

**ФГБОУ ВПО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи



Козлов Алексей Витальевич

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН
МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ
МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ПОКРЫТИЯ**

Специальность 05.20.03 – Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Орел - 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|----|
| ВВЕДЕНИЕ..... | 5 |
| 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ..... | 10 |
| 1.1 Назначение, анализ работы и характеристика основных причин потери работоспособности гидроцилиндров..... | 10 |
| 1.2 Способы восстановления и упрочнения поверхностей изношенных деталей, выбранных для проведения исследований..... | 15 |
| 1.3 МДО, как способ восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов..... | 19 |
| 1.4 Свойства МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах в анодно-катодном режиме | 23 |
| 1.5 Технологические приёмы повышения долговечности подвижных соединений и деталей машин, упрочнённых МДО..... | 27 |
| 1.6 Выводы, цель и задачи исследования..... | 30 |
| 2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ МДО РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИХ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ НАНОПОРОШКА CuO ДУГОВЫМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗОМ..... | 32 |
| 2.1 Механизм модифицирования МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO | 32 |
| 2.2 Модель тока пробоя при вторичной обработке МДО-покрытия..... | 38 |
| 2.3 Влияние модифицирования частицами нанопорошка CuO МДО- покрытия на коэффициент трения..... | 46 |
| 2.4 Выводы | 51 |
| 3 ПРОГРАММА, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ..... | 52 |
| 3.1 Программа исследований..... | 52 |
| 3.2 Оборудование и материалы для формирования МДО-покрытий и | |

| | |
|--|----|
| модифицирования упрочненного слоя..... | 53 |
| 3.3 Оценка работоспособности электролита для формирования МДО-покрытий | 56 |
| 3.4 Измерение толщины МДО-покрытий..... | 56 |
| 3.5 Определение микротвердости МДО-покрытий..... | 57 |
| 3.6 Определение сквозной пористости МДО-покрытий..... | 58 |
| 3.7 Определение содержания меди на поверхности МДО-покрытий..... | 58 |
| 3.8 Определение коэффициента трения и его молекулярной составляющей в подвижных соединениях с МДО-покрытиями..... | 60 |
| 3.9 Планирование эксперимента по оптимизации режимов модифицирования МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO..... | 64 |
| 3.10 Сравнительная износостойкость подвижных соединений | 68 |
| 3.11 Проведение эксплуатационных испытаний | 72 |
| 3.12 Выводы..... | 73 |
| 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ..... | 74 |
| 4.1 Микродуговое оксидирование алюминиевого сплава АК7ч (первичная обработка) | 74 |
| 4.2 Приготовление раствора-носителя нанопорошка CuO..... | 76 |
| 4.3 Дуговой электрофорез МДО-покрытия (вторичная обработка)..... | 78 |
| 4.4 Работоспособность электролита | 82 |
| 4.5 Определение содержания меди на модифицированной поверхности МДО-покрытий..... | 84 |
| 4.6 Определение коэффициента трения и его молекулярной составляющей в подвижных соединениях с МДО-покрытиями | 85 |
| 4.7 Сравнительные испытания на износостойкость | 88 |
| 4.8 Сравнительные эксплуатационные испытания гидроцилиндров Ц-75.. | 94 |
| 4.9 Выводы | 96 |
| 5 ПРЕДЛАГАЕМАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ С УПРОЧНЕНИЕМ И МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МДО- | |

| | |
|---|-----|
| ПОКРЫТИЯ ЧАСТИЦАМИ НАНОПОРОШКА CuO..... | 98 |
| 5.1 Технологический процесс восстановления с упрочнением поршня гидроцилиндра из алюминиевого сплава АК7ч МДО-покрытием модифицированным частицами нанопорошка CuO..... | 98 |
| 5.2 Экономическая эффективность разработанной комбинированной технологии | 103 |
| 5.2.1 Расчеты по базовой технологии восстановления..... | 104 |
| 5.2.2 Расчеты по новой технологии восстановления..... | 108 |
| 5.3 Выводы и предложения производству..... | 114 |
| ОБЩИЕ ВЫВОДЫ..... | 115 |
| ЛИТЕРАТУРА..... | 117 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ..... | 133 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Постоянная закупка новой техники не решает вопрос технического оснащения аграрного производства России. Огромная роль в решении данного вопроса должна отводиться эффективному использованию имеющегося парка машин и поддержанию его в работоспособном состоянии за счет технического обслуживания и ремонта.

Вследствие изнашивания рабочих поверхностей деталей утрачивают свое работоспособное состояние около 85...90% машин. В связи с этим повышение износостойкости деталей машин является очень важным и актуальным направлением деятельности для предприятий, занимающихся как изготовлением, так и ремонтом сельскохозяйственной техники. Невысокое качество запасных частей и постоянное увеличение их стоимости являются причинами для разработки новых технологий изготовления и восстановления, которые позволяют повысить износостойкость деталей и сборочных единиц сельскохозяйственной техники при ее эксплуатации.

Известно, что при эксплуатации сельскохозяйственной техники около 50% её деталей переходят в неработоспособное состояние при износах, не превышающих 0,1 мм [34, 87, 94]. Значительную долю в этом объёме занимают детали из алюминиевых сплавов, обладающие положительными свойствами и благодаря этому широко применяемые в сельскохозяйственном машиностроении, но имеющие низкую износостойкость и, соответственно, ресурс. Одним из современных и перспективных способов восстановления с одновременным упрочнением деталей из алюминиевых сплавов с таким износом, который лишен многих недостатков присущим другим методам, является микродуговое оксидирование (МДО). Данный способ в последние годы получил широкое распространение. Однако, при взаимодействии деталей без смазочного материала или в режиме граничной смазки, которые возникают в аварийных ситуациях, а также в периоды приработки, начала или окончания работы машины, рабочая поверхность детали, упрочненная

МДО-покрытием, вызывает повышенное изнашивание сопряженной детали типа «вал». В связи с этим снижается износостойкость всего подвижного соединения. Процесс формирования МДО-покрытий предопределяет наличие в упрочненном слое остаточной пористости, которая зависит от режимов оксидирования, состава и температуры электролита. Кроме этого за счет пористости снижается площадь поперечного сечения МДО-покрытия, тогда поры становятся концентраторами напряжений, что приводит к более интенсивному изнашиванию сформированного упрочненного слоя [99, 113].

При формировании МДО-покрытий на алюминиевых сплавах чаще всего используют силикатно-щелочной электролит типа « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ » [71, 83]. В развитие технологии МДО большой вклад внесли следующие ученые: Батищев А.Н., Гордиенко П.С., Малышев В.Н., Марков Г.А., Черненко В.И., Эпельфельд А.В., Новиков А.Н., Кузнецов Ю.А., Суминов И.В., Снежко Л.А., Фёдоров В.А., Коломейченко А.В., а также ряд других учёных. Основные достоинства процесса МДО представлены в работе Коломейченко А.В. ими являются [36]: «получение многофункциональных покрытий заданного состава, структуры и толщины», также к ним можно отнести: возможность нанесения упрочненного слоя одинакового по своим свойствам, как на внешние, так и на внутренние рабочие поверхности деталей; одновременное оксидирование нескольких деталей (при использовании электролитической ванны); доступность компонентов электролита; экологичность процесса, которая выражается в отсутствии необходимости создания очистных сооружений при использовании в процессе МДО силикатно-щелочного электролита; возможность использования различных материалов для придания упрочненному слою, обладающему высокой микротвердостью (до 24 ГПа), антифрикционных свойств (модифицирование покрытия). Применение модифицированных МДО-покрытий на деталях из алюминиевых сплавов, позволит значительно увеличить не только износостойкость восстановленной детали, но и ресурс ответной детали подвижного соединения, а следовательно и долговечность всей сборочной

единицы. Данное обстоятельство может положительно отразиться на развитии ремонтного производства.

С развитием nanoиндустрии появилась возможность использования в отработанных технологиях новых, перспективных материалов, в частности нанопорошков традиционных металлов и сплавов. Одним из таких материалов является нанопорошок оксида меди (CuO). Его довольно часто используют в качестве твердого смазочного материала. Однако, теоретических основ и технологических рекомендаций по его использованию для модифицирования упрочненного слоя образованного МДО на рабочих поверхностях деталей, практически нет. В связи с этим, их разработка должна позволить повысить износостойкость подвижных соединений деталей сельскохозяйственной техники с такими покрытиями.

Цель работы заключается в повышении износостойкости рабочих поверхностей деталей машин восстановлением и упрочнением микродуговым оксидированием за счет внедрения частиц нанопорошка CuO в поры покрытия.

Объект исследования. Технология восстановления и упрочнения МДО рабочих поверхностей изношенных деталей с последующим дуговым электрофорезом частиц нанопорошка CuO.

Предмет исследования. Физико-механические и эксплуатационные свойства упрочняющих покрытий, полученных на деталях из алюминиевого сплава АК7ч, с применением МДО и дугового электрофореза частиц нанопорошка CuO.

Методы исследования. Теоретические исследования выполнены с использованием положений и методов электротехники и электрофизики. Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных и частных методик и современных приборов и оборудования. Обработка результатов исследований проводилась с использованием методов математической статистики.

Научная новизна работы:

1. Разработан новый способ формирования износостойких покрытий на деталях из алюминиевых сплавов, позволяющий снизить коэффициент трения в подвижном соединении между рабочими поверхностями за счет внедрения дуговым электрофорезом частиц нанопорошка CuO в поры упрочненного слоя.

2. Выявлена зависимость электрического тока при дуговом электрофорезе частиц нанопорошка CuO в поры упрочненного слоя от сопротивления раствора-носителя CuO, позволяющая прогнозировать продолжительность дугового электрофореза при модифицировании покрытия по рассчитанному значению силы тока.

Практическая ценность заключается в разработке комбинированной технологии восстановления и упрочнения МДО изношенных рабочих поверхностей деталей машин из алюминиевых сплавов с последующим модифицированием дуговым электрофорезом МДО-покрытия нанопорошком CuO. Технология апробирована на примере восстановления поршня гидроцилиндра серии Ц-75, который устанавливается на сеялки, культиваторы, навески тракторов МТЗ-80/82, ЮМЗ-6М/6Л, а также на другие виды сельскохозяйственной техники.

Апробация работы. Основные результаты проведенных исследований докладывались на:

- международных научно-технических и научно-практических конференциях: Курск, Курская ГСХА им. профессора И.И. Иванова, 2009; Белгород, Белгородская ГСХА, 2010; Севастополь, Донецкий и Севастопольский НТУ, 2010; Орел, ОрелГАУ, 2013;

- Всероссийских научно-практических конференциях и форумах: Орел, ОрелГАУ, 2010, 2012; Уфа, Башкирский ГАУ, 2011;

- Всероссийских конкурсах: Саратов, СГАУ, 2012 (первое место); Москва, НТТМ-2012, 2012 (второе место);

- заседаниях кафедры надежности и ремонта машин ФГБОУ ВПО

ОрелГАУ 2009, 2010, 2011, 2012, 2013;

- результаты работы получили признание выделением гранта «Молодые новаторы аграрной России 2010г» на проведение научных исследований по данной теме на сумму 75000 рублей.

Публикации. На основании проведенных исследований опубликовано 12 печатных работ, в том числе 1 патент на изобретение и 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Научные положения и результаты исследований, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование технологической схемы двухступенчатой обработки (МДО + дуговой электрофорез) алюминиевого сплава;

- теоретическое обоснование изменения силы тока пробоя МДО-покрытия и раствора-носителя нанопорошка CuO при вторичной обработке, и экспериментальное подтверждение влияния продолжительности вторичной обработки на снижение коэффициента трения в подвижном соединении между рабочими поверхностями;

- результаты экспериментальных исследований влияния режимов МДО алюминиевого сплава АК7ч при первичной обработке на последующее внедрение частиц нанопорошка CuO дуговым электрофорезом при вторичной обработке и изменение эксплуатационных свойств: нагрузочной способности и износостойкости подвижных соединений с МДО-покрытиями различной пористости модифицированными частицами нанопорошка CuO;

- разработанная комбинированная технология восстановления с упрочнением МДО и модифицированием частицами нанопорошка CuO, которая обеспечивает повышение износостойкости подвижных соединений деталей сельскохозяйственной техники, и результаты её апробации.

Выполнение работы осуществлялось на кафедре «Надёжность и ремонт машин» ФГБОУ ВПО «Орловский государственный аграрный университет».

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА, ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

1.1 Назначение, анализ работы и характеристика основных причин потери работоспособности гидроцилиндров

Гидравлические силовые цилиндры (в дальнейшем – гидроцилиндры) широко применяются в конструкциях тракторов для подъёма и опускания навесных и полунавесных с.-х. машин, управления поворотом, а также для приведения в действие рабочих органов комбайнов и различных с.-х. машин. Краткая техническая характеристика гидроцилиндров с поршнями из алюминиевых сплавов, широко применяемых на с.-х. технике, приведена в таблице 1.1. При её составлении использованы данные работ [1, 28, 29, 44, 106, 121].

Таблица 1.1 – Краткая техническая характеристика гидроцилиндров с поршнями из алюминиевых сплавов

| Марка гидроцилиндра | Параметры | | масса цилиндра, кг | Применение |
|----------------------------|---------------------------|--------------|--------------------|--|
| | создаваемое давление, МПа | | | |
| | номинальное | максимальное | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Ц-55-220-2 | 14 | 17,5 | 12,7 | тракторы Т-40М/40АМ, |
| Ц-75-110-2 (Ц-75-200-2) | 14 | 17,5 | 13,6 (17,3) | тракторы Т-25А/30А/40, ВТЗ-2048/2032 МТЗ-80/82, ЮМЗ-6М/6Л, ДТ-75М, Т-4А, |

Продолжение таблицы 1.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|------------------------------|----|------|----------------|--|
| Ц-90-200-2 | 14 | 17,5 | 18,6 | тракторы Т-40М/40АМ, |
| Ц-75-110-3 (Ц-75-200-3) | 16 | 20 | 13,6 (17,3) | тракторы Т-25, Т-16 жатка ЖВП-9, сеялка СЗ-3,6 |
| Ц-110-250-2 | 14 | 17,5 | 33,0 | тракторы ДТ-75М, Т-4А |
| Ц-125-250-3 (Ц-125-400-3) | 16 | 20 | 46,9 (53,2) | тракторы МТЗ-100/102, Т- 150/150К ДТ-175С, Т-130М, К-701 |

Анализ литературных данных показал, что ресурсопределяющей деталью гидроцилиндра является резиновое уплотнительное кольцо, установленное в канавке поршня [28, 44, 121]. При наработке порядка 500 км, которую гидроцилиндр получает в среднем за 6...7 лет работы, поршень вместе с уплотнительным кольцом изнашивается до такой степени, что уже не выполняют свои функции. В то же время нередко случаи того, что даже у новых гидроцилиндров уплотнение недостаточно эффективно работает из-за несоответствия материала кольца установленным требованиям или повреждения вследствие некачественной сборки, а также вследствие превышения предельно-допустимой нагрузки на гидроцилиндр при его эксплуатации (Рисунок 1.1). В этих случаях функции уплотнительного кольца берёт на себя рабочая поверхность поршня гидроцилиндра. В качестве материала для изготовления поршней используются, главным образом, литейные алюминиевые сплавы АК7ч и АК8М, в то время как

гильзы изготовлены из закалённых сталей марок 40X и 45 с твёрдостью порядка 50...55 HRC. В связи с этим при их взаимодействии с рабочей поверхностью поршня происходит её интенсивное изнашивание. Кроме этого на износ рабочих поверхностей поршня и гильзы гидроцилиндра влияют посторонние примеси (загрязнители), содержащиеся в рабочей жидкости гидроагрегатов. Твёрдость таких загрязнителей в 3...12 раз больше, чем материалов применяемых для изготовления подвижного соединения «поршень-гильза» гидроагрегатов. После попадания в зазоры между совершающими возвратно-поступательное движение деталями, неотфильтрованные твердые частицы могут вызывать не только повышенный износ, но и могут увеличить силы трения [121].

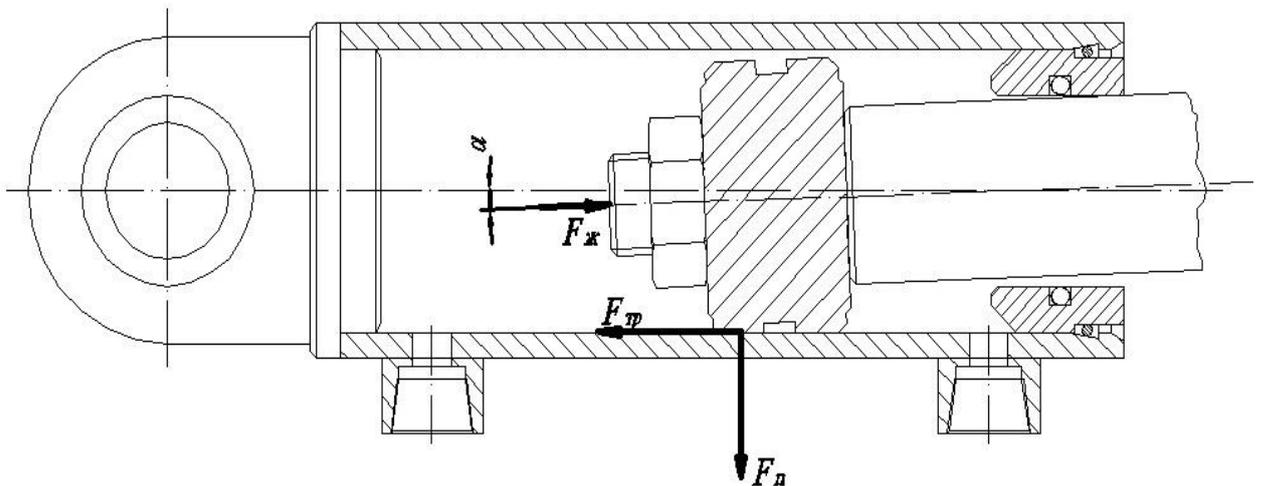


Рисунок 1.1 – Схема работы гидроцилиндра при превышении предельно-допустимой нагрузки

Вследствие выше перечисленных факторов гидроцилиндр после некоторой продолжительности эксплуатации переходит в неработоспособное состояние, так как зазор в сопряжении «поршень – гильза» оказывается достаточным для того, чтобы масло свободно перетекало из одной полости гидроцилиндра в другую, не создавая при этом требуемого давления.

В связи с вышеизложенным, для проведения научных исследований нами был выбран алюминиевый сплав АК7ч, как один из широко используемых для изготовления поршней гидроцилиндров. Основной износ таких деталей приходится на внешние цилиндрические поверхности. В

таблице 1.2 приведен состав вышеуказанного сплава согласно ГОСТ 1583.

Таблица 1.2 – Состав алюминиевого сплава АК7ч, который применяется для изготовления поршней гидроцилиндров

| Марка сплава | Массовая доля, % | | | | | | | | | | | |
|--------------|----------------------|-----------|-----------|----------|------|-------|--------------------|------|-------|-------------------|----------------|--------|
| | основных компонентов | | | | | | примесей, не более | | | | | |
| | алюминия | магния | кремния | марганца | меди | олова | марганца | меди | цинка | титана + циркония | свинца + олова | железа |
| АК7ч | Основа | 0,2...0,4 | 6,0...8,0 | – | – | – | 0,5 | 0,2 | 0,3 | 0,15 | 0,06 | – |

С целью определения износа рабочей поверхности поршня гидроцилиндра, приводящего гидроцилиндр в неработоспособное состояние, в ЗАО ТПК «СтройДорМаш – Орел», которое занимается изготовлением и ремонтом гидроцилиндров, были проведены измерения изношенных рабочих поверхностей поршней. Выборка составляла 50 штук.

Полученные статистические данные обрабатывали с использованием ПК. Результаты представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Результаты измерений и расчетов в виде статистических показателей

| Наименование изношенной поверхности и детали | Теоретический закон распределения (ТЗР) износов | Параметры ТЗР | | | | | |
|--|---|--|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------|
| | | среднеквадратическое отклонение (σ) | коэффициент вариации (V) | Износ на диаметр | | | отклонение, % |
| | | | | минимальный (I_{\min}), мм | средний ($I_{\text{ср}}$), мм | максимальный (I_{\max}), мм | |
| Рабочая поверхность поршня гидроцилиндра | ЗРВ | 0,016 | 0,53 | 0,055 | 0,08 | 0,12 | 16,56 |

Анализ 50 неработоспособных силовых гидроцилиндров, имеющих наработку порядка 500...700 км, проведенный в ЗАО ТПК «СтройДорМаш – Орел», позволил установить, что износы по диаметру рабочих поверхностей поршней находятся в интервале 0,055...0,12 мм. Силовой цилиндр при таких износах полностью утрачивает работоспособное состояние, так как зазор в подвижном соединении увеличивается настолько, что абразивные частицы, находящиеся в гидравлическом масле не вызывают дальнейшего изнашивания рабочей поверхности поршня. Проведенный анализ показал, что около 90% деталей, рабочие поверхности которых подвергались дефектации, необходимо восстанавливать (Приложение А) [119, 120]. Износ рабочей поверхности гильзы цилиндра значительно меньше и колеблется в интервале 20...60 мкм на диаметр. Фотография изношенной детали наглядно характеризует ее техническое состояние (Рисунок 1.2).

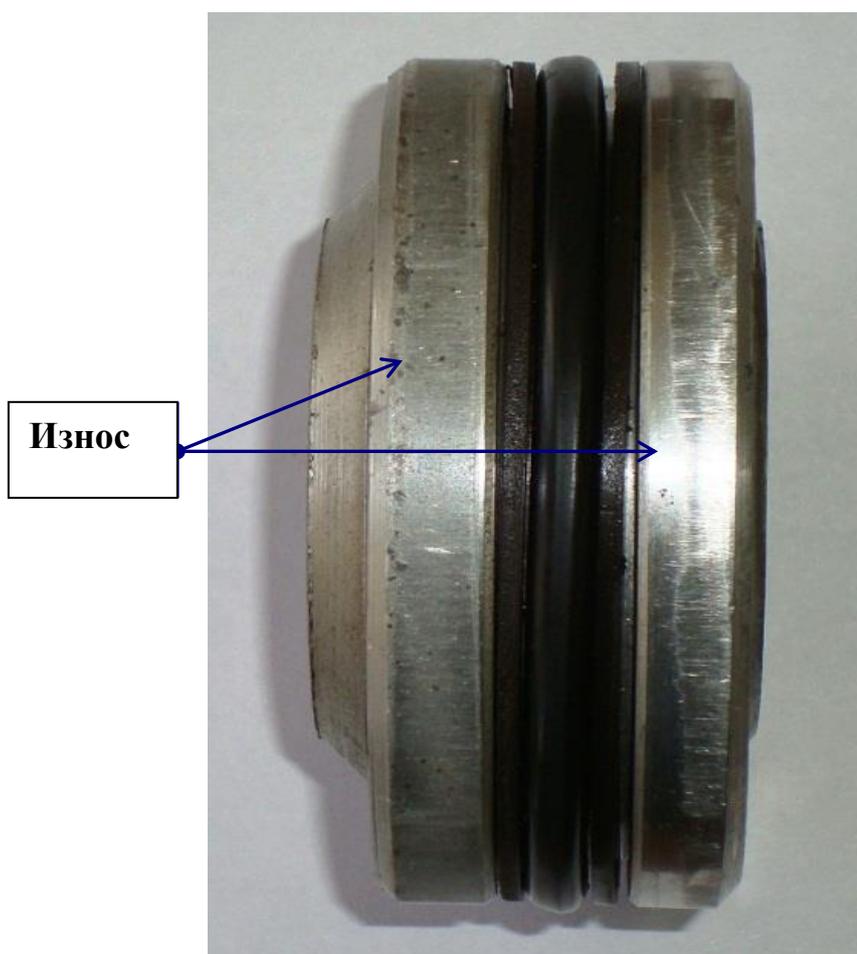


Рисунок 1.2 – Изношенный поршень гидроцилиндра Ц-75

1.2 Способы восстановления и упрочнения поверхностей изношенных деталей, выбранных для проведения исследований

Восстановление и упрочнение выбранных для проведения исследований деталей с выявленным износом близким к 0,1 мм в ремонтном производстве проводят следующими методами: ремонтные размеры, постанковка дополнительной ремонтной детали (ДРД), пластическое деформирование, полимерные материалы, гальванические покрытия, методы напыления, МДО. Существенный вклад в развитие технологий восстановления рабочих поверхностей деталей внесли следующие ученые: Батищев А.Н., Бурумкулов Ф.Х., Васильев В.В., Голубев И.Г., Катц Н.В., Коломейченко А.В., Кузнецов Ю.А., Курчаткин В.В., Лялякин В.П., Марков Г.А., Патон Б.Е., Пучин Е.А., Черноиванов В.И., Юдин В.М., Фархшатов М.Н. и многие другие ученые. В представленных выше способах на ряду с положительными характеристиками имеют место и недостатки, существенно ограничивающие возможность их применения для восстановления и упрочнения поршней гидроцилиндров из алюминиевых сплавов.

Ремонтные размеры и постанковка ДРД. Данные способы достаточно широко распространены. Однако, необходимость изготовления деталей ремонтного размера, а также нецелесообразность применения способа ДРД при малом износе усложняют взаимозаменяемость и организацию производства, и требуют больших складских помещений.

Пластическое деформирование. Для данного способа восстановления деталей характерно использование пластических свойств и запаса прочности материала детали. Недостатком данного способа является разупрочнение материала в следствии механического сдавливания и сдвига кристаллов металла, что приводит к увеличению внутренних напряжений. Это приводит к разрушению детали при её эксплуатации [56, 57]. Кроме этого твердость алюминиевых сплавов, в отличии от сталей, не велика. Поэтому использовать данный метод для ремонта таких деталей нецелесообразно.

Полимерные материалы. По данным ГНУ ГОСНИТИ Россельхозакадемии в ходе ремонта машин с использованием полимерных материалов, в сравнении с другими способами, снижается на 20...30% - трудоемкость восстановления деталей, на 15...20% - себестоимость ремонта и на 40...50% - расход материалов [57, 69]. В тоже время, в ряде случаев существующие способы нанесения полимерных материалов связаны с проблемами адгезии полимерного покрытия с металлом, потерями при нанесении, необходимостью разработки и применения сложного дорогостоящего оборудования (при их нанесении под давлением). Кроме этого, триботехнический контакт металлической поверхности с полимером зарождает в ней водородное охрупчивание и последующее форсированное разрушение, что приводит к обнажению материала металлической основы [36, 59]. Все это ограничивает область применения полимерных материалов для восстановления поршней гидроцилиндров.

Гальванопокрытия. Покрытия, полученные электролитическим путем, получили широкое распространение, в том числе их используют для восстановления рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов. Сплавы цинка с железом или никелем являются наиболее перспективными покрытиями. Физико-механические свойства сплава цинка с железом близки к свойствам алюминиевых сплавов. Однако, в ряде случаев, при эксплуатации в тяжелых условиях (высокие циклические нагрузки, температура и т.д.) необходимо использование более износостойкого покрытия. В таких случаях используют сплавы цинк-никель [57, 69, 70].

Однако гальванопокрытия, далеко не всегда могут соответствовать требованиям, предъявляемым современным износостойким покрытиям и материалам. Довольно часто данные покрытия характеризуются невысокой их прочностью сцепления с металлической основой или невысокими прочностными характеристиками самого покрытия. Многооперационность, дорогостоящее оборудование, вредность производства и потребность в

специальных очистных сооружениях для отработанных электролитов существенно ограничивают область их применения.

Методы напыления. В последнее время они достаточно широко применяются в ремонтном производстве. Покрытия, полученные данными способами, характеризуются низкой пористостью и достаточно высокой прочностью сцепления с металлической основой. К основным недостаткам данных методов можно отнести: дороговизну применяемого оборудования, большой расход материалов используемых для напыления, в ряде случаев большой производственный шум и громоздкость оборудования, а также газовая струя может оказать высокое термическое воздействие на поверхность детали.

В настоящее время наукой созданы новые технологические способы поверхностного упрочнения деталей машин. Их основная задача заключается в создании поверхностных слоев с высокими физико-механическими свойствами, прочностью сцепления с металлической основой, а также износо- и коррозионной стойкостью. Данные характеристики являются важнейшими для обеспечения долговечности техники при её эксплуатации. Создание поверхностных упрочненных слоев дает необходимый барьер для защиты рабочих поверхностей деталей с.-х. техники от воздействия агрессивных сред, абразивных частиц и механических нагрузок [36, 41].

В тоже время, среди способов упрочнения рабочих поверхностей деталей с.-х. техники из алюминиевых сплавов эффективных не так много. Такими способами упрочнения являются пластическое деформирование, электроосаждение покрытий и методы напыления описанные выше. Однако, вместе с положительными характеристиками они имеют и существенные недостатки, Коломейченко А.В. в своей работе приводит следующие недостатки [36]: «невозможность обработки небольших посадочных отверстий, токсичность, низкая прочность сцепления покрытий с металлом, склонность к усталостному выкрашиванию, невысокая износо- и коррозионная стойкость, вопросы экологической безопасности».

Установленные недостатки, возникающие в перечисленных методах восстановления и упрочнения изношенных деталей, выбранных для проведения исследований, а также влияние агрессивности технологических сред и постоянно ужесточающиеся условия эксплуатации деталей с.-х. техники не всегда могут ей обеспечить требуемую долговечность.

Постоянно растущим требованиям, которые на сегодняшний день предъявляются к свойствам упрочняющих покрытий, могут удовлетворить керамические покрытия, которые обладают высокими служебными свойствами, такими как стойкость к окислению, термоударам и вибрациям [4, 8, 17, 31, 72, 104]. Одним из видов данных покрытий является **металло-кварцевые композитные материалы**. В работе [107] рассматривается разработка данных материалов для гидроцилиндров высокого давления. В данной работе говорится о высокой прочности и износостойкости таких покрытий. Однако, способ нанесения метало-кварцевого композитного материала предусматривает термообработку при температуре 1200...1250°C, что неприемлемо для деталей, изготовленных из алюминиевых сплавов.

Наряду с технологиями напыления и рядом других способов нанесения оксидокерамических покрытий [24, 51, 124-126], весьма активно разрабатываются и совершенствуются электролизные процессы формирования упрочненных слоев в электролитах под высоким напряжением. Получаемые упрочненные слои состоят из оксида алюминия Al_2O_3 и композиций на его основе [7, 38, 108]. Наиболее перспективным способом получения оксидокерамических покрытий является МДО. Данный способ, в значительной мере лишенный многих недостатков и получающий в последнее время все более широкое распространение, позволяет устранить износ до 0,1 мм, а также значительно повысить стойкость к изнашиванию и коррозии рабочих поверхностей деталей [27, 36, 67, 74, 98, 101, 104, 133].

1.3 МДО, как способ восстановления и упрочнения рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов

Технология МДО достаточно хорошо отработана для таких металлов и их сплавов как – алюминий, титан, магний, тантал и другие. Они входят в группу вентильных металлов. Вентильными их называют потому, что оксидокерамические покрытия, которые формируются на их поверхности электрохимическим путём, имеют униполярную или асимметричную проводимость в системе «металл – оксид – электролит». В этом случае за счет образования анодной оксидной плёнки на металле формируется положительный потенциал, который соответствует запирающему или обратному направлению. Поэтому система действует как полупроводниковый вентиль. Метод МДО лишен многих недостатков, которые имеются у других технологий поверхностного упрочнения. Основными преимуществами технологии МДО являются: создание многофункциональных покрытий требуемой толщины, состава и структуры; регулирование скорости процесса формирования покрытия; доступность компонентов электролита; процесс считается экологичным, за счет отсутствия токсичных компонентов при использовании силикатно-щелочных электролитов [14, 33, 36, 38, 52]. Количество работ по изучению свойств упрочненных слоев формируемых МДО и их применению в различных отраслях за последнее десятилетие значительно возросло [9, 45, 54, 75, 95, 127, 132]. Это свидетельствует о том, что они обладают уникальным комплексом свойств.

Сущность МДО заключается в том, что под действием высокого напряжения, которое прикладывается между деталью, находящейся в электролите и металлическим катодом (которым может выступать корпус электролитической ванны) на поверхности детали возникают микродуговые разряды (МДР). Они в свою очередь своим термическим, плазмохимическим и гидродинамическим воздействием преобразуют поверхностный слой

детали из алюминиевого сплава в прочно сцепленное оксидокерамическое покрытие [31, 67].

Отличительная особенность этого процесса – участие в формировании упрочненного слоя поверхностных МДР, которые оказывают достаточно существенное и специфическое воздействие на структуру и фазовый состав МДО-покрытия. В результате получаемые упрочненные слои по своим свойствам существенно отличаются от свойств покрытий полученных традиционным анодированием. Одной из отличительных особенностей технологии МДО является то, что образуемый с ее помощью оксидокерамический слой развивается в обе стороны упрочняемой поверхности детали относительно ее действительного размера [105]. Таким образом, для МДО характерны черты двух различных групп методов формирования:

- 1) формирование покрытия на поверхности детали, т.е. процесс упрочнения с приращением толщины;
- 2) изменение поверхности детали, т.е. ее структуры и свойств - процесс упрочнения без приращения толщины.

В работах [6, 45, 53, 54, 91], по развитию и внедрению МДО в ремонтное производство, наибольшее распространение получило первое направление. Его использование позволяет компенсировать износ рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов до 0,1 мм и одновременно упрочнять восстанавливаемую поверхность. Среди технологических схем, используемых для формирования МДО-покрытий, наибольшее распространение получило анодно-катодное (АК) МДО [62-64, 73, 98, 104, 115, 116, 130]. Во время АК МДО на поверхности обрабатываемой детали попеременно возникают то анодные, то катодные МДР. Мощность катодных МДР больше чем анодных. Это связано с большей, почти на 1000°С, температурой горения катодных МДР по сравнению с анодными МДР. В итоге, катодные МДР повышают температуру формирующегося МДО-

покрытия. Таким образом, они способствуют более легкому зажиганию анодных МДР и поддерживают их горение. Таким образом, МДО-покрытия, сформированные АК методом, по эксплуатационным характеристикам значительно превосходят аналогичные упрочненные слои, сформированные анодным или катодным МДО [101, 104, 109, 122, 123].

Для формирования МДО-покрытий существуют различные виды источников электрического питания. Больше остальных распространены источники, которые в процессе МДО образуют необходимые электрические параметры с применением токов промышленной частоты [8, 64, 85, 102, 103, 122, 129]. У импульсных высокочастотных источников питания энергозатраты ниже, чем у источников работающих на токах промышленной частоты. Однако, их использование менее предпочтительно так как они более сложны в изготовлении и дорого стоят.

