}} = 2,05 \cdot 150 = 307,5 \text{ руб.}$$

Дополнительная заработанная плата:

$$C_{\text{доп}} = 14,6 \cdot C_{\text{оз}} / 100, \quad (5.5)$$

$$C_{\text{доп0}} = 14,6 \cdot 274,5 / 100 = 40,1 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{доп1}} = 14,6 \cdot 307,5 / 100 = 44,9 \text{ руб.}$$

Начисления по социальному страхованию:

$$C_{\text{со}} = (36 \cdot (C_{\text{оз}} + C_{\text{доп}})) / 100, \quad (5.6)$$

$$C_{\text{со0}} = (36 \cdot (274,5 + 40,1)) / 100 = 113,3 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{со1}} = (36 \cdot (307,5 + 44,9)) / 100 = 126,9 \text{ руб.}$$

Стоимость материала определяем по формуле:

$$C_{\text{м1}} = K_{\text{мв}} \cdot C_{\text{ав}} + K_{\text{мл}} \cdot C_{\text{эл}}, \quad (5.7)$$

$$C_{\text{м1}} = 2500 \cdot 0,05 + 400 \cdot 0,02 = 133 \text{ руб.}$$

Транспортно заготовительные расходы на материал составляют:

$$C_{\text{трг}} = 12 \cdot C_{\text{мл}} / 100, \quad (5.8)$$

$$C_{\text{трг}} = 12 \cdot 133 / 100 = 16 \text{ руб.}$$

Цеховые расходы:

$$C_{\text{ц}} = 116,3 \cdot C_{\text{зм}} / 100, \quad (5.9)$$

$$C_{\text{ц1}} = 116,3 \cdot 274,5 / 100 = 319,2 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{ц2}} = 116,3 \cdot 307,5 / 100 = 357,6 \text{ руб.}$$

Расходы на содержание оборудования:

$$C_{\text{об}} = 118,3 \cdot C_{\text{зм}} / 100, \quad (5.10)$$

$$C_{\text{об1}} = 118,3 \cdot 274,5 / 100 = 324,7 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{об2}} = 118,3 \cdot 307,5 / 100 = 363,8 \text{ руб.}$$

Общезаводские расходы:

$$C_{\text{зав}} = 73,7 \cdot C_{\text{зм}} / 100, \quad (5.11)$$

$$C_{\text{зав1}} = 73,7 \cdot 274,5 / 100 = 202,3 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{зав2}} = 73,7 \cdot 307,5 / 100 = 226,6 \text{ руб.}$$

Внепроизводственные накладные расходы:

$$C_{\text{вн}} = \frac{1,116(C_{\text{зав}} + C_{\text{об}} + C_{\text{ц}} + C_{\text{трг}} + C_{\text{м}} + C_{\text{мгс}} + C_{\text{ц}} + C_{\text{а}} + C_{\text{аз}})}{100}, \quad (5.12)$$

$$C_{\text{вн1}} = \frac{1,116(274,5 + 40,1 + 113,3 + 319,2 + 324,7 + 202,3)}{100} = 14,2 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{вн2}} = \frac{1,116(307,5 + 44,9 + 126,9 + 133 + 16 + 357,6 + 363,8 + 226,6)}{100} = 17,6 \text{ руб.}$$

Тогда себестоимость восстановления детали будет равна:

$$C_{\text{в0}} = 274,5 + 40,1 + 113,3 + 319,2 + 324,7 + 202,3 + 14,2 = 1288,3 \text{ руб.}$$

$$C_{\text{в1}} = 307,5 + 44,9 + 126,9 + 133 + 16 + 357,6 + 363,8 + 226,6 + 17,6 = 1593,9 \text{ руб.}$$

Стоимость оборудования для восстановления по базовому способу 2870 тыс.руб., по предлагаемому – 2250 тыс.руб. Программа ремонта 500 деталей в год. Тогда значения удельных капитальных вложений будут равны:

$$K_0 = 1288,3 \text{ руб.}$$

$$K_1 = 166 \text{ руб.}$$

Эксплуатационные наблюдения показали, что средний межремонтный ресурс деталей, отремонтированных по базовой технологии составил 2000 моточасов [16], по новой 6500 моточасов.

