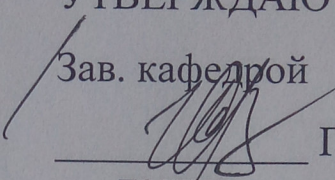


Институт механики и энергетики
Кафедра технического сервиса машин

УТВЕРЖДАЮ

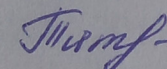
Зав. кафедрой


_____ П.В. Сенин
подпись

«14» 06 2019 г.
дата

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРИБОТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПОКРЫТИЙ СФОРМИРОВАННЫХ МЕТОДОМ
ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ОБРАБОТКИ

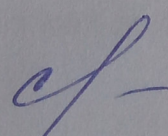
Автор магистерской диссертации  - 30.05.19 М. Г. Тятюшкина

Обозначение магистерской диссертации МД-02069964-35.04.06-20-19

Направление 35.04.06 Агроинженерия

Руководитель работы

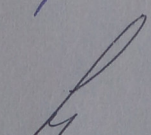
д-р. тех. наук, профессор

 - 02.06.19.

С. А. Величко

Нормоконтролер

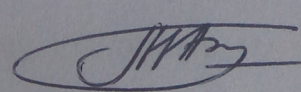
канд. тех. наук, доцент

 - 30.05.19

В. В. Власкин

Рецензент

канд. тех. наук, доцент



М. А. Березин

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ МОРДОВСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Н.П. ОГАРЁВА»**

Институт механики и энергетики
Кафедра технического сервиса машин

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

П.В. Сенин

подпись

«03» 11 2019 г.

дата

**ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
(в форме магистерской диссертации)**

Магистрант Тятюшкина Марина Григорьевна

1 Тема «Исследование триботехнических свойств покрытий сформированных методом электроискровой обработки»

Утверждена по МордГУ № 9036-с от 03.11.2017 г.

2 Срок представления магистерской диссертации к защите до 10 июня 2019 г.

3 Исходные данные для магистерской диссертации: анализ научной литературы в области электрофизических методов восстановления деталей и теории трения материалов

4 Содержание магистерской работы

4.1 Введение

4.2 Состояние вопроса цель и задачи исследования

4.3 Теоретические предпосылки к экспериментальным исследованиям

4.4 Методики исследования

4.5 Результаты экспериментальных исследований

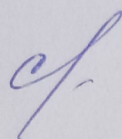
4.6 Совершенствование технологического процесса ремонта круглых шестеренных насосов и оценка его экономической эффективности

4.7 Заключение

4.8 Список использованных источников

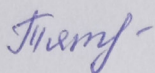
Руководитель работы

д-р. тех. наук, профессор



С.А. Величко

Задание принял к исполнению



М. Г. Тятюшкина

Реферат

Магистерская диссертация содержит 100 страниц машинописного текста, 33 рисунка, 31 таблицу, 34 литературных источника.

ЭЛЕКТРОИСКРОВАЯ ОБРАБОТКА, ПОКРЫТИЕ, ИНТЕНСИВНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ, ШЕРОХОВАТОСТЬ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Объект исследования – интенсивность изнашивания покрытий сформированных на рабочих поверхностях деталей методом электроискровой обработки.

Цель исследований – снижение усталостного износа рабочих поверхностях деталей из алюминиевых сплавов, применением метода электроискровой обработки.

Методология проведения работы – комплекс теоретических и экспериментальных исследований направленный на качественную и количественную оценку интенсивности изнашивания деталей из алюминиевых сплавов.

Результаты работы. Расчетно-экспериментальная оценка интенсивности изнашивания деталей из алюминиевого сплава АК5М7 показала, что применение метода ЭИО позволяет получать покрытия, износостойкость которых выше, чем у пар трения без покрытий.

Проведены исследования микрогеометрии, механических, фрикционных и триботехнических свойств покрытий, полученных методом электроискровой обработки.

					МД-02069964-35.04.06-20-19			
Изм	Лист	№ докум	Подпись	Дата				
Разраб		Тягашкина МГ	<i>Тягашкина</i>	30.05.19	Исследование триботехнических свойств покрытий сформированных методом электроискровой обработки	Лит	Лист	Листов
Провер		Величко С.А.	<i>Величко</i>	02.05.19			5	100
Н. Кантр		Вяскин В.В.	<i>Вяскин</i>	30.05		ИМЭ		
Чтв		Сенин П.В.	<i>Сенин</i>	14.06				

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение.....	9
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	11
1.1 Анализ методов упрочнения и восстановления деталей машин основанных на использовании источников концентрированной энергии	11
1.2 Общие закономерности формирования электроискровых покрытий на катоде.....	20
1.3 Микротвердость электроискровых покрытий.....	22
1.4 Задачи исследования.....	26
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ	28
2.1 Условия взаимодействия рабочих поверхностей деталей сопряжения подшипниковая обойма – цапфа круглого шестеренного насоса	28
2.2 Пути снижения интенсивности изнашивания деталей пары трения подшипниковая обойма – цапфа круглого шестеренного насоса	35
3 Методики экспериментальных исследований	41
3.1 Методика оценки значений параметров шероховатости поверхностей	41
3.2 Исследование микротвердости покрытий, образованных методом электроискровой обработки	45
3.3 Методика определения пластических свойств поверхностей образцов	49
3.4 Методика определения условного предела текучести поверхностей образцов	52
3.5 Методика определения удельной сдвиговой прочности молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел	54

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

3.6 Методика оценки фрикционной усталости поверхностей образцов ..	58
3.7 Лабораторные триботехнические испытания образцов пар трения ..	60
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	64
4.1 Оценка параметров шероховатости рабочих поверхностей деталей пар трения	64
4.2 Оценка механических свойств поверхностных слоев образцов пар трения	65
4.2.1 Микротвердость	65
4.2.2 Относительное удлинение поверхностных слоев	68
4.2.3 Условный предел текучести	69
4.3 Исследование фрикционных свойств поверхностей деталей пар трения	70
4.3.1 Удельная сдвиговая прочность молекулярных связей	70
4.3.2 Фрикционная усталость	74
4.4 Коэффициент трения и интенсивность изнашивания	76
5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА КРУГЛЫХ ШЕСТЕРЕННЫХ НАСОСОВ	78
5.1 Технологические рекомендации по ремонту круглых шестеренных насосов	78
6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА КРУГЛЫХ ШЕСТЕРЕННЫХ НАСОСОВ	130
6.1 Себестоимость ремонта круглых шестеренных насосов	130
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	136
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	139

Введение

Важным резервом повышения качества ремонта автомобилей, тракторов и сельскохозяйственных машин, экономии материальных и других ресурсов является применение прогрессивных технологических процессов восстановления деталей, обеспечивающих повышение ресурса отремонтированных машин.

В прогнозе научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года, подготовленном Минобрнауки, одним из приоритетных направлений развития является создание новых материалов и покрытий, обеспечивающих заданные функциональные свойства рабочих поверхностей деталей [1].

Наиболее перспективными в настоящее время являются методы поверхностного упрочнения и модифицирования, основанные на обработке материалов концентрированными потоками энергии. Об уникальном влиянии указанного воздействия на формирование структуры, микроструктуры, свойств поверхности, а так же впоследствии на процессы трения и изнашивания металлов указывается в работах известных ученых Ф.Х. Бурумкулова, А.Д. Верхотурова, К.К. Намитокова, Г.В. Самсонова, Г.И. Бровера, А.А. Углова и др.

К числу современных и перспективных методов поверхностной обработки металлических поверхностей относится электроискровая обработка, позволяющая получать поверхностные структуры с уникальными физико-механическими свойствами на наноуровне.

Физическая сущность процесса заключается в явлении электрической эрозии и полярном переносе материала анода (обрабатываемого электрода) на катод (электрод-деталь) при протекании импульсных разрядов в газовой среде. Метод разработан Б.Р.Лазаренко и Н.И.Лазаренко, которые предложили

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19				

физическую модель процесса, изучили возможности и технологические особенности метода, создали опытные и промышленные образцы установок.

К основным достоинствам метода следует отнести возможность формировать на рабочих поверхностях деталей покрытия с заданными служебными свойствами, высокую адгезию покрытия с основой, возможность локальной обработки поверхности, отсутствие необходимости в предварительной подготовке поверхности и экологичность процесса.

Несмотря на высокую эффективность и повышенный интерес к процессу электроискровой обработки, в настоящее время все же недостаточно изучены свойства измененного поверхностного слоя определяющие трибологические свойства покрытий.

В связи с этим представленная магистерская диссертация направлена на изучение микрогеометрических характеристик, физико-механических и фрикционных свойств покрытий сформированных методом электроискровой обработки (ЭИО), определяющих интенсивность усталостного изнашивания рабочих поверхностей пар трения.

Работа выполнена на примере пары трения сопряжения подшипниковая обойма – цапфа круглого шестеренного насоса.

									Лист
									10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19				

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ методов упрочнения и восстановления деталей машин основанных на использовании источников концентрированной энергии

Современная концепция эффективного использования машин и оборудования заключается в разработке технологий и средств повышения их долговечности за счет создания покрытий, обеспечивающих заданные функциональные свойства рабочих поверхностей деталей узлов и агрегатов. В связи с этим, исследование, разработка и совершенствование технологий получения поверхностных слоев с заданной структурой и, соответственно, требуемыми свойствами является актуальной задачей.

При этом необходимо учитывать, что решающее значение при формировании структуры слоя имеют энергетическая способность взаимодействия насыщающего элемента, физико-химическая природа насыщающей среды и механизм фазовых превращений. Широкие перспективы, в этой связи, открывает технологическое обеспечение износостойкости металлических поверхностей на основе электрофизических способов упрочнения и восстановления с использованием высокоэнергетических концентрированных потоков энергии. В ремонтном производстве для восстановления и упрочнения деталей широко применяются методы, основанные на использовании потоков энергии с удельной мощностью в пятне нагрева более 10^2 Вт/мм².

Газовое пламя. Сущность упрочнения газопламенным напылением заключается в расплавлении напыляемых материалов газовым пламенем и распылении их сжатым газом [2]. Температура пламени горючих газов в смеси с кислородом находится в пределах 2000-3500 °К. Наименьшая площадь пятна нагрева – 10^{-2} см². Наибольшая удельная мощность в пятне –

									Лист
									11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19				

5×10^2 Вт/мм². Скорость потока газа ниже 700 м/с, частиц порошка до 50 - 100 м/с, производительность напыления 1 - 100 кг/час, прочность сцепления до 50 МПа, температура частиц распыляемого материала близка к температуре плавления. Металлические порошки поступают в горелку из бункера с помощью транспортирующего газа или под действием силы тяжести. В качестве горючего газа применяют ацетилен, пропан-бутан, природный газ и др. Газопламенное напыление порошковых и проволочных материалов рекомендуется применять: для восстановления деталей узлов трения скольжения или при изготовлении биметаллических вкладышей со стальной основой взамен цельнобронзовых; при формировании рабочих поверхностей деталей узлов трения скольжения, работающих в условиях жидкостного или граничного трения при удельных нагрузках до 12 МПа и скоростях скольжения до 2,5 м/с.

Наплавка в среде углекислого газа. Процесс наплавки в среде углекислого газа заключается в том, что в зону горения электрической дуги под давлением подается пищевая углекислота или сварочный углекислый газ и чистый аргон, то есть сварочная ванна изолируется от кислорода и азота воздуха. Расход газа составляет 0,6 – 0,96 м³/ч. Наибольшая плотность мощности электрической дуги в пятне составляет примерно 1×10^3 Вт/мм². Наплавка в среде углекислого газа обеспечивает хорошее формирование шва, наплавленный металл получается плотным, низкая зона термического влияния. Механизированную наплавку в среде углекислого газа целесообразно применять для восстановления цилиндрических деталей диаметром 10... 40 мм.

Наплавка в среде инертного газа. Процесс наплавки в среде инертного газа состоит в дуговой наплавке при защите зоны дуги аргоном, гелием или иным инертным газом. Наплавку в среде инертного газа осуществляют плавящимся и неплавящимся вольфрамовым электродами. Наплавка плавящимся электродом отличается тем, что дуга возникает между основным

									МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата						12

металлом и электродным наплавочным материалом. Процесс протекает в условиях автоматической подачи электродной проволоки. При наплавке вольфрамовым электродом дуга, за счет теплоты которой происходит плавление наплавочного присадочного металла, возникает между основным металлом и вольфрамовым электродом. Режим наплавки определяется двумя основными параметрами: силой тока и диаметром электрода. Температура дуги составляет 10000 - 20000 °К, наибольшая плотность мощности энергии в пятне - 1×10^3 Вт/мм². Устойчивость процесса наплавки и хорошее формирование наплавленного металла позволяют вести процесс на высоких скоростях - до 150 м/ч и выше. К преимуществам метода относятся - высокая производительность процесса (в 3...4 раза выше, чем при газовой сварке); высокая механическая прочность сварного шва; небольшая зона термического влияния; снижение потерь энергии дуги на световое излучение. Применение инертного газа исключает необходимость использования флюса, поэтому этот способ особенно эффективен при наплавке цветных металлов, высоколегированных сталей и других материалов, чувствительных к окислению и азотированию.