Наиболее часто в ремонтном производстве применяется двухкомпонентный силикатно-щелочной электролит типа « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ ». Это связано с его дешевизной и экологичностью, а также способностью формировать на алюминиевых сплавах МДО-покрытия с высокой микротвёрдостью и химической инертностью [8, 52, 72, 85, 104, 108, 114, 123]. Перед МДО приготовленный электролит необходимо прорабатывать, то есть в течение определенного времени провести образование в нём МДО-покрытия на образце, при этом площадь поверхности образца должна быть сравнима с площадью оксидируемой детали. Проработка электролита способствует перемешиванию компонентов и увеличивает его долговечность. Электролиты типа « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ » имеют значение pH близкое к 10. Поэтому для утилизации такого электролита достаточно разбавить его некоторым количеством воды. Этого достаточно, для того чтобы он удовлетворял требованиям санитарных норм ($\text{pH} \leq 6,5 \dots 8,5$). После разбавления электролита водой его можно сбрасывать в канализационный сток без дополнительной очистки.

В МДО-покрытии различают три слоя кристаллического строения: упрочнённый, переходный и поверхностный [57, 64, 73]. Поверхностный слой – рыхлый и имеет низкую износостойкость. Он состоит из оксида кремния, алюмосиликатов и муллита. Его удаляют при финишной механической обработке упрочненной детали. Это обязательно необходимо осуществлять, так как при эксплуатации он будет разрушаться, и служить в роли абразива. Упрочнённый слой имеет структуру в виде ячеек, он включает в себя кристаллы с микротвёрдостью 18...24 ГПа, которые расположены в аморфоподобной связке (её микротвёрдость достигает 8 ГПа). Этот слой состоит из α - и γ -оксидов алюминия (Al_2O_3). Он характеризуется высокими показателями плотности, твёрдости и износостойкости. Относительно действительных размеров деталей до МДО данный слой делится на внешний и внутренний. Переходный слой, толщина которого составляет 3...5 мкм, в свою очередь располагается между металлом основы (детали) и упрочнённым слоем МДО-покрытия. В состав переходного слоя входит незначительное количество α - и γ - Al_2O_3 и ортоклаз.

В настоящее время наиболее широко распространен ванный способ формирования МДО-покрытий. Он имеет несколько недостатков, которые связаны с поддержанием необходимой температуры электролита и его рациональным использованием, а также защитой поверхностей детали неподлежащих оксидированию. Проточное МДО частично или полностью устраняет эти недостатки, поэтому оно является более перспективным [14, 32, 38, 79, 91]. Сущность проточного МДО заключается в том, что упрочняемые поверхности детали находятся в электролите, который прокачивается щелочестойким насосом. Тем самым, этот способ МДО получает следующее преимущество: постоянное перемешивание электролита, за счет этого область горения МДР пополняется его новыми незадействованными порциями. Это приводит к улучшению физико-механических свойств МДО-покрытий; возрастает работоспособность

электролита и увеличивается время интервалов между его заменами; условия получения МДО-покрытий становятся более стабильными.

При проточном способе оксидирования деталей большой площади электролит сильно нагревается. В результате этого он интенсивно испаряется. Высокая температура вызывает оплавление изоляции токоведущих проводов и подвески. Горячий электролит частично растворяет создаваемое МДО-покрытие, это уменьшает его толщину и способствует образованию дополнительной остаточной пористости [38, 76, 77]. Чтобы избежать таких негативных явлений, необходимо охлаждать электролит. Для его охлаждения в контур проточной циркуляции встраивают охладитель, при этом охлаждающий реагент (например, холодная водопроводная вода или фреон) забирает часть теплоты электролита [34, 36]. В связи с этим МДО-покрытия получают с оптимальной толщиной и физико-механическим свойствам.

Во время процесса МДО в электролитической ванне, целесообразно осуществлять воздушное барботирование (орошение пузырьками воздуха) электролита и оксидируемой поверхности детали. Это выравнивает температуру электролита, и способствует его перемешиванию и подаче свежих порций в зону горения МДР [36, 73, 81, 82, 84].

Таким образом, МДО является наиболее предпочтительным способом восстановления с упрочнением деталей из алюминиевых сплавов, который в последнее время получил достаточно широкое распространение [69, 70, 72, 73, 75, 89-94].

1.4 Свойства МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах в анодно-катодном режиме

Толщина МДО-покрытий, зависит главным образом, от их функционального назначения и может варьироваться в достаточно широком

интервале. По мнению ряда ученых, наиболее предпочтительной в технологическом отношении является толщина более 100 мкм, которая позволяет обеспечить длительную работу подвижного соединения даже в условиях абразивного изнашивания [38, 61, 87, 116]. В целом МДО-покрытия, которые формируются на литейных алюминиевых сплавах с применением рациональных режимов, обладают немного меньшей толщиной и микротвердостью, чем на деформируемых. Это связано с высоким содержанием кремния в их составе, за счет него формируемые МДО-покрытия имеют значительно больший рыхлый слой, который в последствии необходимо удалять финишной механической обработкой [3, 67, 73].

МДО-покрытия имеют очень высокую прочность сцепления с алюминиевым сплавом, которая сопоставима с пределом прочности упрочняемого металла. Это происходит из-за того, что упрочненный слой формируется за счёт действия МДР на поверхностный слой оксидируемого алюминиевого сплава, в результате поверхность материала основы перерабатывается [100, 101, 116]. Кроме этого, высокие показатели прочности сцепления обусловлены механическим сцеплением так называемого «анкерного типа». Оно образуется за счет частичного оплавления оксидируемого алюминиевого сплава в зоне контакта с МДР контакта и его перемешивания с упрочненным слоем, а также за счет сил химической связи, возникающей в результате такого воздействия [57, 72]. В зависимости от состава и содержания компонентов в электролите прочность сцепления МДО-покрытия с алюминиевым сплавом может достигать значений 350...380 МПа [57, 72].

Фазовый состав МДО-покрытий, образованных на различных алюминиевых сплавах, может отличаться как качественно, так и количественно. Упрочненный слой состоит из фаз α – Al_2O_3 , γ – Al_2O_3 и муллита $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$. Например, такое покрытие, сформированное на литейном алюминиевом сплаве АК7ч, имеет в своей основе фазы γ – Al_2O_3 и

муллита ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$) [18, 55, 58, 71, 112]. Фаза $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ обладает твёрдостью порядка 14,3 ГПа, а муллит – около 10 ГПа. На процентное содержание фаз в упрочнённом слое достаточно существенное влияние могут оказывать режимы МДО и вид электролита. Одним из примеров служит увеличение содержания Na_2SiO_3 в электролите или количества кремния в оксидируемом алюминиевом сплаве, это приводит к возрастанию доли фазы муллита $3\text{Al}_2\text{O}_3 \times 2\text{SiO}_2$ в упрочненном слое, как правило, в его поверхностных слоях. Это происходит в связи с уменьшением содержания фаз $\alpha -$ и $\gamma - \text{Al}_2\text{O}_3$ [72, 73, 112].

Известно, что если в составе электролита присутствуют силикаты, то полученный из них в разряде оксид кремния при нагреве с Al_2O_3 может образовывать тугоплавкие и термически стойкие вещества – алюмосиликаты. Наиболее часто образующиеся при МДО алюминиевого сплава в силикатно-щелочном электролите алюмосиликаты – это ортоклаз $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$, альбит $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$ и нефелин $\text{Na}(\text{AlSiO}_4)$ [105]. Максимальная микротвёрдость МДО-покрытий формируемых в электролитах типа « $\text{KOH}-\text{Na}_2\text{SiO}_3$ », располагается в средней зоне упрочненного слоя. Например, на литейном алюминиевом сплаве АК7ч микротвёрдость поверхности упрочненного слоя может составить 3,5...4 ГПа. Она постепенно увеличивается в ходе приближения к металлической основе и достигает максимальных значений (около 9-10 ГПа) на расстоянии 25...40 мкм от границы раздела «алюминиевый сплав - МДО-покрытие». После этого микротвердость упрочненного слоя существенно снижается [36, 71].

Среди различных свойств МДО-покрытий немаловажным значением обладает их пористость, ее образование происходит во время горения МДР. Она делится на сквозную и замкнутую (тупиковую часть открытой пористости). При этом, замкнутая пористость образуется в результате частичного заполнения существующих сквозных пор при горении МДР [36, 105].

Пористость МДО-покрытий зависит от плотности тока, а также состава и температуры электролита [10, 27, 36, 40, 74, 87, 105]. Наибольшая пористость характерна для поверхностного слоя МДО-покрытий (для литейных сплавов – 15...40%), упрочнённый слой обладает относительно постоянной пористостью, для литейных алюминиевых сплавов – 10...15%, а переходный слой – не более 5%. Минимальная пористость упрочнённого слоя МДО-покрытия соответствует значениям температуры электролита – 10...20°C. При увеличении температуры электролита до 50...60°C пористость существенно возрастает. Это происходит за счёт действия электролита, как указывалось ранее, при высоких температурах он частично растворяет слабые места в МДО-покрытии, такими местами и являются замкнутые поры [36, 76, 77, 105].

Известно, что размеры пор колеблются от 2 до 15 мкм, при этом основное количество пор (около 90%) в упрочнённом слое имеет размер, не превышающий 6 мкм. В ходе приближения к переходному слою пористость МДО-покрытия уменьшается [36, 114, 120].

Стойкость МДО-покрытий к изнашиванию, с учетом использования рациональных режимов оксидирования, очень высока и может сравниться с износостойкостью диффузионных боридных покрытий [31, 61, 62, 99, 122]. Это дает возможность использовать МДО-покрытия в определённом интервале нагрузок, скоростей и смазочных сред в паре трения с различными материалами. Необходимо отметить, что финишная механическая обработка МДО-покрытия, резко снижает изнашивание, как упрочненной детали, так и ответной детали подвижного соединения. Это происходит за счет существенного снижения шероховатости при удалении поверхностного слоя МДО-покрытия.

Однако, несмотря на высокие показатели прочности сцепления, микротвёрдости и износостойкости в условиях граничной смазки или взаимодействия без смазочного материала, МДО-покрытия сформированные

на рабочих поверхностях деталей из алюминиевых сплавов обладают высокими фрикционными свойствами [9, 21, 22, 131]. Что в свою очередь способствует повышенному изнашиванию (до 30%) ответной, зачастую дорогостоящей, детали типа «вал» при их взаимодействии в подвижном соединении [53, 100, 111]. Чтобы устранить указанный недостаток целесообразно использовать технологические приёмы, позволяющие его минимизировать.

1.5 Технологические приёмы повышения долговечности подвижных соединений и деталей машин, упрочненных МДО

Известно несколько способов улучшения антифрикционных свойств МДО-покрытий, в условиях приработки и эксплуатации подвижных соединений [36]:

- 1) введение антифрикционных присадок в смазочный материал, которые обладают низким сопротивлением сдвигу;
- 2) создание на поверхности МДО-покрытия слоя из антифрикционного материала, действие которого снизит коэффициент трения при взаимодействии деталей подвижного соединения;
- 3) повышение маслоёмкости МДО-покрытия, которое достигается за счёт увеличения количества пор или их искусственного наполнения смазочными материалами;
- 4) создание МДО-покрытий в электролитах, в состав которых введены антифрикционные материалы, которые при окислении входят в состав упрочненного слоя.

В работах [23, 36, 54, 60, 86, 105] достаточно широко рассмотрены указанные выше способы повышения антифрикционных свойств МДО-покрытий. Однако, у них также имеются недостатки ограничивающие область их применения. Например, при использовании первого способа: дисперсные частицы металлов могут со временем оседать в поддонах картеров, корпусах редукторов, масляных баках и т.д. Они могут задерживаться в фильтрующих элементах гидросистем. Второй способ

представлен фрикционно-механическим нанесением антифрикционного медного слоя на поверхность МДО-покрытия, который неприменим для деталей сложной конфигурации. Общим недостатком третьего способа служит отсутствие данных об изменении нагрузочной способности МДО-покрытий после их наполнения смазочными материалами. Также неизвестно какие должны быть значения оптимальной пористости упрочненного слоя, чтобы наполнять его маслом. Для реализации четвертого направления учёные, которые работают в области применения технологии МДО, разработали несколько электролитов, позволяющих при оксидировании включать в состав МДО-покрытия те или иные дополнительные компоненты, способные повысить антифрикционные свойства упрочнённого слоя [36, 43, 119].

Ультрадисперсные порошки при включении их в состав МДО-покрытий, могут повысить антифрикционные свойства и износостойкость не только упрочненного слоя на детали из алюминиевого сплава, но и ответной детали типа «вал» в подвижном соединении. Известны электролиты, с добавлением ультрадисперсных порошков оксида меди, оксида алюминия и/или циркония и др. [78, 80]. При МДО дополнительные компоненты, находящиеся в электролите транспортируются к поверхности оксидируемого алюминиевого сплава и, попадая в зону горения искрового разряда (ИР), включаются в состав МДО-покрытия. Это явление называется дуговой электрофорез. Главным недостатком таких электролитов является отсутствие или недостаточность разъяснений механизма включения дополнительных компонентов в упрочненный слой и их последующее влияние на улучшение его антифрикционных свойств. Необходимо отметить, что используемый ультрадисперсный порошок добавляется прямо в электролит. Это негативно сказывается на экономической составляющей данного метода, с точки зрения большого расхода достаточно дорогостоящего порошка, а также может негативно сказаться на экологической составляющей способа МДО.

В связи с вышеизложенным, для придания антифрикционных свойств подвижному соединению деталей машин, предоставляется целесообразным разработать новый способ включения частиц нанопорошка CuO в состав МДО-покрытия. Реализацией идеи может служить частичное изменение самого способа дугового электрофореза, а именно включение частиц нанопорошка CuO в МДО-покрытие после его полного формирования. Данный способ предусматривает полное формирование МДО-покрытия на алюминиевом сплаве (первичная обработка). Затем удаление рыхлого, технологического слоя МДО-покрытия. Нанесение и закрепление частиц нанопорошка CuO на поверхность МДО-покрытия. Далее, для расплавления и закрепления меди в порах упрочненного слоя проводится дуговой электрофорез (вторичная обработка). Исследование свойств покрытий, полученных комбинированным способом МДО и дугового электрофореза, с применением нанопорошков CuO другими учеными не проводилось. В связи с этим представляется целесообразным подобрать рациональные состав электролита и режимы МДО, позволяющие получать на восстановленной рабочей поверхности детали из алюминиевого сплава оптимальные микротвердость, толщину и пористость упрочненного слоя для последующего внедрения дуговым электрофорезом в поры МДО-покрытия частиц нанопорошка CuO для повышения износостойкости подвижных соединений деталей машин имеющих покрытия данного типа.

Таким образом, для снижения коэффициента трения и повышения износостойкости в подвижных соединениях деталей машин, содержащих МДО-покрытия данного типа можно использовать антифрикционные материалы, которые при внедрении в поры МДО-покрытия должны обеспечить решение этой задачи.

1.6 Выводы, цель и задачи исследования

На основании анализа научной литературы были сделаны следующие выводы:

1) рабочие поверхности деталей из алюминиевых сплавов, таких как поршни гидроцилиндров, имеют максимальный износ от 55 до 120 мкм на диаметр. Около 90% продефектованных наружных цилиндрических рабочих поверхностей поршней подлежат восстановлению;

2) существующие способы восстановления и упрочнения изношенных рабочих поверхностей таких деталей не всегда обеспечивают их требуемую износостойкость. Наиболее перспективным способом восстановления с одновременным упрочнением таких деталей является МДО с использованием силикатно-щелочного электролита;

3) МДО-покрытия характеризуются высокими служебными свойствами (твёрдость, износостойкость и прочностью сцепления с алюминиевым сплавом). Однако, при граничной смазке подвижного соединения или взаимодействия деталей без смазочного материала проявляются их повышенные фрикционные свойства. Это приводит к повышенному изнашиванию ответной детали типа «вал» при их взаимодействии в подвижном соединении;

4) механизм формирования МДО-покрытий предопределяет наличие у них сквозной и замкнутой пористости, зависящей от режимов оксидирования, содержания компонентов в электролите и его температуры;

5) снизить фрикционные свойства МДО-покрытий возможно за счёт модифицирования поверхностного упрочненного слоя дуговым электрофорезом с применением нанопорошков CuO , путем внедрения их частиц в поры МДО-покрытия. Однако в открытых источниках научной литературы практически отсутствуют технологические рекомендации по данному вопросу.

Таким образом, целью настоящей работы является повышение

износостойкости рабочих поверхностей деталей машин восстановлением и упрочнением микродуговым оксидированием за счет внедрения частиц нанопорошка CuO в поры покрытия.

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи исследований:

1. Выявить оптимальные микротвердость, толщину и пористость МДО-покрытия для последующего внедрения дуговым электрофорезом частиц нанопорошка CuO в поры упрочненного слоя, сформированного на литейном алюминиевом сплаве АК7ч.

2. По расчетному значению силы тока теоретически определить и экспериментально подтвердить продолжительность вторичной обработки МДО-покрытия.

3. Определить оптимальное содержание компонентов в растворе-носителе нанопорошка CuO и электролите для дугового электрофореза.

4. Определить факторы оказывающие влияние, на снижение коэффициента трения в подвижном соединении, включающем МДО-покрытие модифицированное частицами нанопорошка CuO, формируемое на алюминиевом сплаве АК7ч. Оценить износостойкость подвижных соединений «МДО-покрытие – сталь» с использованием нанопорошка CuO и без него.

5. Разработать и экономически обосновать комбинированную технологию, включающую в себя восстановление и упрочнение МДО рабочих поверхностей изношенных деталей и их последующее модифицирование частицами нанопорошка CuO дуговым электрофорезом, которая позволит повысить износостойкость подвижных соединений деталей сельскохозяйственной техники.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ КОМБИНИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И УПРОЧНЕНИЯ МДО РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗНОШЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ И ИХ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ЧАСТИЦАМИ НАНОПОРОШКА CuO ДУГОВЫМ ЭЛЕКТРОФОРЕЗОМ

2.1 Механизм модифицирования МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO

Постоянно повышающиеся требования сельхозтоваропроизводителей к сельскохозяйственной технике способствуют поиску и разработке новых более совершенных способов борьбы с её изнашиванием. Упрочняющие покрытия на основе оксида алюминия Al_2O_3 значительно повышают износостойкость рабочих поверхностей деталей из алюминиевых сплавов, поэтому применение таких покрытий наиболее целесообразно. Данные покрытия отличаются высокой стойкостью к изнашиванию и окислению. Как было отмечено в первой главе, одним из перспективных и стремительно развивающихся способов поверхностного упрочнения оксидокерамическими покрытиями изделий сельскохозяйственного машиностроения из алюминиевых сплавов является МДО.

Известно, что в процессе МДО на поверхности обрабатываемой детали возникают мигрирующие точечные МДР. В источнике [105] дается следующее определение искрового разряда и процесса его образования: «искровой разряд (ИР) – это неустановившийся электрический разряд в газе, возникающий и протекающий нестационарно (обычно при давлениях близких к атмосферному и выше) в том случае, когда непосредственно после пробоя разрядного промежутка напряжение на нем падает в течение очень короткого отрезка времени (до 100 мкс) ниже величины напряжения гашения МДР». Таким образом МДР, то есть самостоятельный газовый разряд, формируется в порах оксидной пленки на поверхности вентильного металла.

Наиболее важными моментами в образовании МДР при МДО являются процессы возникновения парогазовых пузырьков (ППП) и зажигания в них микроарядов. Начальная ионизация промежутка происходит при контактно-разрывном процессе в ходе возникновения и расширения ППП в поре МДО-покрытия. Для МДР характерно многократное увеличение длины газоразрядного промежутка за счет парогазовыделения, удлинения порового канала при росте толщины МДО-покрытия, а главное, резкого увеличения объема ППП при зажигании микроаряда из-за роста температуры в нем.

В результате теплового воздействия МДР окисная пленка локально нагревается до температуры выше 2000°С [121], что приводит к оплавлению стенок поровых разрядных каналов и появлению в МДО-покрытии кристаллических модификаций оксидов алюминия, в том числе и высокотемпературных, за счет дегидратации оксогидроксидов и полиморфных превращений.

Химический состав оксидируемого алюминиевого сплава оказывает влияние на многие параметры процесса: время зажигания МДР, состав и свойства получаемых МДО-покрытий, но прежде всего на саму возможность инициирования и поддержания продуктивного процесса МДО. Химический состав алюминиевых сплавов также определяет выбор состава электролита и режимов их оксидирования. Так, наличие в сплаве меди дает возможность уменьшить количество Na_2SiO_3 в силикатно-щелочном электролите, а сплавы, содержащие кремний, хорошо оксидируются в чисто силикатном электролите, но требуют более высоких плотностей тока при МДО [105].

Электролит типа « $\text{KOH-Na}_2\text{SiO}_3$ » наиболее часто используется для МДО. Гидролиз протекает по следующей схеме:



Далее, претерпевая термическую дегидратацию, кремниевая кислота H_2SiO_3 дает диоксид кремния SiO_2 в виде α -кristобалита и/или α -кварца, что и наблюдается при МДО в растворах, содержащих силикаты натрия (натриевое жидкое стекло). При МДО алюминиевого сплава в силикатно-

щелочном электролите происходит образование силлиманита:



Если в состав электролита входят силикаты, то образующийся из них, под действием МДР, оксид кремния при нагреве с Al_2O_3 и оксидами других металлов может образовывать алюмосиликаты. Алюмосиликаты это тугоплавкие и термически стойкие вещества, которые не взаимодействуют с растворами большинства кислот и щелочей. Отсюда и получается высокая твердость и коррозионная стойкость формируемых МДО-покрытий при использовании электролита данного состава.

На основании вышеизложенного можно сделать краткий вывод о том, что процесс образования МДО-покрытия основан на МДР, которые образуются в парогазовых пузырьках пор окисной пленки на алюминиевом сплаве. На основании анализа литературных данных и собственных проведенных исследований нами было сделано предположение, что включение частиц CuO в состав МДО-покрытий, при дуговом электрофорезе, может обеспечить существенное повышение антифрикционных свойств подвижных соединений деталей машин, содержащих покрытия данного типа при взаимодействии деталей без смазочного материала или в режиме граничной смазки.

Однако, в отличие от общепринятого дугового электрофореза, где включение частиц порошков металлов в МДО-покрытие происходит прямо из электролита, в котором и происходит МДО, этот процесс предлагается осуществлять в две стадии. В начале МДО, а затем дуговой электрофорез с увеличенной концентрацией частиц CuO на поверхности уже сформированного оксидокерамического покрытия. Первая стадия (первичная обработка) предусматривает полное формирование МДО-покрытия на алюминиевом сплаве. Затем удаление рыхлого, технологического слоя. Нанесение и закрепление частиц CuO на поверхность МДО-покрытия. Далее идет вторая стадия, которая предусматривает дуговой электрофорез

(вторичная обработка), для расплавления и закрепления меди в оксидокерамическом покрытии. Достоинством такого решения будет включение частиц антифрикционного металла только в поры и поверхностный слой МДО-покрытия. Это позволит существенно снизить расход применяемого порошка и повысить антифрикционные свойства внешнего упрочненного слоя. Данное обстоятельство связано с тем, что в трении двух твердых тел участвует только внешняя поверхность МДО-покрытия. Поэтому улучшение антифрикционных свойств по всей толщине упрочненного слоя не требуется.

Для реализации данной идеи необходимо выбрать материал порошка, его фракцию и способ его фиксации на внешней поверхности уже сформированного МДО-покрытия. Включение частиц меди в состав МДО-покрытия будет производиться дуговым электрофорезом.

Проанализировав имеющиеся на Российском рынке порошковые материалы, их свойства и стоимость, мы пришли к выводу, что для повышения антифрикционных свойств МДО-покрытий наиболее целесообразно использовать порошки CuO . Такой порошок часто применяют в материаловедении, в качестве добавок к электродным материалам для изготовления высокопроводящих кислородных электродов с высокой электрохимической активностью, что по нашему мнению будет благоприятно сказываться на включении порошка в состав МДО-покрытия при воздействии на него ИР. Помимо этого, данный выбор порошка основан на анализе литературных источников [15, 46-50]. В частности С.Г. Красиков в работе [50] описывает преобразование пары трения «сталь-бронза» в пару трения «медь – медь». Поэтому, минуя медьсодержащие порошки мы остановили свой выбор на порошке из чистой меди.

В связи с тем, что размеры пор в МДО-покрытии колеблются в интервале от 2 до 6 мкм [36, 104, 105], можно предположить, что для лучшей заполняемости (по глубине упрочненного слоя) при дуговом электрофорезе потребуется порошок фракцией менее 1 мкм, который является

наноразмерным. Предлагаемый нами, способ закрепления частиц нанопорошка CuO перед дуговым электрофорезом на поверхности МДО-покрытия заключается в следующем. Порошок должен находиться в составе раствора, который при нанесении на сформированное при первичной обработке МДО-покрытие, позволит зафиксировать его частицы на поверхности упрочненного слоя до начала вторичной обработки. Для приготовления основы раствора-носителя мы решили выбрать дистиллированную воду и один из компонентов электролита, а именно Na_2SiO_3 , который применяется в промышленности в качестве компонента клеевых растворов. Это обусловлено тем, что порошок CuO в растворе-носителе на основе воды и натриевого жидкого стекла под собственным весом будет осаждаться на внешнюю поверхность МДО-покрытия и частично проникать в его поры, а Na_2SiO_3 после испарения воды удержит частицы CuO на МДО-покрытии. Выбор Na_2SiO_3 для основы раствора-носителя также основан на том, что он является компонентом электролита и не сможет повлиять на изменение химического состава МДО-покрытия при вторичной обработке. Однако нельзя полностью исключить использования и других компонентов вместо него, например крахмала. Он не взаимодействует с компонентами электролита, а также не сможет повлиять на фазовый состав МДО-покрытия. Кроме этого крахмал обладает хорошими склеивающими характеристиками. Однако, он может оказать негативное влияние на образование ИР [95].

В качестве способа для включения частиц нанопорошка CuO в состав МДО-покрытия, как описывалось ранее, будем использовать дуговой электрофорез. Ранее указывалось, что МДР при МДО проходит сквозь парогазовый пузырек, который образуется в порах упрочненного слоя. После нанесения раствора-носителя на поверхность МДО-покрытия верхняя часть пор в нем окажется занятой частицами CuO, а сама пора внутри будет полой. В этом случае при вторичной обработке воздействие ИР будет проходить по пути наименьшего сопротивления, т.е. через поры в упрочненном слое. В это

же время он окажет воздействие на нанопорошок CuO , который будет находиться в зоне единичной поры. Под действием ИР нанопорошок CuO расплавится и займет полость поры. При этом также произойдет частичное расплавление стенки поры в МДО-покрытии. Таким образом и произойдет модифицирование его внешнего слоя, медь (Cu) будет включена в состав упрочненного слоя. Продолжительность вторичной обработки будем выбирать исходя из потребности расплавления как можно большего количества частиц нанопорошка CuO , нанесенного в составе раствора-носителя на поверхность МДО-покрытия. На рисунке 2.1 представлен предлагаемый нами механизм модифицирования МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO .

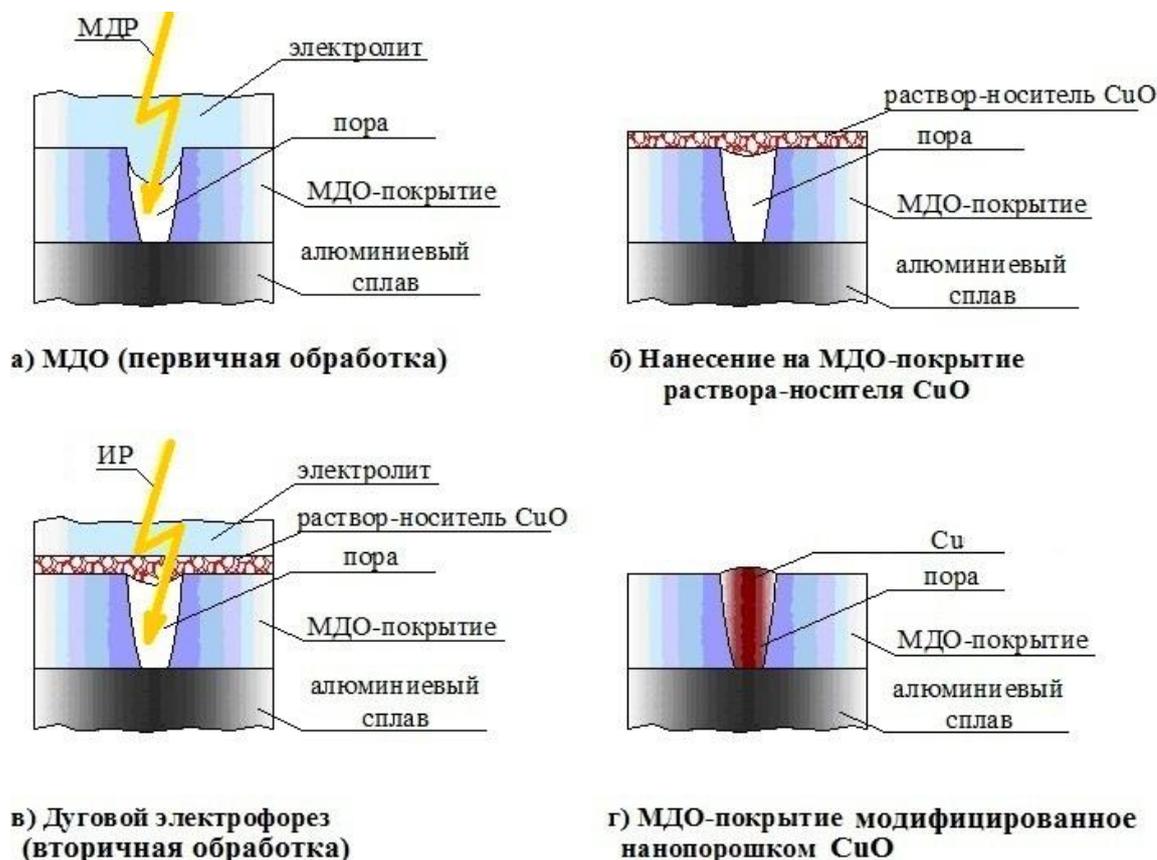


Рисунок 2.1- Механизм модифицирования МДО-покрытия частицами нанопоршка CuO

2.2 Модель тока пробоя при вторичной обработке МДО-покрытия

Для выбора электрического режима вторичной обработки необходимо провести теоретическое исследование, которое позволит определить электрический ток пробоя упрочненного слоя, который необходим для расплавления как можно большего количества частиц нанопорошка CuO , нанесенного на поверхность МДО-покрытия. Проведение подобного расчета требует четкого понятия о механизме протекания ИР. Он позволит понять, как меняются электрические параметры в ходе процесса дугового электрофореза в зависимости от электрофизических параметров электролита, раствора-носителя и сформированного МДО-покрытия.

Как известно, закон которому подчиняется процесс МДО является циклическим. В ходе такого процесса ИР последовательно проходит через стадии зарождения, распространения и затухания. На сегодняшний день механизм образования и пробоя барьерной пленки достаточно хорошо изучен и математически описан [19, 68, 88, 108, 110, 128]. В работе Пронина В.В. описываются теоретические представления роста МДО-покрытия на алюминиевом сплаве и его кинетические закономерности, также в ней представлена динамика процесса зарождения МДР в элементарной ячейке [88]. В этой модели учтена форма ЭДС источника технологического тока. Однако, в нашем случае МДО-покрытие уже сформировано, поэтому ИР будет в основном проходить через поры МДО-покрытия. Кроме этого при вторичной обработке появляется дополнительное сопротивление в виде раствора-носителя CuO .

В связи с этим модель, представленная в работе [88] получила в нашей работе дальнейшее развитие применительно к вторичной обработке (дуговому электрофорезу) МДО-покрытия. При рассмотрении начальных условий задачи, также как и в работе [88] был сделан ряд допущений. В расчетах не учитывался ионный ток в системе и сопротивление электролита в порах МДО-покрытия. В нашем случае задача была сведена к определению

изменения электронного тока, проходящего через систему металл - оксид - раствор-носитель CuO - электролит (МОРЭ), от напряжения на ячейке. Эквивалентная электрическая схема системы МОРЭ представлена на рисунке 2.2. При этом также вводилось допущение, что постоянными величинами останутся следующие параметры: сопротивление МДО-покрытия ($R_{\text{п}}$), сопротивление барьерного слоя на дне сквозной поры МДО-покрытия ($R_{\text{б}}$) и емкость МДО-покрытия [105], а также сопротивление электролита ($R_{\text{э}}$). Параметры сопротивления раствора-носителя ($R_{\text{р}}$) и сопротивления воздуха в порах ($R_{\text{в}}$) будут меняться с течением времени. В частности $R_{\text{р}}$ будет снижаться, так как раствор-носитель будет израсходован, то есть одна его часть заполнит поры и образуется сопротивление металла в порах, а другая часть вовсе растворится в электролите, при этом $R_{\text{в}}$ сведется к нулю, за очень короткий промежуток времени, а появится сопротивление электролита в порах.