Отсюда:

$$\Theta = \left[(1288,3 + 0,15 \cdot 1288,3 \frac{1900 / 2000 + 0,15}{1900 / 6500 + 0,15}) - (1593,9 + 0,15 \cdot 166) \right] \cdot 1500 = 225600 \text{ руб.}$$

Таблица 5.2 Показатели технико-экономические эффективности

| Наименование показателей | Варианты | |
|---|--------------------|---------------|
| | Исходный (базовый) | Проектируемый |
| Затраты на оплату труда, руб./ед. | 274,5 | 307,5 |
| Затраты на доп. оплату труда, руб./ед. | 40,1 | 44,9 |
| Затраты на ремонт и ТО оборуд., руб./ед. | 234,3 | 381,2 |
| Затраты на материалы, руб./ед. | 155,3 | 133 |
| Затраты на транспортно-загот., руб./ед. | 11,4 | 16 |
| Отчисления на социальные нужды, руб./ед. | 113,3 | 126,9 |
| Цеховые расходы, руб./ед. | 319,2 | 357,6 |
| Общезаводские расходы, руб./ед. | 202,3 | 226,6 |
| Внепроизводственные расходы, руб./ед. | 14,2 | 17,6 |
| Уровень эксплуатационных затрат, руб./ед. | 1288,3 | 1593,9 |
| Годовая экономия, руб. | | 225600 |

Как видно из результатов расчета экономическая эффективность внедрения новой технологии составляет 225600 руб. на программу ремонта 500 деталей в год.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Доказано, что с позиции требований простоты и универсальности использования, доступности и приемлемой стоимости расходных материалов, оборудования, а также в соответствии с критерием обеспечения необходимого уровня качества восстановления деталей, существенными преимуществами обладает метод газопламенной наплавки напылением, предложенный в настоящей работе.

Несмотря на присутствие существенного количества научных исследований в сфере восстановления деталей сельхозмашин, основное внимание в них делалось на экспериментальное исследование процессов напыления и проведение качественного, описательного анализа таких процессов. Вопросы разработки простой, сравнительно дешевой и высокоэффективной технологии восстановления деталей, направленной на реальные условия работы сельхозтехники, а также вопросы теории процесса, разработки расчетных моделей, практически не рассматривались. В силу чего, в настоящее время ученым и специалистам-практикам все еще не удалось решить три основные задачи.

- не разработан метод вычисления толщины покрытия, которое получают в процессе напыления;

- не разработан метод вычисления рационального расстояния напыления;

- не разработаны методы оценки надежности покрытия.

2. Осуществлена разработка технологии восстановления деталей сельхозтехники по методу газопламенной наплавки напылением. В сравнении с другими методами газопламенного напыления предлагается введение в технологию процесса оплавления при помощи ТВЧ.

Доказано, что наплавка напылением позволит получить однородные покрытия без трещин, в т.ч. тонкослойные покрытия (0,1...1,0 мм), что особенно значимо для деталей, выпущенных из чугуна.

3. В ходе осуществления экспериментальных исследований были представлены веские доказательства, подтверждающие, что предлагаемая в рамках выпускной квалификационной работы (магистерской диссертации) технология газопламенной наплавки металла методом напыления с применением ТВЧ предоставляет возможность сформировать покрытия с повышенным уровнем производительности наплавки (7,0...10 кг/ч) на обширной номенклатуре деталей для а/м. В сравнении с газопламенным оплавлением производительность повышена в 5...7 раз. Технология позволяет обеспечить получение повышенных физико-механических параметров покрытий: значения прочности сцепления покрытия с основным металлом, твердости покрытия и коэффициента износостойкости (относительно закаленной стали 45) составляют 450-650 МПа; HRC 40-70 и 3-10. А в данном случае наплавка не требует оснащения мастерских и цехов специальным оборудованием и программами.

4. Разработана специальная расчетная методика, позволяющая определить толщину покрытия при использовании газопламенной наплавки. Сформулированные в ходе написания работы уравнение определения толщины слоя, а также ряд существенных сформулированных решений этого уравнения впервые предоставляют возможность установить характер изменения в толщине слоя покрытия при использовании разных режимов напыления или под влиянием разных технологических факторов и параметров.

5. В ходе написания выпускной квалификационной работы было выявлено оптимальное решение задачи уже про расстояние, с которого следует осуществлять напыление приводятся доказательства, подтверждающие тот факт, что оптимальным начальным параметрам скорости частиц напыляемого порошка и оптимальным значением расстояния напыления являются пропорциональными корню квадратному из параметра удельной энергии, требующейся для нагрева частицы от ее начального значения температуры до температуры нагрева поверхности.

Экономический эффект при внедрении работы в рамках восстановления указанной детали, принимая во внимание снижение затрат на эксплуатацию на программу 500 ремонтов в год может составить 225 600 руб. в ценах на 2017 г.