Вибродуговая наплавка. Особенности вибродуговой наплавки являются, вибрация электродной проволоки и подача охлаждающей жидкости в зону горения дуги. Вибрация обеспечивает стабильность дуги за счет использования энергии электродвижущей силы самоиндукции при размыкании электрода и детали. Максимальная плотность энергии в пятне нагрева составляет 1×10^3 Вт/мм². Вибрация позволяет осуществить мелкокапельный перенос наплавляемого металла. Преимущества вибродуговой наплавки: путем подбора электродной проволоки получают покрытия высокой твердости и износостойкости без дополнительной термообработки; детали не деформируются и не нагреваются в процессе наплавки; производительность процесса в 4-5 раз выше, чем ручной дуговой наплавкой. Данный метод наплавки не рекомендуется применять к деталям

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					13

машин, испытывающим при эксплуатации переменные нагрузки и имеющим склонность к поломке из-за усталости.

Плазменные технологии. В настоящее время широкое применение нашли плазменные технологии, включающие осаждение расплавленного в плазменной струе порошка на поверхность металлов и сплавов [3]. Плазмой называется газ, находящийся в сильно ионизированном состоянии под воздействием различных факторов: температуры, электрического или высокочастотного разряда, детонации. При использовании аргона температура плазмы составляет 15000-30000°К, а азота - 10000-15000 °К. Наибольшая плотность мощности энергии в пятне составляет 5×10^2 Вт/мм². При плазменной металлизации плазма образуется пропусканьем газа (аргон, азот, водород, гелий), который возбуждается между двумя электродами. Обработка осуществляется в специальных устройствах, называемых плазмотронами или плазменными головками.

Для получения плазменной струи между катодом и анодом возбуждают электрическую дугу. Плазмообразующий газ, введенный в зону горения дуги, ионизируется и выходит из сопла в виде струи небольшого сечения. В качестве напыляемого материала применяют гранулированный порошок. Подача порошка в плазменную струю осуществляется транспортирующим газом (азотом). Расход порошка регулируется в пределах от 3 до 20 кг/ч. Напыляемый порошок расплавляется плазменной струей и наносится на поверхность детали. Периодическое чередование твердых и пластичных прослоек в структуре рабочей поверхности позволяет эффективно увеличить долговечность деталей, работающих в условиях динамических и термомеханических нагрузок. Высокая стоимость оборудования и присадочных порошков ограничивает применение данного метода в мелкосерийном и единичном производстве.

Лазерные технологии. Лазерное излучение позволяет сконцентрировать энергию с плотностью мощности до 10^{16} Вт/мм². Частота следования

						МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			14

импульсов может составлять от 1 до 30 Гц, а время воздействия импульсов от 500 мкс до 10 мс. Внедрение методов лазерного упрочнения обусловливается наличием серийного высокопроизводительного лазерного оборудования как импульсного, так и непрерывного действия, высокой технологичностью процесса, значительной номенклатурой обрабатываемых деталей, требующих локального упрочнения, возможностью получения заданного комплекса физико-механических свойств обрабатываемых поверхностей путем их легирования различными элементами при лазерном нагреве. В процессе лазерного легирования расплавляется участок поверхности металла вместе с добавляемыми легирующими элементами, предварительно нанесенными на обрабатываемый участок, что позволяет в локальном объеме получить новый сплав с необходимыми эксплуатационными свойствами [4-6]. Упрочнение лазерным излучением основано на локальном нагреве участка поверхности под воздействием излучения и охлаждения этого участка со сверхкритической скоростью после прекращения воздействия за счет теплоотвода во внутренние слои металла [6].

При лазерном легировании можно улучшить конструкционную прочность металлов и сплавов, включающую такие характеристики, как надежность, долговечность и прочность деталей. Однако, лазерное упрочнение не может быть конечным видом термической обработки, и необходимо использование комбинированных технологий поверхностного упрочнения сталей, легированных при лазерном нагреве.

Кроме того, некоторыми исследователями было отмечено [7], что лазерное упрочнение не обеспечивает низколегированным сталям преимущества в износостойкости по сравнению с обычной объемной закалкой при одинаковых уровнях содержания углерода в мартенситных структурах, и наличие 10...30 % остаточного аустенита не оказывает заметного влияния на абразивную износостойкость низколегированных инструментальных сталей, закаленных лазером.

							МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				15

Электронно-лучевая обработка. Электронно-лучевая обработка поверхности заключается в следующем: при воздействии на поверхность деталей потока электронных пучков часть энергии отражается от поверхности, часть поглощается в тонком поверхностном слое материала, что приводит к его нагреву, последующему плавлению и испарению в зависимости от условий и режимов обработки. Улучшение триботехнических свойств деталей обеспечивается оптимальным выбором параметров электронно-лучевой обработки. Плотность энергии электронного луча – до 5×10^6 Вт/мм². Одним из видов электронно-лучевой обработки является метод *электронно-лучевой наплавки*, который позволяет формировать беспористые покрытия с равномерным распределением твердой фазы по всему объему наплавленного слоя. При этом средний размер карбидных зерен остается постоянным. Толщина покрытия варьируется в зависимости от количества проходов электронного пучка. Увеличение количества твердой фазы уменьшает износ, увеличивает нагрузочную способность и время приработки. Применение двухкратной электронно-лучевой закалки позволяет упрочнять поверхностные слои углеродистых сталей [8]. Сложность процесса и высокая стоимость оборудования ограничивает применение метода электронно-лучевой обработки в производстве с узкой номенклатурой деталей и низкой программой.

Ионно-лучевая обработка – ионная имплантация (ИИ) относится к эффективным видам модифицирования поверхностных слоев при облучении импульсными мощными ионными пучками, и позволяет значительно повысить износостойкость и коррозионную стойкость деталей [9]. Ионная имплантация основана на внедрении в твердое тело ионов, ускоренных в электростатическом поле, что приводит к изменению структурно-фазового и элементного состава поверхностных слоев. В качестве первичных частиц могут быть использованы положительные или отрицательные ионы и нейтральные атомы. При имплантации в металлическую матрицу ускоренный

										Лист
										16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

ион теряет свою энергию вследствие упругих соударений с атомами матрицы и неупругого взаимодействия с электронами. Ионная имплантация позволяет внедрять любые элементы в количествах, превышающих их предельную растворимость. Не смотря на то, что имплантируемые частицы проникают на небольшую глубину, толщина слоя с измененными свойствами на 2-3 порядка превышает глубину их проникновения вследствие развивающихся диффузионных процессов и возникающих дефектов кристаллической структуры. ИИ сопровождается распылением облучаемого материала, что приводит к уменьшению шероховатости обрабатываемой поверхности. Плотность мощности ионизирующего тока – 50 Вт/мм². В процессе обработки температура детали остается практически неизменной. Благодаря отсутствию термических дефектов, ИИ может быть использована на финишных операциях. Наибольшее распространение ионная имплантация получила при обработке режущего инструмента. Ее проведение позволяет повысить износостойкость в десятки раз. В Западной Европе 20...25 % выпускаемых пресс-форм подвергаются ионной имплантации. Обработка ионами азота и углерода ножей для резки резины, ленточных пил, винтов вертолетов, ответственных узлов реактивных двигателей позволяет повысить их долговечность в 10...80 раз.

Электроэрозионный синтез (ЭЭС) покрытий – технология нанесения износостойких сверхтвердых покрытий, основанная на взаимодействии специальной экзотермической смеси с основным металлом под действием электрической искры с образованием сплавов внедрения. Наибольшая плотность мощности энергии электрической дуги в пятне составляет 1×10^9 Вт/мм². Исследования, проводимые в области технологии ЭЭС, направлены на изучение особенностей формирования покрытий при воздействии импульсов электрического тока различной мощности, качества покрытий при изменении технологических параметров процесса, износостойкости покрытий в условиях абразивного изнашивания, на выбор оптимальных режимов

										Лист
										17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

упрочнения. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности ЭЭС-покрытий, возможности их применения для упрочнения и ремонта деталей машин. Данный метод широко применяется для локального упрочнения различных деталей машин и механизмов, а также рабочих поверхностей режущего инструмента.

Электроконтактная приварка. Одним из способов восстановления цилиндрических деталей является электроконтактная приварка присадочных материалов [10-12]. Процесс электроконтактной приварки заключается в следующем. К восстанавливаемой поверхности детали импульсным током до 15 кА приваривают листовой материал, проволоку или порошок. Максимальная плотность энергии в пятне нагрева составляет 1×10^3 Вт/мм². При этом нагрев до 1200⁰С поверхности детали и присадочного материала осуществляется методом электросопротивления, а металлическая связь между ними образуется вследствие частичного контакта, а также вследствие диффузии и схватывания металлов. После нанесения покрытия поверхность шлифуют до получения требуемой шероховатости.

Электроискровая обработка используется для легирования, упрочнения, и восстановления деталей изготовленных из токопроводящих материалов и в жидкой, и в газовой среде, и в вакууме. Данный метод основан на явлении электрической эрозии материалов при искровом разряде, полярного переноса продуктов эрозии на катод (деталь), на поверхности которого формируется слой измененной структуры и состава. Величина этих изменений определяется составом, структурой, свойствами материалов электродов и технологическими параметрами процесса ЭИО. При электроискровом разряде плотность энергии в пятне контакта достигает значения $1 \times 10^6 - 1 \times 10^9$ Вт/мм², а температура плазмы 7000-20000 К.

На основании проведенного обзора термические источники различных методов можно расположить следующим образом (табл. 1.1).

										Лист
										18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

Таблица 1.1 - Энергетические характеристики некоторых термических источников энергии, применяемых для восстановления параметров изношенных деталей

Источники энергии	Температура пламени, плазмы или дуги, °К	Наименьшая площадь нагрева, мм ²	Наибольшая плотность мощности энергии в пятне, Вт/мм ²
1	2	3	4
Ионно-лучевая обработка	-	-	5×10^1
Газовое пламя	3000-3500	1	5×10^2
Топливо-плазменное пламя	4000-5000	1	5×10^2
Дуга в парах: щелочных металлов железа	4000...5000	1	1×10^3
	5000...6000	1	1×10^3
Дуга в газах: водород, азот аргон, гелий	5000...8000	$1 \cdot 10^{-1}$	1×10^3
	10000...20000	$1 \cdot 10^{-4}$	1×10^3
Электроконтактная приварка	до 1200	-	1×10^3
Наплавка в среде углекислого газа	-	-	1×10^3
Наплавка в среде инертного газа	10000-20000	-	1×10^3
Вибродуговая наплавка	-	-	1×10^3
Плазменные технологии	7000-30000	-	$5 \times 10^2 - 1 \times 10^6$
Электронно-лучевая обработка	-	$1 \cdot 10^{-5}$	1×10^6
Электроэрозионная обработка	7000...20000	$1 \cdot 10^{-6}$	1×10^9
Электрическая искра в газовой среде	7000...20000	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \times 10^6 - 1 \times 10^9$
Лазерные технологии	-	$1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{16}$

Как следует из таблицы 1.1, одним из методов, у которого наблюдается наибольшая концентрация энергии в пятне контакта, является импульсная электрическая искра.

Основными достоинствами обработки электрической искрой являются: возможность проводить локальную обработку поверхности детали на открытом воздухе; отказ от использования флюсов или защитных газов; значительное снижение тепловой напряжённости детали при обработке; обеспечение минимальных потерь электродного материала на

разбрызгивание; обеспечение высокой прочности сцепления покрытия с основой; отказ от предварительной подготовки и в некоторых случаях от обработки восстановленной поверхности; обеспечение экологической чистоты окружающей среды; использование малогабаритного, транспортабельного оборудования, питающегося от осветительной сети переменного тока.

Универсальность электрической искры, как технологического инструмента, дает возможность использовать одно и то же оборудование для различных технологических целей и совмещать в одном цикле обработки различные технологические процессы: легирование, упрочнение и наплавку.

Таким образом, очевидно, что для современного ремонтного производства, из всех рассмотренных методов, ЭИО является наиболее перспективной.