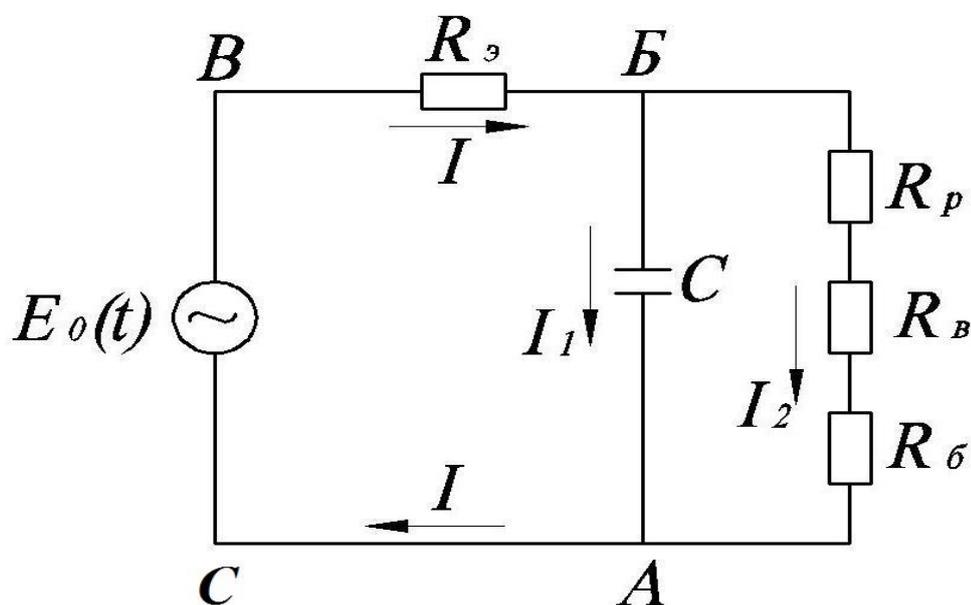


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема системы МОРЭ в предпробойном состоянии при вторичной обработке. $R_{\text{э}}$ – сопротивление электролита; $R_{\text{р}}$ – сопротивление раствора-носителя нанопорошка CuO; $R_{\text{в}}$ – сопротивление воздуха в порах МДО-покрытия; $R_{\text{б}}$ – сопротивление барьерного слоя на дне сквозной поры МДО-покрытия; C – ёмкость МДО-покрытия; $E_0(t)$ – ЭДС источника питания

Тогда падение напряжения на участке АВ при вторичной обработке МДО-покрытия (Рисунок 2.2) будет:

$$U_{AB} = q/C = (1/C) \int I_1 t(dt) = I_2(R_\epsilon + R_\delta + R_p) \quad (2.1)$$

Следовательно:

$$I_2 = ((R_\epsilon + R_\delta + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt) \quad (2.2)$$

Падение напряжения на участке АВ при вторичной обработке МДО-покрытия, будет складываться из суммы падений напряжений на участках АВ и БВ, то есть:

$$\begin{aligned} U_{AC} &= U_{AB} + U_{BB} \Rightarrow IR_3 + I_2(R_\epsilon + R_\delta + R_p) \Rightarrow \\ &\Rightarrow E_0(t) = IR_3 + I_2(R_\epsilon + R_\delta + R_p) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Тогда, общий ток при вторичной обработке МДО-покрытия будет определяться из выражений:

$$I = \frac{E_0(t)}{R_3} - \frac{I_2(R_\epsilon + R_\delta + R_p)}{R_3} = \frac{E_0(t)}{R_3} - \frac{\int I_1 t(dt)}{R_3 \cdot C} \quad (2.4)$$

$$I = I_1 + I_2 = I_1 + ((R_\epsilon + R_\delta + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt) \quad (2.5)$$

Приравниваем правые части уравнений (2.4) и (2.5) и получим:

$$\begin{aligned} I_1 + ((R_\epsilon + R_\delta + R_p)C)^{-1} \int I_1 t(dt) &= \frac{E_0(t)}{R_3} - \frac{\int I_1 t(dt)}{R_3 \cdot C} \Rightarrow \\ I_1 + \frac{\int I_1 t(dt)}{(R_\epsilon + R_\delta + R_p)C} - \frac{E_0(t)}{R_3} &= 0 \end{aligned} \quad (2.6)$$

Для упрощения математических расчетов, заменим коэффициентом m член $\frac{1}{(R_\epsilon + R_\delta + R_p)C}$.

$$\frac{1}{(R_\epsilon + R_\delta + R_p)C} = m \quad (2.7)$$

Тогда зная, что ЭДС источника питания $E_0(t)$ подчиняется закону:

$$E_0(t) = A \cdot \sin(\omega t) - B, \quad (2.8)$$

где A - текущее амплитудное напряжение (величина, зависящая от толщины МДО-покрытия и плотности тока), В;

B - смещение амплитуды колебаний (связано с использованием ёмкостного источника тока), В;

ω - угловая частота, c^{-1} , $\omega=2\pi f$ (при $f=50$ Гц, $\omega = 100\pi$).

Учитывая (2.7) и (2.8) уравнение (2.6) примет вид:

$$I_1(t) + mf I_1'(t) - \frac{A \sin(\omega t) - B}{R_s} = 0 \quad (2.9)$$

Продифференцировав уравнение (2.9) получим:

$$I_1'(t) + m I_1(t) = \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_s} \quad (2.10)$$

Общее решение I_0 уравнения (2.10) найдем в виде:

$$I_0 = I_{00} + I_{CH} \quad (2.11)$$

где I_{00} – общее решение соответствующего однородного дифференциального уравнения;

I_{CH} - частное решение неоднородного дифференциального уравнения.

Характеристическое уравнение соответствующего однородного дифференциального уравнения имеет вид:

$$y + m = 0 \quad (2.12)$$

Тогда решение уравнения примет вид:

$$y = -m \quad (2.13)$$

Ему будет соответствовать общее решение в виде:

$$I_{100}(t) = e^{-mt} \quad (2.14)$$

Найдем частное решение неоднородного дифференциального уравнения I_{CH} .

Так как правая часть этого уравнения имеет вид $\frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_s}$, то её можно представить:

$$e^{\alpha t} \cdot [P_n(t) \cdot \cos(\beta t) + Q_m(t) \cdot \sin(\beta t)], \quad (2.15)$$

где $\alpha = 0$;

$\beta = \omega$;

$P_n = \frac{A \cdot \omega}{R_s}$ - многочлен уравнения;

Q_m - многочлен уравнения, $Q_m = 0$.

Тогда получим частное решение неоднородного дифференциального уравнения в виде:

$$I_{\text{ЧН}}(t) = D_1 \cdot \cos(\omega t) + D_2 \cdot \sin(\omega t), \quad (2.16)$$

где D_1 и D_2 – постоянные коэффициенты.

Определим производную выражения (2.16) и получим:

$$I_1'_{\text{ЧН}}(t) = -D_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + D_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) \quad (2.17)$$

Чтобы определить постоянные коэффициенты D_1 и D_2 сделаем подстановку полученного частного решения неоднородного дифференциального уравнения (2.16) и его производной (2.17) в начальное уравнение (2.10).

$$m \cdot D_1 \cdot \cos(\omega t) + m \cdot D_2 \cdot \sin(\omega t) - D_1 \cdot \omega \cdot \sin(\omega t) + D_2 \cdot \omega \cdot \cos(\omega t) = \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_3} \quad (2.18)$$

Общее решение уравнения примет вид:

$$I_1(t) = e^{-mt} + D_1 \cdot \cos(\omega t) + D_2 \cdot \sin(\omega t) \quad (2.19)$$

Определим коэффициенты D_1 и D_2 , составив систему уравнений на основе уравнения (2.18)

$$\begin{aligned} m \cdot D_2 - D_1 \cdot \omega &= 0 \\ m \cdot D_1 - D_2 \cdot \omega &= \frac{A \cdot \omega}{R_3} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Решением этой системы будет:

$$D_1 = \frac{A \cdot \omega}{R_3 \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m \right)} \quad (2.21)$$

$$D_2 = \frac{A \cdot \omega^2}{R_3 \cdot (\omega^2 + m^2)} \quad (2.22)$$

Тогда общее решение примет вид:

$$I_1(t) = e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_3 \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m \right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_3 \cdot (\omega^2 + m^2)} \quad (2.23)$$

Подставив (2.23) в (2.2) получим:

$$\begin{aligned}
 I_2 &= ((R_\epsilon + R_\delta + R_p) \cdot C)^{-1} \int \left[e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_\omega \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_\omega \cdot (\omega^2 + m^2)} \right] dt = \\
 &= ((R_\epsilon + R_\delta + R_p) \cdot C)^{-1} \cdot \left[e^{-mt} / m + \frac{A \cdot \sin(\omega t)}{R_\omega \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} - \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_\omega \cdot (\omega^2 + m^2)} \right] \quad (2.24)
 \end{aligned}$$

В итоге уравнение (2.5) позволяющее определять общий ток, проходящий через систему МОРЭ, примет вид:

$$\begin{aligned}
 I &= e^{-mt} + \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_\omega \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} + \frac{A \cdot \omega^2 \cdot \sin(\omega t)}{R_\omega \cdot (\omega^2 + m^2)} + \\
 &+ ((R_\epsilon + R_\delta + R_p) \cdot C)^{-1} \cdot \left[e^{-mt} / m + \frac{A \cdot \sin(\omega t)}{R_\omega \cdot \left(\frac{\omega^2}{m} + m\right)} - \frac{A \cdot \omega \cdot \cos(\omega t)}{R_\omega \cdot (\omega^2 + m^2)} \right] \quad (2.25)
 \end{aligned}$$

Уравнение (2.25) представляет собой модель, которая показывает изменение тока пробы при вторичной обработке МДО-покрытия и учитывает электрофизические параметры сквозной пористости, раствореносителя CuO и ЭДС источника питания. Из полученного уравнения видна обратно пропорциональная зависимость силы тока от напряженности электрического поля в МДО-покрытии, сопротивления раствора-носителя CuO, электролита, МДО-покрытия и воздуха в его порах. Оно объясняет потребность в большей силе тока в момент начала вторичной обработки МДО-покрытия с нанесенным на него раствором-носителем CuO, чем при МДО.

При вторичной обработке ток зависит от сопротивления системы МОРЭ. Теоретическая зависимость изменения сопротивления системы МОРЭ от продолжительности вторичной обработки представлена на рисунке 2.3.

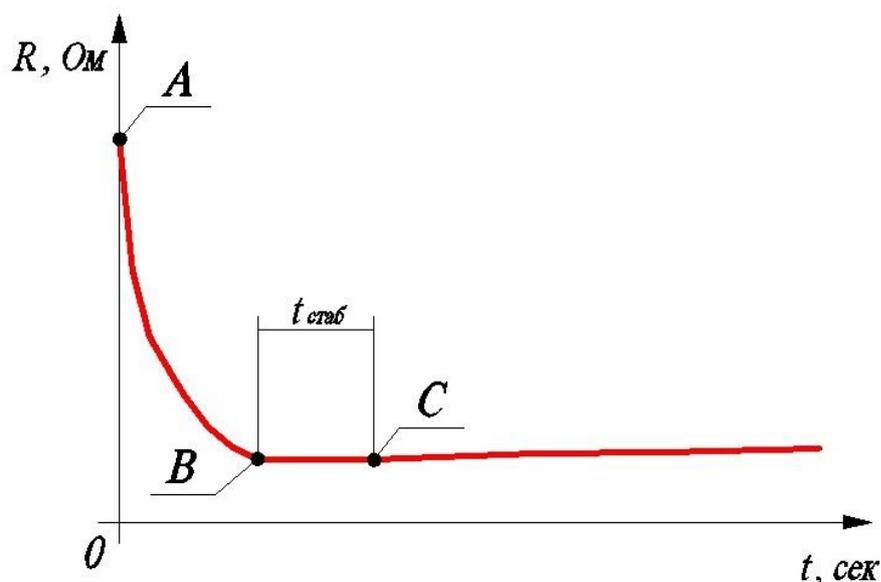


Рисунок 2.3 – Теоретическая кривая изменения сопротивления системы МОРЭ от продолжительности вторичной обработки

Из рисунка 2.3 видно, что в начальный момент времени вторичной обработки (точка А) сопротивление системы МОРЭ имеет максимальное значение. Этому значению сопротивления будет соответствовать ток I_A . Затем, как указывалось ранее, в ходе дугового электрофореза будет расходоваться раствор-носитель CuO , а значит, будет уменьшаться сопротивление системы МОРЭ. Когда раствор-носитель CuO будет полностью израсходован (точка В), сила тока перестанет резко расти. На некоторый промежуток времени $t_{\text{стаб}}$ она стабилизируется, то есть примет значение I_B . При этом в период $t_{\text{стаб}}$ ток I_B будет приблизительно равен I_C , после чего, если не остановить вторичную обработку, МДО-покрытие начнет увеличивать свою толщину и сопротивление R начнет возрастать. Однако ранее указывалось, что это не приемлемо для разрабатываемой технологии. Поэтому, при наступлении промежутка времени $t_{\text{стаб}}$ процесс вторичной обработки необходимо остановить.

Рассчитать изменение силы тока от точки А до точки В (Рисунок 2.3) весьма затруднительно, из-за отсутствия данных быстро меняющегося сопротивления R_p в ходе дугового электрофореза. Однако, используя формулу 2.25 с определенной погрешностью можно определить

минимальный начальный ток I_A необходимый для начала вторичной обработки и ток I_B , при котором необходимо закончить вторичную обработку. Численно рассчитанные значения I_A и I_B помогут контролировать процесс вторичной обработки.

Для определения значения I_A необходимо знать электрофизические параметры системы МОРЭ, то есть емкость C и сопротивления R_3 , R_p , R_6 и R_B . ЭДС источника питания известна. Сопротивление воздуха R_B известно, а сопротивления R_3 , R_p , R_6 и емкость C можно измерить по известным методикам [68, 88]. Таким образом подставив электрофизические параметры системы МОРЭ в точку А в формулу 2.25, можно теоретически рассчитать необходимый для начала вторичной обработки ток I_A .

Для определения значения I_B необходимо учитывать, что сопротивление R_6 значительно больше чем R_p (т.е. $R_6 \gg R_p$), то есть при растворении раствора-носителя CuO в электролите сила тока I_B будет изменяться незначительно. Кроме этого характер и глубина заполнения пор на данной стадии исследований нам пока не известны, поэтому при расчетах I_B сделаем следующее допущение. Примем, что в точке В сопротивление R_p полностью перерастет в сопротивление R_3 , так как раствор-носитель CuO практически полностью растворится в электролите, пористость МДО-покрытия и количество раствора-носителя CuO наносимого на обрабатываемую поверхность отличаются на несколько порядков. Учитывая данное допущение и зная, какое количество раствора-носителя CuO было нанесено на обрабатываемую поверхность, можно рассчитать сопротивление электролита в точке В. Вычисления силы тока производились при помощи программного обеспечения «PТC Mathcad 15».

Таким образом, уравнение (2.25), которое является моделью для теоретического определения минимального начального тока I_A необходимого для вторичной обработки. Полученная модель показывает, что при снижении параметров сопротивления раствора-носителя CuO и воздуха в порах, сила тока необходимая для вторичной обработки будет также снижаться и

стабилизируется при переходе частиц нанопорошка CuO в поры МДО-покрытия. При этом, сопротивление воздуха в порах МДО-покрытия перерастет в сопротивление электролита в них. Причем второе будет значительно ниже первого, так как частицы нанопорошка CuO займут поровое пространство после воздействия ИР, а остатки раствора-носителя растворятся в электролите. После этого МДО-покрытие снова начнет увеличивать свою толщину, что для разрабатываемой технологии является неприемлемым. Полученная модель также позволяет контролировать продолжительность вторичной обработки по стабилизации электрического тока I_B .

2.3 Влияние модифицирования частицами нанопорошка CuO МДО-покрытия на коэффициент трения

Узлы трения современных машин и механизмов, смазанные жидкими или пластичными смазочными материалами, в определенные моменты (пуск и остановка; высокие контактные нагрузки или температуры; низкие скорости относительного перемещения взаимодействующих деталей и т.д.) работают в основном в режиме граничной смазки. Поверхности трения при этом не разделены слоем жидкости, а непосредственный металлический контакт, приводящий к их повышенному изнашиванию и возможному заеданию пары трения, предотвращается (или минимизируется) вследствие образования на рабочих поверхностях участвующих в трении граничных слоев различного происхождения.

Такие способности граничных слоев как уменьшение потерь на трение, снижение изнашивания и предотвращение заедания в подвижных соединениях деталей машин возникают по следующим причинам [46-49]:

1) трущиеся поверхности разделяются под действием граничных слоев на расстояния, превышающие радиус действия адгезионных сил, что значительно снижает эти силы, поскольку они резко уменьшаются при

увеличении расстояния между твердыми телами;

2) граничные слои обладают анизотропией механических свойств. Тончайшие граничные слои могут не разрушаясь, выдерживать большие нормальные нагрузки. При этом, под действием относительно невысоких тангенциально направленных сил в граничных слоях происходит сдвиг по плоскостям наилучшего скольжения;

3) компоненты смазочного материала, взаимодействуя с поверхностью пар трения, вызывают адсорбированное пластифицирование тонких поверхностных слоев, избирательное растворение некоторых составляющих поверхностного слоя металла и перенос их на ответную поверхность, что также снижает сдвиговую прочность поверхностных слоев.

В нашем случае мы считаем, что благодаря выше указанным явлениям при граничной смазке сдвиговые деформации будут образовываться в граничном слое, образованном Си между взаимодействующими при трении поверхностями. Образованию такого граничного слоя будет способствовать приработка рабочих поверхностей, при которой на рабочих поверхностях деталей будет иметь место некоторый износ, в том числе и на деталях с модифицированным МДО-покрытием. Тогда Си, содержащийся в порах МДО-покрытия, будет постепенно попадать в зону контакта трущихся поверхностей и выступать в роли твердого смазочного материала. Отсюда мы получим граничный слой - «третье тело» из Си, который будет предохранять от разрушения поверхностные слои взаимодействующих деталей, а низкая сдвиговая прочность граничного слоя обеспечит относительно малые потери на трение. Данный способ доставки твердого смазочного материала в зону трения схож с ротапринтным методом нанесения твердых смазок.

После появления третьего тела в зоне трения двух деталей мы получим 2 варианта контакта: «сталь – МДО-покрытие» и «сталь – Си – МДО-покрытие». Сила трения F в нашем случае будет подчиняться модели Бодена и Тейбора, т.е. она будет складываться из сопротивления срезу

адгезионных связей на участке контакта «сталь – чистое МДО-покрытие» и сопротивления сдвигу твердого смазочного материала на остальной площадке контакта.

$$F = A[\alpha \cdot \tau_m + (1 - \alpha) \cdot \tau_{cm}], \text{ Н}, \quad (2.26)$$

где A – суммарная площадь контакта, несущая нагрузку;

α – доля контакта «сталь – МДО-покрытие»;

τ_m и τ_{cm} – удельные сдвиговые сопротивления соответственно на участке «сталь – чистое МДО-покрытие» и на участке занятом Cu .

В нашем случае, выражение $(1 - \alpha)$ в формуле 2.26 по сути выражает площадь контакта деталей через твердый смазочный материал, который напрямую зависит от процентного содержания Cu на поверхности модифицированного МДО-покрытия. Тогда, согласно формуле 2.26 можно сделать вывод о том, что с увеличением содержания Cu на поверхности МДО-покрытия сила трения между рабочими поверхностями деталей будет снижаться, так как площадь контакта через твердый смазочный материал будет возрастать.

Можно также предположить, что коэффициент трения до приработки (образования граничного слоя) между соединением «сталь – МДО-покрытие модифицированное CuO » будет выше, чем между парой трения «сталь – МДО-покрытие». Это можно объяснить тем, что поры МДО-покрытия будут заполнены кристаллами Cu и оксида кремния, т.е. после модифицирования шероховатость упрочненного слоя увеличится.

Следует отметить, что граничный слой образуется после приработки рабочих поверхностей деталей подвижного соединения. Поэтому во время приработки за счет избирательного (фрикционного) переноса частиц меди с одной поверхности на другую, будет увеличиваться площадь контакта «сталь – Cu - МДО-покрытие». То есть, как описывалось ранее, произойдет образование третьего тела при трении, которое будет обладать меньшим сдвиговым сопротивлением, чем материалы серийных изделий. А значит,

будет происходить снижение коэффициента трения и связанное изменение микрогеометрии между взаимодействующими поверхностями. Данный процесс будет происходить до наступления равновесной шероховатости [47, 48].

Определенный теоретический интерес будет представлять разложение коэффициента трения на величины молекулярной и механической его составляющих между рабочими поверхностями деталей подвижного соединения. Подробное разложение данных составляющих позволит описать и выявить закономерности изменения свойств МДО-покрытий после их модифицирования частицами нанопорошка CuO.

В настоящее время общепризнанной является молекулярно-механическая теория трения, основные положения которой разработаны И.В. Крагельским и его учениками. Исходя из представлений о дискретной структуре контакта, он предложил рассчитать силы трения путем суммирования сопротивлений, возникающих от молекулярного и механического взаимодействия на отдельных площадках контакта [47]:

$$F = \tau_{\text{мол}}A_{\text{мол}} + \tau_{\text{мех}}A_{\text{мех}}, \quad (2.27)$$

где $\tau_{\text{мол}}$, $\tau_{\text{мех}}$ – удельные молекулярные и механические взаимодействия или силы трения;

$A_{\text{мол}}$, $A_{\text{мех}}$ – фактическая площадь молекулярных и механических контактов.

Следовательно, общий коэффициент трения f складывается из молекулярной составляющей и механической составляющей [47]:

$$f = f_{\text{мол}} + f_{\text{мех}} \quad (2.28)$$

После приработки механическая часть общего коэффициента трения соединения «сталь – МДО-покрытие модифицированное CuO» будет сведена к минимуму, и трение между данными поверхностями примет другой вид. Оно в большей степени, будет сводиться к преодолению сил затрачиваемых

на срез мостиков сварки внутри более мягкого материала, то есть появившегося «третьего тела» [47].

Общий вид молекулярной составляющей силы трения [47]:

$$T_a = \tau_0 A_r + \beta N, \quad (2.29)$$

где τ_0 , β – константы (определяются экспериментальным путем), зависящие от природы взаимодействия между твердыми телами;

A_r – площадь фрикционной связи;

N – нагрузка, воспринимаемая фрикционной связью.

Тогда молекулярная составляющая коэффициента трения примет вид:

$$f_{\text{мол}} = \frac{\tau_0}{\delta_{ri}} + \beta, \quad (2.30)$$

где δ_{ri} – среднее нормальное напряжение на фрикционной связи.

Из формулы (2.30) видно, что молекулярная составляющая коэффициента трения напрямую зависит от τ_0 – прочности тела на сдвиг и β – коэффициента, характеризующего увеличение касательных напряжений (прочности на сдвиг) от нормального давления. Таким образом, добавляя в зону трения Cu, которая имеет более низкую прочность на сдвиг чем сталь, меняется характер взаимодействия между поверхностями взаимодействующих деталей. Тем самым уменьшаются обе составляющие коэффициента трения. Мы считаем, что в большей степени должна уменьшиться механическая составляющая коэффициента трения, а молекулярная уменьшится незначительно.

Для подтверждения этих предположений, необходимо определить составляющие коэффициента трения до и после приработки. Анализ литературных источников [5, 48] позволяет сделать вывод о том, что величину молекулярной составляющей коэффициента трения можно оценить с помощью трибометров (шариковых, роликовых).

Использование шариковых трибометров обусловлено следующими соображениями:

- обеспечение высоких контактных напряжений при сравнительно малых нагрузках,
- устранение возможных погрешностей при перекосе, возникающем при вращении,
- получаемые пластические отпечатки имеют сферическую форму и остаются неизменными при вращении индентора.

Определение молекулярной составляющей коэффициента трения позволит подтвердить наши предположения о снижении силы трения в исследуемой паре трения подвижного соединения «сталь – МДО-покрытие модифицированное CuO».

2.4 Выводы

2.1 Обосновано применение явления дугового электрофореза при вторичной обработке для внедрения частиц нанопорошка CuO в поры МДО-покрытия, что будет способствовать его модифицированию.

2.2 Усовершенствована модель тока пробоя при вторичной обработке (уравнение 2.25), которая учитывает электрофизические параметры сквозной пористости, раствора-носителя частиц нанопорошка CuO и электродвижущей силы источника питания и устанавливает взаимосвязь между растворением раствора-носителя в электролите и уменьшением потребного для дугового электрофореза электрического тока.

2.3 Сделано теоретическое предположение о возможном влиянии модифицирования частицами нанопорошка CuO МДО-покрытия на молекулярную и механическую составляющую коэффициента трения в подвижном соединении рабочих поверхностей деталей.

3 ПРОГРАММА, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Программа исследований

Программой научного исследования предусматривалось: изучить закономерности формирования и свойства упрочняющих МДО-покрытий модифицированных нанопорошком CuO; провести теоретические и экспериментальные исследования по выявлению физико-механических и эксплуатационных свойств восстановленных и упрочненных данными покрытиями деталей; разработать практические рекомендации для внедрения предлагаемой комбинированной технологии в производство и выполнить её экономическую оценку. На рисунке 3.1 представлена программа экспериментальных исследований.



Рисунок 3.1 – Программа экспериментальных исследований

3.2 Оборудование и материалы для формирования МДО-покрытий и модифицирования упрочненного слоя

Для формирования МДО-покрытий использовали экспериментальную установку, находящуюся на кафедре «Надёжность и ремонт машин» ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ. В устройство данной установки входят: источник питания (Рисунок 3.2, а); электролитическая ванна, которая имеет систему крепления образцов и водяную рубашку охлаждения (Рисунок 3.2, б). Установка работает от сети напряжением 380 В на переменном электрическом токе промышленной частоты 50 Гц. Она обеспечивает анодно-катодное формирование МДО-покрытий с соотношением амплитуд катодного и анодного токов $I_K/I_A=1,0$.

В ходе исследований использовались образцы, изготовленные из литейного алюминиевого сплава АК7ч ГОСТ 1583.

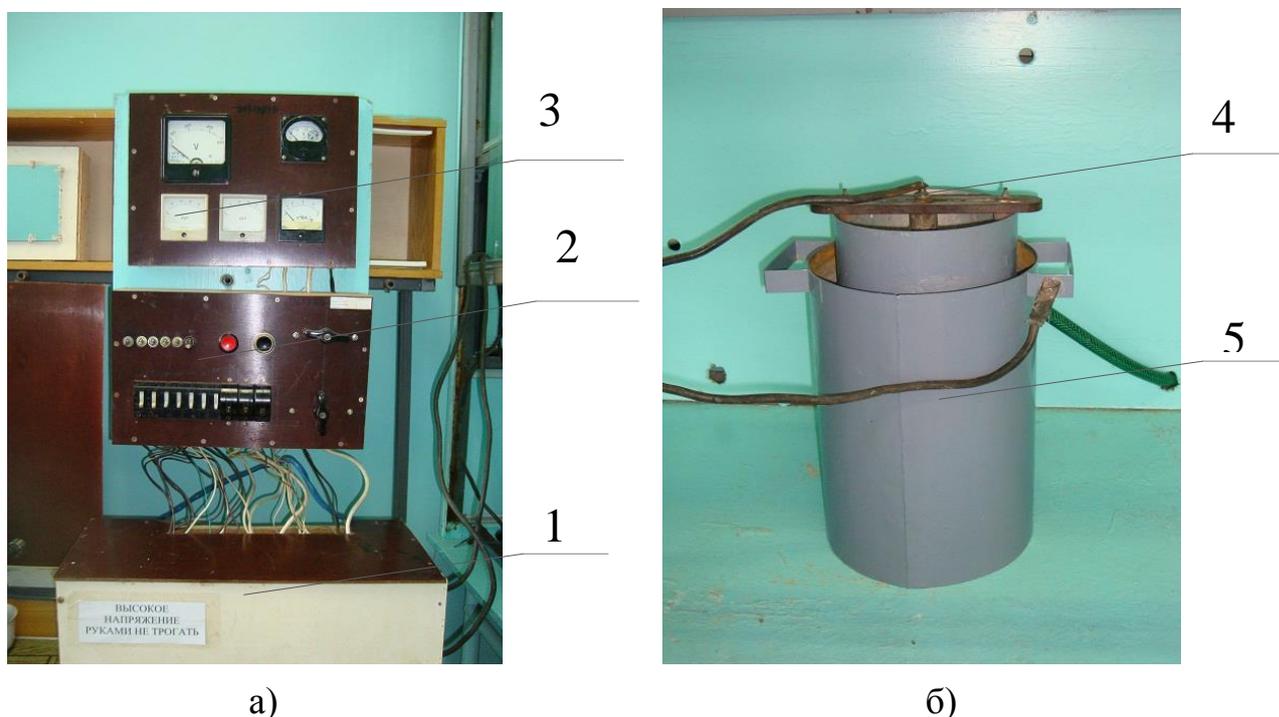


Рисунок 3.2 – Общий вид источника питания (а), электролитической ванны (б) экспериментальной установки для МДО: 1 – силовой блок; 2 – блок управления; 3 – блок измерения электрических режимов МДО; 4 – подвеска для образцов; 5 – электролитическая ванна.

МДО-покрытия получали электрохимическим путем в ванне цилиндрической формы (Рисунок 3.2, б), которая изготовлена из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, она рассчитана на 10 литров электролита. В ходе исследований использовали электролит, на основе дистиллированной воды с добавлением гидроксида калия КОН ГОСТ 9285 и натриевого жидкого стекла Na_2SiO_3 ГОСТ 13078 с плотностью $\rho=1,47 \times 10^3$ кг/м³ и модулем 3,0. Регулирование температуры электролита в процессе МДО осуществляли проточной водопроводной водой подаваемой в рубашку охлаждения электролитической ванны. В процессе МДО осуществляли воздушное барботирование электролита, тем самым перемешивали его при помощи микрокомпрессора. Закрепление образца на токоведущей подвеске осуществляли при помощи резьбового соединения.

На основе анализа литературных данных [36, 56, 119] были подобраны наиболее подходящие для исследуемого сплава АК7ч состав электролита и режимы МДО. Плотность тока при оксидировании составляла 25 А/дм². Её выбор основан на том, что при такой плотности тока динамика роста толщины МДО-покрытия наиболее высокая и незначительно увеличивается пористость упрочненного слоя [36, 56, 119]. Для оксидирования сплава АК7ч содержание КОН в составе электролита должно быть от 1 г/л до 3 г/л [36, 56, 119]. При увеличении его содержания выше рекомендуемого значения толщина МДО-покрытия уменьшается при незначительном изменении микротвердости упрочненного слоя. Анализ технического состояния деталей проведенный в главе 1 показал, что износ поршня на сторону не превышает 60 мкм. Поэтому для компенсации такого износа за счет толщины МДО-покрытия содержание в электролите КОН должно составлять 2 г/л [36, 56, 103-105, 119]. Содержание в электролите Na_2SiO_3 рекомендуется от 8 г/л до 16 г/л. Однако при увеличении его содержания выше 12 г/л наблюдается снижение микротвердости упрочненного слоя [56, 103-105, 119]. Поэтому мы остановили свой выбор на рекомендациях источников [36, 57, 103-105] и содержание Na_2SiO_3 в электролите при проведении экспериментов

составляло 10 г/л. Температура электролита изменялась в интервале 20...40°C, который использовался для искусственного изменения пористости МДО-покрытия [35-37]. Продолжительность оксидирования до полного формирования МДО-покрытия была определена экспериментальным путем и составляла 80...90 мин. В дальнейшем, состав электролита при первичной обработке не изменялся. МДО-покрытия формировали на торцевой поверхности образцов (Рисунок 3.12).

Дозирование химических компонентов электролита проводили на лабораторных весах ВЛКТ-500, погрешностью при взвешивании не более 0,02 г. Свежеприготовленный электролит прорабатывали в течение 0,5 часа перед началом экспериментов. Для исключения возможности влияния обеднения электролита на свойства формируемых МДО-покрытий, после каждого опыта меняли использованный электролит на свежий, с последующей его проработкой.

После МДО с оксидированной поверхности образца снимали рыхлый технологический слой и шлифовали его до шероховатости, соответствующей оригинальной детали ($R_a=0,32...0,63$). Затем на упрочненную поверхность наносили подготовленный раствор-носитель с нанопорошком CuO. Он содержал дистиллированную воду, натриевое жидкое стекло Na_2SiO_3 ГОСТ 13078 и нанопорошок оксида меди с фракцией частиц от 80 до 100 нм по ТУ 1791-003-36280340-2008. Пропорции компонентов раствора-носителя были следующие: три части по массе жидкого стекла Na_2SiO_3 , три части по массе дистиллированная вода, 1 часть нанопорошка CuO. Далее, после застывания раствора-носителя проводили вторичную обработку исследуемой поверхности образца.

Модифицирование МДО-покрытия при вторичной обработке дуговым электрофорезом осуществляли на следующих режимах: плотность тока – 25 А/дм²; продолжительность вторичной обработки – 0,5...2 мин.; температура электролита – 15...20°C. Содержание компонентов электролита

варьировалось в интервале: КОН – 0,5...2 г/л; Na₂SiO₃ – 2...10 г/л. Данный интервал основан на том, что концентрация компонентов электролита для вторичной обработки МДО-покрытия должна быть существенно ниже, чем при первичной обработке, так как не требуется наращивания упрочненного слоя. После вторичной обработки образец подвергался повторному шлифованию и проведению дальнейших исследований.

3.3 Оценка работоспособности электролита для формирования МДО-покрытий

Оценку работоспособности электролита проводили на основе изменения его кислотности. Определение кислотности электролита осуществляли лабораторным рН-метром-милливольтметром модели рН-121. Продолжительность работы электролита измеряли в А·ч/л, при этом учитывали влияние площади упрочняемых образцов и объема электролита на его обеднение. Данная оценка проводилась только при первичной обработке. При вторичной обработке компоненты раствора-носителя частично переходят в электролит. В связи с тем, что после вторичной обработки в электролите будет увеличиваться содержание Na₂SiO₃ поэтому для каждого следующего модифицирования МДО-покрытия, необходимо его заменять.

3.4 Измерение толщины МДО-покрытий

Толщину МДО-покрытий определяли при помощи вихретокового толщиномера ВТ-201 (Рисунок 3.3) по ГОСТ 9.302. Показания толщины МДО-покрытия снимали с цифрового индикатора прибора ВТ-201 после установки датчика на исследуемый образец. За толщину принимали среднее значение из 10 измерений. Линейные размеры образцов с МДО-покрытием и без него определяли микрометром МР-25 ГОСТ 4381.



Рисунок 3.3 – Вихретоковый толщиномер ВТ-201

3.5 Определение микротвердости МДО-покрытий

Микротвердость в HV измеряли по ГОСТ 9450 на компьютеризированном микротвердомере ПМТ-3М-01 (Рисунок 3.4) при нагрузке на индентор 1,96 Н. Погрешность измерения контрольного отпечатка составляла не более 0,3 мкм.



Рисунок 3.4 – Общий вид компьютеризированного микротвердомера ПМТ-3М-01

Измерения микротвердости проводили на поперечных шлифах образцов (Рисунок 3.12, а) по толщине полученных МДО-покрытий. Чтобы

получить поперечные шлифы мы разрезали образцы на две половины и обрабатывали, согласно рекомендациям [11]. Помимо этого, определение микротвердости осуществляли вдавливанием алмазной пирамиды перпендикулярно в исследуемую поверхность МДО-покрытия. Перед измерениями проводили шлифование образцов наждачной бумагой типа Л2Э320×250П215А15-НМА ГОСТ 6456-82 до удаления рыхлого (технологического) слоя МДО-покрытия, а затем полировали. Численное значение микротвердости определяли при помощи специализированной программы, через видеоустройство, подключенное к ПК микротвердомера.

3.6 Определение сквозной пористости МДО-покрытий

Для определения сквозной пористости использовали метод цветной дефектоскопии [36, 59]. После оксидирования удаляли рыхлый (технологический слой) МДО-покрытия образцов (Рисунок 3.12, а). Затем их промывали в холодной проточной воде, после чего погружали на 30 с в теплый (35...40°C) раствор едкого натра (20 г/л) и на 1 мин в раствор осветления (азотная и плавиковая кислоты в соотношении 1:1). Для того чтобы окрасить поры образцы помещали на 5 мин в раствор, содержащий 20 г/л сернокислой меди и 20 мл/л соляной кислоты. После промывки и сушки образцы с окрашенными порами в виде выделившейся меди на упрочненном слое исследовали под микроскопом ×20. Сквозная пористость МДО-покрытий определялась из процентного отношения площади окрашенных мест к площади рассматриваемого участка.

3.7 Определение содержания меди на поверхности МДО-покрытий

Содержание меди (Cu) на поверхности образца с МДО-покрытием определяли на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-35 ТУ4276-051-00226230-2008 (Рисунок 3.5), в ЗАО «Научприбор» г. Орел.



Рисунок 3.5 - Общий вид многоканального рентгеновского спектрометра СРМ-35

Метод РФА (рентгено-флуоресцентный анализ) основан на зависимости интенсивности характеристических линий флуоресценции элемента от его массовой доли в пробе. Возбуждаемое первичным рентгеновским излучением характеристическое излучение элементов в пробе разлагается в спектр с последующим измерением интенсивности сигнала и определением массовой доли элемента с помощью градуировочного графика, построенного от проб с известным содержанием элементов.

Измерения проводились в режиме рентгеновской трубки $U_a=30$ кВ, $I_a=30$ мА, $T_{\text{эксп}}=40$ сек, с облучаемой поверхности образцов диаметром 35 мм. Определение содержания Си проводили по градуировке относительно стандартных образцов.

3.8 Определение коэффициента трения и его молекулярной составляющей в подвижных соединениях с МДО-покрытиями

Исследования проводились на установке, принципиальная схема которой приведена на рисунке 3.6. Она сконструирована учеными Брянского Государственного технического университета Ильенко К.А., Ильенко А.К., Новиковым В.Г., Воробьевым В.И., Пугачевым А.А., Воробьевым Д.В., Новиковым А.С. и Кошелевым А.В.

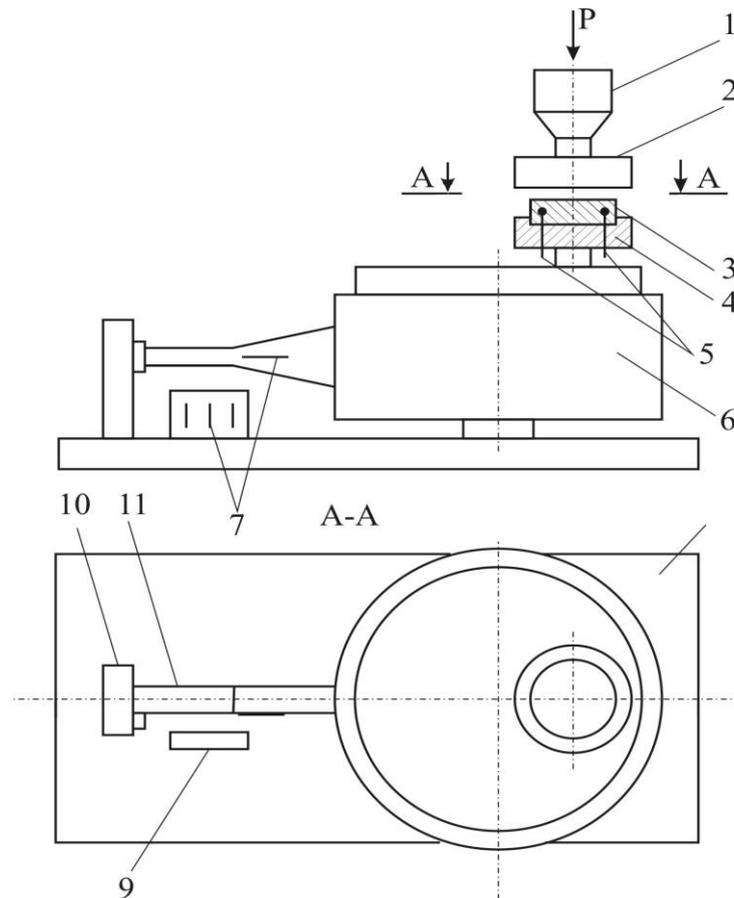


Рисунок 3.6 - Принципиальная схема установки для определения коэффициента трения и его молекулярной составляющей: 1 – патрон сверлильного станка, 2 – контртело, 3 – образец, 4 – держатель образца, 5 – термопары, 6 – барабан, 7 – тензорезисторы, 8 – основание, 9 – пластина компенсационных датчиков, 10 – упор, 11 – тензобалка, P – осевая нагрузка

Измерительная часть системы состоит из анализатора спектра типа А17-Т8, входные каналы которого соединены с тензометрическим контуром, а выходные – с персональным компьютером. Прибор А17-Т8 имеет 8

измерительных каналов. Он обеспечивает регистрацию и анализ сигналов с каждого канала одновременно в диапазоне от 0,1 до 10 кГц. Анализатор спектра оснащен встроенным генератором, позволяющим формировать сигналы специальной или произвольной формы. Тензометрический контур собран по 6-ти проводной мостовой схеме. Данная схема позволяет проводить требуемые измерения без тензометрического усилителя. Для функционирования системы необходимо использовать два входных канала аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) анализатора спектра. Первый канал (вход 1 АЦП) служит для измерения напряжения возбуждения $U_{воз} = U_{ген} + U_{пом}$, состоящего из $U_{ген}$ - напряжения встроенного генератора и $U_{пом}$ - напряжения помех, наведенного каким-либо внешним источником. Второй канал (вход 2 АЦП) необходим для замера суммы $U_{сум}$ непосредственно на измерительной части моста $U_{сум} = U_{ген} + U_{пом} + U_{изм}$.

Разница между значениями $U_{сум}$ и $U_{воз}$ является $U_{изм}$ - измерительным сигналом. Данные с анализатора спектра посредством шины USB 2.0 передаются на ПК, что в совокупности с применением программного комплекса ZetLab обеспечивает необходимую точность измерения.

Общая погрешность измерения:

$$\Delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta_i^2}, \quad (3.1)$$

где частные погрешности:

$\Delta_1 = 1\%$ - проволочных тензорезисторов;

$\Delta_2 = 1\%$ - соединительных проводов;

$\Delta_3 = 1\%$ - анализатора спектра;

$\Delta_4 = 1,5\%$ - обработки осциллограмм.

Таким образом, общая погрешность при определении коэффициента трения $K_{тр}$ составила:

$$\Delta = 2,5\%$$

Тарировка измерительного узла (тензобалки с проволочным тензорезистором) производилась с использованием анализатора спектра А17-

Т8, связанного с ПК. Она осуществлялась до начала экспериментов и после их завершения. На рисунке 3.7 приведена тарировочная характеристика, отражающая линейную зависимость сигнала измерения $U_{изм}$ от приложенной нагрузки F . Общий вид и тарировка установки представлены на рисунке 3.8.

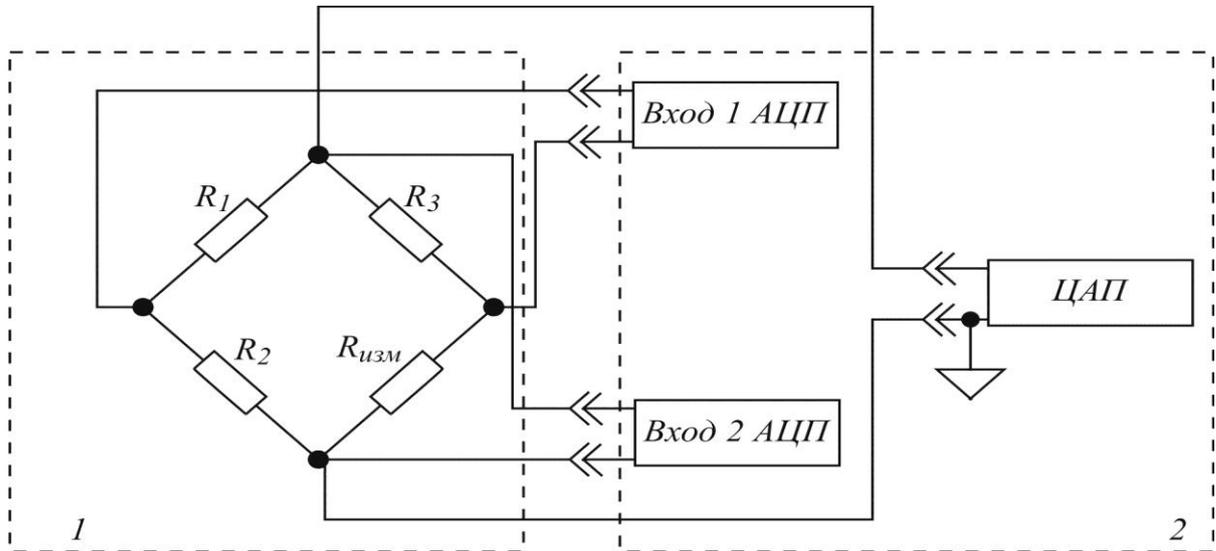


Рисунок 3.7 - Тарировочная характеристика: 1 – тензометрический измерительный контур, 2 - анализатор спектра

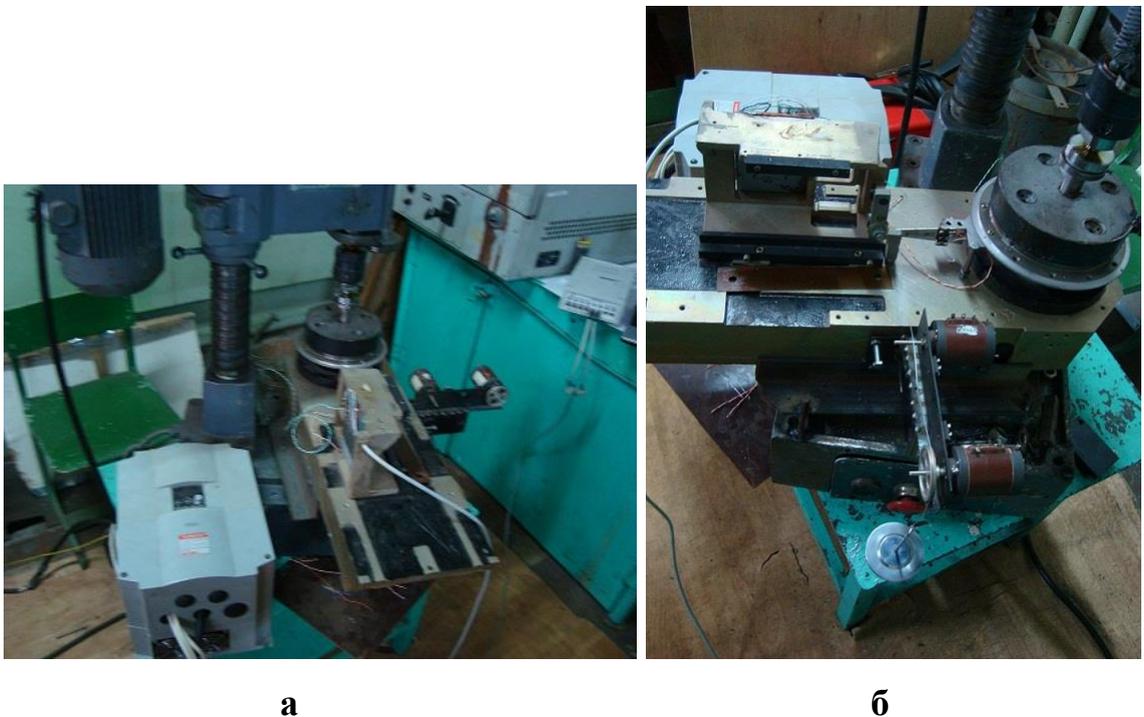


Рисунок 3.8 – Общий вид установки (а) и тарировка тензобалки (б)

Последовательность проведения эксперимента

1. Тарировка тензобалки.
2. Очистка рабочих поверхностей образцов и контртела.
3. Установка образцов в держатель и контртела в патрон сверлильного станка.
4. Нагружение вертикальной силой.
5. Выдержка образцов (образца) и контртела под нагрузкой.
6. Включение двигателя электропривода шпинделя станка через полупроводниковый преобразователь частоты производства «Веспер».
7. При повороте контртела на 180° двигатель выключается.
8. Осуществляется изъятие образцов (образца) из держателя (предварительно подняв контртело)
9. Проводится повторная тарировка тензобалки

При проведении пунктов 5 – 7 производится запись усилия с тензобалки на ПК. Перед испытанием со смазочным материалом (индустриальное масло) обезжиренные образцы выдерживаются в смазочном материале 10 – 20 минут. При повороте индентора относительно первоначального положения на 30° , 90° , 180° и более, сила, необходимая для вращения остается практически неизменной [48]. Поэтому при проведении экспериментов ограничивались углом поворота не более 180° .

В роле индентора при определении молекулярных составляющих коэффициента трения был принят шарик из стали ШХ15. Данный выбор был сделан в соответствии с ГОСТ 27640. Он включает в себя «метод определения прочности адгезионной (молекулярной) связи твердых тел при трении». Данный метод предопределяет измерение молекулярной составляющей коэффициента трения между образцами, изготавливаемыми из одинакового материала. Однако в нашем случае трение идет между двумя телами из разных материалов. Поэтому во время проведения исследований мы основывались на общепринятые методики [25, 46-49, 96], а не на ГОСТ 27640.

3.9 Планирование эксперимента по оптимизации режимов модифицирования МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO

Для наибольшего снижения коэффициента трения в соединении нам потребуется максимально возможное присутствие меди в пространстве между взаимодействующими поверхностями. Поэтому в качестве математической модели, описывающей зависимость коэффициента трения в подвижном соединении: «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO» от влияющих факторов, нами была выбрана статистическая регрессионная модель. Для получения адекватной модели был поставлен и проведён полный 2-уровневый 3-факторный эксперимент [2, 20, 23]. За параметр оптимизации Y приняли коэффициент трения после 10 часов испытаний под нагрузкой 2 МПа и скоростью скольжения поверхности контробразцов по поверхности образца – 1 м/с. На основании проведённых исследований и анализа научной литературы [16, 42, 57] в качестве основных факторов, которые влияют на коэффициент трения, были выбраны следующие:

X_1 – пористость МДО-покрытия, после первичной обработки, %;

X_2 – продолжительность вторичной обработки, сек.;

X_3 – содержание Na_2SiO_3 в растворе-носителе, г/л.

Выбор уровней и интервалов варьирования факторов осуществляли на основании результатов предварительных исследований (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Интервалы и уровни варьирования факторов

| Наименование факторов | Обозначения | Уровни варьирования | | | Интервал варьирования |
|---|-------------|---------------------|----------|---------|-----------------------|
| | | нижний | основной | верхний | |
| Сквозная пористость, % | X_1 | 4 | 8 | 12 | 4 |
| Продолжительность вторичной обработки, сек. | X_2 | 20 | 40 | 60 | 20 |
| Содержание Na_2SiO_3 в растворе-носителе, г/л | X_3 | 300 | 500 | 700 | 200 |

Чтобы построить стандартную матрицу планирования эксперимента натуральные значения уровней факторов переводили в кодовые безразмерные величины (кодировали) по формуле кодирования источника [20]:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}, \quad (3.2)$$

где X_i – кодовое значение i -го фактора;

x_i – натуральное текущее значение i -го фактора;

x_{i0} – основной уровень фактора;

Δx_i – интервал (полуинтервал) варьирования i -го фактора

$$\Delta x_i = \frac{x_{iMAX} - x_{iMIN}}{2}, \quad (3.3)$$

где x_{iMAX} и x_{iMIN} – соответственно, натуральные значения верхнего и нижнего уровней варьирования i -го фактора.

Для нижнего и верхнего уровней, кодированные значения факторов варьирования рассчитанные по формуле (3.2), соответственно равны: $X_i^{HV} = -1$; $X_i^{BV} = 1$.

В таблице 3.2 представлена матрица планирования эксперимента.

Для проводимого эксперимента уравнение регрессии, которое характеризует влияние трёх факторов (X_1, X_2, X_3) на коэффициент трения (Y), можно выразить в виде математического уравнения первого порядка [20]:

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.4)$$

Определение дисперсии параллельных опытов осуществляли по формуле [20]:

$$S_U^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{v=1}^n (y_{UV} - y_{UC})^2, \quad (3.5)$$

где n – количество параллельных опытов, принимаем минимально возможное количество $n=2$ [20];

y_{UV} – параметр оптимизации одного из параллельных опытов;

y_{uc} – среднее значение параметра оптимизации по параллельным опытам.

Оценку однородности дисперсий параллельных опытов проводили по критерию Кохрена [2, 20]:

$$G_p = \frac{S_{UMAX}^2}{\sum_{U=1}^N S_U^2}, \quad (3.6)$$

где N – количество независимых опытов ($N=8$, таблица 3.3).

Таблица 3.2 – Матрица планирования эксперимента

| № опыта | Пористость МДО-покрытия, X_1 | Продолжительность вторичной обработки, X_2 | Содержание Na_2SiO_3 , X_3 |
|---------|--------------------------------|--|--------------------------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | -1 | -1 | +1 |
| 3 | -1 | +1 | -1 |
| 4 | +1 | -1 | -1 |
| 5 | -1 | +1 | +1 |
| 6 | +1 | -1 | +1 |
| 7 | +1 | +1 | -1 |
| 8 | +1 | +1 | +1 |

Расчётный критерий G_p сравнивали с его табличным значением $G_{ТАБЛ}$, которые были определены в соответствии со степенями свободы: числителя $f_1 = n - 1$, знаменателя $f_2 = N$ при выбранном уровне значимости $\alpha = 0,05$ [20]. Если $G_p \leq G_{ТАБЛ}$, то гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов принимается и затем рассчитывается дисперсия воспроизводимости [20]:

$$S^2(y) = \frac{1}{N} \cdot \sum_{U=1}^N S_U^2 \quad (3.7)$$

Определение ошибки эксперимента проводили по формуле:

$$S(y) = \sqrt{S^2(y)} \quad (3.8)$$

Коэффициенты уравнения регрессии (3.3) определяли с использованием зависимостей [2, 20]:

$$b_0 = \frac{\sum_{U=1}^N X_0 \cdot y_{UC}}{N}, \quad b_i = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot y_{UC}}{N}, \quad (3.9)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot X_j \cdot y_{UC}}{N}, \quad b_{ijk} = \frac{\sum_{U=1}^N X_i \cdot X_j \cdot X_k \cdot y_{UC}}{N} \quad (3.10)$$

С помощью t -критерия (критерия Стьюдента) осуществлялась проверка статистической значимости коэффициентов уравнения (3.4) [20, 23]:

$$t_0 = \frac{|b_0|}{S(b_0)}, \quad t_i = \frac{|b_i|}{S(b_i)}, \quad t_{ij} = \frac{|b_{ij}|}{S(b_{ij})}, \quad t_{ijk} = \frac{|b_{ijk}|}{S(b_{ijk})}, \quad (3.11)$$

где $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijk}$ – коэффициенты уравнения регрессии;

$S(b_0), S(b_i), S(b_{ij}), S(b_{ijk})$ – ошибки коэффициентов уравнения регрессии.

$$S(b_0) = S(b_i) = S(b_{ij}) = S(b_{ijk}) = \frac{S(y)}{\sqrt{N \cdot n}} \quad (3.12)$$

Значения t -критериев, вычисленные по формулам (3.11), сравнивали с их табличными значениями. Их определение осуществляли с учётом числа степеней свободы $f_3 = N(n-1)$ и уровня значимости $\alpha = 0,05$. Статистически значимыми коэффициенты уравнения регрессии считали в том случае, если расчётное значение t -критерия выше его табличного значения [20, 23]. Если один из коэффициентов уравнения регрессии оказывался статистически незначимым, то он не учитывался без пересчёта остальных коэффициентов. Затем уравнение (3.4) представляли как уравнение регрессии с факторами и их взаимодействиями, которые имеют только значимые коэффициенты.

Оценку адекватности модели проводили при помощи F -критерия (критерия Фишера) [2, 20, 23]:

$$F_P = \frac{S_{AD}^2}{S^2(y)}, \quad (3.13)$$

где S_{AD}^2 – дисперсия адекватности.

$$S_{AD}^2 = \frac{n}{N - \lambda} \cdot \sum_{U=1}^N (y_{UC} - y_{UP})^2, \quad (3.14)$$

где λ – количество значимых коэффициентов уравнения регрессии;

y_{UP} – расчётное значение параметра оптимизации, который получен с использованием уравнения регрессии.

Критерий F_p сравнивали с его табличным значением $F_{ТАБЛ}$, которое выбрали в соответствии с принятым уровнем значимости $\alpha = 0,05$ и числом степеней свободы $f_{AD} = N - \lambda$, $f_E = N \cdot (n - 1)$. Если $F_p \leq F_{ТАБЛ}$, то гипотеза об адекватности модели принималась [2, 12, 20, 23]. Затем, полученная модель подвергалась дальнейшему анализу.

3.10 Сравнительная износостойкость подвижных соединений

Исследование сравнительной износостойкости поверхностей образцов проводили по ГОСТ 23.224 на машине трения МТУ-01 (ТУ 4271-001-290346000) (Рисунок 3.9), Способ испытаний предопределяет взаимное перемещение прижатых друг к другу испытуемых образцов. Перемещение происходит в смазочном материале под определенной нагрузкой. Схема контакта (Рисунок 3.10): торцы трех вращающихся роликов (контробразцы) и неподвижного диска (образца с МДО-покрытием).

Испытывались следующие подвижные соединения: «сталь 40Х – МДО-покрытие», «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO ».

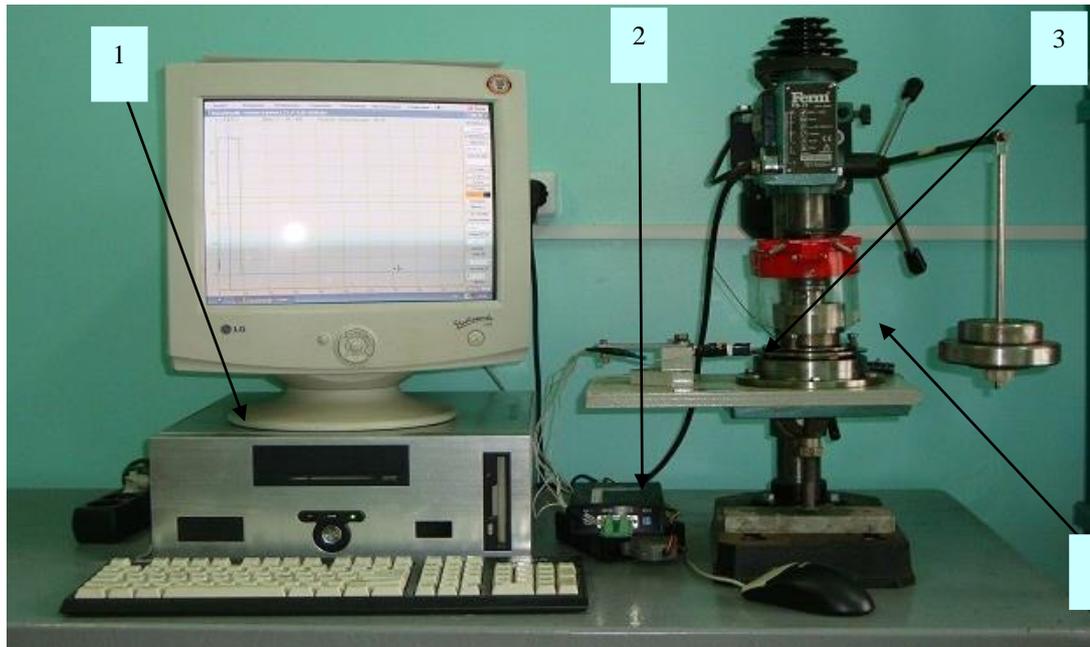


Рисунок 3.9 – Общий вид машины трения универсальной МТУ-01: 1 – ПК; 2 – предварительный усилитель и модуль АЦП; 3 – тензодатчик; 4 – испытуемое соединение

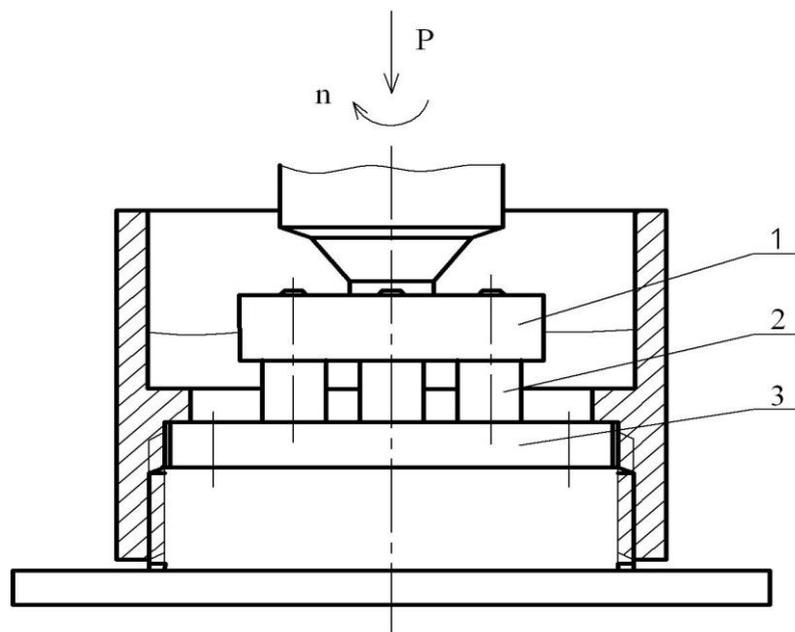


Рисунок 3.10 – Схема контакта образцов, испытываемых на машине трения МТУ-01: 1 – оправка для контрообразцов; 2 – контрообразец; 3 – образец

Материал для изготовления контрообразцов - сталь 40Х ГОСТ 4543, твердостью HRC 50...55 и шероховатостью рабочей поверхности $R_a=0,32$ мкм (Рисунок 3.10, поз. 2).

Материал для изготовления образцов (Рисунок 3.10, поз. 3) - сплав АК7ч. Формирование оксидокерамических покрытий способом МДО осуществляли на торцевой поверхности образцов, затем их шлифовали до удаления рыхлого слоя и шероховатости $R_a=0,32\dots 0,63$ мкм. Пористость МДО-покрытий изменяли, варьируя температурой электролита. Затем на поверхность МДО-покрытия с пористостью 12% наносили раствор-носитель и высушивали его. Затем, используя способ дугового электрофореза, частицы нанопорошка CuO включали в состав МДО-покрытий. Выбор материалов основывался на том, что они широко применяются для изготовления деталей гидроцилиндров, а также различных корпусных и других деталей сельскохозяйственной техники. В дальнейшем, для чистоты эксперимента материал для изготовления образцов не изменяли.

Исследования проводили следующим образом. В начале проводили приработку испытуемых соединений, при постепенном изменении нагрузки от 20 до 200 Н с интервалом 20 Н. Окончание приработки фиксировали по стабилизации силы трения в зоне контакта образца с контрообразцами. Контроль силы трения осуществляли при помощи тензодатчика (Рисунок 3.9, поз. 3). Приработку проводили с использованием масла индустриального - 20 ГОСТ 20779.

Испытание образцов на изнашивание длилось 50 ч, при этом контактное давление составляло 2 МПа, а скорость скольжения 1,0 м/с, данные параметры выбраны в соответствии с ГОСТ 16514. Испытания проводили в смазочной среде - масло индустриальное – 20 по ГОСТ 20779. Суммарный износ образцов и контрообразцов по массе определяли взвешиванием на лабораторных весах Setra E-500 (Рисунок 3.11), с погрешностью не более 0,002 г.



Рисунок 3.11 – Общий вид лабораторных весов Setra E-500

Перед взвешиванием на весах образец и контрообразцы (Рисунок 3.12 позиции *a* и *б* соответственно) тщательно промывали в течение 15 минут в бензоле, после этого высушивали в течение 40 минут в сушильном шкафу СНОЛ-16, при этом температура воздуха в нем составляла 60...70°C. Затем их охлаждали в течение 30 мин в эксикаторе. Контроль износ осуществляли через каждые 10 часов проведенных испытаний. За эталон сравнения принималось подвижное соединение «сталь 40Х – МДО-покрытие».

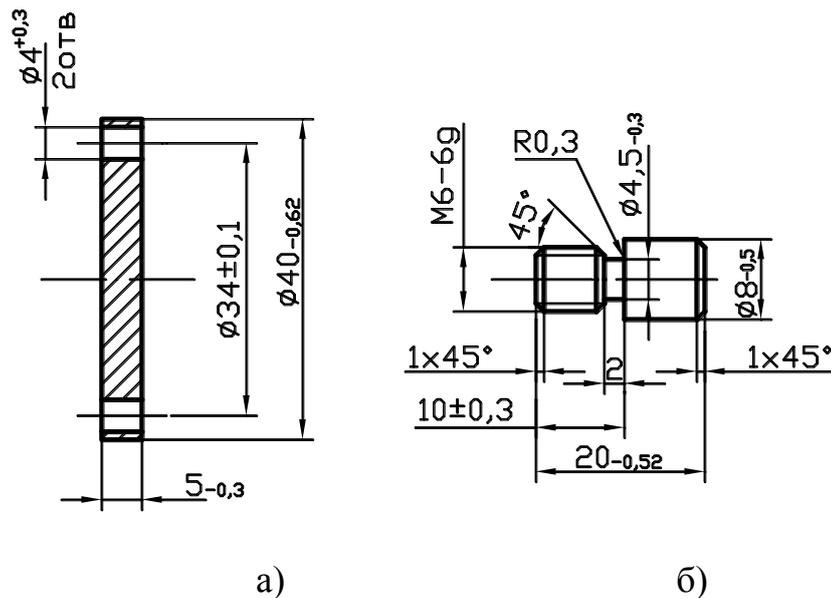


Рисунок 3.12 – Общий вид образца (а) и контрообразца (б) для исследования подвижных соединений

Скорость изнашивания подвижного соединения определяли исходя из формулы:

$$V = \frac{I_K + I_O}{T}, \frac{\text{мг}}{\text{ч}}, \quad (3.15)$$

где I_K – износ контртела, мг;

I_O – износ образца, мг;

T – продолжительность испытаний, ч.

Износостойкость подвижного соединения вычисляли по формуле:

$$U = \frac{1}{V}, \frac{\text{ч}}{\text{мг}} \quad (3.16)$$

3.11 Проведение эксплуатационных испытаний

Цель эксплуатационных испытаний состояла в сравнительной оценке износостойкости подвижных соединений: корпус гидроцилиндра - поршень, рабочая поверхность которого имела МДО-покрытие, модифицированное частицами нанопорошка CuO , в сравнении с аналогичными серийными изделиями.

Условия испытаний соответствовали рядовой эксплуатации. Режимы нагрузки и скорости взаимодействия рабочих поверхностей, а также рабочие жидкости соответствовали рекомендациям заводов производителей гидроцилиндров, а также ГОСТ 16514 и ГОСТ 18464. Для получения достоверных данных на испытания были установлены двенадцать экспериментальных деталей. Контроль количества рабочих ходов гидроцилиндров осуществлялся при помощи бесконтактных датчиков СМ12 и регистратора РМ-2201.

Износ зеркала цилиндра в ходе проведения испытаний определяли с помощью индикаторного нутромера ГОСТ 9244, а износ ответных рабочих поверхностей - поршней гидроцилиндров определяли микрометром ГОСТ 4381. Выбор плоскостей измерения осуществляли в соответствии с ГОСТ 18509.

3.12 Выводы

1. Разработана программа научных исследований, которая предусматривает последовательность решения сформулированных в главе 1 задач, связанных с экспериментальными исследованиями.

2. Представлены приборы и оборудование для проводимых экспериментальных научных исследований и методики их проведения.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

4.1 Микродуговое оксидирование алюминиевого сплава АК7ч (первичная обработка)

Толщина МДО-покрытий является их важнейшей характеристикой, напрямую влияющей на износостойкость восстановленных и упрочнённых деталей. Вместе с тем в электролите типа «КОН- Na_2SiO_3 » МДО-покрытие, относительно действительного размера детали, формируется не только внутрь оксидируемого сплава (внутренний упрочнённый слой), но и наружу (внешний упрочнённый слой). Это позволяет компенсировать её износ. В связи с этим представляется целесообразным рассматривать влияние режимов МДО (плотности тока, продолжительности оксидирования и температуры электролита) на изменение толщины внешнего упрочнённого слоя МДО-покрытия, который должен компенсировать износ одной из деталей в подвижном соединении.

Из литературных источников [36, 56, 119] известно, что наиболее рациональная плотность тока, позволяющая формировать МДО-покрытия с большой скоростью и значительной толщиной в электролите типа «КОН- Na_2SiO_3 », составляет 25 А/дм². При её уменьшении мощность и, соответственно, температура МДР на единице площади оксидируемого алюминиевого сплава снижаются, что приводит к снижению толщины и скорости формирования МДО-покрытия, главным образом, его внешнего упрочнённого слоя. С увеличением плотности тока до 30 А/дм² и более, уже после 20...30 мин. оксидирования МДР сменяются мощными дуговыми разрядами (ДР), которые начинают разрушать сформированное МДО-покрытие с образованием на его поверхности глубоких кратеров. Необходимая продолжительность оксидирования должна составлять не менее 30 мин, так как в противном случае не обеспечиваются достаточная толщина и равномерность МДО-покрытия. Известно, что температура

электролита при оксидировании должна находиться в интервале 15...60°C, так как поддержание её ниже 15°C достаточно сложно осуществить технически и нецелесообразно с экономических позиций [36, 56, 118]. Увеличение температуры электролита более 60°C приводит к существенному снижению стабильности последнего и увеличивает его испарение при МДО [26, 64, 72, 96].

Исследования показали, что с увеличением температуры электролита, сквозная пористость МДО-покрытия возрастает (Рисунок 4.1). Полученная зависимость согласуется с данными других ученых, работающих в области получения и использования МДО-покрытий [26, 64, 73, 97].

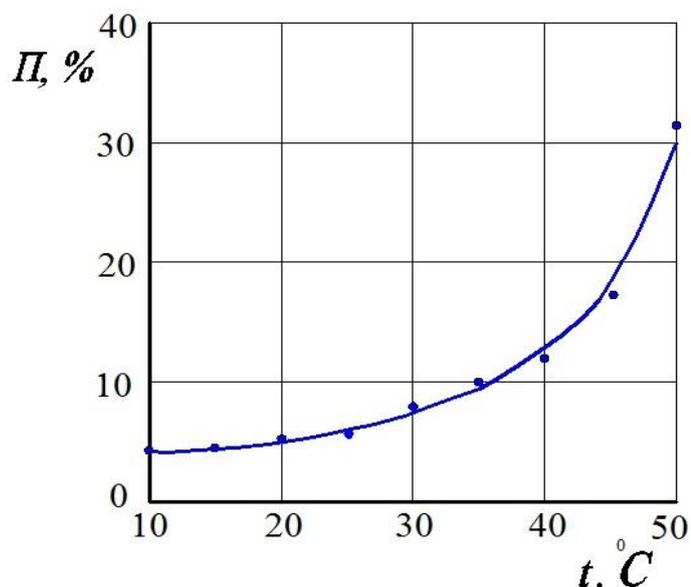


Рисунок 4.1 – Влияние температуры электролита t на сквозную пористость P МДО-покрытия при $D_T=25$ А/дм²; $T=80$ мин; $C_{\text{КОН}}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л

Обоснование содержания химических компонентов в рассматриваемом электролите (при первичной обработке) представлено в главе 3. Целесообразно использовать их следующее содержание: КОН=2 г/л, $\text{Na}_2\text{SiO}_3=10$ г/л. Плотность тока при МДО равна 25 А/дм². При создании в МДО-покрытии необходимой пористости для последующего модифицирования частицами нанопорошка CuO (Рисунок 4.1), температура

электролита должна поддерживаться на уровне 40°C. В этом случае сквозная пористость МДО-покрытия не превышает 12 %. Увеличение сквозной пористости упрочненного слоя выше этого значения может привести к потере несущей способности МДО-покрытия [36, 105]. Продолжительность оксидирования на данных режимах МДО и сплаве АК7ч, была определена экспериментальным путем. Она составила 80...90 мин. При большей продолжительности оксидирования МДР переходят в ДР, что отрицательно влияет на микротвердость и качество МДО-покрытия.