1.2 Общие закономерности формирования электроискровых покрытий на катоде

Физико-химические процессы, происходящие при искровом разряде в межэлектродном промежутке и на поверхности электродов, определяют свойства электроискровых покрытий (ЭИП).

Впервые химический, фазовый состав и структура ЭИП на катоде исследованы и описаны в работах *Barash M.M.*, Гитлевича А.Е., *Goldshmidt M.J.*, Иванова Г.П., Золотых Б.Н., Лазаренко Б.Р. и Н.И., Могилевского И.З., Палатника Л.С., Сафронова И.И. и др.

Основные выводы этих работ заключаются в следующем:

1. На поверхности катода в процессе ЭИЛ образуется слой измененной структуры и состава – так называемый, «белый слой» (БС). Высокая скорость теплоотвода приводит к тому, что в пределах слоя температура быстро падает до температуры плавления и соответствующих фазовых превращений. В

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

связи с этим кристаллизация, фазовые превращения, сопровождающие процесс ЭИЛ, приводят к образованию крайне неравновесных структур с очень мелким зерном, высокой гетерогенности по составу, структуре и свойствам. Фазовыми составляющими структуры слоя после ЭИО в основном являются: аустенит (реже феррит), нитриды, карбиды, карбонитриды и закалочные структуры (мартенсит, сорбит, тростит).

2. Непосредственно к белому слою прилегает диффузионная зона и зона термического влияния, представляющие неравновесные фазы и структуры, в большинстве случаев наблюдаемые при термической обработке материалов.

3. На поверхности катода в зависимости от физико-химической природы материалов электродов и режимов обработки можно получить либо покрытия из материала анода, либо образование зоны совместной кристаллизации, либо диффузионную зону.

4. Измененный поверхностный слой (ИПС) неоднороден по химическому, фазовому составу и свойствам как по глубине, так и вдоль легированного слоя.

5. Количество перенесенного материала анода зависит от физико-химического состава материала катода.

6. Масса катода в процессе ЭИЛ (с повышением удельного времени обработки) изменяется нелинейно и выражается кривой с максимумом. Каждому заданному электрическому режиму и составу материала электродов соответствует определенная толщина БС.

7. Повышение твердости легирующего электрода приводит к повышению твердости БС, при этом его твердость может превышать твердость исходных материалов электродов.

8. Чем больше инертна межэлектродная среда, тем дольше может длиться обработка единиц площади катода и тем толще могут быть наносимые слои.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		21

Таким образом, в приповерхностных слоях материала катода в общем случае образуются белый слой, диффузионная зона и зона термического влияния. В зависимости от физико-химических свойств материала электродов, режимов обработки, межэлектродной среды образование некоторых зон может не происходить.

1.3 Микротвердость электроискровых покрытий

Твердость является одной из важнейших физико-механических свойств покрытия и представляет собой его внешнюю характеристику, заключающуюся в сопротивлении деформации или разрушению под действием локальных силовых воздействий.

Ряд исследователей считает, что при искровом разряде упрочнение материала происходит в результате преимущественного теплового действия искры при формировании поверхностного слоя. Другие считают, что эффект упрочнения происходит только в результате переноса материала анода на катод. В ряде работ сделан вывод, что упрочнение происходит как в результате переноса вещества электродов, так и в результате теплового действия искрового разряда. Анализ литературы [13] позволяет сделать выводы об основных взглядах на процесс упрочнения:

1. Процесс упрочнения происходит за счет осаждения на поверхности катода материала анода при электроискровом разряде. Считается, что наибольший эффект наблюдается в том случае, если в качестве материала электрода используются материалы с наибольшей твердостью. В этом случае можно условно записать:

$$H_{\mu} = f(Me_{(a)} + T_{(к)}), \quad (1.2)$$

где H_{μ} – эффект упрочнения; $Me_{(a)}$ – характеристики материала анода; $T_{(к)}$ – температура в зоне расплава катода при воздействии электрического

разряда. При этом в межэлектродном промежутке температура может достигать $\sim 10000^{\circ}\text{C}$.

2. Поверхностный слой после ЭИО представляет собой результат взаимодействия материалов анода, катода и межэлектродной среды. При этом в зоне воздействия электрических разрядов (рис. 1.1, а) нагревается катод: $T_{(к)}$. На разогретую часть $T_{(к)}$ катода $Me_{(к)}$ осаждается расплавленный металл анода $Me_{(а)}$: $[Me_{(а)} + Me_{(к)} + T_{(к)}]$ (рис. 1.1, б). Под воздействием высоких температур в зоне расплава катода образуются твердые растворы, химические соединения $[Me_{(а)} \cdot Me_{(к)}]$ (рис. 1.1, в), в том числе с кислородом и азотом воздуха (оксиды, нитриды), которые осаждаются на нем. Кроме того, следует учесть влияние диффузии материала анода $Me_{(а)}$ в материал катода $Me_{(к)}$: $[Me_{(а)} \rightarrow Me_{(к)}]$ (рис. 1.1, г).

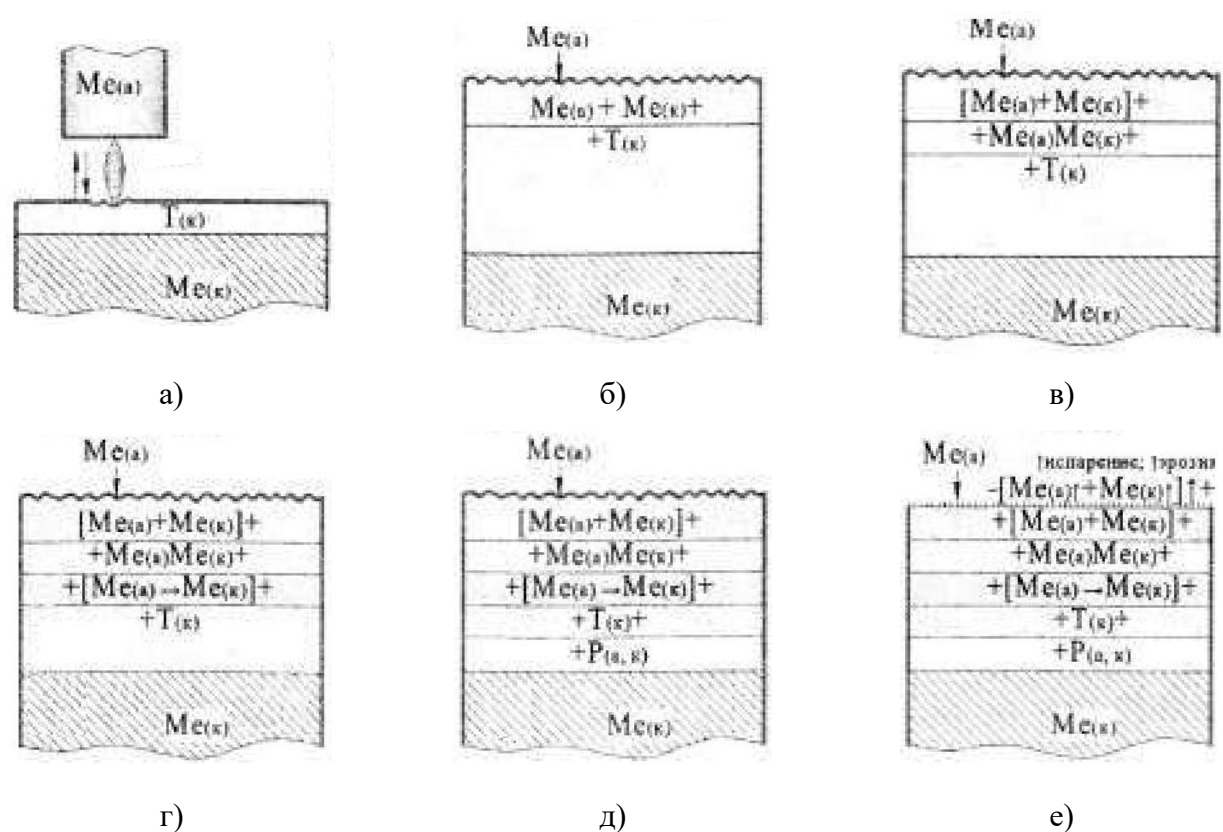


Рисунок 1.1 – Схемы основных последовательно и параллельно действующих процессов упрочнения при ЭИО

Следовательно, учитывая вышеперечисленные процессы, эффект упрочнения можно записать:

$$H_{\mu} = f \left\{ \left[Me_{(a)} + Me_{(к)} + T_{(к)} \right] + (Me_{(a)} \cdot Me_{(к)}) + \left[Me_{(a)} \rightarrow Me_{(к)} \right] \right\}, \quad (1.2)$$

где $Me_{(a)}$, $Me_{(к)}$, $T_{(к)}$ – эффекты формирования упрочненного поверхностного слоя в результате взаимодействия материалов анода, катода, температуры, полученных твердых растворов, химических соединений и влияния диффузии. 3. Процесс упрочнения происходит как за счет переноса и взаимодействия материала электродов, так и за счет импульсного воздействия высоких температур и давлений $P_{(a,к)}$ (рис. 1.1, д), которые приводят к появлению крайне неравновесных структур, новых фаз, дроблению зерна. Кроме того, ЭИО сопровождается испарением материала анода и катода в газовой фазе, а также их эрозией (преимущественно анода) в жидкой и твердой фазах: $\left[Me_{(a)\uparrow} \rightarrow Me_{(к)\uparrow} \right] \uparrow$. С учетом перечисленных процессов общее выражение эффекта упрочнения запишем в виде:

$$H_{\mu} = f \left\{ \left[Me_{(a)} + Me_{(к)} + T_{(к)} \right] + (Me_{(a)} \cdot Me_{(к)}) + \left[Me_{(a)} \rightarrow Me_{(к)} \right] + P_{(a,к)} + \left[Me_{(a)\uparrow} \rightarrow Me_{(к)\uparrow} \right] \uparrow \right\}, \quad (1.3)$$

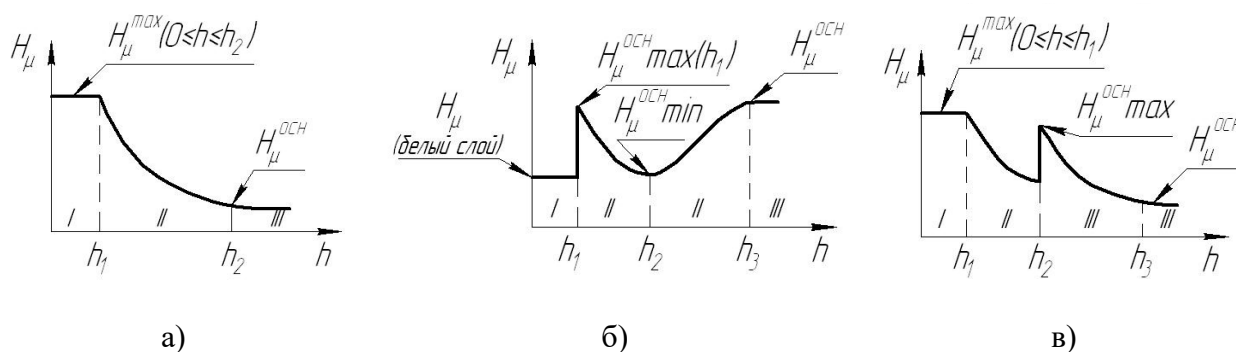
где $P_{(a,к)}$ – импульсное воздействие на материал упрочненного слоя; $Me_{(a)\uparrow}, \uparrow, Me_{(к)\uparrow}, \uparrow$ – испарение и эрозия, соответственно, материалов анода и катода.

Как правило, значения микротвердости ИПС распределяются по глубине неравномерно. В работе [14] представлены распределения закаленных и «сырых» образцов, упрочненных твердым сплавом Т15К5 при одинаковых режимах нанесения покрытий. У «сырого» образца подслоя тверже, чем у материала основы, и твердость подслоя является как бы переходной к повышенной твердости нанесенного слоя. При ЭИО закаленной стали подслоя является зоной отпуска, так как твердость его ниже твердости

исходного материала образца. Этот факт важно учитывать при обработке деталей с закаленной поверхностью.

Существенное влияние на твердость и глубину ИПС оказывают параметры импульсного разряда. Авторы работы [15] отмечают, что при упрочнении энергетические режимы обработки должны быть такими, чтобы термическое влияние электрических импульсов на подслои было возможно меньше. Это условие выполняется при ЭИО с параметрами импульсного разряда $W_{и} \leq 1 \text{ Дж}$ и $t_{и} = (50 - 150) \cdot 10^{-6} \text{ с}$.

Типичные распределения микротвердости по глубине покрытия показаны на рисунке 1.2.