Таким образом по результатам проведенных литературных [40, 118] и собственных экспериментальных исследований при соотношении катодного и анодного токов $I_K/I_A=1,0$ рекомендуются следующие рациональные параметры МДО: содержание компонентов электролита, г/л: КОН -2, Na_2SiO_3 -10, остальное – вода дистиллированная; режимы МДО: плотность тока - 25 А/дм², продолжительность МДО – 80...85 мин. Для получения необходимой для вторичной обработки сквозной пористости МДО-покрытия температура электролита должна поддерживаться на уровне 40°C. При использовании выше указанных рациональных параметров МДО необходимая для вторичной обработки сквозная пористость МДО-покрытия составит 12%. Толщина внешнего упрочнённого слоя МДО-покрытия (после удаления технологического) составит 65...70 мкм (на сторону) при общей толщине упрочненного слоя 125 мкм. Микротвердость МДО-покрытия составит 10 ГПа.

4.2 Приготовление раствора-носителя нанопорошка CuO

В качестве связующего компонента раствора-носителя нами был выбран компонент электролита Na_2SiO_3 . Исследования по выявлению оптимального состава раствора-носителя нанопорошка CuO показали, что высокое содержание связующего компонента негативно сказывается на микротвердости и качестве уже сформированного МДО-покрытия [34, 35, 42, 54, 56, 119]. Так как при вторичной обработке Na_2SiO_3 оказывается в

большом количестве в зоне горения ИР, которые способствуют его кристаллизации и соединению с упрочненным слоем. В итоге образуется нежелательное соединение МДО-покрытия с кристаллами диоксида кремния (α -кварца), образовавшимися из Na_2SiO_3 (Рисунок 4.3). При этом микротвердость упрочненного слоя уменьшается на 15...30%.

Опытным путем установлено, что оптимальной концентрацией Na_2SiO_3 в растворе-носителе является соотношение 1/1 по массе от дистиллированной воды. При их меньшем соотношении раствор-носитель растекается по поверхности образца и не выполняет свою функцию по фиксации нанопорошка CuO на модифицируемой поверхности.

Кроме этого в роли фиксатора в растворе-носителе пробовали использовать крахмал. Однако он оказал негативное влияние на образование ИР. В работе [95] это объясняется тем, что крахмал замедляет их действие и делает более редкими и меньшей мощности.

Использование в растворе-носителе порошка CuO с фракцией 1...5 мкм при вторичной обработке дуговым электрофорезом не дало ожидаемых результатов. При вторичной обработке порошок не проникал в поры МДО-покрытия и практически полностью растворялся в электролите. Как было установлено в литературном обзоре (глава 1) это связано с размером пор в упрочненном слое.

В связи с этим было решено использовать нанопорошок CuO с фракцией 80...100 нм. Количество нанопорошка CuO в растворе-носителе определяли экспериментальным путем. Его оптимальное количество составило 160 г/л раствора (силикат натрия – дистиллированная вода). При меньшей концентрации нанопорошок распределяется неравномерно по МДО-покрытию. При превышении указанной концентрации он быстро оседает, и в растворе образуются комки, что при вторичной обработке оказывает негативное влияние на равномерное распределение нанопорошка CuO по поверхности МДО-покрытия.

Необходимая толщина наносимого раствора-носителя нанопорошка CuO перед вторичной обработкой МДО-покрытия составляет 60...80 мкм. Большая толщина экономически нецелесообразна, так как избыток раствора-носителя не оказывает существенного влияния на заполнение нанопорошком CuO пор в упрочненном слое. Он просто растворяется в электролите при вторичной обработке. Меньшая толщина технически сложно выполнима.

Способом отверждения раствора-носителя была выбрана сушка на открытом воздухе, при температуре 20...25°C. При более быстром отверждении в образующейся пленке появляются трещины и сколы, что способствует частичному отслаиванию отвержденного раствора-носителя еще до начала вторичной обработки. Отсюда вытекает нецелесообразность применения ускоренной сушки раствора-носителя в печах и сушильных камерах. Продолжительность сушки раствора-носителя нанопорошка CuO должна составлять 30...50 мин. Данный интервал объясняется тем, что при меньшей продолжительности сушки раствор-носитель не имеет достаточной вязкости для удержания наночастиц CuO на МДО-покрытии, и при опускании образца в электролитическую ванну нанопорошок в течение 1 мин. переходит в состав электролита. Если продолжительность сушки раствора-носителя CuO будет больше рекомендованного нами интервала, то Na₂SiO₃ полностью отвердеет, что негативно скажется на образовании ИР на поверхности МДО-покрытия при вторичной обработке за счет диэлектрических свойств отвердевшего Na₂SiO₃.

4.3 Дуговой электрофорез МДО-покрытия (вторичная обработка)

Целью вторичной обработки является расплавление ИР частиц нанопорошка CuO, находящегося на поверхности МДО-покрытия в отвержденном растворе-носителе, и включение их во внешний упрочненный слой в зонах сквозных и тупиковых пор. В связи с этим концентрация

компонентов электролита для вторичной обработки МДО-покрытия должна быть существенно ниже, чем при первичной обработке. Опытным путем установлено, что целесообразно применять электролит со следующей концентрацией компонентов: $\text{KOH}=0,5\dots1$ г/л, а $\text{Na}_2\text{SiO}_3=1\dots2$ г/л. Такой выбор концентрации KOH объясняется тем, что это минимально необходимое содержание данного вещества в электролите для образования ИР. Больше его количество способствует более быстрому переходу в состав электролита раствора-носителя нанопорошка CuO , что негативно сказывается на удержании частиц нанопорошка CuO на модифицируемой поверхности. Рекомендуемое количество Na_2SiO_3 в электролите используется также для поддержания горения ИР, так как приращение толщины МДО-покрытия не требуется. Кроме этого эксперименты показали, что использование при вторичной обработке электролита с более высоким содержанием Na_2SiO_3 приводит к разрушению уже имеющегося МДО-покрытия (Рисунок 4.2) при эксплуатации восстановленной и упрочненной детали, а также к нежелательным образованиям на модифицируемой поверхности диоксида кремния (α -кварца) (Рисунок 4.3), что весьма затрудняет закрепление частиц нанопорошка CuO в порах МДО-покрытия.

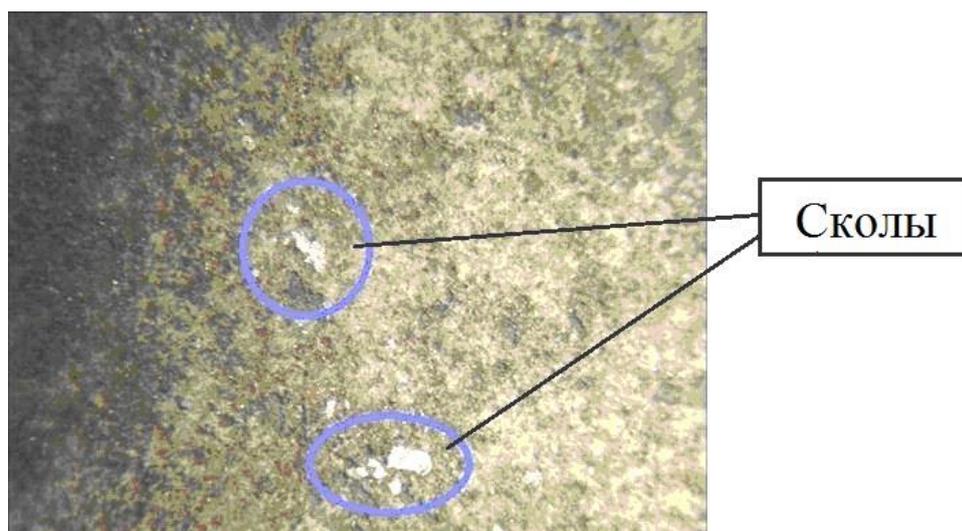


Рисунок 4.2 – Сколы на модифицированном частицами нанопорошка CuO МДО-покрытии, образующиеся при эксплуатации восстановленной и упрочненной детали, $\times 25$



Рисунок 4.3 – Образование диоксида кремния (α -кварца) на поверхности МДО-покрытия при вторичной обработке, $\times 25$

Ранее в пункте 2.2 указывалось, что для определения силы тока в точках начала и окончания вторичной обработки необходимо определение составляющих сопротивления и емкости. Проведенные исследования показали, что емкость МДО-покрытия составляет $C=0,015$ мкФ, тогда как в работе [68] указывается $0,008$ мкФ, данное расхождение связано с различной толщиной МДО-покрытия. Произведение $R_{\sigma}C$, указанное в п 2.2, уравнение (2.25) можно определить из формулы [88]:

$$R_{\sigma} C = p_v \alpha E \epsilon \epsilon_0, \quad (4.1)$$

где p_v – удельное объемное сопротивление МДО-покрытия, Ом·м;

α - коэффициент пропорциональности роста МДО-покрытия, м/В;

$\epsilon \epsilon_0$ - диэлектрическая проницаемость материала пленки и вакуума соответственно;

E - напряженность электрического поля в МДО-покрытии, В/м.

По нашим данным $p_v=3,1$ МОм·см, тогда как в работе [88] получено значение $p_v=3,8$ МОм·см. Получившееся расхождение объясняется большей пористостью нашего МДО-покрытия.

После подстановки найденных значений в формулу 2.25 было

получено, что значение силы тока (из расчета обрабатываемой поверхности площадью $0,42 \text{ дм}^2$) составляет $9,40 \dots 9,46 \text{ А}$ для начала вторичной обработки и $8,19 \dots 8,27 \text{ А}$ для окончания вторичной обработки. Полученные экспериментальные значения выше расчетных на $4,3\%$ и 5% соответственно. Это связано с тем, что расчетные значения были определены исходя из минимума потребности в силе тока, а также сделанных допущений. Как показали эксперименты для стабильности протекания процесса дугового электрофореза необходимо повысить плотность тока до 25 А/дм^2 , что составит превышенное расчетное значение на 10% .

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить, что оптимальная продолжительность вторичной обработки при модифицировании МДО-покрытия составляет 1 мин . Это подтверждает предположения сделанные в пункте 2.2 диссертационной работы. Продолжительность стабилизации силы тока составляет около 40 секунд . Однако в электролите в этот момент рядом с поверхностью обрабатываемой детали находятся в большом количестве частицы нанопорошка CuO . Поэтому для более полного заполнения пор МДО-покрытия продолжительность вторичной обработки необходимо увеличить еще на 20 секунд . Этого времени достаточно для полного расплавления и включения в состав МДО-покрытия наночастиц CuO , находящихся на внешней поверхности упрочненного слоя. В тоже время, увеличение продолжительности вторичной обработки более 1 минуты также приводит к нежелательным последствиям (Рисунок 4.3). Температура электролита при дуговом электрофорезе должна составлять $15 \dots 20^\circ\text{C}$. При более высоких ее значениях интенсифицируется процесс перехода наночастиц CuO из раствора-носителя в электролит.

Анализ полученных опытных данных позволяет сделать вывод о том, что рациональные состав раствора-носителя нанопорошка CuO и электролита, а также режимы вторичной обработки при модифицировании

МДО-покрытия, сформированного на детали из алюминиевого сплава АК7ч, позволяющие включать во внешний упрочненный слой наибольшее количество частиц нанопорошка CuO будут следующими: раствор-носитель - по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na₂SiO₃ + 3 части дистиллированной воды; КОН – 0,5 г/л, Na₂SiO₃ – 2 г/л, плотность тока – 25 А/дм², продолжительность дугового электрофореза – 1 мин., температура электролита – 20 °С. При этом толщина внешнего упрочнённого слоя МДО-покрытия после дугового электрофореза остается неизменной и составляет 65...70 мкм. Измерения микротвердости до и после вторичной обработки дуговым электрофорезом показали, что данный показатель МДО-покрытия не изменяется и составляет 10 ГПа.

4.4 Работоспособность электролита

Для формирования МДО-покрытий при первичной обработке алюминиевого сплава АК7ч важен показатель работоспособности электролита, то есть, в течение какой продолжительности возможно формирование упрочненного слоя с требуемыми свойствами без замены электролита. Эксперименты показали, что в процессе МДО происходит обеднение электролита. Это отрицательно влияет на свойства формируемых МДО-покрытий. Для определения причин, которые приводят к снижению показателя микротвердости сформированных МДО-покрытий на сплаве АК7ч, нами были проведены исследования изменения рН электролита, имеющего в своем составе 2 г/л КОН и 10 г/л Na₂SiO₃. Плотность тока в процессе МДО составляла 25 А/дм², а температура электролита поддерживалась на уровне 40°С. Микротвердость МДО-покрытия измерялась с его поверхности, сошлифованной до толщины 60 мкм. Эксперименты показали, что при оксидировании в течение 12...15 А·ч/л показатель рН электролита снижается незначительно. Для сформированных на данном этапе МДО-покрытий характерно незначительное снижение микротвердости.

Последующее формирование МДО-покрытия приводит к интенсивному снижению рН электролита и соответственно микротвердости упрочненного слоя (Таблица 4.1). Необходимо отметить, что в процессе МДО образуется осадок белого, он наблюдается на дне электролитической ванны. Это указывает на протекание химических процессов на поверхности оксидируемого образца и в объеме электролита.

Таблица 4.1 – Влияние продолжительности оксидирования при первичной обработке на рН электролита и микротвердость МДО-покрытия при $D_T=25 \text{ А/дм}^2$; $C_{\text{KOH}}=2 \text{ г/л}$; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10 \text{ г/л}$; $t=40^\circ\text{C}$.

| | | | | | | |
|------------------------------------|----|------|------|------|-----|-----|
| Продолжительность оксидирования, ч | 3 | 6 | 9 | 12 | 15 | 18 |
| Микротвердость МДО-покрытия, ГПа | 10 | 9,8 | 9,5 | 9,1 | 8,4 | 7,6 |
| рН электролита | 12 | 11,8 | 11,4 | 10,9 | 10 | 8,8 |

При МДО происходит постепенное обеднение электролита ионами Na^+ , SiO_3^{2-} и обогащается ионами AlO_2^- , что приводит к снижению его рН. Электролит обедняется щелочью и становится насыщенным гидроксидом алюминия. В следствии этого ухудшаются свойства упрочненного слоя, и нормальное протекание процесса МДО становится невозможным [36, 117]. Таким образом, к снижению работоспособности электролита и микротвердости упрочненного слоя приводят: включение компонентов электролита в состав МДО-покрытия, образование труднорастворимых осадков и нейтрализация щелочи.

Анализ полученных данных показывает, что оптимальная работоспособность электролита, содержащего 2 г/л KOH и 10 г/л Na_2SiO_3 при значениях температуры электролита 40°C и плотности тока 25 А/дм^2 , может составить 12 А·ч/л. После этого микротвердость упрочненного слоя начинает существенно снижаться. Сохранение работоспособности электролита при

первичной обработке осуществимо за счет поддержания начального значения рН электролита, для этого следует удалить из него гидроксид алюминия и добавить требуемое количество щелочи [36].

4.5 Определение содержания меди на модифицированной поверхности МДО-покрытий

Исследование поверхности модифицированных нанопорошком CuO МДО-покрытий на содержание меди по толщине упрочненного слоя проводили на многоканальном рентгеновском спектрометре СРМ-35. Результаты представлены в таблице 4.2, градуировочная кривая для стандартного образца приведена в приложении Б. В связи с тем, что присутствие меди по всей толщине упрочненного слоя не требуется, проведение исследований осуществлялось на глубину не превышающую 15 мкм.

Таблица 4.2 – Содержание меди на поверхности модифицированного нанопорошком CuO МДО-покрытия пористостью 12%

| № п/п опыта | Глубина шлифования от поверхности модифицированного МДО-покрытия, мкм | Набор импульсов за 20 сек. | Содержание Cu на поверхности, % |
|-------------|---|----------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0 | 3022701 | 6,55 |
| 2 | 5 | 1013837 | 2,95 |
| 3 | 10 | 599362 | 1,29 |
| 4 | 15 | 572062 | 1,23 |

Как видно из таблицы 4.2 поры в МДО-покрытии заполняются медью не на 100%, они также заполняются компонентом электролита и раствора носителя нанопорошка CuO, то есть оксидом кремния (SiO₂). Это также подтверждают снимки поверхности образцов после вторичной обработки,

которые были сделаны на электронном сканирующем микроскопе «Hitachi TM-1000» (Рисунок 4.4).

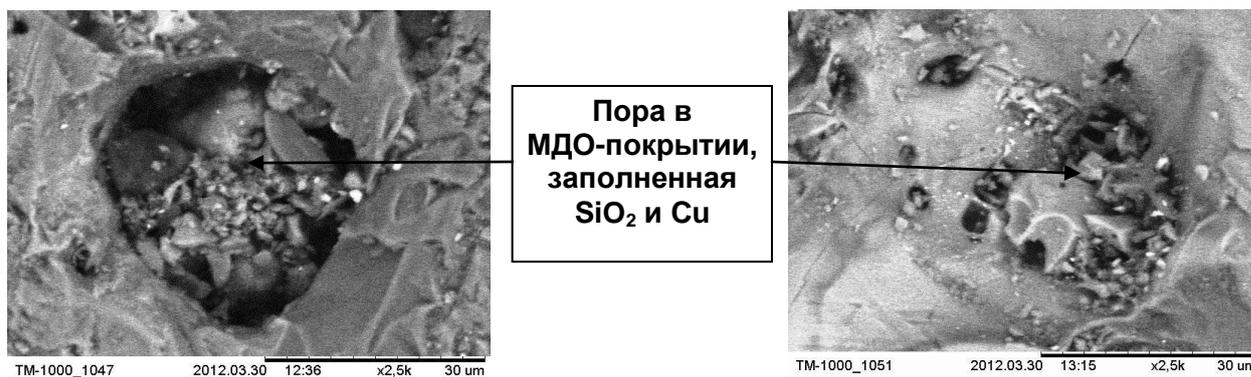


Рисунок 4.4 – Заполненные поры в МДО-покрытии после вторичной обработки, x2500

4.6 Определение коэффициента трения и его молекулярной составляющей в подвижных соединениях с МДО-покрытиями

При определении коэффициента трения исследовались следующие подвижные соединения:

- 1) сталь 40Х – МДО-покрытие;
- 2) сталь 40Х – МДО-покрытие со сквозной пористостью 8%, модифицированное CuO ;
- 3) сталь 40Х – МДО-покрытие со сквозной пористостью 12%, модифицированное CuO .

Нагрузка на индентор для каждой пары трения составляла: 125 Н; 240 Н; 340 Н. При данных нагрузках также определялась молекулярная составляющая коэффициента трения. Результаты измерений выводились на экран ПК посредством прибора А17-Т8 и аналогово-цифрового преобразователя (АЦП). График изменения коэффициента трения для одного из образцов в зависимости от нагрузки, приведен на рисунке 4.5.

Pattern 45, shipment #1



Рисунок 4.5 – График изменения общего коэффициента трения для пары трения «сталь 40X – МДО-покрытие» в зависимости от нагрузки, где результаты измерений соответствуют: 1 – при 125 Н; 2- при 240 Н; 3 – 340 Н

Полученные значения коэффициента трения были усреднены, и для простоты восприятия представлены в виде диаграмм (Рисунки 4.6 и 4.7).

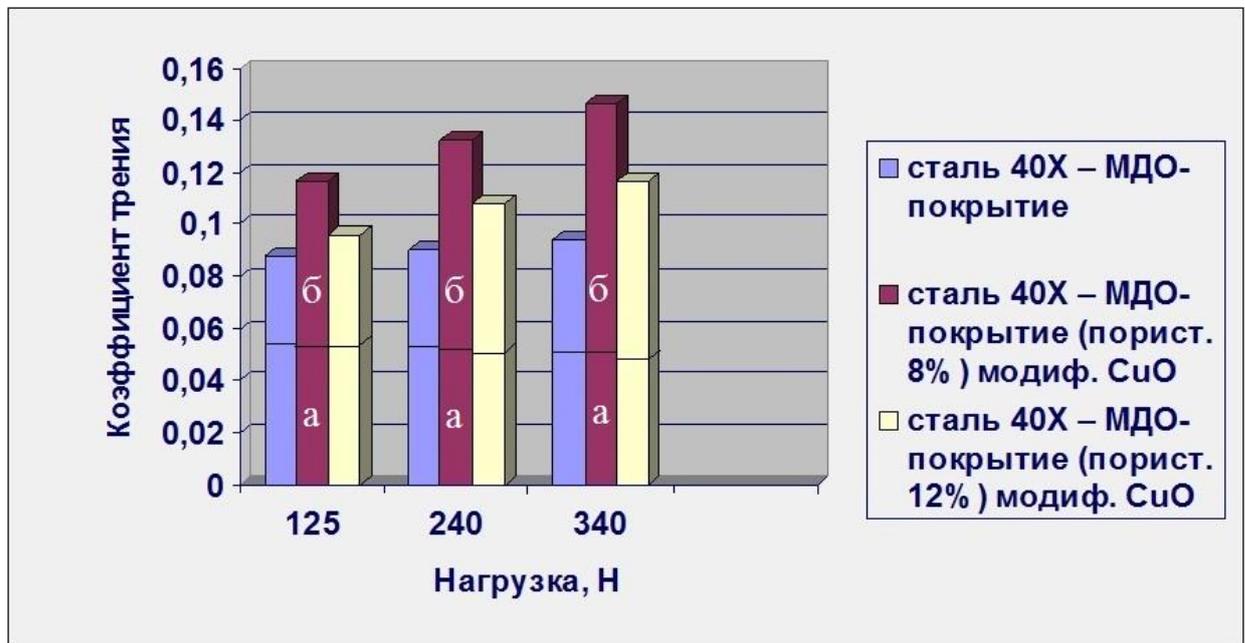


Рисунок 4.6 – Значения коэффициента трения для различных пар трения до их приработки в зависимости от нагрузки, где а – молекулярная составляющая, б - механическая

Как видно из рисунка 4.6 с ростом нагрузки механическая составляющая коэффициента трения для всех пар трения увеличивается, а молекулярная составляющая незначительно уменьшается. Это характерно для таких пар трения (упругий контакт). Также из полученных данных следует, что общий коэффициент трения в паре трения «сталь 40X – МДО-покрытие» имеет более низкие значения, чем у остальных. Это объясняется тем, что при одинаковом для всех параметре шероховатости R_a , параметр шероховатости S у других пар трения увеличен за счет модифицирования пор частицами нанопорошка CuO (Рисунок 4.4).

Из рисунка 4.7 видно что после приработки и испытаний в течении 50 часов значения коэффициента трения для всех пар трения снизились. Наибольшее снижение произошло на паре трения «сталь 40X – МДО-покрытие со сквозной пористостью 12%, модифицированное CuO ». Из рисунка 4.7 также следует, что молекулярная составляющая коэффициента трения снизилась незначительно. Это подтверждает наши теоретические предположения сделанные в пункте 2.3 диссертационной работы.

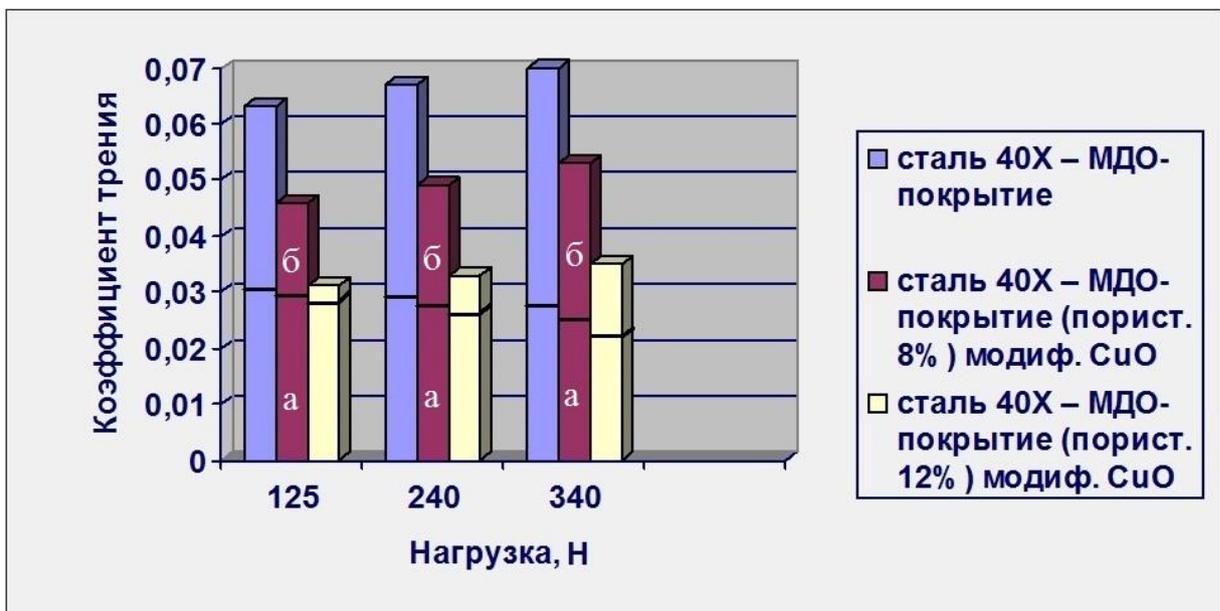


Рисунок 4.7 – Значения коэффициента трения для различных пар трения в зависимости от нагрузки, после приработки и 50 ч испытаний, где а – молекулярная составляющая, б – механическая составляющая

4.7 Сравнительные испытания на износостойкость

Для установления влияния частиц нанопорошка CuO, после модифицирования МДО-покрытия, на износостойкость подвижного соединения были проведены сравнительные испытания, в ходе которых контролировался коэффициент трения в соответствии с планированием эксперимента. В качестве примера была выбрана пара трения «поршень – стенка гидроцилиндра». Для изготовления данных деталей применяют, соответственно, литейный алюминиевый сплав АК7ч и сталь 40Х. Контактное давление при взаимодействии контробразцов из стали с поверхностью образца с МДО-покрытием составляло 2 МПа. Данное значение соответствует, рекомендациям заводов производителей гидроцилиндров и требованиям ГОСТ 16514. Для ускорения проведения испытаний на изнашивание, а также в соответствии с ГОСТ 16514 скорость скольжения контробразцов по поверхности образца с МДО-покрытием была выбрана 1 м/с.

В соответствии с пунктом 3.10 настоящей работы в качестве параметра оптимизации Y был принят коэффициент трения после 10 часов испытаний подвижного соединения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO». Образцы оксидировали с использованием следующих режимов: плотность тока – 25 А/дм², продолжительность оксидирования – 90 мин., температура электролита – 20...40°С. Содержание компонентов КОН в электролите составляло 2 г/л, а Na₂SiO₃ - 10 г/л. Режимы вторичной обработки были следующими. Содержание КОН в электролите составляло 0,5 г/л, а Na₂SiO₃ - 2 г/л, продолжительность сушки раствора-носителя составляла 50 мин., содержание Na₂SiO₃ в растворе-носителе составляло 300...700 г/л с интервалом 200 г/л. Продолжительность вторичной обработки от 20 до 60 секунд с интервалом 20 секунд. Это позволяло формировать упрочненные слои с разным содержанием Си в модифицированном МДО-покрытии. Результаты исследований сведены в таблицу 4.3.

Критерий Кохрена, который определялся по формуле (3.6), равен:

$$G_P = \frac{0,0000045}{0,000011} = 0,409$$

Табличное значение критерия Кохрена $G_{ТАБЛ}$, которое было определено для уровня значимости $\alpha = 0,05$ при числе степеней свободы $f_1 = 2 - 1 = 1$ и $f_2 = 8$, имеет значение 0,679 [12]. Мы имеем $0,409 < 0,679$, тогда дисперсии параллельных опытов однородны. Следовательно дисперсия воспроизводимости будет:

$$S^2(y) = \frac{0,000011}{8} = 0,000001375$$

При этом ошибка эксперимента будет:

$$S(y) = \sqrt{0,000001375} = 0,0012$$

Таблица 4.3 – Результаты исследований по влиянию основных факторов на коэффициент трения в подвижном соединении

| № опыта | Результаты исследований | | Среднее значение $y_{\text{ср}}$ | S_y^2 |
|----------|-------------------------|----------|----------------------------------|-----------|
| | y_{U1} | y_{U2} | | |
| 1 | 0,072 | 0,070 | 0,0710 | 0,000002 |
| 2 | 0,070 | 0,071 | 0,0705 | 0,0000005 |
| 3 | 0,071 | 0,068 | 0,0695 | 0,0000045 |
| 4 | 0,042 | 0,043 | 0,0425 | 0,0000005 |
| 5 | 0,068 | 0,066 | 0,0670 | 0,000002 |
| 6 | 0,041 | 0,040 | 0,0405 | 0,0000005 |
| 7 | 0,039 | 0,040 | 0,0395 | 0,0000005 |
| 8 | 0,038 | 0,037 | 0,0375 | 0,0000005 |
| Σ | | | 0,438 | 0,000011 |

По формулам (3.9) и (3.10) находим коэффициенты уравнения регрессии, после этого оно примет следующий вид:

$$Y = 0,055 - 0,015X_1 - 0,0014X_2 - 0,0009X_3 - 0,00013X_1X_2 - 0,00013X_1X_3 - 0,00025X_2X_3 + 0,00025X_1X_2X_3$$

Определили ошибки коэффициентов уравнения регрессии по формуле (3.12), они равны:

$$S(b_0) = S(b_i) = S(b_{ij}) = S(b_{ijk}) = \frac{0,0012}{\sqrt{8 \cdot 2}} = 0,0003$$

С учетом t-критерия осуществляем проверку статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии. Расчётные значения t-критериев, которые были определены с помощью формул (3.11), сведены в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Расчётные значения t-критериев для коэффициентов уравнения регрессии

| t_{b_0} | t_{b_1} | t_{b_2} | t_{b_3} | $t_{b_{12}}$ | $t_{b_{13}}$ | $t_{b_{23}}$ | $t_{b_{123}}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| 183,3 | 50 | 4,7 | 3 | 0,4 | 0,4 | 0,8 | 0,8 |

Табличное значение t-критерия, при указанных выше уровне значимости и числе степеней свободы, составит 2,306 [12]. Значения представленные в таблице 4.2 указывают на то, что расчётные значения t-критерия для коэффициентов b_0 , b_1 , b_2 , и b_3 численно превосходят его табличное значение. Отсюда следует, что эти коэффициенты обладают статистической значимостью. При этом коэффициенты b_{12} , b_{13} , b_{23} , и b_{123} не обладают статистической значимостью, поэтому исключаются из уравнения регрессии. Тогда уравнение регрессии предстанет в следующем виде:

$$Y = 0,055 - 0,015X_1 - 0,0014X_2 - 0,0009X_3$$

Проводим проверку полученного уравнения на адекватность. Результаты проведенных расчётов дисперсии адекватности сведены в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Результаты расчёта дисперсии адекватности

| № опыта | y_{UC} | y_{UP} | $y_{UC} - y_{UP}$ | $(y_{UC} - y_{UP})^2$ |
|---------|----------|----------|-------------------|-----------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 0,0710 | 0,0723 | -0,0013 | 0,0000017 |

Продолжение таблицы 4.5

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------|--------|--------|---------|----------------------|
| 2 | 0,0705 | 0,0705 | 0 | 0 |
| 3 | 0,0695 | 0,0695 | 0 | 0 |
| 4 | 0,0425 | 0,0423 | 0,0002 | 0,00000004 |
| 5 | 0,0670 | 0,0677 | 0 | 0 |
| 6 | 0,0405 | 0,0405 | 0 | 0 |
| 7 | 0,0395 | 0,0395 | 0 | 0 |
| 8 | 0,0375 | 0,0377 | -0,0002 | 0,00000004 |
| Σ | | | | $1,78 \cdot 10^{-6}$ |

С учётом полученных данных S_{AD}^2 (формула 3.14) примет вид:

$$S_{AD}^2 = \frac{2}{8-4} \cdot 1,78 \cdot 10^{-6} = 0,89 \cdot 10^{-6}$$

Следовательно расчётное значение F -критерия составит:

$$F_p = \frac{0,89 \cdot 10^{-6}}{1,375 \cdot 10^{-6}} = 0,65$$

Значение F -критерия, которое было определено как табличное для уровня значимости $\alpha = 0,05$ при числе степеней свободы $f_{AD} = 8 - 4 = 4$ и $f_E = 8(2 - 1) = 8$, составит 3,8 [12]. Мы имеем $0,65 < 3,8$, отсюда следует, что модель адекватна. Полученная модель с достаточной точностью характеризует влияние факторов ($X1$, $X2$ и $X3$) на изменение коэффициента трения соединения «сталь 40X – МДО-покрытие модифицированное CuO».

Анализ уравнения регрессии и полученные результаты показывают, что наибольшее влияние на снижение коэффициента трения в подвижном соединении оказывает пористость МДО-покрытия и продолжительность вторичной обработки. Наилучший результат по снижению коэффициента трения достигается с использованием МДО-покрытия сквозной пористостью 12% модифицированном частицами нанопорошка CuO. В дальнейшем исследования износостойкости подвижных соединений проводили с их использованием.

Испытания на износостойкость испытуемых подвижных соединений показали (Рисунок 4.8), что в паре трения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO» приработка трущихся поверхностей идет быстрее, чем у пары «сталь 40Х – МДО-покрытие». Кроме этого было установлено, что коэффициент трения у подвижных соединений с модифицированным МДО-покрытием значительно меньше, чем с обычным МДО-покрытием. Это подтверждает наши теоретические предположения, сделанные в главе 2, что медь выполняет роль антифрикционного материала.

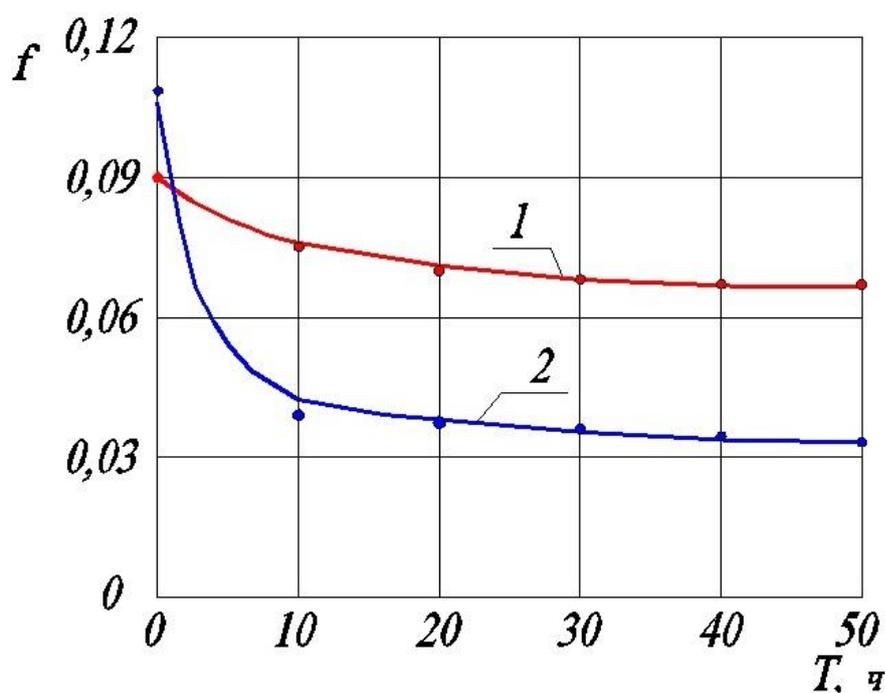


Рисунок 4.8 – Изменение коэффициента трения в подвижных соединениях: 1 – «сталь 40Х – МДО-покрытие»; 2 – «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO»

Проведенные в течение 50 часов испытания показали, что износостойкость подвижного соединения «сталь 40Х - МДО-покрытие модифицированное CuO» в 1,5...2 раза выше, чем у эталонной пары трения «сталь 40Х - МДО-покрытие», (Рисунок 4.9). Износ образцов с МДО-покрытием как с модифицированием CuO, так и без него был на протяжении всех испытаний достаточно мал и к концу испытаний не превысил 3% по массе.

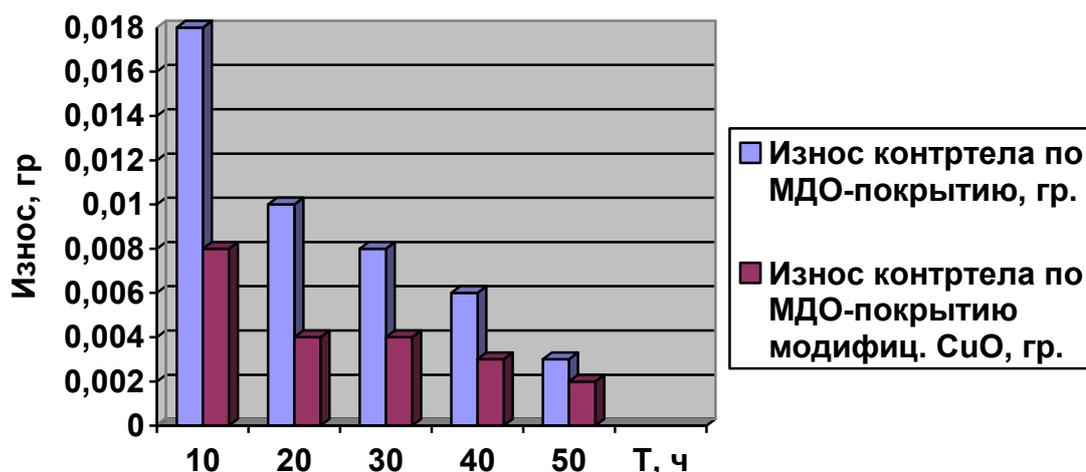


Рисунок 4.9 – Диаграмма износа контробразцов из стали 40Х в ходе испытаний на износостойкость, $P=2$ МПа.

Скорость изнашивания при испытаниях определяли по формуле 3.15. Для подвижного соединения «сталь 40Х – МДО-покрытие»:

$$V_1 = 4,5/50 = 0,09 \text{ мг/ч.}$$

Для подвижного соединения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO»:

$$V_2 = 2,1/50 = 0,042 \text{ мг/ч.}$$

Износостойкость испытуемых пар трения, определенная по формуле 3.16, составила:

$$U_1 = 1/0,09 = 11,11 \text{ ч/мг;}$$

$$U_2 = 1/0,042 = 23,81 \text{ ч/мг.}$$

Проведенный комплекс научных исследований позволил установить, что рациональные составы электролитов для МДО и дугового электрофореза, режимы двухступенчатой обработки и состав раствора-носителя наночастиц CuO, обеспечивающих наименьший износ испытуемых подвижных соединений, следующие: **первичная обработка:** $D_T=25 \text{ А/дм}^2$; $T=90$ мин; $C_{\text{KOH}}=2 \text{ г/л}$; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10 \text{ г/л}$; $t=40^\circ\text{C}$; **вторичная обработка:** $D_T=25 \text{ А/дм}^2$;

$T=1$ мин; $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л; $t=20^\circ\text{C}$; **раствор-носитель:** по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды. При использовании рекомендуемых составов электролитов для МДО и дугового электрофореза, режимов двухступенчатой обработки и состава раствора-носителя нанопорошка CuO износостойкость испытуемых подвижных соединений с МДО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка CuO в 1,5...2 раза выше, а коэффициент трения в 1,9...2 раза ниже, чем у аналогичных подвижных соединений без модифицирования упрочненного слоя, принятых за эталон сравнения.

4.8 Сравнительные эксплуатационные испытания гидроцилиндров Ц-75

Для сравнения долговечности восстановленных МДО-покрытиями и модифицированными наночастицами CuO серийных поршней гидроцилиндров с диаметром рабочей части $\varnothing 75$ мм были проведены их эксплуатационные испытания. Целью данных испытаний являлась - сравнительная оценка износостойкости подвижных соединений «корпус цилиндра - поршень» восстановленных по предлагаемой технологии и серийных гидроцилиндров. На навеску тракторов МТЗ-80 и ЮМЗ-6, а также на сеялки СЗ-3,6 и культиваторы КПС было установлено в общей сложности по 12 предлагаемых и серийных гидроцилиндров Ц-75. Испытания соответствовали условиям рядовой эксплуатации. Измерения рассматриваемых рабочих поверхностей осуществляли после определённой наработки.

У представленных для испытаний экспериментальных гидроцилиндров Ц-75 (Рисунок 4.10) поршни были восстановлены и упрочнены МДО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка CuO , сформированными на следующих режимах: **первичная обработка:** $D_t=25$ А/дм²; $T=90$ мин; $C_{\text{KOH}}=2$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л; $t=40^\circ\text{C}$; **вторичная обработка:**

$D_T=25$ А/дм²; $T=1$ мин; $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л; $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л; $t=20^\circ\text{C}$; **раствор-носитель:** по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды.

Сравнительные эксплуатационные испытания показали, что при наработке поршня 100...110 км, составляющей 20% от гарантированной заводом-изготовителем, износостойкость испытуемых подвижных соединений с восстановленными и упрочненными МДО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка CuO была в 2 раза выше, чем у аналогичных подвижных соединений в серийных гидроцилиндрах Ц-75. Результаты испытаний были подтверждены соответствующими протоколами (приложение В). В связи с этим, разработанные нами рациональные составы электролитов для МДО и дугового электрофореза, режимы двухступенчатой обработки и состав раствора-носителя нанопорошка CuO можно рекомендовать к внедрению в ремонтное и машиностроительное производство для повышения износостойкости и долговечности подвижных соединений деталей, изготовленных из алюминиевого сплава АК7ч.



а



б

Рисунок 4.10 – Общий вид установленного гидроцилиндра Ц-75, восстановленного и упрочненного по разрабатываемой комбинированной технологии: (а) – на навеске трактора ЮМЗ-6, (б) – на культиваторе КПС-4

4.9 Выводы

1. Для первичной обработки алюминиевого сплава АК7ч оптимальные толщина, микротвёрдость и пористость упрочнённого слоя при соотношении катодного и анодного токов 1,0 обеспечиваются использованием электролита на основе дистиллированной воды, содержащем 2 г/л КОН и 10 г/л Na_2SiO_3 , и режимами МДО : плотность тока – 25 А/дм², продолжительность оксидирования – 90 мин., температура электролита – 40°С. В этом случае толщина упрочненного слоя (после удаления технологического) составит – 65...70 мкм на сторону. Микротвердость МДО-покрытия – 10 ГПа. Сквозная пористость упрочнённого слоя составит не более 12%.

2. Рациональные состав раствора-носителя частиц нанопорошка CuO и электролита, а также режимы вторичной обработки МДО-покрытий, сформированных на деталях из алюминиевого сплава АК7ч, позволяющие включать во внешний упрочненный слой наибольшее количество частиц нанопорошка CuO будут следующими: раствор-носитель - по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды; КОН – 1 г/л, Na_2SiO_3 – 2 г/л, плотность тока – 25 А/дм² (соответствует расчетному значению), продолжительность дугового электрофореза – 1 мин., температура электролита – 20°С. При этом толщина упрочнённого слоя МДО-покрытия после дугового электрофореза останется неизменной и составит 65...70 мкм. Микротвердость МДО-покрытия до и после вторичной обработки дуговым электрофорезом не изменяется и составляет 10 ГПа.

3. Долговечность электролита при первичной обработке зависит от режимов МДО и продолжительности оксидирования. Она составляет около 12 ч, после чего требуется его корректировка.

4. Содержание меди в порах МДО-покрытия модифицированного частицами нанопорошка CuO составляет 60%, а остальные 40% занимают кристаллы α -кварца.

5. Коэффициент трения до приработки в эталонной паре трения «сталь 40Х – МДО-покрытие» на 5...7% ниже, чем для пары трения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO». После приработки и испытаний в течении 50 часов для пары трения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO» коэффициент трения становится в 1,9...2 раза ниже чем у эталонной пары трения. Что свидетельствует о появлении «третьего тела» между взаимодействующими поверхностями.

6. Износостойкость подвижного соединения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO» в 1,5...2 раза выше, чем у подвижного соединения «сталь 40Х – МДО-покрытие».

7. Эксплуатационные испытания показали, что при наработке поршней 100...110 км, составляющей 20% от гарантированной заводом-изготовителем, износостойкость испытуемых подвижных соединений с восстановленными и упрочненными МДО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка CuO деталями была в 2 раза выше, чем у аналогичных подвижных соединений в серийных гидроцилиндрах Ц-75.

5 ПРЕДЛАГАЕМАЯ КОМБИНИРОВАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ С УПРОЧНЕНИЕМ И МОДИФИЦИРОВАНИЕМ МДО-ПОКРЫТИЯ ЧАСТИЦАМИ НАНОПОРОШКА CuO

5.1 Технологический процесс восстановления с упрочнением поршня гидроцилиндра из алюминиевого сплава АК7ч МДО-покрытием модифицированным частицами нанопорошка CuO

Максимальный износ поршня гидроцилиндра серии Ц-75 достигает 0,12 мм на диаметр. Проведенный комплекс научных исследований позволил разработать и предложить ремонтному производству технологию восстановления с упрочнением МДО и модифицированием МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO поршней гидроцилиндров. Технология разработана на примере поршня гидроцилиндра Ц-75. Она включает в себя следующие основные операции: очистку, дефектацию, механическую обработку, обезжиривание, МДО, промывку в воде, сушку, нанесение раствора-носителя CuO , дуговой электрофорез, финишную механическую обработку, очистку, заключительный контроль, сортировку, маркирование, упаковку (Рисунок 5.1).

При поступлении поршня в ремонт, предварительно удалив резинотехнические уплотнения, его тщательно очищают от масла и продуктов износа с помощью моечной машины с использованием моющего раствора типа МС или Лабомид (20...30 г/л). Деталь промывают под давлением моющим раствором, при этом его температура должна составлять 70...80°C. Очистку поршня ведут до полного удаления загрязнений. Затем деталь высушивают.

После очистки и сушки, поршень гидроцилиндра дефектуют. При этом измеряют износ рабочей поверхности поршня, осматривают его для выявления трещин, сколов и задиров. При обнаружении трещин и сколов деталь не подлежит восстановлению (бракуется).

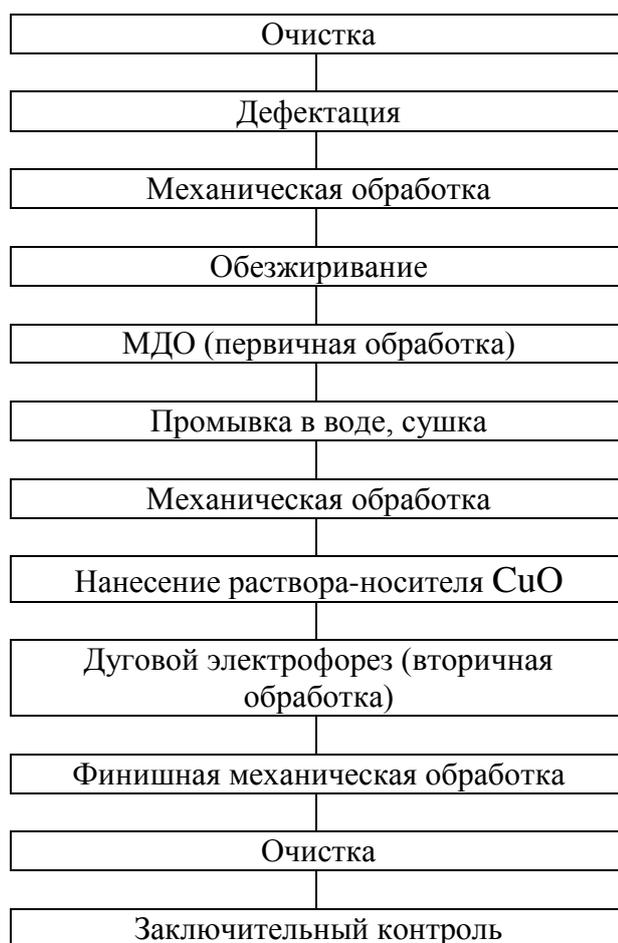


Рисунок 5.1 – Структурная схема технологического процесса восстановления с упрочнением МДО и модифицированием МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO поршня гидроцилиндра

После дефектации поршень гидроцилиндра подвергается механической обработке. На кругло-шлифовальном станке 3А161 шлифуют его рабочую поверхность. Шлифование проводится в 2 этапа: предварительное и чистовое. Износ детали устраняют предварительным шлифованием. После установки и закрепления поршня и шлифовального круга 14А50СМ1К 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781 его проводят на следующих режимах: окружная скорость вращения детали – 30 м/мин, окружная скорость вращения абразивного круга – 35 м/с, поперечная подача – 0,01 мм/об. детали, глубина шлифования – 0,025...0,060 мм. Затем проводят чистовое шлифование кругом 24А25СМ2К 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781 до шероховатости $R_a=0,63$ на следующих режимах: окружная скорость вращения детали – 20

м/мин, окружная скорость вращения абразивного круга – 35 м/с, поперечная подача – 0,005 мм/об. детали, глубина шлифования – 0,005 мм.

После механической обработки поршень гидроцилиндра подвергается повторной очистке, а затем обезжириванию. Обезжиривание проводят в водном растворе, содержащем 5...10 г/л NaOH, 40..50 г/л Na₃PO₄ и 3...5 г/л Na₂SiO₃. Оно проходит при температуре 60...70°С с продолжительностью 1,5 минуты [16, 39]. Далее поршень промывается водой, нагретой до температуры 40...50° С, и обдувается сжатым воздухом.

Затем следует МДО (первичная обработка) рабочей поверхности поршня гидроцилиндра. После закрепления поршня на подвеске оксидирование осуществляют в электролите со следующим содержанием компонентов: КОН – 2 г/л, Na₂SiO₃ – 10 г/л. Режимы МДО: плотность тока – 25 А/дм², температура электролита – 40°С, продолжительность оксидирования – 90 мин. Увеличение размеров поршня в диаметре составляет 120...130 мкм. При проведении данной операции целесообразно использовать ванный способ оксидирования. Для увеличения производительности процесса МДО рекомендуется использовать специальное устройство (Рисунок 5.2), при помощи которого можно оксидировать сразу несколько поршней гидроцилиндров [16, 39]. Оно включает в себя электролитическую ванну 1 и подвеску, состоящую из электрода 2 и поперечины 5. Восстанавливаемые поршни поочередно устанавливают на электрод 2, разделяя их между собой шайбами 3 и 4. Эти шайбы также служат для защиты поверхностей не подлежащих МДО. В канавки на рабочих поверхностях поршней устанавливают защитные полукольца 8. Затем электрод 2 закрепляют на поперечине 5 при помощи гаек 13 и 14, после чего собранную подвеску крепят к ванне 1 при помощи передвижных втулок 6, фиксируемых на поперечине 5 винтами 10 и гайками 12. После этого электрод 2 и корпус электролитической ванны 1 соединяют с токопроводами, включают подачу электролита, охлаждающей жидкости и ИТТ установки МДО.

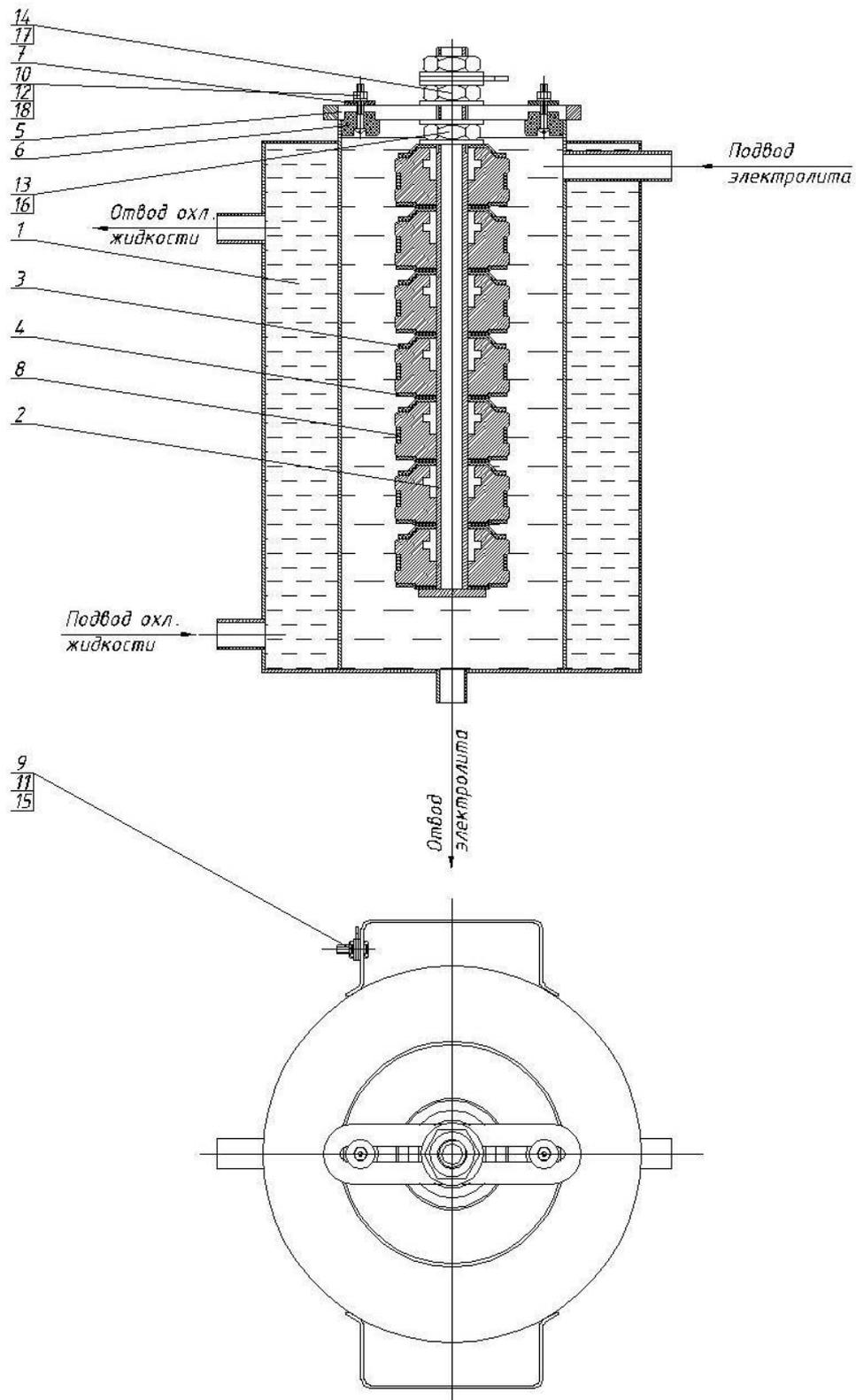


Рисунок 5.2 – Схема устройства для МДО поршней гидроцилиндров: 1 - электролитическая ванна; 2 – электрод; 3,4 – защитные шайбы; 5 – поперечина; 6 – втулка; 7 – опорная шайба; 8 – защитные полукольца; 9 – болт; 10 – винт; 11-14 – гайки; 15-18 - шайбы

После МДО поршни снимают с подвески, удаляют остатки герметика,

используемого для фиксации защитных шайб и полуколец, промывают проточной водой и обдувают сжатым воздухом.

Затем механической обработкой удаляется технологический слой МДО-покрытия. Его снимают с помощью эластичного абразивного инструмента, он состоит из лепестков шлифовальной шкурки, которые закреплёны между двумя дисками [13, 30, 39, 73]. При обработке задействуется только периферийная часть лепестков шкурки. Шлифование осуществляется за счет вращения инструмента. Далее поршень подвергают чистовому шлифованию в необходимый размер на кругло-шлифовальном станке 3А161. При этом используют круг 54С25СТ1К 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781 обработку производят на следующих режимах: окружная скорость вращения детали – 20 м/мин, окружная скорость вращения абразивного круга – 35 м/с, поперечная подача – 0,005 мм/об. детали, глубина шлифования – 0,005...0,010 мм.

Далее поршень очищают и обезжиривают. Затем на рабочую поверхность поршня наносится раствор-носитель нанопорошка CuO , при этом раствор-носитель имеет следующие пропорции компонентов по массе: 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды. После нанесения раствора-носителя он высушивается на открытом воздухе в течении 50 минут. Далее поршень гидроцилиндра подвергается дуговому электрофорезу (вторичной обработке) в электролитической ванне с электролитом следующего состава: KOH – 0,5 г/л, Na_2SiO_3 – 2 г/л. Режимы вторичной обработки следующие: плотность тока – 25 А/дм², продолжительность обработки – 1 мин., температура электролита – 15...20°С. Необходимо отметить, что вторичная обработка детали должна проводиться только ванным способом, так как при использовании способа с проточной циркуляцией электролита будет интенсифицироваться процесс растворения раствора-носителя нанопорошка CuO .

После вторичной обработки поршень гидроцилиндра промывают в проточной воде и обдувают сжатым воздухом. Затем проводят финишную

механическую обработку. Рабочую поверхность поршня подвергают притирке в необходимый размер и шероховатость на вертикально-доводочном станке 3807В. При этом используют притирочный порошок из карбида бора зернистостью М40. Обработку производят с частотой вращения шпинделя – 110 об/мин. Необходимо отметить, что для восстановления рабочей поверхности зеркала гидроцилиндра можно использовать железнение или метод ДРД.

Карта разработанного технологического процесса восстановления с упрочнением изношенных рабочих поверхностей поршня гидроцилиндра Ц-75 за счёт применения комбинированной технологии МДО с последующим модифицированием дуговым электрофорезом МДО-покрытия нанопорошком CuO представлена в приложении Г. Готовая деталь представлена на рисунке 5.3.



Рисунок 5.3 – Поршень гидроцилиндра Ц-75 восстановленный и упрочненный за счёт применения комбинированной технологии МДО с последующим модифицированием МДО-покрытия частицами нанопорошка CuO

5.2 Экономическая эффективность разработанной комбинированной технологии

При расчёте использовали методики [65, 66]. В расчетах учитывали, что на данный момент при ремонте гидроцилиндров используется метод

ремонтных размеров, то есть при критическом износе поршня его заменяют новым. За базовую была принята технология восстановления с упрочнением МДО. В новой комбинированной технологии к ней дополнительно была добавлена вторичная обработка с последующим шлифованием.

5.2.1 Расчеты по базовой технологии восстановления

Экономическую эффективность применения базовой технологии (МДО) определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_B = \left(\frac{C_H - C_{\text{ост}}^H}{P_H} - \frac{C_B - C_{\text{ост}}^B}{P_{BB}} \right) \cdot P_{BB}, \text{ руб.}, \quad (5.1)$$

где C_H, C_B – цена новой и восстановленной деталей, соответственно, руб.;

$C_{\text{ост}}^H, C_{\text{ост}}^B$ – остаточная стоимость после эксплуатации новой и восстановленной деталей, соответственно, руб.;

P_H, P_{BB} – наработка новой и восстановленной детали, соответственно, км.

Стоимость покупки нового поршня для ремонта гидроцилиндра Ц-75 составляет 305 руб. Для определения цены восстановленной по базовой технологии детали рассчитываем себестоимость ее восстановления (C_{BB}) по формуле:

$$C_{BB} = ЗП + C_M + C_{ИЗ} + C_{\mathcal{E}} + ОПУ, \text{ руб.}, \quad (5.2)$$

где $ЗП$ – заработная плата (основная и дополнительная) производственным рабочим с начислениями, руб.;

C_M – стоимость ремонтных материалов, применяемых при восстановлении, руб.;

$C_{ИЗ}$ – стоимость изношенной детали (стоимость ремонтного фонда), руб.;

$C_{\mathcal{E}}$ – затраты на силовую электроэнергию, руб.;

$ОПУ$ – расходы, связанные с организацией производства и управления, руб.

Основную и дополнительную заработную плату рабочих определяли по формуле:

$$ЗП = \sum_{i=1}^N \frac{T_{Hi} \cdot C_{Pi}}{60} \cdot K_{П} \cdot K_{Д} \cdot K_{С}, \text{ руб.}, \quad (5.3)$$

где T_{Hi} – норма времени на выполнение i -ой операции технологического процесса восстановления поршня гидроцилиндра Ц-75, мин.;

N – количество операций технологического процесса, шт.;

C_{Pi} – часовая тарифная ставка рабочего, занятого на выполнении i -ой операции технологического процесса восстановления поршня гидроцилиндра, руб./ч;

$K_{П}$ – коэффициент, учитывающий премиальную доплату ($K_{П}=1,1 \dots 1,4$);

$K_{Д}$ – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату (оплата отпусков, компенсаций, дежурств и др.) ($K_{Д}=1,1 \dots 1,5$);

$K_{С}$ – коэффициент, учитывающий отчисления в фонды социального страхования ($K_{С}=1,26$).

Результаты расчёта основной заработной платы $ЗП_о$, с учетом обработки сразу нескольких деталей (операции 05, 20, 25) сведены в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты расчёта основной заработной платы рабочих

| № операции | Наименование операции | Норма времени на выполнение, мин. | Часовая тарифная ставка, руб. | Заработная плата за операцию, руб. |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 05 | Очистная | 1 | 45,5 | 0,76 |
| 10 | Дефектовочная | 2,8 | 60 | 2,8 |
| 15 | Шлифовальная | 3 | 60 | 3 |
| 20 | Очистная | 1 | 45,5 | 0,76 |

Продолжение таблицы 5.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------|--------------|------|----|-------|
| 25 | МДО | 12,8 | 50 | 10,67 |
| 30 | Шлифовальная | 3 | 60 | 3 |
| 35 | Контрольная | 3 | 60 | 3 |
| ΣP_o | | | | 24 |

$$\Sigma П = 24 \cdot 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,26 = 43,55 \text{ руб.}$$

Затраты на силовую электроэнергию определяли по формуле:

$$C_{\text{э}} = \sum_{i=1}^m N_{\text{п}i} \cdot T_{P_i} \cdot C_{\text{эл}}, \text{ руб.}, \quad (5.4)$$

где $N_{\text{п}i}$ – мощность, потребляемая оборудованием i -го вида, кВт;

m – количество оборудования, потребляющего электроэнергию, шт;

$C_{\text{эл}}=3$ руб – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

Результаты расчёта затрат на электроэнергию сведены в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Результаты расчёта затрат на электроэнергию

| Наименование оборудования | Потребляемая мощность, кВт | Время работы, ч | Затраты на электроэнергию, руб. |
|------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1. Машина моечная | 3,0 | 0,03 | 0,3 |
| 2. Установка МДО | 10,0 | 0,21 | 6,3 |
| 3. Станок круглошлифовальный | 4,5 | 0,1 | 1,35 |
| $C_{\text{эл}}$ | | | 7,95 |

Затраты на ремонтные материалы определяют по формуле:

$$C_M = \sum_{i=1}^k g_i \cdot C_i, \text{ руб.}, \quad (5.5)$$

где g_i – норма расхода i -го материала, кг.;

C_i – цена 1 кг i -го материала, руб.;

k – количество материалов, используемых при восстановлении, шт.

Результаты расчёта затрат на ремонтные материалы, с учетом работоспособности электролита (пункт 4.4), сведены в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Результаты расчёта затрат на ремонтные материалы

| Наименование материала | Норма расхода, кг/дет. | Цена 1 кг материала, руб. | Затраты на материалы, руб. |
|--|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1. КОН | 0,0025 | 80 | 0,2 |
| 2. Na_2SiO_3 (обезжиривание + МДО) | 0,016 | 26 | 0,42 |
| 3. Герметик | 0,05 | 350 | 17,5 |
| 4. Моющее средство типа «Лабомид» | 0,06 | 43 | 2,58 |
| 5. NaOH | 0,01 | 34 | 0,34 |
| 6. Na_3PO_4 | 0,04 | 39 | 1,56 |
| C_M | | | 22,6 |

Затраты на организацию и управление производством составляют 200% фонда оплаты труда рабочих:

$$C_{OY} = 2 \cdot ЗП_o, \text{руб.} \quad (5.6)$$

Подставляем значение $ЗП_o$ в формулу 5.6 и получим:

$$C_{OY} = 2 \cdot 24 = 48 \text{ руб.}$$

Стоимость изношенного поршня определяли по цене металлолома:

$$C_{ИЗ} = C_L \cdot M, \text{руб.}, \quad (5.7)$$

где C_L – цена лома, руб./кг;

M – масса изношенной детали, кг.

$$C_{ИЗ} = 25 \cdot 0,4 = 10 \text{ руб.}$$

Таким образом, себестоимость восстановления с упрочнением поршня гидроцилиндра Ц-75 по базовой технологии составит:

$$C_{ВБ} = 43,55 + 7,95 + 22,6 + 48 + 10 = 132,1 \text{ руб.}$$

Цену реализации восстановленной по базовой технологии детали принимаем на 30% превышающую себестоимость ее восстановления:

$$C_{BB}=132,1+39,63=171,73 \text{ руб. } \approx 172 \text{ руб.}$$

Учитывая результаты сравнительных испытаний на износостойкость, а также результаты эксплуатационных испытаний, было установлено, что при увеличении износостойкости поршня гидроцилиндра за счет восстановления с упрочнением по базовой технологии долговечность подвижного соединения остается такой же как при использовании новой детали. Это связано с тем, что стенка гидроцилиндра при использовании восстановленной детали (МДО) начинает более интенсивно изнашиваться. По достижении предельного состояния при неизменных размерах восстановленного поршня его придется заменить на новый большего диаметра. Таким образом, ресурс гидроцилиндра Ц-75 с поршнем, восстановленным и упрочненным по базовой технологии в сравнении с установкой нового поршня окажется одинаков ($P_H = P_{BB}$). Согласно данным ЗАО ТПК «СтройДорМаш – Орел» $C_{OCT}^H = C_{OCT}^B = 10 \text{ руб.}$

С учетом этого, проведя преобразования формулы (5.1), получим:

$$\mathcal{E}_{BB}=C_H-C_{BB}, \text{ руб.} \quad (5.8)$$

Стоимость нового поршня гидроцилиндра Ц-75 составляет 305 руб. Экономическая эффективность восстановления по базовой технологии одного поршня гидроцилиндра Ц-75 составит:

$$\mathcal{E}_{BB}=305-172=133 \text{ руб.}$$

5.2.2 Расчеты по новой технологии восстановления

Чтобы определить экономическую эффективность внедрения новой технологии (МДО+ дуговой электрофорез частицами нанопорошка CuO) также используем формулу (5.1). Следует отметить, что вместо данных по запасным частям будем использовать значения, которые были получены при

расчетах экономической эффективности от внедрения базовой технологии восстановления поршня гидроцилиндра.

Тогда себестоимость восстановления детали по новой разработанной технологии определяли по формуле (5.2). Соответственно расчет заработной платы осуществляли по формуле (5.3).

Результаты расчёта основной заработной платы $ZП_0$ для варианта восстановления с упрочнением по новой технологии сведены в таблицу 5.5.