I – «белый» слой; II – термодиффузионный слой; III – основа

Рисунок 1.2 – Изменение микротвердости по глубине материала

Тип кривых, представленных на рисунках 1.2, а и 1.2, в, характерен для материалов из твердых сплавов, тугоплавких металлов, а также сплавов на основе железа, никеля, незакаленных сталей и чугунов.

Тип кривой на рисунке 1.2, б характерен для материалов, образованных цветными металлами и их сплавами, а также черными металлами и сплавами на их основе.

Для описания закона распределения микротвердости по глубине материала (рис. 1.2, а) использована функция:

$$F(h) = 1 - \frac{H_{\mu}(h) - H_{\mu}^{\text{осн}}}{H_{\mu}^{\text{max}}(h_1) - H_{\mu}^{\text{осн}}} = 1 - \exp\left[-\left(\frac{h - h_1}{a}\right)^b\right], \quad (1.4)$$

где $H_{\mu}^{\text{осн}}$ – микротвердость материала основы; H_{μ}^{max} – максимальная микротвердость материала; h_1 – толщина «белого» слоя; a и b – параметры распределения.

На рисунке 1.2 видно, что H_{μ}^{max} у всех рассматриваемых кривых соответствует точке h_1 . С учетом этого функция может быть представлена в виде:

$$H_{\mu}(h \geq h_1) = H_{\mu}^{\text{осн}} + (H_{\mu}^{\text{max}}(h_1) - H_{\mu}^{\text{осн}}) \cdot \exp\left[-\left(\frac{h - h_1}{a}\right)^b\right]. \quad (1.5)$$

Аналогичными функциями могут быть описаны кривые изменения микротвердости, представленные на рисунках 1.2, б и 1.2, в. На рисунке 1.2, б для описания возрастающей ветви кривой на участке от h_2 до h_3 используется не функция $F(h)$, а функция $1 - F(h)$.

Значения $H_{\mu}^{\text{max}}(h)$, где толщина «белого» слоя может быть, в частности, равна нулю, экспериментом не определяется. Эту точку на кривой распределения находят методом экстраполяции кривой распределения $H_{\mu}(h)$ на край образца, если $h_1=0$, либо в точку h_1 , если $h_1>0$.

Из рисунка 1.2 видно, что применение метода ЭИО позволяет в широком диапазоне изменять микротвердость ИПС.

1.4 Задачи исследования

Из представленного обзора следует, что для современного ремонтного производства, из всех рассмотренных методов, электроискровая обработка является наиболее перспективной. Одной из важных особенностей ЭИО является возможность формировать покрытия с большим диапазоном физико-химических и механических свойств. Варьируя электрическими и кинематическими режимами, материалом электродов, межэлектродной

										Лист
										26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

средой, можно управлять эксплуатационными характеристиками рабочих поверхностей деталей. Однако представленные в научной литературе результаты исследований свойств ИПС, предназначенных для восстановления изношенных поверхностей, изучены недостаточно.

Задачи, решаемые в магистерской диссертации:

1. Рассмотреть условия взаимодействия рабочих поверхностей деталей (на примере ресурсопределяющего сопряжения круглого шестеренного насоса) и определить пути повышения их триботехнических свойств.

2. Дать количественную оценку повышения износостойкости изнашиваемой поверхности пары трения.

3. Исследовать микрогеометрию, механические, фрикционные и триботехнические свойства покрытий, полученных методом электроискровой обработки.

4. Разработать технологию ремонта круглых шестеренных насосов и определить ее технико-экономическую эффективность внедрения в производство.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ПАР ТРЕНИЯ

2.1 Условия взаимодействия рабочих поверхностей деталей сопряжения подшипниковая обойма – цапфа круглого шестеренного насоса

В круглых шестеренных насосах сила, действующая на подшипники, определяется по формуле:

$$F_{НШ} = 0,85 \Delta P b D_e, \quad (2.1)$$

где $\Delta P = P_2 - P_1$ – перепад давления между камерой нагнетания P_2 и камерой всасывания P_1 , МПа; b – ширина шестерни, мм; D_e – диаметр шестерни по окружности головок зубьев, мм.

Тогда нагрузка на каждой опоре составит:

$$F_{НШ1,2} = \frac{0,85 \Delta P b D_e}{2}. \quad (2.2)$$

По формуле (2.2) для насоса НШ50 А, при $\Delta P = 10$ МПа, $b = 31,4_{-0,02}$ мм, $D_e = 59,8_{-0,030}$ мм, сила, действующая на каждую опору, составит 7980,3 Н.

При теоретическом решении задачи о напряженном состоянии в зоне контакта упругих тел предполагают, что нагрузка статическая, материалы тел изотропны, площадка контакта мала по сравнению с поверхностями и действующие силы направлены нормально к этой площадке. Максимальное напряжение σ_{max} зависит от упругости материалов и геометрических параметров сжимаемых тел.

Для расчета напряжения в зоне контакта поджимная обойма – цапфа воспользуемся программным комплексом САПР SolidWorks. В частности, модулем Simulation, который позволяет проводить расчет на прочность конструкций в упругой зоне.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		28

На первом этапе строится 3-D модель пары трения подшипниковая обойма цапфа (рис. 2.1), при этом, пренебрегая теми особенностями конструкции деталей, которые не являются определяющими в формировании распределения контактных напряжений.

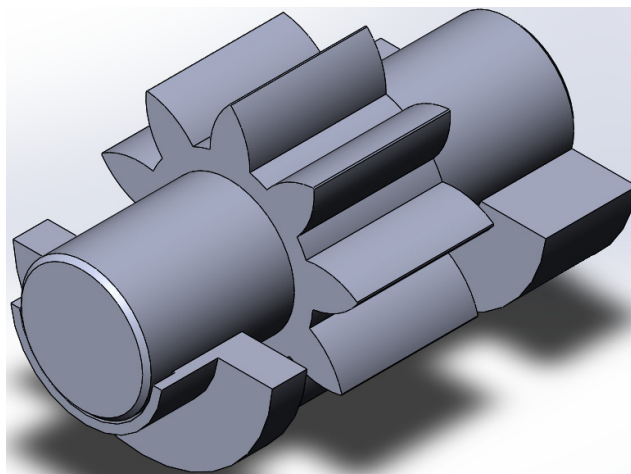


Рисунок 2.1 – 3-D модель пары трения «цапфа шестерни – поджимная обойма»

На следующем этапе определяются граничные условия (рис. 2.2) и места приложения действующей нагрузки (рис. 2.3).

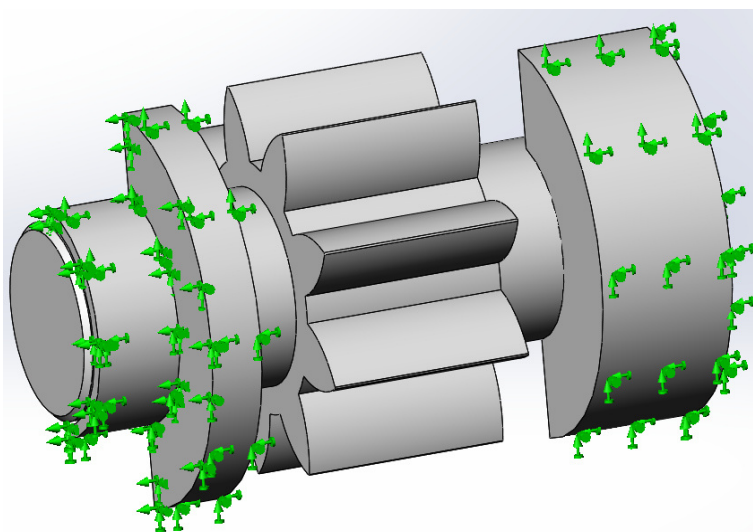


Рисунок 2.2 – Граничное условие «Зафиксированная геометрия»

Граничным условием является «зафиксированная геометрия», поскольку поджимная обойма круглого шестеренного насоса, будучи в корпусе, находится в жестко зафиксированном состоянии. Второе граничное условие в местах контакта деталей друг с другом «нет проникновения».

Согласно анализу принципа работы круглого шестеренного насоса внешняя нагрузка «Сила», действует по нормали к зубу (рис. 2.3). Симметричное воздействие этих сил на зуб формирует равнодействующую гидравлических сил, значение которой вычисляется по формуле (2.2).

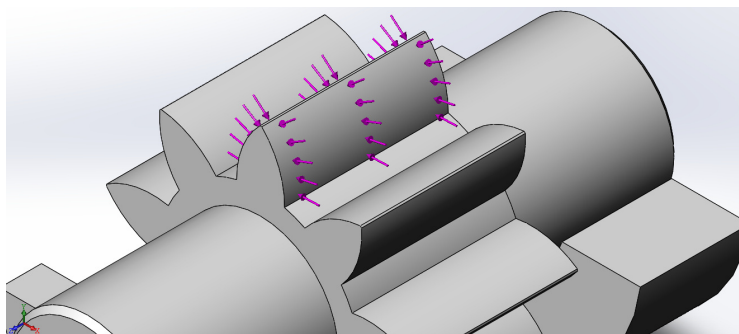


Рисунок 2.3 – Внешняя нагрузка «Сила»

Для проведения расчета в программу введены физико-механические свойства материалов деталей (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Основные физико-механические свойства материалов деталей

Материал детали	Поджимная обойма	Цапфа шестерни
	AK5M7	18ХГТ
Модуль упругости, МПа	70000	211000
Коэффициент Пуассона	0,31	0,27
Плотность, кг/м ³	2850	7800
Предел текучести, МПа	195	300

Далее, для получения более точного распределения напряжений создается сетка с учетом кривизны деталей, и запускается программа для расчета. По окончании программа выдает следующие результаты: напряжения, перемещения и деформации.

На рисунке 2.4 показано напряженно-деформированное состояние поджимной обоймы в напряжениях по Мизесу. Максимальное значение напряжения в зоне контакта подшипниковой обоймы и цапфы составляет 34,2 МПа. Красная и желтая зона – это участки, в которых возникают максимальные напряжения и близкие к ним. Синяя зона – участок, в котором напряжения, близки к минимальным.

Полученные результаты имеют определяющее значение при использовании расчетно-экспериментального метода оценки интенсивности изнашивания пары трения шестерня - подшипниковая обойма и прогнозирования ресурса круглых шестеренных насосов.

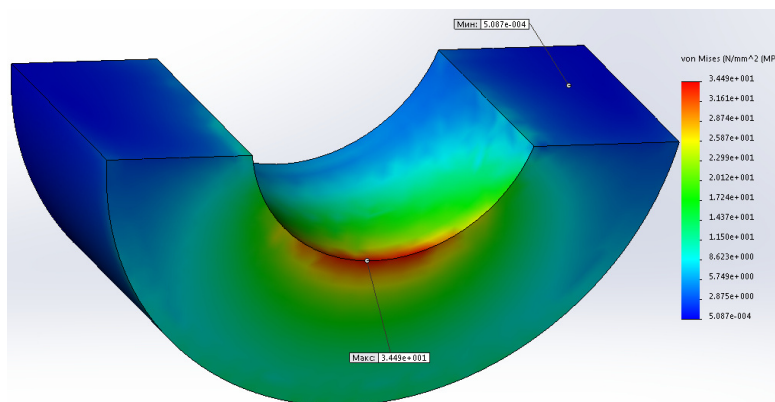


Рисунок 2.4 – Распределение напряжений в зоне контакта шестерни и поджимной обоймы

Для дальнейших расчетов за номинальное давление p_a правомерно принять максимальное напряжение на площадке контакта σ_{max} , МПа. При этом, учитывая, что контактирующие поверхности криволинейные и значения напряжений во всех случаях превышают 10 МПа, контурное давление p_c будет равно номинальному p_a . В связи с этим в расчетах будем использовать значения номинального давления p_a в сопряжениях.

При контактировании поверхностей тел с разной твердостью, выступы более твердой поверхности внедряются в выступы сопряженной поверхности, а выступы более мягкой поверхности при этом расплющиваются и изменяют свою форму. Очевидно, что в расчетах следует принимать макро- и микрогеометрические параметры поверхности более твердого тела и физико-механические свойства более мягкого.

Значение порогового контурного давления, ниже которого будет выполняться условие внешнего трения, определяется по формуле:

$$p_c^* = \frac{HB}{2^{v+1} \cdot \Delta^v} \left(1 - \frac{6\tau_n}{HB} \right)^v, \quad (2.3)$$

где HB – твердость по Бринеллю; τ_n – удельная сдвиговая прочность молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел, МПа.