Таблица 5.5 – Результаты расчёта основной заработной платы рабочих (новая технология)

| № операции | Наименование операции | Норма времени на выполнение, мин. | Часовая тарифная ставка, руб. | Заработная плата за операцию, руб. |
|------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
| 05 | Очистная | 1 | 45,5 | 0,76 |
| 10 | Дефектовочная | 2,8 | 60 | 2,8 |
| 15 | Шлифовальная | 3 | 60 | 3 |
| 20 | Очистная | 1 | 45,5 | 0,76 |
| 25 | МДО | 12,8 | 50 | 10,67 |
| 30 | Шлифовальная | 3 | 60 | 3 |
| 35 | Очистная | 1 | 45,5 | 0,76 |
| 40 | Дуговой электрофрез | 0,14 | 50 | 0,12 |
| 45 | Притирочная | 3 | 60 | 3 |
| 50 | Контрольная | 3 | 60 | 3 |
| $ZП_0$ | | | | 27,87 |

$$ZП = 27,87 \cdot 1,2 \cdot 1,2 \cdot 1,26 = 50,57 \text{ руб.}$$

Определение затрат на силовую электроэнергию производили по формуле 5.4. Результаты расчёта затрат на электроэнергию для новой

технологии сведены в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 – Результаты расчёта затрат на электроэнергию

| Наименование оборудования | Потребляемая мощность, кВт | Время работы, ч | Затраты на электроэнергию, руб. |
|----------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------------|
| 1. Машина моечная | 3,0 | 0,05 | 0,45 |
| 2. Установка МДО | 10 | 0,22 | 6,6 |
| 3. Станок круглошлифовальный | 4,5 | 0,1 | 1,35 |
| 4. Станок вертикально-доводочный | 15 | 0,05 | 2,25 |
| C_9 | | | 10,65 |

Затраты на ремонтные материалы определяем по формуле 5.5. Результаты расчёта сведены в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Результаты расчёта затрат на ремонтные материалы для новой технологии

| Наименование материала | Норма расхода, кг/дет. | Цена 1 кг материала, руб. | Затраты на материалы, руб. |
|--|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1. Моющее средство типа «Лабомид» | 0,09 | 43 | 3,87 |
| 2. КОН | 0,0032 | 100 | 0,32 |
| 3. Na_2SiO_3 (МДО + обезжиривание + раствор-носитель CuO + дуговой электрофорез) | 0,024 | 30 | 0,72 |

Продолжение таблицы 5.7

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| 4. Герметик | 0,05 | 350 | 17,5 |
| 5. NaOH | 0,02 | 34 | 0,68 |
| 6. Na ₃ PO ₄ | 0,08 | 39 | 3,12 |
| 7. Нанопорошок CuO | 0,001 | 11400 | 11,4 |
| 8. Карбид бора | 10 | 2550 | 25,5 |
| C_M | | | 63,11 |

Затраты на организацию и управление производством определяли по формуле 5.6:

$$C_{Oy}=2 \cdot 27,87 = 55,74 \text{ руб.}$$

Стоимость изношенного поршня не изменится и составит:

$$C_{ИЗ}= 10 \text{ руб.}$$

Таким образом, полная себестоимость восстановления с упрочнением поршня гидроцилиндра по новой технологии составит:

$$C=50,57+10,65+63,11+55,74+10=190,07 \text{ руб.}$$

Цену реализации восстановленной по новой технологии детали также принимаем на 30% превышающую себестоимость ее восстановления:

$$Ц_{ВБ}=190,07+57,02=247,09 \text{ руб.} \approx 247 \text{ руб.}$$

Стоимость нового поршня гидроцилиндра Ц-75 составляет 305 руб., сравнительные и эксплуатационные испытания показали увеличение долговечности соединения: восстановленный по новой технологии поршень – стенка гидроцилиндра по сравнению с изделиями восстановленными по базовой технологии (МДО) в 2 раза выше, тогда экономическая эффективность от восстановления изношенной детали (формула 5.1) в этом случае будет равна:

1) по сравнению с базовой технологией восстановления:

$$\mathcal{E}_{ВНІ}=\left(\frac{172-10}{400}-\frac{247-10}{800}\right) \cdot 800=87,2 \text{ руб.}$$

2) по сравнению с приобретением новой детали:

$$\mathcal{E}_{BH2} = \left(\frac{305 - 10}{400} - \frac{247 - 10}{800} \right) \cdot 800 = 353,2 \text{ руб.}$$

Таким образом, расчеты показывают, что применение новой технологии (МДО + дуговой электрофорез частиц нанопорошка CuO) экономически целесообразно. Кроме того, учитывая, что минимальная годовая программа восстановления рассматриваемых деталей, на имеющемся в Орловской области парке машин, по данным ЗАО ТПК «СтройДорМаш – Орел» может составить не менее 500 шт. Тогда экономическая эффективность от внедрения новой технологии, включающей применение МДО-покрытий модифицированных частицами нанопорошка CuO, из расчета принятой программы (по сравнению с приобретением новых деталей) будет равна:

$$\mathcal{E}_{BH} = 353,2 \cdot 500 = 176600 \text{ руб.}$$

Технико-экономические показатели расчета эффективности при восстановлении поршня гидроцилиндра Ц-75 по разработанной комбинированной технологии представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Технико-экономическая эффективность от внедрения разработанной комбинированной технологии

| Наименование показателя | Вариант | |
|---|---------|-------|
| | базовый | новый |
| 1 | 2 | 3 |
| 1. Годовая программа восстанавливаемых поршней, шт. | 500 | |
| 2. Цена новой детали | 305 | |
| 3. Цена восстановления поршня, руб. | 172 | 247 |
| 4. Ресурс нового поршня, км. | 400 | |
| 5. Ресурс восстановленного поршня, км. | 400 | 800 |

Продолжение таблицы 5.8

| 1 | 2 | 3 |
|--|-----|--------|
| 6. Экономическая эффективность от восстановления одного поршня в сравнении с приобретением новой детали, руб. | 133 | 353,2 |
| 7. Экономическая эффективность от восстановления поршней по новой технологии в сравнении с приобретением новых, руб. | | 176600 |

Разработанную технологию также можно применить для восстановления деталей представленных в таблице 5.9

Таблица 5.9 – Номенклатура деталей, которые предлагается восстанавливать по разработанной технологии

| Наименование детали | Устраняемый дефект |
|---|--|
| Поршни двигателей внутреннего сгорания | Износ юбки |
| Втулки шестеренных насосов типа НШ-У и гидромоторов типа МНШ-У | Износ отверстия под цапфу шестерен Износ торцевой большой поверхности |
| Подшипниковые обоймы шестеренных насосов типа НШ-К и гидромоторов ГМШ | Износ полуотверстий под цапфы шестерен |
| Поршни главных тормозных цилиндров, гидроусилителей руля и компрессоров | Износ рабочей поверхности |
| Подшипниковые блоки шестеренных насосов типа НШ-Е | Износ отверстий под цапфы шестерен |
| Постели распределительных валов | Износ отверстия под подшипник скольжения |

5.3 Выводы и предложения производству

1. Проведённые исследования позволили разработать и предложить комбинированную технологию повышения износостойкости деталей сельскохозяйственной техники из литейного алюминиевого сплава АК7ч, включающую в себя восстановление и упрочнение МДО изношенных рабочих поверхностей и их модифицирование частицами нанопорошка CuO дуговым электрофорезом. Технология апробирована на примере поршня гидроцилиндра Ц-75 (приложение Г).

2. Предложенная технология внедрена в КФХ «Калинин» с. Лаврово, Орловского р-на, Орловской области и на предприятии ИП Андриюшенков, г. Орел, а также в учебный процесс ФГБОУ ВПО «ОрелГАУ» (приложение Д).

3. Проведенные расчеты показали, что ожидаемый экономический эффект от внедрения предлагаемой комбинированной технологии может составить свыше 176600 рублей при годовой программе восстановления с упрочнением 500 поршней гидроцилиндров по сравнению с закупкой новых изделий. Таким образом, её внедрение в производство целесообразно.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Установлено, что оптимальные толщина, твёрдость и пористость упрочнённого слоя для МДО (первичной обработки) при соотношении катодного и анодного токов 1,0 обеспечиваются использованием электролита на основе дистиллированной воды, с содержащем 2 г/л КОН и 10 г/л Na_2SiO_3 , и режимами МДО: плотность тока – 25 А/дм², продолжительность оксидирования – 90 мин., температура электролита – 40°С. В этом случае толщина упрочненного слоя (после удаления технологического) составит: на литейном сплаве АК7ч – 65...70 мкм. Твёрдость МДО-покрытия – 10 ГПа. Сквозная пористость упрочнённого слоя составит 12%.

2. Теоретически рассчитана и экспериментально подтверждена сила тока, по которой определяется окончание вторичной обработки. Она составляет 8,19...8,27А. Оптимальная продолжительность вторичной обработки, позволяющая включать во внешний слой сформированного МДО-покрытия наибольшее количество частиц нанопорошка CuO , составляет 1 мин.

3. Определено оптимальное содержание компонентов в растворителе нанопорошка CuO при дуговом электрофорезе (вторичной обработке) МДО-покрытия: по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды; в электролите: КОН – 0,5 г/л, Na_2SiO_3 – 2 г/л, при этом плотность тока – 25 А/дм² и температура электролита – 20 °С. Толщина внешнего упрочнённого слоя МДО-покрытия после дугового электрофореза останется неизменной и составит 65...70 мкм. Микротвёрдость МДО-покрытия до и после вторичной обработки дуговым электрофорезом не изменяется и составляет 10 ГПа.

4. Установлено, что наибольшее влияние на снижение коэффициента трения в подвижном соединении, содержащем МДО-покрытие модифицированное частицами нанопорошка CuO , оказывает его пористость.

Теоретически и экспериментально подтверждено, что для пары трения «сталь 40Х – МДО-покрытие модифицированное CuO» значение коэффициента трения будет в 1,9...2 раза ниже чем для эталонной пары. Износостойкость испытуемых подвижных соединений с МДО-покрытиями модифицированными нанопорошком CuO в 1,5...2 раза выше, чем у аналогичных подвижных соединений без модифицирования упрочненного слоя, принятых за эталон сравнения. При наработке поршней 100...110 км, составляющей 20% от гарантированной заводом-изготовителем, износостойкость испытуемых подвижных соединений, с восстановленными и упрочненными МДО-покрытиями модифицированными частицами нанопорошка CuO деталями, была в 2 раза выше, чем у аналогичных соединений в серийных гидроцилиндрах Ц-75.

5. На основании результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны новый способ формирования износостойких покрытий на деталях из алюминиевых сплавов, подтвержденный патентом на изобретение, и комбинированная технология, включающая в себя «первичную обработку» - восстановление с упрочнением рабочих поверхностей поршня гидроцилиндра Ц-75 МДО, и «вторичную обработку» МДО-покрытия – дуговой электрофорез частицами нанопорошка CuO, позволяющая повысить износостойкость подвижных соединений деталей сельскохозяйственной техники. При годовой программе восстановления 500 поршней гидроцилиндров расчетный экономический эффект от внедрения предлагаемой технологии составит свыше 176,6 тыс. рублей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамов, Е.И. Элементы гидропривода. (Справочник) [Текст]. / Е.И. Абрамов, К.А. Колесниченко, В.Т. Маслов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев.: Техніка, 1977. - 320 с.
2. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий [Текст] / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
3. Артемьев, Ю.Н. Качество ремонта и надёжность машин в сельском хозяйстве [Текст] / Ю.Н. Артемьев. – М.: Колос, 1981. - 239 с.
4. Астахов, А.С. Применение технической керамики в сельскохозяйственном производстве [Текст] / А.С. Астахов, Д.С. Буклагин, И.Г. Голубев. – М.: Агропромиздат, 1988. - 95 с.
5. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 247 с.
6. Барыкин, Н.В. Разработка технологии восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. ... канд. техн. наук / Н.В. Барыкин. - М., 1995. - 26 с.
7. Басинюк, В.Л. Металлополимернокерамические композиции и технологии для восстановления и ремонта изношенных поверхностей пар трения [Текст] / В.Л. Басинюк, М.В. Кирейцев, М.А. Белоцерковский // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: сб. науч. тр. – Минск: Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 110-113.
8. Басинюк, В.Л. Разработка технологии и применение многослойных комбинированных покрытий на основе оксидокерамики [Текст] / В.Л. Басинюк, М.А. Белоцерковский // Трение и износ. - 2003. - Т. 24, № 2. – С. 203-209.
9. Басинюк, В.Л. Фрикционные и механические свойства оксидно-керамических покрытий [Текст] / В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич // Трение и износ. - 2003. - Т. 24, № 5. – С. 510-516.

10. Батищев, А.Н. Свойства покрытий, сформированных микродуговым оксидированием [Текст] / А.Н. Батищев, А.В. Ферябков, А.Л. Севостьянов // Изв. Орл. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство. Транспорт. – Орёл, 2004. - № 1-2. – С. 67-69.
11. Богомолова, Н.А. Металлография и общая технология металлов [Текст] / Н.А. Богомолова, Л.К. Гордиенко. – М.: Высшая школа, 1983. - 270с.
12. Большев, Л.Н. Таблицы математической статистики [Текст] / Л.Н. Большев, Н.В. Смирнов. – М.: Наука, 1965. – 474 с.
13. Воробьев, В.Н. Финишная обработка деталей абразивным инструментом [Текст] / В.Н. Воробьев, Ю.А. Луцун // Техника в сельском хозяйстве. - 1985. - №6. - С.58.
14. Восстановление деталей машин [Текст]: справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов [и др.]; под ред. В.П. Иванова. – М.: Машиностроение, 2003. - 672 с.
15. Гаркунов, Д.Н. Повышение износостойкости на основе избирательного переноса [Текст] / Д.Н. Гаркунов, А.А. Поляков, Л.М. Рыбакова [и др.]; под ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1977. - 214 с.
16. Гаркунов, Д.Н. Триботехника, износ и безызносность [Текст] / Д.Н. Гаркунов. – М.: МСХА, 2001. - 616 с.
17. Голубев, И.Г. Упрочнение и восстановление деталей напылением керамическими и металлокерамическими покрытиями [Текст]: экспресс-информ. / И.Г. Голубев // ЦНИИТЭИ. Сер. Произв.-техн. обеспеч. с.-х. : зарубежный опыт. М., 1985. - Вып. 15.– С. 10-15.
18. Голованова, О.А. Фазовый и элементный состав анодных покрытий на вентильных металлах [Текст] / О.А. Голованова, А.М. Сизиков // Химия и химическая технология. - 1995. - Т. 39. Вып. 6. – С.43-46.
19. Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО покрытий на сплавах алюминия / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов. 1990. Т. 6. №3. - С. 467-470.

20. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа [Текст] / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. - 228 с.
21. Ерохин, А.Л. Трибологические свойства оксидно-керамических покрытий, получаемых плазменно-электролитической обработкой [Текст] / А.Л. Ерохин, В.В. Любимов, А.А. Воеводин // Современная электротехнология в машиностроении: сб. тр. Всерос. науч.-техн. конф. – Тула: ТулГУ, 1997. – С. 238-243.
22. Ерохин, А.Л. Повышение фрикционных характеристик МДО-покрытий вакуумно-плазменной обработкой [Текст] / А.Л. Ерохин, А. Мэттьюз, С. Доуи [и др.] // Трение и износ. - 1998. - Т. 19, № 5. – С. 642-646.
23. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем [Текст] / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
24. Зорин, В.А. Ремонт дорожных машин, автомобилей и тракторов [Текст]: учебник / Б.С. Васильев, Б.П. Долгополов, Г.Н. Доценко [и др.]; под ред. В.А. Зорина. – М.: Мастерство, 2001. – 512 с.
25. Зорин, К.М. Повышение износостойкости подвижных сопряжений формированием на поверхностях трения композиционных электрохимических покрытий [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук / К.М. Зорин. – М., 2008. - 21 с.
26. Казанцев, И.А. Влияние микродугового оксидирования на фазовый состав и свойства покрытий алюминия/ И.А. Казанцев, О.Е. Чуфистов, Н.В. Голованова и др.// Мат. 4-го собрания металловедов России. Ч.1. – Пенза: Приволжский Дом знаний, 1998. – С. 105-107.
27. Каракозов, Э.С. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий [Текст] / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин // Сварочное производство. - 1993. - № 6. – С. 4-7.
28. Кобзов, Д.Ю. Практические рекомендации по повышению конструкционной надежности гидроцилиндров [Текст] / Д.Ю. Кобзов, В.В.

Жмуров, И.О. Кобзова, А.Ю. Кулаков // Системы. Методы. Технологии. - 2012. - № 1(13). - С. 45-48.

29. Коган, Б.И. Гидроцилиндры горных машин. Технологии восстановления [Текст] / Б.И. Коган, А.В. Егоров // Вестник Кузбасского государственного технического университета. - 2012. - № 4(92). - С. 73-79.

30. Коломейченко, А.В. Восстановление сильно изношенных деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.В. Коломейченко // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2002. - № 1. – С. 29-32.

31. Коломейченко, А.В. Микродуговое оксидирование как способ восстановления и упрочнения деталей машин [Текст] / А.В. Коломейченко, В.Н. Логачёв, Н.С. Чернышов // Инженерия поверхности и реновация изделий : матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф. – Киев: АТМ Украины, 2002. – С. 73-76.

32. Коломейченко, А.В. Обоснование целесообразности формирования упрочняющих оксидных покрытий МДО в проточном электролите [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.Н. Логачёв // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: матер. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ГОСНИТИ, 2003. – С. 81-83.

33. Коломейченко, А.В. Повышение противоизносных свойств МДО-покрытий за счёт заполнения их различными материалами [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов// Экономика и производство. Технологии, оборудование, материалы. - 2003. - № 4. – С. 61-63.

34. Коломейченко, А.В. Влияние охлаждения электролита на свойства покрытий при восстановлении с упрочнением МДО деталей машин из алюминиевых сплавов [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов// Ремонт, восстановление, модернизация. - 2003. - № 11. – С. 19-20.

35. Коломейченко, А.В. Перспективные направления восстановления изношенных деталей из алюминиевых сплавов с последующим упрочнением МДО [Текст] / А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев, Н.С. Чернышов // Известие

Орловского государственного технического университета, сер. Строительство. Транспорт. – 2004. - №1-2. – С. 76-81.

36. Коломейченко, А.В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами [Текст] : автореф. дис. ... докт. техн. наук / А.В. Коломейченко. – М., 2011. - 31 с.

37. Коломейченко, А.В. Устройства для микродугового оксидирования деталей [Текст] / А.В. Коломейченко, В.Г. Васильев, Н.В. Титов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. - 2005. - № 2. – С. 45-46.

38. Коломейченко, А.В. Формирование МДО-покрытий высокого качества в проточном электролите с его одновременным охлаждением [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.Н. Логачёв / Ресурсосбережение XXI век: сб. матер. Междунар. науч.-техн. конф. – Орёл: ОрёлГАУ, 2005. – С. 66-71.

39. Коломейченко, А.В. Повышение износостойкости подшипников скольжения упрочнением МДО с нанесением антифрикционного покрытия [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.В. Титов, В.Л. Басинюк // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. - №6. – С. 27-29.

40. Коломейченко, А.В. Влияние режима МДО на плотность покрытий [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.С. Чернышов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. - №7. – С. 12-14.

41. Коломейченко, А.В. Улучшение покрытий для восстановления гидравлики [Текст] / А.В. Коломейченко // Сельский механизатор. – 2006. - №9. – С. 42-43.

42. Коломейченко, А.В. Износостойкость МДО-покрытий, сформированных на алюминиевых сплавах АОЗ-7 и АК7ч [Текст] / А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. - №8. – С. 44-46.

43. Коломейченко, А.В. Технологические приемы повышения долговечности подвижных соединений и деталей машин, упрочненных

микродуговым оксидированием [Текст]/ А.В. Коломейченко // ТРУДЫ ГОСНИТИ. – 2010. – Т.105. – С. 155-160.

44. Корнюшенко, С.Ю. Импортзамещение: комплектующие для гидроцилиндров [Текст] / С.Ю. Корнюшенко // Пневматика и гидравлика. - 2009. - № 2. – С. 32-35.

45. Коровин, А.Я. Технология восстановления и упрочнения деталей гидравлических шестеренных насосов типа НШ-У микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Я. Коровин. – Орел: ОрёлГАУ, 2003. – 20 с.

46. Кравцов, В.И. Методы снижения трения и износа деталей машин [Текст]: обзорная информация / В.И. Кравцов; ВНИИТЭМР. Сер. Прогрессивные технол. процессы в машиностр. Вып. 5. – М., 1990. – 44 с.

47. Крагельский, И.В. Трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. - 480 с.

48. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ [Текст] / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.

49. Крагельский, И.В. Узлы трения машин [Текст]: справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.

50. Красиков, С.Г. Исследование износостойкости узлов трения бытовых машин повышение их долговечности с использованием избирательного переноса [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С.Г. Красиков. – М., 1972. - 21 с.

51. Кудинов, В.В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов, Г.В. Бобров. – М.: Металлургия, 1992. – 432 с.

52. Кузнецов, Ю.А. Электролиты для микродуговой обработки деталей [Текст] / Ю.А. Кузнецов, А.Я. Коровин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2003. - № 1. – С. 30-32.

53. Кузнецов, Ю.А. Противоизносные свойства керамических покрытий,

полученных микродуговым оксидированием [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2004. - № 6. – С. 28.

54. Кузнецов, Ю.А. Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. Наук / Ю.А. Кузнецов. – М., 2006. – 35 с.

55. Кусков, В.Н. Фазовый состав и микротвёрдость покрытий, полученных микродуговым оксидированием [Текст] / В.Н. Кусков, Ю.Н. Кусков, И.М. Ковенский // Физика и химия обработки материалов. - 1990. - №6. – С. 101-103.

56. Логачев, В.Н. Восстановление колодцев корпусов насосов типа НШ и НШ-У обжатием с последующим упрочнением МДО [Текст] / В.Н. Логачев // Научные основы решения проблем сельскохозяйственного машиностроения: сб. науч. работ. – Тула: ТулГУ, 2003. – С. 173-175. – ISBN 5-7679-0383-2.

57. Логачев, В.Н. Влияние концентрации метасиликата натрия на толщину МДО-покрытия, сформированного на пластически деформированном сплаве АК7ч [Текст] / В.Н. Логачев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. – Брянск: БГСХА, 2004. – С. 181-184.

58. Любимов, В.В. Исследование влияния состава электролита на физико-механические свойства МДО-покрытий на алюминии и сплавах [Текст] / В.В. Любимов, В.К. Сундуков, В.И. Гаврилин [и др.] // Современная электротехнология в промышленности Центра России: сб. матер. науч.-техн. конф. - Тула: ТулГУ, 2001. - С. 117-122.

59. Людин, В.Б. Разработка методики определения сквозной пористости МДО-покрытия [Текст] / В.Б. Людин, А.В. Эпельфельд, С.В. Семенов [и др.] // Научные труды / МАТИ им. К.Э. Циолковского. - М.: «ИАТМЭС», 2001. - Вып. 4 (76). - С. 137-140.

60. Малышев, В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.Н. Малышев. – М., 1999. - 53 с.

61. Малышев, В.Н. Повреждаемость и разрушение керамического слоя при трении МДО-покрытий [Текст] / В.Н. Малышев // Трение и износ. - 2004. - Т. 25, № 6. – С. 642-649.

62. Марков, Г.А. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий [Текст] / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Повышение износостойкости деталей газонефтяного оборудования за счет реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий: сб. тр. / под ред. А.А. Петросянца, А.Г. Кана. - М., 1985. - Вып. 185. - С. 54-64.

63. Марков, Г.А. Износостойкость покрытий, нанесённых анодно-катодным микродуговым методом [Текст] / Г.А. Марков, В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева // Трение и износ. - 1988. - Т. 9, № 2. – С. 286-290.

64. Марков, Г.А. Микродуговое оксидирование [Текст] / Г.А. Марков, В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева // Вестник МГТУ им. Баумана. Сер. Машиностроение. - 1992. - № 1. – С. 34-56.

65. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст]. Ч. I / под ред. А.В. Шпилько. – М.: Прогресс-Академия, 1998. - 219 с.

66. Методика определения экономической эффективности технологий и сельскохозяйственной техники [Текст]. Ч. II Нормативно-справочный материал / под ред. А.В. Шпилько. – М.: Прогресс-Академия, 1998. - 251 с.

67. Михеев, А.Е. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов [Текст] / А.Е. Михеев, Н.А. Терёхин, В.В. Стацура // Вестник машиностроения. - 2003. - № 2. – С. 56-63.

68. Нечаев Г.Г. Влияние внешних физических воздействий на микроплазмохимические процессы при электрохимическом формировании оксидных покрытий на сплавах алюминия [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Г.Г. Нечаев. – Саратов., 2008. - 22 с.

69. Новиков, А.Н. Ремонт объемных гидромашин [Текст]: учебное пособие / А.Н. Новиков. – Орел: ОГСХА, 1995.–72 с.

70. Новиков, А.Н. Ремонт деталей из алюминия и его сплавов [Текст]:

учеб. пособие / А.Н. Новиков. – Орёл: ОГСХА, 1997. - 57 с.

71. Новиков, А.Н. Взаимосвязь фазового состава и свойств упрочнённого слоя, нанесённого микродуговым оксидированием на алюминиевую деталь [Текст] / А.Н. Новиков, Ю.А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1998. - № 2. – С. 27-28.

72. Новиков, А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами [Текст] / А.Н. Новиков. – Орёл: ОрёлГАУ, 2001. - 233 с.

73. Новиков, А.Н. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Новиков, А.Н. Батищев, А.В. Коломейченко [и др.] – Орёл: ОрёлГАУ, 2001. - 99 с.

74. Новиков, А.Н. Пористость МДО-покрытий на восстановленных поверхностях деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.Н. Новиков, В.В. Жуков // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2005. - № 6. – С. 7-9.

75. Новиков, А.Н. Перспективы применения микродугового оксидирования для восстановления и упрочнения деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.Н. Новиков. // Изд. ОрелГТУ сер. Строительство. Транспорт. – Орел, 2004. - № 3-4. – С. 115-122.

76. Пат. 2046157 Российская Федерация, С 25 D 11/18. Способ микродугового оксидирования вентильных металлов [Текст] / Ж.М. Рамазанова, Ю.А. Савельев, А.И. Мамаев. - № 5050626/26; заявл. 01.07.92; опубл. 20.10.95, Бюл. № 29. – 8 с.

77. Пат. 2112087 Российская Федерация, С 25 D 11/06. Способ получения защитных покрытий на алюминии и его сплавах [Текст] / С.В. Гнеденков, О.А. Хрисанфова, А.Н. Коврянов [и др.]. - № 96118802/02; заявл. 23.09.96; опубл. 27.05.98, Бюл. № 15. – 18 с.

78. Пат. 2147323 Российская Федерация, С 25 D 11/06. Электролит для

микродугового анодирования алюминия и его сплавов [Текст] / Ю.А. Кузнецов, А.В. Коломейченко, В.Н. Хромов [и др.]. - № 99110977/02; заявл. 17.05.1999; опубл. 10.04.2000, Бюл. № 10. – 6 с.

79. Пат. 2147324 Российская Федерация, С 25 D 17/02, 7/04, 11/06. Устройство для микродугового оксидирования колодцев корпуса шестерённого насоса [Текст] / А.Н. Новиков, Ю.А. Кузнецов, В.Н. Хромов. - № 99105709/02; заявл. 22.03.1999; опубл. 10.04.2000, Бюл. № 10. – 8 с.

80. Пат. 2152255 Российская Федерация, В 01 J 37/34, 21/00, 21/04, 23/16, 23/70. Способ получения оксидных каталитически активных слоёв и каталитически активный материал, полученный данным способом [Текст] / А.И. Мамаев, П.И. Бутягин. - № 98113500/04; заявл. 14.07.1998; опубл. 10.07.2000, Бюл. № 19. – 8 с.

81. Пат. 2190045 Российская Федерация, С25 D17/02. Устройство для микродугового оксидирования поджимной и подшипниковой обойм шестеренного насоса [Текст] / А.В. Коломейченко, А.Н. Новиков, Н.В. Зуева. - № 200029935/02; заявл. 30.11.2000; опубл. 27.09.2002; бюл. № 27- 5 с.

82. Пат. 2209259 Российская Федерация, С 25 D 17/02. Устройство для микродугового оксидирования колодцев корпуса шестерённого насоса [Текст] / А.В. Коломейченко, Ю.А. Кузнецов, Н.В. Титов [и др.]. - № 2002100557/02; заявл. 03.01.2002; опубл. 27.07.2003, Бюл. № 21. – 7 с.

83. Пат. 2227088 Российская Федерация, В 23 P 6/02. Способ восстановления юбок поршней двигателей внутреннего сгорания [Текст]/ Н.В. Титов, А.В. Коломейченко. - № 2003115981/02; заявл. 28.05.2003; опубл. 20.04.2004, Бюл. № 11. – 6 с.

84. Пат. №2215831 Российская Федерация, С 25 В 11/02. Устройство для микродугового оксидирования колодцев корпуса шестеренного насоса [Текст] / Ю.А. Кузнецов. – Опубл. Б.И. №31, 2003.

85. Пат. №2229542 Российская Федерация, С 25 О 11/08. Электролит для микродугового оксидирования алюминия и его сплавов [Текст] / А.Н. Батищев, Ю.А. Кузнецов, А.Л. Севостьянов [и др.]. – Опубл. Б.И. №15,

2004.

86. Пат. 2287025 Российская Федерация, С23 С26/00. Способ фрикционно-механического нанесения антифрикционных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей и устройство для его осуществления [Текст] / В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, А.В. Коломейченко [и др.]. - № 2005117285/02; заявл. 06.06.2005; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31. – 910 с.

87. Петросянц, А.А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесённых методом микродугового оксидирования [Текст] / А.А. Петросянц, В.Н. Малышев, В.А. Фёдоров // Трение и износ. - 1984. - Т. 5, № 2. – С. 350-354.

88. Пронин, В.В. Разработка технологии формирования изоляционных покрытий на деталях из алюминиевых сплавов методом микродугового оксидирования [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / В.В. Пронин. – Орёл., 2006. – 19 с.

89. Пучин, Е.А. Надежность технических систем [Текст] / Е.А. Пучин, О.Н. Дидманидзе, П.П. Лезин [и др.] – М.: УМЦ «Триада», 2005. – 353 с.

90. РТМ 70.0009.035-84 Технологический процесс восстановления деталей машин из алюминиевых сплавов. - М.: ГОСНИТИ, 1986. - 28 с.

91. РТМ 10.278-2005. Восстановление колодцев корпусов шестеренных насосов типа «НШ-У» способом ремонтных размеров с упрочнением микродуговым оксидированием технологический процесс [Текст]. – Введ. 01-01-2006. – М.: ОГАУ, 2006. – 8 с.: ил.

92. РТМ 10.280-2005. Восстановление посадочных отверстий под подшипники корпусных деталей из алюминиевых сплавов сверхзвуковым газодинамическим напылением с упрочнением микродуговым оксидированием технологический процесс [Текст]. – Введ. 01-07-2006. – М.: ОГАУ, 2006. – 11 с.: ил.

93. РТМ 10.279-2005. Восстановление наконечников молочных центробежных насосов газопламенным напылением с упрочнением

микродуговым оксидированием технологический процесс [Текст]. – Введ. 01-01-2006. – М.: ОГАУ, 2006. – 11 с.: ил.

94. РТМ 10.281-2005. Восстановление деталей из коррозионно-стойких сталей типа «вал» сверхзвуковым напылением с упрочнением микродуговым оксидированием технологический процесс [Текст]. – Введ. 01-01-2006. – М.: ОГАУ, 2006. – 14 с.: ил.

95. Севостьянов, А.Л. Восстановление и упрочнение сёдел клапанной коробки насосной установки Ж6-ВНП микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.Л. Севостьянов. – М., 2003. - 21 с.

96. Словарь-справочник по трению, износу и смазке деталей машин [Текст] / В.Д. Зозуля, Е.Л. Шведков, Д.Я. Ровинский [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наукова Думка, 1990. - 257 с.

97. Слонова, А.И. О роли состава силикатного электролита в анодно-катодных микродуговых процессах [Текст] / А.И. Слонова, О.П. Терлеева, Г.А. Марков // Защита металлов. - 1997. - Т. 33, № 2. – С.208-212.

98. Смелянский, В.М. Упрочнение алюминиевых деталей микродуговым оксидированием [Текст] / В.М. Смелянский, О.Ю. Герций, Е.М. Морозов // Автомобильная промышленность. - 1999. - № 1. – С. 22-25.

99. Смелянский В.М. Методика технологического проектирования МДО [Текст] / В.М. Смелянский, О.Ю. Герций // Автомобильная промышленность. - 2001. - № 2. – С. 31-33.

100. Стребков, С.В. Обеспечение работоспособности оксидированных поверхностей деталей [Текст] / С.В. Стребков, И.Г. Голубев, А.В. Грамолин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1997. -№ 7. – С. 30-31.

101. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование защищает металл [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, А.М. Борисов // Наука в России. - 1999. - № 4. – С. 21-25.

102. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (обзор) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.] // Приборы. - 2001. - № 9. - С. 13-23.

103. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (окончание) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.] // Приборы. - 2001. - № 10. - С. 26-36.

104. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.]. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.: ил.

105. Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов [Текст] В 2-х т. Т. 2 / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов – Москва: Техносфера, 2011. – 512 с.

106. Сырицын, Т.А. Надежность гидро- и пневмопривода [Текст]: Т.А. Сырицын. — М.: Машиностроение, 1981. — 216 с.

107. Тавасиев, Р.М. Способ повышения надежности и долговечности гидравлических систем машин и оборудования [Текст] / Р.М. Тавасиев, М.С. Льянов, О.И. Туриев [и др.] // Известия Горского ГАУ. – 2011. Т. 48. № 2. С. 154-158.

108. Терлеева, О.П. Распределение плотности тока по поверхности дюралюминия в процессе роста оксида в условиях микроплазменных разрядов / О.П. Терлеева, В.В. Уткин, А.И. Слонова // Физика и химия обработки материалов. - 1999. №2. - С. 60-64.

109. Тимошенко, А.В. Микродуговое оксидирование сплава Д16Т на переменном токе в щелочном электролите [Текст] / А.В. Тимошенко, Б.К. Опара, А.Ф. Ковалёв // Защита металлов. - 1991. - Т. 27, № 3. – С. 417-424.

110. Тимошенко, А.В. Влияние наложенного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме на сплаве Д16 [Текст] / А.В. Тимошенко, Б.К. Опара, Ю.В. Магурова // Защита металлов. - 1994. - Т. 30, № 1. – С. 32-38.

111. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.

112. Фёдоров, В.А. Состав и структура упрочнённого поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаемого при микродуговом оксидировании [Текст] / В.А. Фёдоров, В.В. Белозёров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. - 1988. - № 4. – С. 92-97.

113. Фёдоров, В.А. Физико-механические характеристики упрочнённого поверхностного слоя на сплавах алюминия, получаемого при микродуговом оксидировании [Текст] / В.А. Фёдоров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. - 1990. - № 4. – С. 57-62.

114. Фёдоров, В.А. Формирование упрочнённых поверхностных слоёв методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов [Текст] / В.А. Фёдоров, В.В. Белозоров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 1. – С. 87-93.

115. Фёдоров, В.А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей [Текст] / В.А. Фёдоров // Сварочное производство. - 1992. - № 8. – С. 29-30.

116. Фёдоров, В.А. Разработка основ применения лёгких сплавов в качестве материалов триботехнического назначения за счёт формирования поверхностного керамического слоя [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.А. Фёдоров. – М., 1993. - 49 с.

117. Федоров, В.А. Создание пар трения, работоспособных при нетрадиционных смазках [Текст] // В.А. Федоров, Н.Д. Великосельская // Трение и износ. - 1990. - Т. 11, №5. - С. 840-843.

118. Хромов, В.Н. Исследование пористости МДО-покрытий на поверхностях деталей из сплава АК9ч, восстановленных пайкой припоем ПА-12 [Текст] / В.Н. Хромов, А.В. Коломейченко, Н.С. Чернышов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2006. - №7. - С. 49-51.

119. Хромов, В.Н. Повышение износостойкости внутренних цилиндрических поверхностей деталей машин микродуговым

оксидированием и нанесением медного слоя [Текст] / В.Н. Хромов, А.В. Коломейченко, Н.В. Титов [и др.] - Орел: Изд. Орел ГАУ, 2008. – 100 с.

120. Хромов, В.Н. Восстановление деталей из алюминиевых сплавов шестеренных насосов типа НШ-У пластическим деформированием с последующим упрочнением микродуговым оксидированием: монография / В.Н. Хромов, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев [и др.] - Орел: Изд. Орел ГАУ, 2010. – 108 с.

121. Черкун, В.Е. Организация и технология ремонта и восстановления деталей гидроагрегатов [Текст] / В.Е. Черкун, Н.И. Клочковский, Е.В. Гранкина – М., - 1990. – 40 с.

122. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом [Текст] / В.И. Снежко, И.И. Папанова. - Л.: Химия, 1991. - 128 с.: ил.

123. Черненко, В.И. Электролиты для формовки керамических покрытий на алюминии в режиме искрового разряда [Текст] / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, С.Е. Чернов. // Защита металлов. - Т. 18, №3. - 1982. - С. 454-458.

124. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин [Текст] / В.И. Черноиванов.- М.: ГОСНИТИ, 1995. – 280 с.

125. Черноиванов, В.И. Организация и технология восстановления деталей машин [Текст] / В.И. Черноиванов, В.П. Лялякин. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ГОСНИТИ, 2003. - 488 с.

126. Черноиванов, В.И. Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве [Текст]: учеб. пособие / В.И. Черноиванов, В.В. Бледных, А.Э. Северный; под ред. В.И. Черноиванова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.; Челябинск: ГОСНИТИ, ЧГАУ, 2003. - 992 с.

127. Чигринова, Н.М. Микродуговое оксидирование поршней ДВС [Текст] / Н.М. Чигринова // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 7. – С. 27-28.