Значения ν , b , R_{max} , r , Δ , HB , τ_n определены по результатам экспериментальных исследований и представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Расчетные значения и результат расчета порогового значения контурного давления p_c^* , МПа, ниже которого будет выполняться условие внешнего трения

b	ν	R_{max}	r	Δ	HB	τ_n	p_c^*
		МКМ				МПа	
2,5	1,6	0,62	167	0,0021	87	3,91	167084,1

Так как контурное давление p_c значительно меньше порогового p_c^* , то можно утверждать, что детали сопряжения подшипниковая обойма – цапфа *работают в режиме внешнего трения.*

Рассчитаем значение порогового контурного давления, превышение которого приведет к пластическому контакту:

$$\frac{p_c^{**}}{HB} = \frac{0,5 \cdot 5,4^\nu}{\Delta^\nu} \cdot \left[\frac{HB \cdot (1 - \mu^2)}{E} \right]^{2\nu}. \quad (2.4)$$

По формуле (2.4) пороговое значение контурного давления $p_c^{**} = 4,5 \cdot 10^{-3}$ МПа. Т.к. контурное давление p_c много больше порогового значения p_c^{**} , то можно утверждать, что в зонах контакта *имеют место пластические деформации.*

Определим значение порогового контурного давления p_c^{***} , МПа, выше которого будет наблюдаться насыщенный контакт:

$$p_c^{***} = \frac{0,5 \cdot HB}{(b^{1/\nu} \cdot \nu)^{\frac{\nu}{\nu-1}}}, \quad (2.5)$$

По формуле (2.5) пороговое значение контурного давления $p_c^{***} = 2,69$ МПа. Т.к. контурное давление p_c много больше порогового значения p_c^{***} , то можно утверждать, что в зонах контакта *имеет место пластический насыщенный контакт.*

В общем случае коэффициент внешнего трения f складывается из молекулярной составляющей f_a и механической f_m :

$$f = f_a + f_m, \quad (2.6)$$

Молекулярная составляющая коэффициента трения f_a определяется молекулярным взаимодействием в точках касания скользящих поверхностей $f_a = \frac{\tau_n}{HB}$, а механическая – физико-механическими характеристиками материалов, нагрузкой и параметрами микрогеометрии поверхностей.

Тогда для *пластического насыщенного контакта* коэффициент внешнего трения можно записать, как:

$$f = \frac{\tau_n}{HB} + 0,76 \cdot \left(\frac{R_{max}}{r_{пр}} \right)^{0,5} \cdot \left(\frac{P_c}{HB} \right)^{0,5}. \quad (2.7)$$

В таблице 2.3 представлены значения коэффициента трения и его составляющих, рассчитанных по формуле (2.7).

Таблица 2.3 – Результат расчета коэффициента трения и его составляющих

f	f_a	f_m
0,074	0,045	0,029

Учитывая, что в исследуемой паре трения имеет место пластический или упруго-пластический контакт, воспользуемся зависимостью для определения интенсивности изнашивания поверхности из источника:

$$I_{II} = c \left(\frac{Pa}{HB} \right)^{\frac{1+\beta t_{II}}{1-\beta}} \cdot (2\Delta)^{\frac{1+t_{II}}{2}} \cdot \left(\frac{k_f^{II}}{\delta_{5B}} \right)^{t_{II}} \cdot \eta_{c,a}^{\frac{(1+t_{II})\beta}{1-\beta}}, \quad (2.8)$$

где c , β , k_f^{II} – коэффициенты; t_{II} – параметр кривой фрикционной усталости; δ_{5B} – деформация при однократном растяжении; $\eta_{c,a}$ – коэффициент, характеризующийся отношением контурной площади контакта к номинальной.

Коэффициенты c , β , k_f^{II} находят из соотношений:

$$\left\{ \begin{aligned} c &= \frac{v^{1/2} \Gamma(v) \Gamma(1 + t_{\text{п}}/2)}{4(v+1) \Gamma(v + t_{\text{п}}/2)}; \\ \beta &= \frac{1}{2v+1}; \\ k_f^{\text{п}} &= \sqrt{\frac{\sigma_{\text{T}} + 2f_a HB}{\sigma_{\text{T}} - 2f_a HB}}. \end{aligned} \right. \quad (2.9)$$

где Γ – гамма-функция; σ_{T} – предел текучести, МПа.

Для двух волнистых поверхностей коэффициент, характеризующийся отношением контурной площади контакта A_c к номинальной A_a , определяется по формуле:

$$\eta_{c,a} = \frac{A_c}{A_a} = \frac{1}{F} p_a^{0,9}, \quad (2.10)$$

где $F = k \left\{ \frac{(H_{B1} H_{B2})^{1/4}}{\Theta \cdot R_{\text{пр}}^{1/2}} \right\}^{0,9}$; $k = 0,22 \dots 0,29$ – величина, зависящая от

коэффициента заполнения профиля волнами; H_{B1} и H_{B2} – высота волны более мягкого материала и более твердого материала, соответственно, мкм; $R_{\text{пр}}$ – приведенный радиус волн двух взаимодействующих поверхностей:

$$R_{\text{пр}} = \frac{R_{B1} \cdot R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}}, \quad (2.11)$$

где R_{B1} и R_{B2} – радиусы сферических волн более мягкого материала и более твердого материала, соответственно, мкм.

Формула (2.8) справедлива для расчета интенсивности изнашивания плоских волнистых поверхностей. В случае контакта криволинейных волнистых поверхностей отношение $\frac{A_c}{A_a} = 1$, тогда коэффициентом $\eta_{c,a}$ можно пренебречь.

Расчет интенсивности изнашивания проводится для граничного трения и постоянной скорости скольжения, при которой изменение температуры на контакте не влияет на природу поверхностного слоя.

Значения параметров t , $\sigma_{0,2}$ (σ_T) и δ_{5B} определены экспериментальными исследованиями и представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Расчетные значения и результат расчета интенсивности изнашивания в сопряжении подшипниковая обойма - цапфа

c	β	$\sigma_{0,2}$, МПа	t_{II}	f_a	k_f^{II}	δ_{5B}	I_{II}
0,07	0,24	150	2,21	0,045	1,05	0,25	$3,72 \cdot 10^{-5}$

2.2 Пути снижения интенсивности изнашивания деталей пары трения подшипниковая обойма – цапфа круглого шестеренного насоса

При разработке новых технологий восстановления изношенных поверхностей деталей важным этапом является предварительный расчет на трение, позволяющий прогнозировать интенсивность изнашивания в зависимости от применяемых методов и свойств восстановительных и упрочняющих покрытий.

Выбор метода и материалов наносимых покрытий следует проводить с учетом основных положений молекулярно-механической теории трения, основываясь на знаниях и опыте фрикционного материаловедения.

Применительно к поверхностным слоям, необходимо, чтобы соблюдалось правило положительного градиента механических свойств. Фрикционная связь должна быть менее прочной, чем связь между глубже лежащими слоями. При этом следует иметь в виду, что при наличии положительного градиента механических свойств внешнее трение реализуется только в определенном диапазоне значений отношения глубины внедрения h к радиусу r микронеровностей, касательного напряжения τ_n и предела текучести деформируемого материала σ_T :

– при малых значениях h и больших значениях τ_n

$$\frac{h}{r} \leq 0,5 \left(1 - \frac{2\tau_n}{\sigma_T} \right); \quad (2.12)$$

– при больших значениях h и малых значениях τ_n

$$\sqrt{\frac{h}{r}} \geq \left(\frac{\pi}{5,6} - \frac{1,3\sigma_T}{p_r} \right). \quad (2.13)$$

Таким образом, для обеспечения процесса внешнего трения должны выполняться два условия: положительный градиент механических свойств и соотношение $\frac{h}{r} + \frac{\tau_n}{c\sigma_T} \leq \frac{1}{2}$, где c – коэффициент, зависящий от формы выступов и наклепа материалов.

Что касается сдвигового сопротивления τ_n , то оно определяется прочностью единичной связи, обычно оцениваемой энергией активации молекулярной связи E_{ak} , необходимой для ее разрушения, и числом связей, одновременно возникающих внутри этого тела.

Энергия активации связи, необходимая для ее разрушения, зависит от напряженного состояния тела. В зависимости от знака приведенного напряжения энергия активации связи определяется по формуле:

$$E_{ak} = E_{ak0} \pm \nu p_r, \quad (2.14)$$

где E_{ak0} – энергия активации связи, необходимая для ее разрушения до перехода из одного временного положения равновесия в другое; ν – коэффициент, имеющий размерность объема, характеризующий величину зазора, который нужно осуществить для разрыва связи.

Таким образом, νp_r характеризует работу, которую нужно затратить против внешнего поля для разрушения связи.

Применительно к поверхностному слою, подвергнутому сжимающим напряжениям [16]:

$$\tau_n = \alpha \cdot \exp \frac{E_{ak} + \nu p_r}{k\vartheta}, \quad (2.15)$$

где α – коэффициент пропорциональности; E_{ak} – энергия активации молекулярной связи, необходимая для ее разрушения; ϑ – абсолютная температура, характерная для данного вещества и его термодинамического

состояния, K ; k – константа Больцмана.

В формуле (2.8) физико-механические свойства материала представлены комплексом:

$$I_p \sim \left(HB^{\frac{1+\beta t}{1-\beta}} \cdot \delta_{5B}^t \right)^{-1}, \quad (2.16)$$

т. е. чем выше твердость и величина относительного удлинения при разрыве, тем выше износостойкость.

В настоящее время имеется большой экспериментальный материал по исследованию влияния структуры металла на механические свойства. Установлены соотношения между пределом текучести и размером блоков мозаики D (2.17), пределом текучести и неоднородностью межплоскостного расстояния $\Delta d / d$ (2.18):

$$\sigma_T = \alpha_1 D^{-1/2}, \quad (2.17)$$

$$\sigma_T = \alpha_2 \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^{1/2}. \quad (2.18)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты пропорциональности.

Найдены экспериментальные зависимости твердости HB от величин $D^{-1/2}$ и $(\Delta d / d)^{1/2}$, которые имеют линейный характер и при экстраполяции отсекают на ординате отрезок H_0 , т. е.

$$HB = HB_0 + \alpha' d^{-1/2}, \quad (2.19)$$

$$HB = HB_0 + \beta' \eta^{1/2}. \quad (2.20)$$

Зависимости (2.17), (2.18), (2.19) и (2.20) могут быть приняты за основу при анализе закономерностей изнашивания новых и восстановленных рабочих поверхностей деталей.

Основываясь на результатах анализа методов восстановления изношенных поверхностей деталей, наиболее перспективным является метод электроискровой обработки, позволяющий в зависимости от выбранных

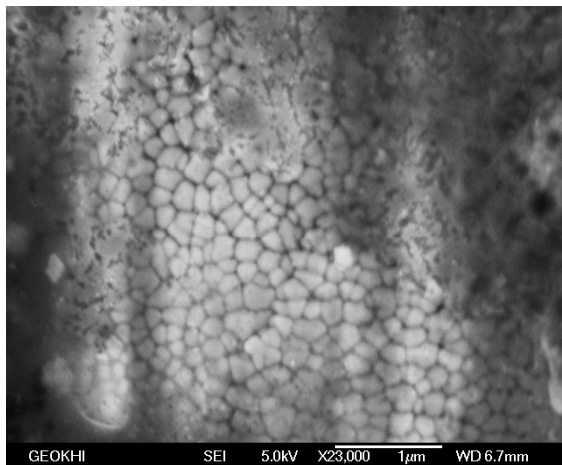
электродных материалов и принятых режимов в широком диапазоне изменять физико-механические свойства рабочих поверхностей деталей, что в конечном итоге позволяет формировать покрытия с высокими триботехническими свойствами.

Из таблицы 2.5 видно, что наибольшая плотность дислокаций и наименьший размер блоков, близкий к предельному измельчению, достигается у поверхностей, обработанных ЭИО, что обусловлено максимальным искажением кристаллической решетки.

Таблица 2.5 – Субструктура измененного поверхностного слоя (ИПС) после различных видов обработки

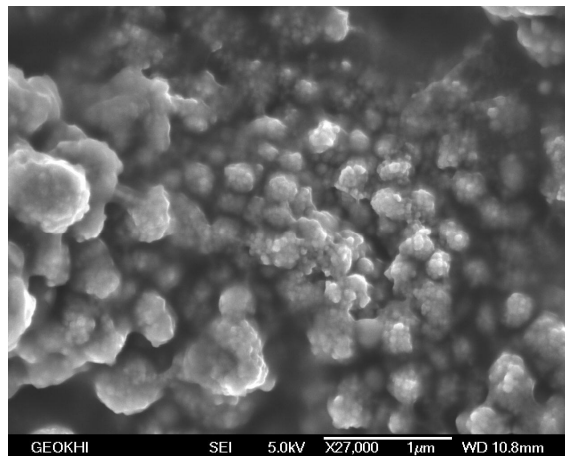
Вид упрочняющей обработки	Средний размер блоков, нм	Микро-искажение, $\times 10^4$, нм	Плотность дислокаций, $\times 10^{-11}$ см $^{-2}$
Закалка в печи стали 30ХГСА при температуре 860 °С с охлаждением в воде	5200	1,8	
Лазерная обработка	208	4,7	15,5
ЭИО стали 30ХН2МФА (электрод – твердый сплав Т15К6; генератор ЭФИ-46: ток 1,5...2 А, энергия импульса 0,3...0,4 Дж, частота импульсов 50Гц)	17	12,0	35,6
ЭИО стали 30ХН2МФА (электрод – твердый сплав Т15К6; генератор ЭФИ-46: ток 1,5...2 А, энергия импульса 0,3...0,4 Дж, частота импульсов 50Гц) и лазерная обработка	44	4,1	20,0
ЭИО стали 30ХН2МФА (электрод – твердый сплав Т15К6; генератор ЭФИ-46: ток 1,5...2 А, энергия импульса 0,3...0,4 Дж, частота импульсов 50Гц) и ультразвуковое выглаживание	27	12,0	14,8
ЭИО стали 20Х (электрод – сталь 65Г; генератор «ELITRON-22В»: ток 3,8 А, энергии импульса 1,66 Дж, частота импульсов 100Гц)	31	16,0	36,0
ЭИО стали 20Х (электрод – сварочная проволока Св08Г; генератор «ELITRON-22В»: ток 3,8 А, энергии импульса 1,66 Дж, частота импульсов 100Гц)	29	12,0	36,0

На рисунке 2.5 представлена блочная структура ИПС образца из стали 45, полученная электродом ВК8 и СТИМ-ЗБОУ_ц.



×23000

Электрод ВК8
(режим 2 (1-0,2) – $E=0,045$ Дж,
 $f_{\text{имп}}=600$ Гц; 2τ)



×27000

Электрод СТИМ-ЗБОУ_н
(режим 7 (2-0,4) – $E=0,09$ Дж;
 $f_{\text{имп}}=600$ Гц; 2τ)

Рисунок 2.5 – Блочная структура ИПС на стали 45 (генератор «БИГ-4»)

Прогнозирование высоких триботехнических свойств электроискровых покрытий объясняется не только структурными изменениями, но и особенностями параметров топографии. Их текстура имеет специфический рельеф в виде замкнутых впадин (рис. 2.6).

При движении таких поверхностей, увлекающих за собой смазку, образуются элементарные гидродинамические клинья, действие которых суммируется и вызывает подъем одной поверхности над другой.

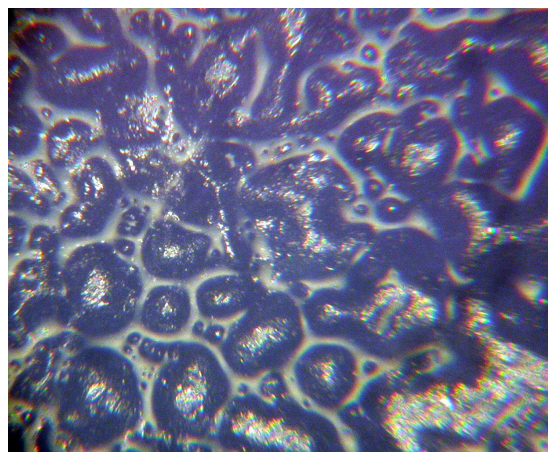


Рисунок 2.6 – Текстура электроискровых покрытий

Исследования *Salama M.E.* подтвердили наличие гидродинамического эффекта микронеровностей.

В работе [17] показано, что у покрытий, полученных методом ЭИО, с величиной опорной поверхности 80-85 %, объем впадин в 255 раз превышает объем на той же площади поверхности образцов, полученных после механической обработки. То есть покрытия, образованные методом ЭИО, способны удерживать на поверхности значительно больший объем масла, что

также благоприятно сказывается на триботехнических свойствах пар трения.

Для оценки эффективности применения метода ЭИО, проведен расчет интенсивности изнашивания подшипниковой обоймы круглого шестеренного насоса.

Рассмотрим технологическую схему восстановления и повышения износостойкости сопряжения подшипниковая обойма – цапфа круглых шестеренных насосов, включающую расточку полуотверстия подшипниковой обоймы под ремонтный размер с последующим упрочнением поверхности методом ЭИО и восстановление методом ЭИО цапфы с последующим шлифованием в размер.

Значение порогового контурного давления, ниже которого будет выполняться условие внешнего трения, определяется по формуле (2.3).

Значения ν , b , R_{max} , r , Δ , HV , τ_n определены по результатам экспериментальных исследований и представлены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Расчетные значения и результат расчета порогового значения контурного давления p_c^* , МПа, ниже которого будет выполняться условие внешнего трения

b	ν	R_{max}	r	Δ	HV	τ_n	p_c^*
						МПа	
		МКМ					
2,7	1,5	0,47	125	0,0019	205,2	12,96	415549,1

Так как контурное давление p_c значительно меньше порогового $p_c^* = 415549,1$, то можно утверждать, что поверхности деталей сопряжения *работают в режиме внешнего трения.*

Рассчитаем значение порогового контурного давления, превышение которого приведет к пластическому контакту. По формуле (2.4) пороговое значение контурного давления $p_c^{**} = 2,8 \cdot 10^{-1}$ МПа. Т.к. контурное давление p_c много больше порогового значения p_c^{**} , то можно утверждать, что в зонах контакта *имеют место пластические деформации.*

По формуле (2.5) определим значение порогового контурного давления p_c^{***} , Мпа, выше которого будет наблюдаться насыщенный контакт.

Из расчета видно, что контурное давление p_c больше порогового значения $p_c^{***}=4,17$, следовательно, в зоне контакта *имеет место пластический насыщенный контакт.*

Тогда для *пластического насыщенного контакта* коэффициент внешнего трения определим по формуле (2.7).

В таблице 2.7 представлены значения коэффициентов трения и его составляющих в ресурсопределяющих сопряжениях гидроагрегатов.

Таблица 2.7 – Результат расчета коэффициента трения и его составляющих

f	f_a	f_m
0,082	0,063	0,019

Учитывая, что в исследуемой паре трения имеет место пластический или упруго-пластический контакт, воспользуемся зависимостью (2.8) для определения интенсивности изнашивания при пластическом контакте.

Значения параметров t , $\sigma_{0,2}$ (σ_T) и δ_{5B} также определены целевыми экспериментальными исследованиями. Расчетные значения и результат расчета интенсивности изнашивания представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Расчетные значения и результат расчета интенсивности изнашивания в восстановленном сопряжении подшипниковая обойма – цапфа

c	β	$\sigma_{0,2}$, МПа	t_{II}	k_f^{II}	δ_{5B}	I_{II}
0,078	0,25	270	2,27	1,10	0,13	$2,62 \cdot 10^{-5}$

Из анализа таблиц 2.4 и 2.7 следует, что при восстановлении работоспособности ресурсопределяющего сопряжения подшипниковая обойма - цапфа круглых шестеренных насосов, используя предложенную выше технологическую схему, можно обеспечить износостойкость деталей на уровне новых и выше.

3 МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1 Методика оценки значений параметров шероховатости поверхностей

Для оценки шероховатости поверхности ГОСТ 2789-73 [18] предусматривает ряд параметров:

- R_a – среднее арифметическое отклонение профиля от средней линии;
- R_{max} – максимальное расстояние пик-впадин профиля в пределах базовой длины;
- R_p – максимальная высота выступа в пределах базовой длины;
- t_p – относительная опорная длина профиля, на уровне сечения p .

Измерение параметров шероховатости поверхностей проводилось с использованием современного комплекса «*Form Talysurf*».

Нанесение покрытий при механизированной электроискровой обработке проводили с использованием независимого генератора «*ELITRON-22B*», на 5 энергетическом режиме (энергия импульса $A_E = 1,66$ Дж).

Покрытия наносили на наружные цилиндрические поверхности $\varnothing 25$ мм, при частоте вращения образца 1,82 об/мин и продольной подаче вращающегося стержневого электрода 0,26 мм/об. Диаметр электрода 3,8 мм.

Рассматривались покрытия, нанесенные электродами из стали 65Г и сварочной проволоки Св08 на образцы из стали 18ХГТ.

Базовые длины исследуемых профилограмм принимали в соответствии с ГОСТ 2789-73 [18]. Параметры шероховатости R_a , R_{max} , R_p определяли с использованием специальных пакетов прикладных программ «*Talymap Control*» и «*Talymap Gold*», устанавливая их среднее арифметическое по измерениям в продольном и поперечном направлениях. При доверительной вероятности 0,90, коэффициенте вариации 0,21, показателе надежности 15 %, количество повторностей в каждом направлении принято не менее 8.

						МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата			42

Обобщение результатов измерений параметров шероховатости электроискровых покрытий, сформированных различными электродными материалами, основано на сравнении средних значений по t -критерию Стьюдента для независимых выборок.

Выборки параметров шероховатости сравнивали с выборкой, у которой среднее арифметическое наименьшее.

Нулевая гипотеза звучит так: средние значения двух групп измерений параметра шероховатости равны, альтернативная – средние значения в группах не равны. Если уровень значимости текущего значения t -критерия Стьюдента p_t выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

Для применения данного критерия проверяли предположение о том, что значения измерений в каждой из групп нормально распределены и их дисперсии равны.

Нормальность групп измерений проверяли по критерию Шапиро-Уилка (W). Нулевая гипотеза звучит так: распределение измерений параметра шероховатости близко к нормальному, альтернативная – нет. Если уровень значимости текущего значения W -критерия p_W выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

Оценку однородности дисперсий двух исследуемых групп измерений проводили по критерию Левина. Нулевая гипотеза звучит так: однородность дисперсии есть, альтернативная – нет. Если уровень значимости текущего значения критерия Левина p_L выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

Комплексную характеристику шероховатости поверхностей после механической обработки и ЭИ покрытий, не требующих последующей механообработки, рассчитывали по формуле [19]:

$$\Delta = \frac{R_{max}}{rb^{*1/v}}, \quad (3.1)$$

где r – приведенный радиус вершин выступов, мкм; b^* и ν – параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой профиля.

Приведенный радиус вершин выступов определяется как среднее геометрическое продольного $r^{пр}$ и поперечного r^{Π} направлений измерений радиусов, мкм [20]:

$$r = \sqrt{r^{пр} r^{\Pi}} . \quad (3.2)$$

Радиусы $r^{пр}$ и r^{Π} определяли с использованием программы «*Talymap Control*», усредняя их по не менее восьми наиболее высоким выступам на базовой длине.

На рисунке 3.1 показаны наиболее высокие радиусы и значения единичных выступов на базовой длине профилограммы.

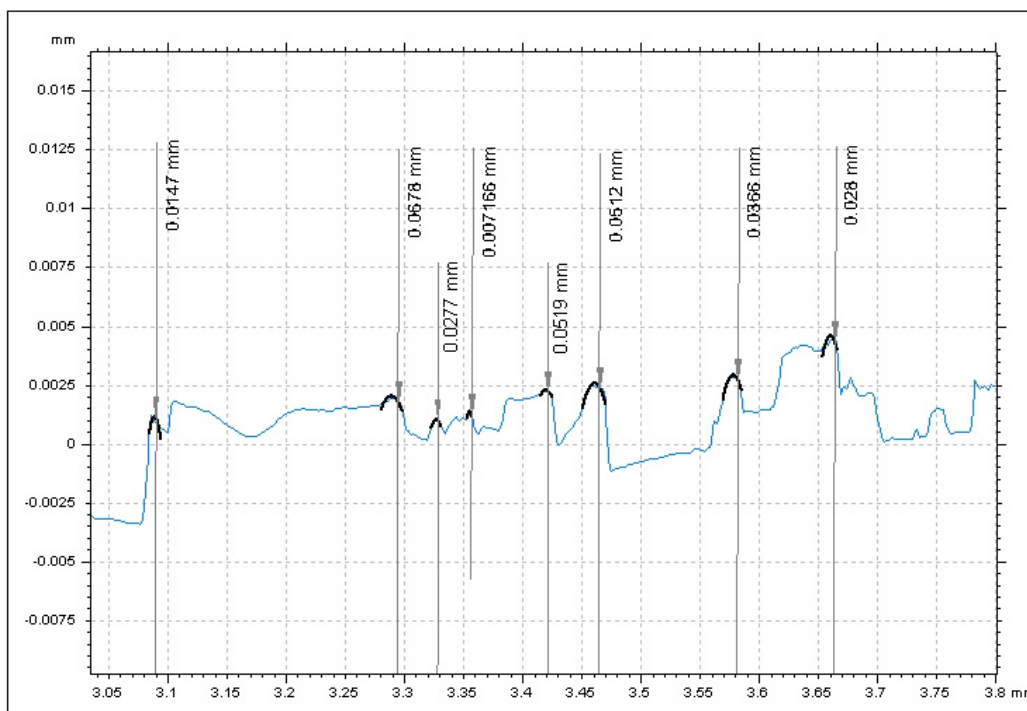


Рисунок 3.1 – Определение радиусов единичных выступов на базовой длине профилограммы с использованием программы «*Talymap Control*»

Параметры степенной аппроксимации начальной части опорной кривой профиля b^* и ν определяли по известным зависимостям Демкина Н. Б. [21]:

$$b^* = t_m \left(\frac{R_{max}}{R_p} \right)^\nu, \quad (3.3)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

$$v = 2t_m \frac{R_p}{R_a} - 1, \quad (3.4)$$

где t_m – относительная опорная длина по средней линии:

$$t_m = \frac{\sum_{i=1}^k \Delta l_{m_i}}{l_{\sigma}}, \quad (3.5)$$

где Δl_{m_i} – длина сечения i -ого выступа на уровне средней линии, определяется из профилограммы, мм.