128. Чубенко, А.К. Роль длительности токового импульса как фактора управления физико-механическими характеристиками анодно-оксидных

покрытий на примере сплава алюминия Д16 [Текст] / А.К. Чубенко, А.И. Мамаев, Ю.Ю. Будницкая, Т.И. Дорофеева // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 62-64.

129. Эпельфельд, А.В. Технология и оборудование микродугового оксидирования [Текст] / А.В. Эпельфельд // Квалификация и качество. - 2002. - № 4. - С. 33-37.

130. Эпельфельд, А.В. Технологические методы и средства формирования многофункциональных покрытий микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис....докт. техн. наук / А.В. Эпельфельд. М., - 2007. - 41 с.

131. Voevodin, A.A. Characterisation of wear resistant Al-Si-O Coatings formed on al-based alloys by micro-arc discharge treatment [Text] / A.A. Voevodin, A.L. Yerokhin, V.V. Lyubimov // Surface and Coating Technology. - 1996. - V 86-87. – P. 516-521.

132. Wang, Z. Microstructure and properties of ceramic coatings produced on 2024 aluminum alloy by microarc oxidation [Text] / Z. Wang, L. Wu, Z. Jiang, W. Cai, A. Shan // Journal of Alloys and Compounds. - 2010. Т. 505. № 1 P. 188-193.

133. Xue, W. Evaluation of the mechanical properties of microarc oxidation coatings and 2024 aluminum alloy substrate [Text] / W. Xue, Ch. Wang, Zh. Deng, R. Chen, Y. Li, T. Zhang // Journal of Physics: Condensed Matter. 2002. Т. 14. № 44. P. 10947-10952.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А1
(Справочное)

Сводная ведомость по износам рабочих поверхностей поршней гидроцилиндров серии Ц-75

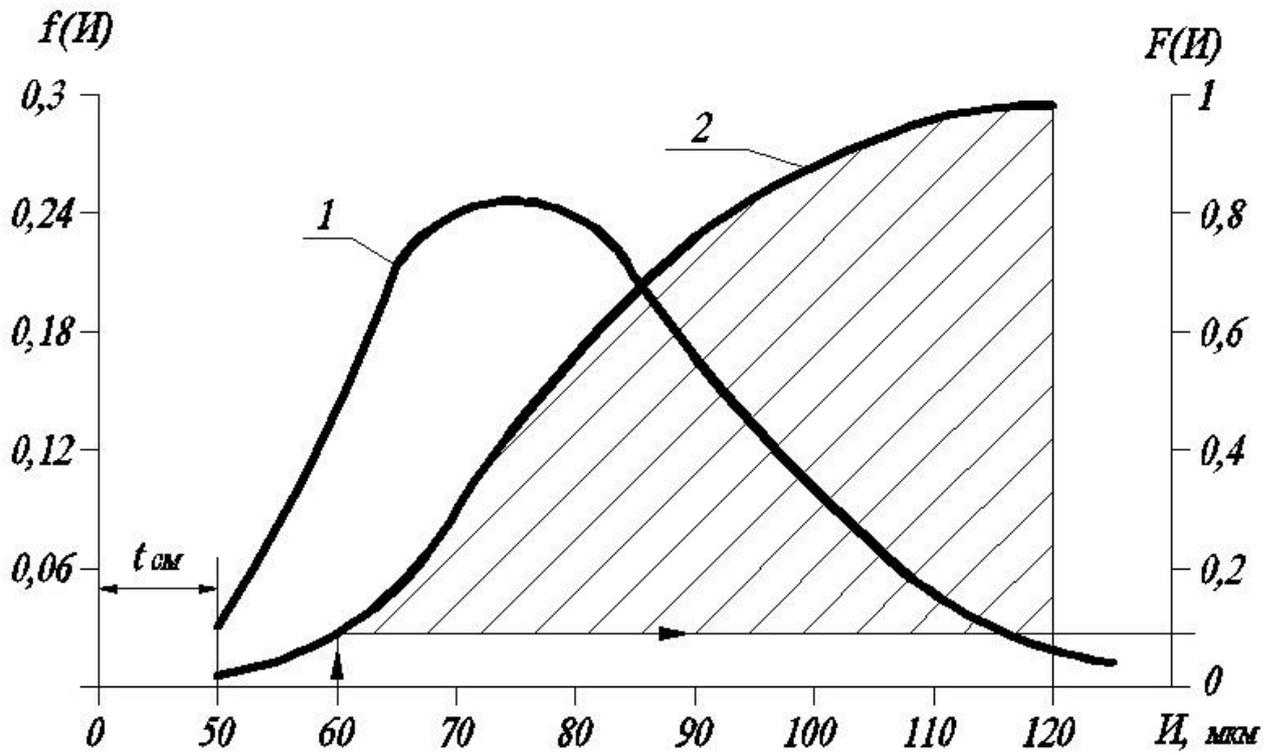
| № п/п | Износ, мм |
|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|
| 1 | 0,055 | 14 | 0,069 | 27 | 0,076 | 40 | 0,094 |
| 2 | 0,060 | 15 | 0,070 | 28 | 0,077 | 41 | 0,096 |
| 3 | 0,060 | 16 | 0,070 | 29 | 0,078 | 42 | 0,097 |
| 4 | 0,063 | 17 | 0,070 | 30 | 0,080 | 43 | 0,099 |
| 5 | 0,064 | 18 | 0,070 | 31 | 0,081 | 44 | 0,101 |
| 6 | 0,065 | 19 | 0,072 | 32 | 0,082 | 45 | 0,103 |
| 7 | 0,066 | 20 | 0,073 | 33 | 0,083 | 46 | 0,105 |
| 8 | 0,067 | 21 | 0,074 | 34 | 0,083 | 47 | 0,108 |
| 9 | 0,067 | 22 | 0,074 | 35 | 0,085 | 48 | 0,111 |
| 10 | 0,068 | 23 | 0,075 | 36 | 0,087 | 49 | 0,115 |
| 11 | 0,068 | 24 | 0,075 | 37 | 0,089 | 50 | 0,119 |
| 12 | 0,069 | 25 | 0,075 | 38 | 0,090 | | |
| 13 | 0,069 | 26 | 0,076 | 39 | 0,092 | | |

Статистический ряд

| | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Границы интервала | | 0,050 | 0,060 | 0,070 | 0,080 | 0,090 | 0,100 | 0,110 |
| | | 0,060 | 0,070 | 0,080 | 0,090 | 0,100 | 0,110 | 0,120 |
| I_i | | 0,055 | 0,065 | 0,075 | 0,085 | 0,095 | 0,105 | 0,115 |
| m_i | | 2 | 14 | 13 | 8 | 6 | 4 | 3 |
| P_i | | 0,04 | 0,28 | 0,26 | 0,16 | 0,12 | 0,08 | 0,06 |
| P_{\square_i} | | 0,04 | 0,32 | 0,58 | 0,74 | 0,86 | 0,94 | 1 |
| ЗНР | f_i | 0,075 | 0,156 | 0,238 | 0,238 | 0,163 | 0,075 | 0,025 |
| | F_i | 0,1 | 0,26 | 0,5 | 0,73 | 0,89 | 0,97 | 0,99 |
| ЗРВ | f_i | 0,081 | 0,213 | 0,247 | 0,206 | 0,133 | 0,071 | 0,03 |
| | F_i | 0,09 | 0,3 | 0,56 | 0,76 | 0,884 | 0,955 | 0,98 |

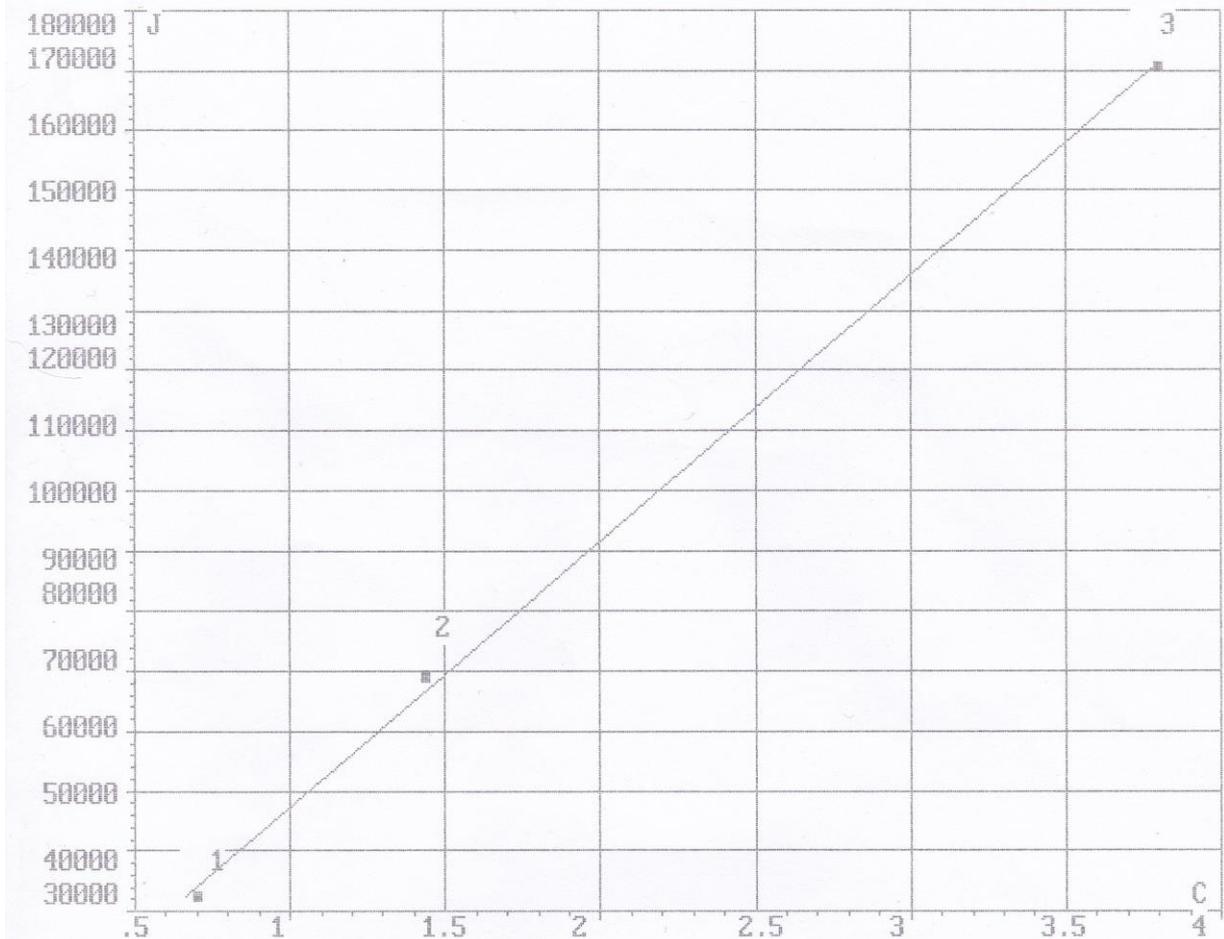
Параметры ТЗР

| ТЗР | Иср | σ | Исм | ν | Ин ср | Ив ср | $\delta, \%$ |
|------------|--------|----------|------|-------|-------|-------|--------------|
| ЗРВ | 0,0802 | 0,016 | 0,05 | 0,53 | 0,076 | 0,085 | 16,56 |

ПРИЛОЖЕНИЕ А2
(Справочное)

Распределение износов поршней гидроцилиндров: 1 – теоретическая дифференциальная кривая распределения износов; 2 - теоретическая интегральная кривая распределения износов

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(Справочное)



Элемент: cu

Файл: cuo.clk

28-05-2013 8:27:20

Дата: 28-05-2013 Время: 8:37:14

Элемент: cu

Число проб: 3

Выходной файл: cuo.clk

Коэффициенты базовой кривой полинома

| A0 | A1 | A2 | A3 |
|--------------|-------------|----|----|
| -.707695E-01 | .226325E-04 | | |
| | 35.4564 | | |

Коэффициенты влияющих элементов

Табличное значение критерия Стьюдента T =12.7000

| No | Имя_пробы | Номер | Вес | Интенсивн. | К.химич. | К.расчет | Откл.абс. | Откл(%) |
|----|-----------|-------|-----|------------|----------|----------|-----------|---------|
| 1 | cuo | 1 | 1 | 32404. | .7000 | .6626 | .0374 | 5.3401 |
| 2 | cuo | 2 | 1 | 69000. | 1.4400 | 1.4909 | -.0509 | -3.5325 |
| 3 | cuo | 3 | 1 | 170431. | 3.8000 | 3.7865 | .0135 | .3549 |

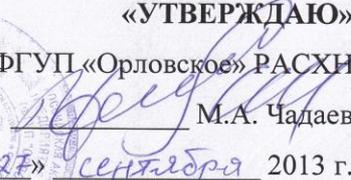
Средне-квадратичное отклонение .065

Коэффициент корреляции .999205

ПРИЛОЖЕНИЕ В1
(Справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГУП «Орловское» РАСХН


М.А. Чадаев

«27» сентября 2013 г.



АКТ

производственных испытаний

Председатель комиссии – Директор ФГУП «Орловское» РАСХН Чадаев М.А.

Члены комиссии – инженер ФГУП «Орловское» РАСХН Корнеев В.Н.; д.т.н., доцент ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ Коломейченко А.В.; аспирант ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ Козлов А.В.

Мы, нижеподписавшиеся, председатель и члены комиссии составили настоящий акт о проведении производственных испытаний гидравлических цилиндров Ц-75. Целью данных испытаний являлась сравнительная оценка износостойкости соединений «поршень-гильза цилиндра» восстановленных по новой технологии и аналогичных серийных соединений. На навески тракторов ЮМЗ-6 и МТЗ-80, сеялки СЗ-3,4, культиваторы КПС-4, дискаторы БДМ-4 устанавливалось в общей сложности по восемь серийных и экспериментальных гидроцилиндров Ц-75. Испытания проводились в обычных условиях эксплуатации. После установленной наработки осуществляли измерения испытуемых соединений.

На каждый экспериментальный гидроцилиндр был установлен восстановленный поршень, который был упрочнен МДО-покрытием модифицированным нанопорошком CuO . Обработка поршней осуществлялась на следующих режимах: **первичная обработка (МДО):** плотность тока $D_r=25 \text{ А/дм}^2$, продол-

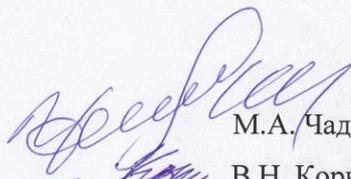
жительность МДО $T=90$ мин, температура электролита $t=40^{\circ}\text{C}$, его состав $C_{\text{KOH}}=2$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л, остальное дистиллированная вода; **раствор-носитель наночастиц CuO**: по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды (по массе); **вторичная обработка (дуговым электрофорезом)**: плотность тока $D_t=25$ А/дм², продолжительность дугового электрофореза $T=1$ мин, температура электролита $t=20^{\circ}\text{C}$, его состав $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л, остальное дистиллированная вода.

Износ внутренней цилиндрической поверхности гильз цилиндров и наружной цилиндрической поверхности поршней определяли соответственно индикаторным нутромером НИ-100-0,002 ГОСТ 9244 с ценой деления 0,002 мм и микрометрами МР-75 ГОСТ 4381 и МР-100 ГОСТ 4381 с погрешностью 1 мкм.

В течение производственных испытаний отказов и простоев по причине потери работоспособного состояния испытываемых соединений не наблюдалось. Производственные испытания показали, что при средней наработке гидроцилиндров 95...105 км износостойкость подвижного соединения «гильза – поршень гидроцилиндра», восстановленного по новой технологии, была в среднем в 1,9...2,1 раза выше, чем у аналогичных соединений с серийными изделиями.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:


М.А. Чадаев

В.Н. Корнеев

А.В. Коломейченко

А.В. Козлов

ПРИЛОЖЕНИЕ В2
(Справочное)



«УТВЕРЖДАЮ»

В.В. Калинин

2013 г.

АКТ

эксплуатационных испытаний гидроцилиндров Ц-75

Председатель комиссии – индивидуальный предприниматель Калинин В.В.

Члены комиссии – д.т.н., доцент ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ Коломейченко А.В.; к.т.н., доцент ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ Волженцев А.В.; аспирант ФГБОУ ВПО ОрёлГАУ Козлов А.В.

Мы, нижеподписавшиеся, председатель и члены комиссии составили настоящий акт о проведении эксплуатационных испытаний гидравлических цилиндров Ц-75. Цель данных испытаний заключалась в сравнительной оценке износостойкости соединений «поршень-гильза цилиндра» восстановленных по предлагаемой технологии и аналогичных соединений у серийных гидроцилиндров. На сеялку СЗ-3,6, культиватор КПС-4, навеску тракторов ЮМЗ-6Л и МТЗ-80 были установлены по одному серийному и одному экспериментальному гидроцилиндру Ц-75. Испытания проводились в условиях рядовой эксплуатации, а измерения испытываемых соединений – после определённой наработки.

У экспериментальных гидроцилиндров восстановленный поршень имел покрытие, полученное при помощи микродугового оксидирования, которое было модифицировано наночастицами оксида меди. Детали были обработаны на следующих режимах: **первичная обработка (МДО):** плотность тока $D_t=25$ А/дм², продолжительность оксидирования $T=90$ мин, температура электролита $t=40^\circ\text{C}$, состав электролита $C_{\text{KOH}}=2$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=10$ г/л, остальное дистиллиро-

ванная вода; **раствор-носитель:** по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части Na_2SiO_3 + 3 части дистиллированной воды; **вторичная обработка (дуговой электрофорез):** плотность тока $D_t=25$ А/дм², продолжительность обработки $T=1$ мин, температура электролита $t=20^\circ\text{C}$, состав электролита $C_{\text{KOH}}=0,5$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=2$ г/л.

Для измерения износа внутренней цилиндрической поверхности гильзы цилиндра и рабочей поверхности поршня гидроцилиндра использовали индикаторный нутромер НИ-100-0,002 ГОСТ 9244 с ценой деления 0,002 мм, микрометры МР-75 ГОСТ 4381 и МР-100 ГОСТ 4381 с точностью измерения 1 мкм.

Сравнительные эксплуатационные испытания показали, что при наработке гидроцилиндров 100...110 км износостойкость соединения гильзы гидроцилиндра с поршнем, восстановленным по предлагаемой технологии, была в среднем в 2 раза выше, чем у аналогичных соединений с серийными деталями.

Председатель комиссии:

Члены комиссии:



В.В. Калинин

А.В. Коломейченко

А.В. Волженцев

А.В. Козлов

РТМ 10.0024-94

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФГБОУ ВПО «ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

(предприятие, организация)

Утверждаю:

Декан факультета агротехники и
энергообеспечения ФГБОУ ВПО Орел ГАУ

Коношин И.В.



Гидроцилиндр Ц-75-200-3

**Технологический процесс восстановления с упрочнением МДО поршня и последующим
модифицированием покрытия частицами нанопорошка CuO**

СОГЛАСОВАНО:

И.П. Андриющенко Д.Н.



РАЗРАБОТЧИКИ:

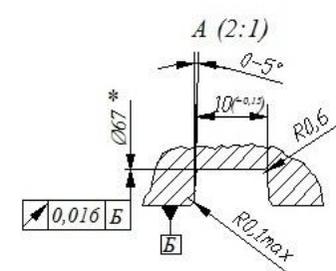
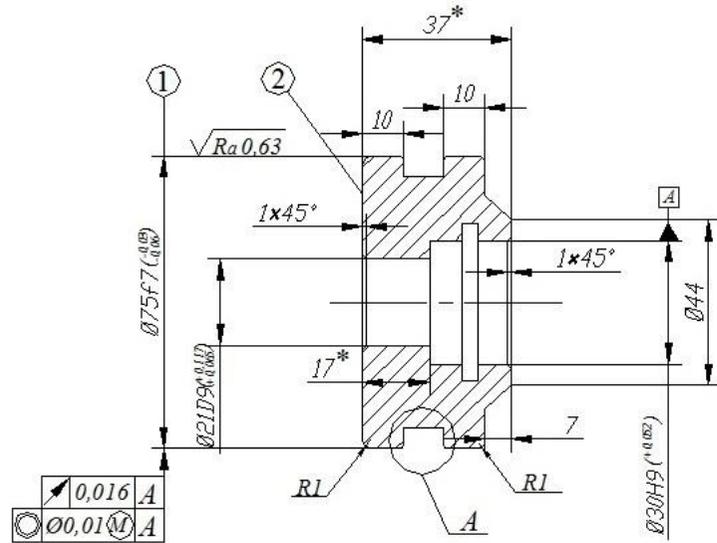
Коломейченко А.В.

Козлов А.В.

Приложение Г
(справочное)

Поршень гидроцилиндра Ц-75-200-3 Р

√Ra0,3(√)



- 1.* Размеры для справок
- 2. -t₂; ±t₂/2

| Номер дефекта | Наименование дефекта | Коеф. повтор. дефекта | | Основной способ устранения дефекта | Допускаемый способ устранения дефекта |
|---------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| | | От общ. числа дет. на деф. | От общ. числа ремонтных деталей | | |
| 1 | Износ поверхности Ø75f7 | 0,9 | 0,9 | МДО+дуговой электрофрез | МДО |
| 2 | Трещины | 0,2 | 0,1 | Браковать | Браковать |

| Поршень гидроцилиндра Ц-75-200-3 Р | | | | | | Лит. | Масса | Масштаб |
|------------------------------------|-------------|----------|------|------|---|----------|-------|---------|
| Изм. | Лист | № докум. | Полт | Ларь | Поршень гидроцилиндра Ремонтный чертеж | | | 1:1 |
| Разрб. | Коллеж | | | | | | | |
| Проп. | Конструктор | | | | | | | |
| Т. контр. | | | | | | | | |
| Н. контр. | Лазичев | | | | Сплав АК7ч ГОСТ 1583-93 | Орел ГАУ | | |
| Утв. | Корошкин | | | | | | | |

| ОрелГАУ | | Разраб. | Козлов | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | Восстановление | Лит. | | |
|---------|---|--|---|---|-------------------------|------------------------------------|------|--------|---|
| | | Пров. | Коломейченко | | | | У | | |
| | | Н. контр. | Логачев | | | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | Т _{пз} Т _{шт} | | | |
| 05 | <u>Очистная</u> 1. Установить детали, закрепить 2. Промыть детали: t=70...80°C, T=3...5 мин. 3. Промыть детали: t=10...20°C, T=2...3 мин. 4. Продуть детали сжатым воздухом 5. Снять детали | Моечная машина ОМ-5288 Ванна цеховая | Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Лабомид 101, 203 (20...30г/л), Вода Вода Сжатый воздух (P=0,6 МПа) | II | 5,0 1,0 | | | |
| 10 | <u>Дефектовочная</u> 1. Установить деталь 2. Проверить поршень на наличие дефектов согласно требований ремонтного чертежа 3. Снять деталь | Стол дефектовочный ОРГ 9810 ГОСНИТИ | Плита 2-1-630x630 ГОСТ 10985-85, Микрометр МР-75 ГОСТ 4381 | | IV | 6,0 2,8 | | | |
| 15 | <u>Шлифовальная</u> 1. Установить деталь, закрепить 2. Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность поршня до $\varnothing 74^{+0,84}$ мм, $v_{окр.д.}=0,5$ м/с; $v_{шлиф.к.}=35$ м/с; S=0,01 мм/об. детали | 3 Кругло-шлифовальный станок 3А161 | Шлифовальный круг 14А50СМ1К 35 м/с ПШ70-20-20 ГОСТ 52781, | | IV | 8,0 3,0 | | | |
| | | | | | | Лист | 2 | Листов | 8 |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|-------|--|---------------------------|---|---|-----------|-------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{пз}}{T_{шт}}$ |
| 20 | 3. Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность поршня до $\varnothing 74^{+0,032}$ и шероховатости $R_a=0,63$; $v_{окр.д.}=0,33$ м/с; $v_{шлиф.к.}=35$ м/с; $S=0,005$ мм/об. детали | | Шлифовальный круг 24A25CM2K 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781, Микрометр МР-75 ГОСТ 4381, Образец шероховатости $R_a 0,63$ ГОСТ 9378-93 | | | |
| | 4. Снять деталь | | | | | |
| | <u>Очистная</u> 1. Установить детали, закрепить 2. Промыть детали: $t=70...80^{\circ}\text{C}$, $T=3...5$ мин. | Моечная машина ОМ-5288 | | Лабомид 101, 203 (20...30г/л), Вода | II | $\frac{5,0}{1,0}$ |
| | 3. Промыть детали: $t=10...20^{\circ}\text{C}$, $T=2...3$ мин. 4. Продуть детали сжатым воздухом 5. Снять детали | Ванна цеховая | Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Вода Сжатый воздух ($P=0,6$ МПа) | | |
| | | | | | Лист | 3 |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|-------|---|--|---|--|-----------|-------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{пл}}{T_{шт}}$ |
| 25 | <u>МДО (первичная обработка)</u> 1. Обезжирить оксидируемые поверхности деталей 1: $t=60...70^{\circ}\text{C}$, $T=1...1,5$ мин. 2. Промыть детали: $t=40...50^{\circ}\text{C}$, $T=2...3$ мин. 3. Установить детали на электрод подвески, разделяя их между собой шайбами. Установить в канавки на рабочих поверхностях поршней защитные полукольца. Закрепить 4. Оксидировать поверхности поршней 1: $T=90$ мин, $D_3=25$ А/дм ² , $t_{эл}=40^{\circ}\text{C}$, $S=65$ мкм 5. Снять детали, удалить остатки герметика 6. Промыть в воде, обдуть сжатым воздухом | Установка для МДО поршней гидроцилиндров с проточной циркуляцией электролита Ванна цеховая Ванна цеховая | Кисть М-906 Подвеска цеховая Подвеска с электродом цеховая Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Водный раствор ($C_{\text{NaOH}}=5...10$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{PO}_4}=40...50$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=3...5$ г/л) Вода Герметик силиконовый Дистиллированная вода, КОН – 2 г/л, Na ₂ SiO ₃ – 10 г/л Вода, Сжатый воздух (P=0,6 МПа) | IV | $\frac{18}{12,8}$ |
| 30 | <u>Шлифовальная</u> 1. Установить деталь, закрепить 2. Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность поршня до удаления рыхлого слоя МДО-покрытия | Кругло-шлифовальный станок 3А161 | Шлифовальная шкурка 14А.54С10 ГОСТ 13344-79, Оправка цеховая | | IV | $\frac{8}{3,0}$ |
| | | | | | Лист | 4 |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|-------|---|-------------------------|---|--|-----------|-------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{пл}}{T_{шт}}$ |
| 35 | 1. Шлифовать наружную цилиндрическую поверхность поршня до $\varnothing 75^{+0,03}$ и шероховатости $R_a=0,63$; $v_{окр.д.}=0,33$ м/с; $v_{шлиф.к.}=35$ м/с; $S=0,005$ мм/об. детали, $S=70$ мкм | | Шлифовальный круг 24A25CM2K 35 м/с ПП70-20-20 ГОСТ 52781, Микрометр МР-100 ГОСТ 4381, Вихретоковый толщиномер ВТ-201, Образец шероховатости $R_a 0,63$ ГОСТ 9378-93 | | | |
| | 4. Снять деталь | Моечная машина ОМ-5288 | | | II | $\frac{5,0}{1,0}$ |
| | <u>Очистная</u> 1. Установить детали, закрепить 2. Промыть детали: $t=70...80^{\circ}\text{C}$, $T=3...5$ мин. 3. Промыть детали: $t=10...20^{\circ}\text{C}$, $T=2...3$ мин. 4. Продуть детали сжатым воздухом | Ванна цеховая | Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Лабомид 101, 203 (20...30г/л), Вода Вода Сжатый воздух ($P=0,6$ МПа) | | |
| | 5. Снять детали | | | | | |
| | | | | | Лист | 5 |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|-------|--|---|--|---|-----------|-------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{пз}}{T_{шт}}$ |
| 40 | <p><u>Дуговой электрофорез (вторичная обработка)</u></p> <p>1. Обезжирить поверхности деталей 1: $t=60...70^{\circ}\text{C}$, $T=1...1,5$ мин.</p> <p>2. Промыть детали: $t=10...20^{\circ}\text{C}$, $T=2...3$ мин. Обдуть сжатым воздухом</p> <p>3. Установить детали на электрод подвески, разделяя их между собой шайбами. Установить в канавки на рабочих поверхностях поршней защитные полукольца. Закрепить</p> <p>4. Нанести раствор-носитель нанопорошка CuO на поверхности А и Б. Сушка раствора-носителя CuO на открытом воздухе: $T=30...50$ мин., $t=20...25^{\circ}\text{C}$</p> | <p>Установка для МДО поршней гидроцилиндров без проточной циркуляции электролита</p> <p>Ванна цеховая</p> | <p>Кисть М-906</p> <p>Подвеска цеховая</p> <p>Кран обдувной ПТ-3353</p> <p>Подвеска с электродом цеховая</p> <p>Пипетка 1-2-10 ГОСТ 29169-91</p> | <p>Водный раствор ($C_{\text{NaOH}}=5...10$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{PO}_4}=40...50$ г/л, $C_{\text{Na}_2\text{SiO}_3}=3...5$ г/л)</p> <p>Вода,</p> <p>Сжатый воздух ($P=0,6$ МПа)</p> <p>Герметик силиконовый</p> <p>Р-р-носитель CuO (по массе 1 часть нанопорошка CuO + 3 части дистиллированной воды + 3 части Na_2SiO_3)</p> | IV | $\frac{18}{0,14}$ |
| | | | | | Лист | 6 |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|---|--|--|---|--|-----------|-------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{пл}}{T_{шт}}$ |
| 45 | 1. Произвести дуговой электрофрез поверхности 1: $T=1$ мин, $D_s=25$ А/дм ² , $t_{гр}=15...20^\circ$ С | Ванна цеховая | Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Дистиллированная вода, КОН – 0,5 г/л, Na ₂ SiO ₃ – 2 г/л | IV | $\frac{80}{30}$ |
| | 6. Снять детали, удалить остатки герметика 7. Промыть детали в воде, обдуть сжатым воздухом | | | Вода, Сжатый воздух (P=0,6 МПа) | | |
| | <u>Притирка</u> 1. Установить деталь, закрепить 2. Притирать наружную цилиндрическую поверхность поршня в размер $\varnothing 75^{+0,03}$ до шероховатости $R_s=0,63$; $n=110$ мин ⁻¹ , $S=70$ мкм | Станок вертикально-доводочный 3807В | Микрометр МР-100 ГОСТ 4381, Вихретоковый толщиномер ВТ-201, Образец шероховатости $R_s 0,63$ ГОСТ 9378-93 | Притирочный порошок из карбида бора зернистостью М40 ГОСТ 5744 | | |
| 3. Снять деталь 4. Промыть деталь в воде, обдуть сжатым воздухом | Ванна цеховая | Подвеска цеховая Кран обдувной ПТ-3353 | Вода, Сжатый воздух (P=0,6 МПа) | Лист | 7 | |

| | | Гидроцилиндр Ц-75-200-3 | | Восстановление | | |
|-------|--|---|--|--------------------|-----------|--------------------------|
| | | Поршень | | | | |
| № п/п | Наименование дефекта, содержание операции, режимы, требования | Оборудование | Оснастка | Расходный материал | Раз. Раб. | $\frac{T_{плз}}{T_{шт}}$ |
| 50 | <p><u>Контрольная</u></p> <p>1. Установить деталь</p> <p>2. Проверить качество восстановления поршня гидроцилиндра согласно требований ремонтного чертежа</p> <p>3. Снять деталь</p> | <p>Стол для контроля</p> <p>ОРГ 9810</p> <p>ГОСНИТИ</p> | <p>Микрометр</p> <p>МР-100 ГОСТ 4381,</p> <p>Вихретоковый</p> <p>толщиномер ВТ-201,</p> <p>Образец</p> <p>шероховатости R_a 0,63</p> <p>ГОСТ 9378-93,</p> <p>Штангенциркуль ШЦ-III-250-0,05 ГОСТ 166-89</p> | | IV | $\frac{6,0}{3,0}$ |
| | | | | | Лист | 8 |

ПРИЛОЖЕНИЕ Д1
(Справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»

В.В. Калинин

«27» сентября 2013 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим подтверждаем, что технология восстановления с упрочнением МДО-покрытиями модифицированными нанопорошком CuO поршней гидроцилиндров, разработанная в Орловском государственном аграрном университете Коломейченко А.В. и Козловым А.В., внедрена в КФХ «Калинин». Было восстановлено по данной технологии 10 деталей, экономический эффект составил 3500 рублей.

Разработчики:

Д.т.н., доцент

Аспирант

А.В. Коломейченко

А.В. Козлов

КФХ «Калинин»:

Индивидуальный предприниматель

В.В. Калинин

ПРИЛОЖЕНИЕ Д2
(Справочное)

«УТВЕРЖДАЮ»



Д.Н. Андрюшенков

«25» ноября 2013 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы

Настоящим подтверждаем, что технология восстановления с упрочнением МДО-покрытиями модифицированными нанопорошком CuO поршней гидроцилиндров, разработанная в Орловском государственном аграрном университете Коломейченко А.В. и Козловым А.В., внедрена на нашем предприятии, которое занимается ремонтом гидроцилиндров. По данной технологии было восстановлено 30 деталей, экономический эффект составил 10500 рублей.

Разработчики:

Д.т.н., доцент

Аспирант

А.В. Коломейченко

А.В. Козлов

Представитель предприятия:

Индивидуальный предприниматель

Д.Н. Андрюшенков

ПРИЛОЖЕНИЕ ДЗ
(Справочное)

УТВЕРЖДАЮ:

Первый проректор
ФГБОУ ВПО Орел ГАУ,

д.э.н., профессор

 Т.И. Гуляева

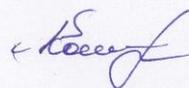
2013 г.



АКТ ВНЕДРЕНИЯ
в учебный процесс

Настоящим подтверждается, что результаты научно-исследовательской работы «Повышение износостойкости деталей машин микродуговым оксидированием с последующим модифицированием покрытия», выполненной на кафедре «Надежность и ремонт машин» А.В. Козловым под руководством д.т.н., доцента А.В. Коломейченко, внедрены в учебный процесс факультета агротехники и энергообеспечения ФГБОУ ВПО Орел ГАУ в виде учебного пособия «Технологии восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники микродуговым оксидированием», разработанного коллективом авторов А.В. Коломейченко, Н.В. Титовым, В.Н. Логачевым и Н.С. Чернышовым. Разработанное учебное пособие рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по агроинженерному образованию в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению «Агроинженерия». Учебное пособие отпечатано на полиграфической базе редакционно-издательского отдела ФГБОУ ВПО «Орловский государственный университет» в 2013 году.

Декан факультета агротехники и
энергообеспечения ФГБОУ ВПО Орел ГАУ



И.В. Коношин

Председатель методической комиссии
факультета агротехники и
энергообеспечения ФГБОУ ВПО Орел ГАУ



В.Н. Корнев