3.2 Исследование микротвердости покрытий, образованных методом электроискровой обработки

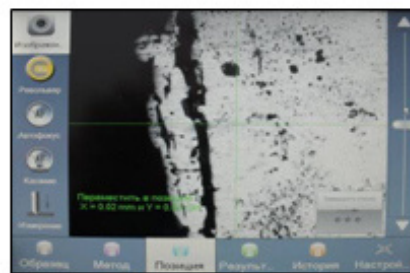
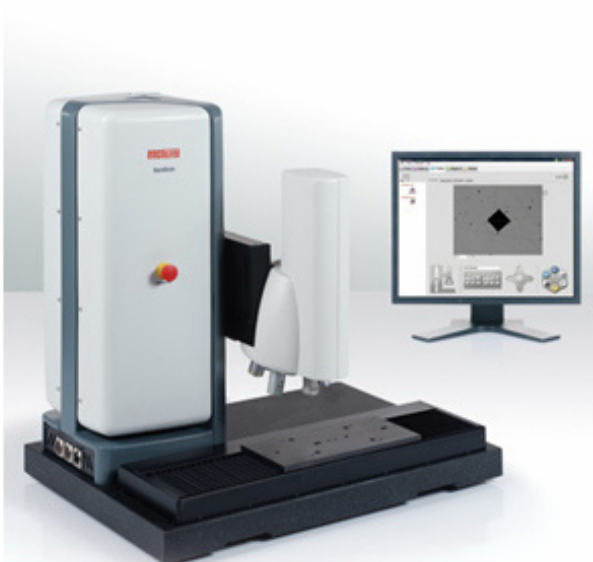
Испытание микротвердости электроискровых покрытий проводилось по методу восстановленного отпечатка в соответствии с ГОСТ 9450-76 [22]. Сущность метода заключается в нанесении на испытываемую поверхность отпечатка под действием статистической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка число микротвердости определяется для четырехгранной пирамиды с квадратным основанием по формуле:

$$H_{\mu} = 0,189 \frac{F_V}{d_{\text{отп}}^2}, \quad (3.6)$$

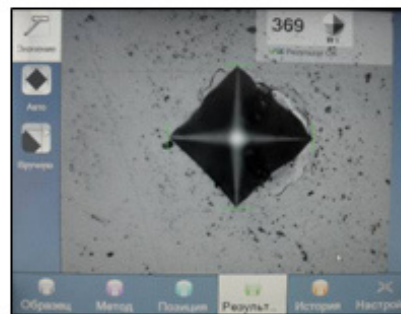
где F_V – сила, приложенная к алмазному наконечнику, Н; $d_{\text{отп}}$ – среднее арифметическое диагоналей квадрата отпечатка, мм.

Для исследования использовали микротвердомер *Dura Scan 20* (рис. 3.2), предназначенный для измерения микротвердости металлов и сплавов вдавливанием алмазного наконечника с автоматической обработкой результатов и выводом их на ПК.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		45



Меню позиция, выбор точки укола



Меню результат, укол алмазной пирамидкой

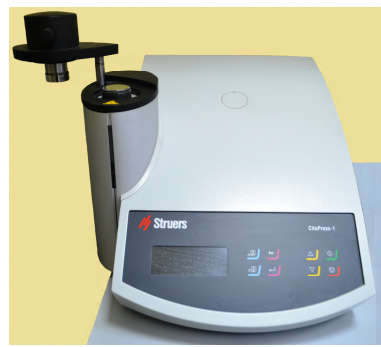
Рисунок 3.2 – Общий вид и интерфейс панелей управления микротвердомера *Dura Scan 20*

Распределение микротвердости по глубине исследовали на образцах в виде плиток, размером $20 \times 40 \times 10$, изготовленных из алюминиевого сплава АК5М7, на поверхность которых наносили электроискровые покрытия электродами из меди, молибдена, вольфрама и графита. Обработка ручная, режимы для нанесения покрытий представлены в таблице 3.2.

Микрошлифы с поперечным разрезом изготавливались на отрезном станке *Discotom-6* (рис. 3.3, а) с подачей СОЖ, что исключало нагрев поверхности среза. С целью исключения «закругления» поверхностного электроискрового слоя при механической обработке, фрагменты образцов запрессовывали в горячую смолу. Запрессовка проводилась с использованием автоматического прессы *CitoPress-1* (рис. 3.3, б). Режимы запрессовки образцов приведены в таблице 3.1.



а



б



в

а – отрезной станок *Discotom-6*, б – цилиндрический пресс *CitoPress-1*, в – шлифовально-полировальный станок *Tegra Pol-21* с приставкой для автоматической обработки *Tegra Force-5*

Рисунок 3.3 – Оборудование для подготовки шлифов

Таблица 3.1 – Режимы запрессовки образцов для исследования микротвердости

Диаметр цилиндра, мм	Тип смолы	Нагрев			Охлаждение	
		время, мин	температура, °С	давление, bar	время, мин	скорость
40	<i>Miltifast</i>	4,5	180	250	3	высокая

Поверхности запрессованных образцов обрабатывали на шлифовально-полировальном станке *Tegra Pol-21* с приставкой для автоматической обработки *Tegra Force-5* (рис. 3.3, в) в несколько этапов: выравнивание, тонкое шлифование, черновая и чистовая полировка.

Режимы механической обработки образцов из цветных металлов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Режимы механической обработки образцов из цветных металлов

Режим, расходный материал	Операция				
	выравнивание	тонкое шлифование	полировка черновая	полировка чистовая	оксидная полировка
Тип диска	<i>Абразивная бумага-220</i>	<i>MD-Largo</i>	<i>MD-Mol</i>	<i>MD-Nap</i>	<i>MD-Chem</i>
Тип суспензии	вода	алмазная, 9 мкм	алмазная, 3 мкм	алмазная, 1 мкм	оксидная суспензия OP-S
Скорость вращения диска, об/мин	300	150	150	150	150
Усилие на микрошлифы, Н	30	30	30	25	15
Время подготовки, мин	до выравнивания	2	2	2	1

При определении микротвердости на поперечных шлифах с

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата
------	------	----------	--------	------

МД-02069964-35.04.06-20-19

Лист

47

электроискровыми покрытиями выполняли следующие требования:

- расстояние от центра отпечатка до края покрытия должно быть не менее одного размера отпечатка;

- расстояние между центрами отпечатков, нанесенных на поверхность покрытия, должно превышать размер отпечатка более чем в три раза.

Замеры проводили по линиям, параллельным поверхности покрытия, количество уколов на линии не менее 10.

Количество линий замеров, параллельных поверхности покрытия в глубину, определялось достижением микротвердости основного металла.

Сила нагружения на индентор составляла от 0,1 до 5 Н, время нагружения – 5-15 с.

Количество повторностей опытов – 5 (при доверительной вероятности 0,95, коэффициенте вариации 0,1 и показателе надежности 10 %).

Анализ результатов измерения микротвердости покрытий, образованных методом электроискровой обработки, основан на использовании критериев значимости математической статистики. Применение данного подхода для обобщения результатов измерений обусловлено предположением о неоднородности фазового состава покрытий, наличием пор и дефектов, ошибками при измерении.

При анализе данных рассматривали гипотезу о сравнении средних значений микротвердости двух групп измерений по глубине слоя, применив t -критерий Стьюдента для независимых выборок. Нулевая гипотеза звучит так: средние значения двух групп измерений микротвердости по глубине слоя равны, альтернативная – средние значения в группах не равны. Если уровень значимости текущего значения t -критерия Стьюдента p_t выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

Для применения данного критерия необходимо проверить предположения о том, что значения измерений в каждой из групп нормально распределены и их дисперсии равны.

Нормальность групп измерений проверяли по критерию Шапиро-Уилка.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		48

Нулевая гипотеза звучит так: распределение измерений на исследуемой глубине измененного поверхностного слоя близко к нормальному, альтернативная – нет. Если уровень значимости p_W выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

Оценку однородности дисперсий двух исследуемых групп измерений микротвердости на глубине проводили по критерию Левина. Нулевая гипотеза звучит так: однородность дисперсии есть, альтернативная – нет. Если уровень значимости текущего значения критерия Левина p_L выше принятого значения $p = 0,05$, то имеет место нулевая гипотеза, и наоборот.

3.3 Методика определения пластических свойств поверхностей образцов

Предельная пластическая деформация – это деформация, соответствующая моменту разрушения металла. Данный параметр характеризует пластичность материала и при лабораторных испытаниях выражается как относительное удлинение – δ_{5B} .

Для экспериментальной оценки относительного удлинения поверхностных слоев металлов применяется метод вдавливания в исследуемую поверхность наконечника с алмазным конусом [23-24].

Сущность метода заключается во вдавливании наконечника с алмазным конусом в испытываемый образец (изделие) под действием нагрузки, в измерении глубины восстановленного отпечатка t и его диаметра d , по значениям которых оценивают относительное удлинение при растяжении поверхностных слоев металлов. При внедрении индентора в поверхность испытуемого образца, обладающую пластичностью, вокруг пластического отпечатка образуется наплыв вытесненного материала (вследствие ограниченной способности последнего к течению). Распределение объема материала в зоне наплыва зависит от механических характеристик

деформируемой среды и, прежде всего, ее способности пластически деформироваться, не разрушаясь. При этом равные вытесненные объемы материалов, обладающих различной способностью к пластической деформации, распределяются в зоне наплыва по-разному, например, как схематично изображено на рисунке 3.4.

При одинаковой глубине восстановленного отпечатка h от внедрения конического индентора, у среды с большей пластичностью диаметр отпечатка по вершине наплыва $d_{отп2}$ (рис. 3.4 б) должен быть меньше, чем у среды с меньшей пластичностью $d_{отп1}$ (рис. 3.4 а). Это является особенностью данного метода определения пластичности, поскольку ее величина, таким образом, является функцией не одного, а двух относительно независимых друг от друга параметров пластического отпечатка (h и $d_{отп}$), по значениям которых оценивают относительное удлинение при растяжении поверхностных слоев металлов.

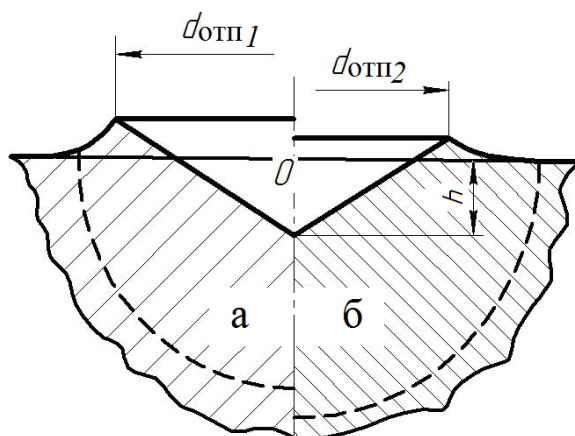


Рисунок 3.4 – Профиль отпечатка при вдавливании конического индентора в металл с низкой (а) и высокой (б) пластичностью

В качестве исследуемых образцов приняты:

- алюминиевый сплав АК5М7;
- алюминиевый сплав АК5М7 с электроискровым покрытием из меди;

Образцы подготавливали с соблюдением следующих требований:

- поверхность, на которой проводится измерение, должна допускать выполнение не менее, чем шести отпечатков;

– параметр шероховатости R_a опорной поверхности образца должен быть не более 0,8 мкм, а испытываемой поверхности – не более 0,2 мкм по ГОСТ 2789-73.

Для проведения испытаний, с целью контроля глубины внедрения h , алмазный наконечник типа НК (ГОСТ 9377-81), применяемый для измерения твердости по методу Роквелла, был установлен на испытательную машину *UAI-7000 M* (рис. 3.5).



Рисунок 3.5 – Универсальная испытательная машина *UAI-7000 M*

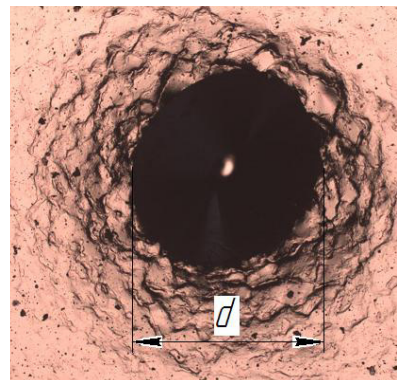
При проведении испытаний, на исследуемую поверхность каждого образца наносилось по 5 отпечатков на заданную глубину h , располагая при этом их равномерно по подготовленному участку поверхности.

Глубину внедрения конуса для каждой обработанной методом ЭИО поверхности принимали индивидуально (согласно результатам исследования микротвердости), исходя из того, чтобы толщина упрочненного слоя или покрытия после механической обработки была больше значения h не менее, чем на 20 %. Глубина внедрения конуса для не обработанных методом ЭИО поверхностей принята равной $h=0,2$ мм.

Измерение диаметра отпечатков d проводилось при помощи анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел *Siams 700* (рис. 3.6) на базе оптического микроскопа *Olympus GX51*.



а



б

Рисунок 3.6 – анализатор фрагментов микроструктуры твердых тел *Siams 700* (а); снимок отпечатка, полученный на образце (б)

При этом измерение диаметров каждого из пяти отпечатков осуществлялось в двух взаимно перпендикулярных направлениях, после чего определялось среднее арифметическое значение. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 0,02 от меньшего из них.

Затем, для каждого из пяти отпечатков определяли коэффициент y по формуле:

$$y_i = h_i / d_i \quad (3.7)$$

и для каждого образца находили среднее арифметическое по формуле:

$$y = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 y_i. \quad (3.8)$$

Значения параметра относительного удлинения δ_{5B} принимали в зависимости от значения коэффициента y по таблице, представленной в [23].

3.4 Методика определения условного предела текучести поверхностей образцов

Пределом текучести называют механическую характеристику материала, характеризующую напряжение, при котором деформации продолжают расти без увеличения нагрузки.

Применение традиционных методов определения механических свойств (испытание на растяжение вырезанных образцов) носит объемный характер и

не позволяет получить данные по пределу текучести поверхностных слоев или покрытий. А испытание на растяжение вырезанных электроискровых покрытий или упрочненных слоев не представляется возможным ввиду малых толщин (от 50 мкм) и их неоднородной структуры. К тому же подготовка таких образцов – процесс достаточно трудоемкий и порой невозможно правильно разделить основу от покрытия или от упрочненного слоя.

Существует метод определения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ металлических поверхностей измерением твердости на пределе текучести $H_{0,2}$ вдавливанием шара (ГОСТ 22762-77 [25]). Твердость на пределе текучести характеризуется напряжением в лунке при вдавливании шара, когда в ней появляется средняя остаточная деформация, близкая к 0,2 %, возникающая при отношении диаметра лунки к диаметру шара, равном 0,09. Для осуществления данного эксперимента необходимо фиксировать глубину проникновения шарика и нагрузку. В связи с этим, для определения твердости на пределе текучести, индентор с шариком диаметром $D=10$ мм был установлен на испытательную машину *UAI-7000 M* (рис. 3.7).



Рисунок 3.7 – Универсальная испытательная машина *UAI-7000 M*

Метод измерения твердости на пределе текучести относится к методу неразрушающего контроля. Минимальная толщина исследуемого образца должна быть не менее 8-кратной рассчитанной глубины отпечатка h . Параметр шероховатости R_a исследуемой поверхности образца должен быть не более 0,32 мкм.

Для исследований приняты такие же образцы, что и для определения относительного удлинения (п. 3.4).

При проведении испытаний, в исследуемую поверхность при помощи испытательной машины внедряется индентор с шариком диаметром $D=10$ мм на глубину $h=0,02$ мм. При этом фиксируется приложенная на шарик нагрузка F .

После проведения испытаний твердость на пределе текучести ($H_{0,2}$) определяли по формуле:

$$H_{0,2} = \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d_{отп}^2} \right)} = 156,9 \frac{F}{D^2}, \quad (3.9)$$

где $d_{отп}$ – диаметр отпечатка, мм.

Значение условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ принимается по значению твердости на пределе текучести из таблицы ГОСТ 22762-77 [26].

3.5 Методика определения удельной сдвиговой прочности молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел

Для определения удельной сдвиговой прочности молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел наиболее широкое распространение получил способ, заключающийся в том, что при определении сопротивления относительному движению исключаются или сводятся к пренебрежимо малой величине сопротивления, обусловленные деформированием поверхностных слоев. Этого можно достигнуть, если шаровой индентор I (рис. 3.8),

запрессованный в оправку 3, сдавливать между плоскопараллельными образцами 2 нормальной силой F_N и одновременно его вращать [20].

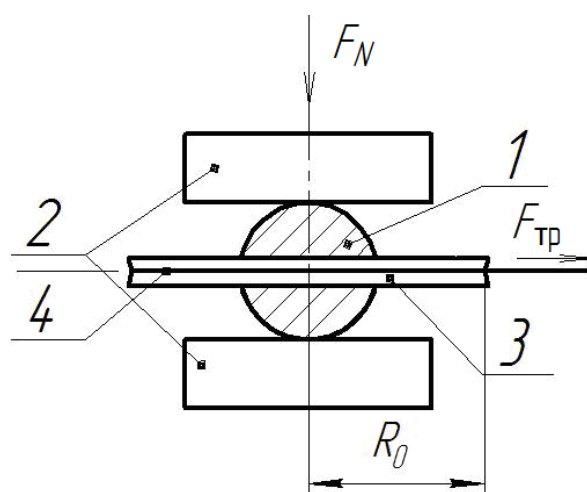


Рисунок 3.8 – Схема определения удельной сдвиговой прочности молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел

Исследования проводили на образцах без покрытий, изготовленных из материалов деталей пар трения гидроагрегатов, и с покрытиями, нанесенными методом ЭИО и ФАБО. Требования к образцам представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Требования к образцам исследуемых пар трения

Материал образца пары трения		Покрытие	<i>HV</i>	Δ
1	изнашивающего	сталь 18ХГТ	без ЭИП покрытия	--
	изнашиваемого	AK5M7	без ЭИП покрытия	87
2	изнашивающего	сталь 18ХГТ	ЭИП из стали 65 Г	--
	изнашиваемого	AK5M7	ЭИП из меди М1	205,2

Плоские образцы размером 20×40 мм и толщиной не менее 7 мм изготавливали из изнашиваемых материалов образцов (табл. 3.3). Рабочие поверхности обрабатывали в зависимости от требований к качеству поверхностей деталей пар трения (табл. 3.3).

Индентор в виде шара изготавливали из изнашивающих материалов пар трения.

Для проведения эксперимента диаметр шара принимали равным не менее

15 мм с целью удобства дальнейшей его механической обработки.

Затем шаровой индентор запрессовывали в оправку в виде шкива радиусом 25 мм, по окружности которого пропускали трос $\varnothing 2$ мм. Один конец троса крепили к оправке, а противоположный к электронному динамометру *Sauter FL 200*. Затем плавно, без рывков тянули за динамометр и фиксировали значение силы трения $F_{\text{тр}}$.

Все устройство смонтировано на разрывной машине *Hegewald&Peschke*, которая обеспечивает плавную нормальную нагрузку на плоские образцы с точностью до 1 Н (рис. 3.9).

При условии пластического или упруго-пластического деформирования в зонах контакта, прилагаемая нагрузка F_N должна быть таковой, чтобы обеспечивалось отношение диаметров отпечатков к диаметру индентора $0,064 \leq d/D \leq 0,6$.



Рисунок 3.9 – Универсальная испытательная машина *Hegewald&Peschke*

Учитывая, что в таком диапазоне изменения диаметров отпечатков средние напряжения на контакте неизменны и равны твердости, нагрузки, при

которых необходимо проводить испытания при пластическом или упруго-пластическом контакте, изменяются в пределах:

$$0,126 \cdot 10^{-3} \cdot R_{\text{ш}}^2 \cdot HB \leq F_N \leq 1,26 \cdot R_{\text{ш}}^2 \cdot HB, \quad (3.10)$$

где $R_{\text{ш}}$ – радиус шарового индентора, мм.

В таблице 3.4 представлены значения нормальной нагрузки F_N , принятые для проведения испытаний, с учетом условия 3.27.

Таблица 3.4 – Нормальная нагрузка F_N для испытания образцов пар трения

Материалы образцов пар трения		Границы F_N , Н		Принятое значение F_N , Н
изнашивающего	изнашиваемого	<i>min</i>	<i>max</i>	
сталь 18ХГТ	алюминиевый сплав АК5М7	0,61	6166	6000
сталь 18ХГТ с ЭИП из стали 65Г	алюминиевый сплав АК5М7 с ЭИП из меди М1	0,61	6166	6000

Величина касательных напряжений по измеренной силе трения, необходимой для вращения относительно оси симметрии, перпендикулярной к рабочим поверхностям плоских образцов, определяется соотношением [20]:

$$\tau_n = \frac{3F_{\text{тр}}R_0}{4\pi r_{\text{от}}^3}, \quad (3.11)$$

где R_0 – радиус оправки, мм; $r_{\text{от}}$ – средний радиус отпечатков на противоположных пластинах, мм.

Диаметры отпечатков измеряли с помощью анализатора фрагментов микроструктуры твердых тел *Siams 700* (рис. 3.6, а) на базе оптического микроскопа *Olympus GX51*.

Фрикционные параметры τ_0 и β определяли методом разгрузки графически [20]. Для этого находили координаты τ_n и p_r первой точки функции $\tau_n = \psi(p_r)$. При пластических и упруго-пластических деформациях в зоне контакта значение p_r вычисляется по формуле:

$$p_r = \frac{F_N}{\pi r_{\text{от}}^2}. \quad (3.12)$$

Затем, незначительно, на 15 – 20 % снижали нормальную нагрузку и

снова по формулам 3.11 и 3.12 определяли значения τ_n и p_r .

По полученным координатам точек, в программе «Компас-3D», строили график зависимости $\tau_n = \psi(p_r)$ (рис. 3.10).

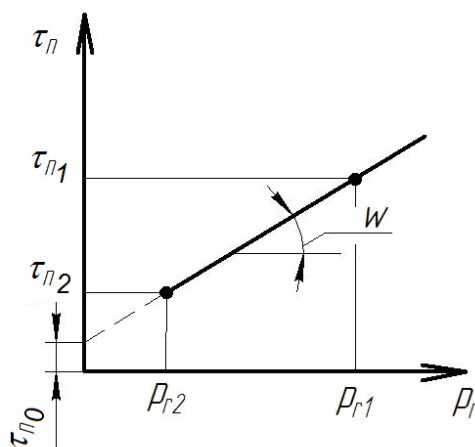


Рисунок 3.10 – График зависимости τ_n и β от p_r

Фрикционные параметры τ_0 и β находили следующим образом. Определив в программе «Компас-3D» угол наклона W отрезка к оси p_r , по квадрату тангенса этого угла находили параметр β . Пересечение прямой с осью τ_n дает значение параметра τ_0 .

Затем по найденным значениям фрикционных параметров τ_0 и β определяли величину касательных напряжений τ_n изнашиваемого образца.

3.6 Методика оценки фрикционной усталости поверхностей образцов

Согласно представлениям об износе твердых пар трения, сопротивление разрушению при действии переменных напряжений, обусловленных контактным взаимодействием тел при скольжении, характеризуется кривой фрикционной усталости (поверхностное повреждение). В этом случае кривая фрикционной усталости (кривая Велера) будет представлять зависимость между усилием, приложенным на поверхность материала F , и числом циклов его повторения n до предельного разрушения материала поверхностного слоя.

Испытания на фрикционную усталость поверхностей образцов проводили на трибометре «TRB-S-DE», представленном на рисунке 3.11, в соответствии с методикой, описанной в источнике [26].

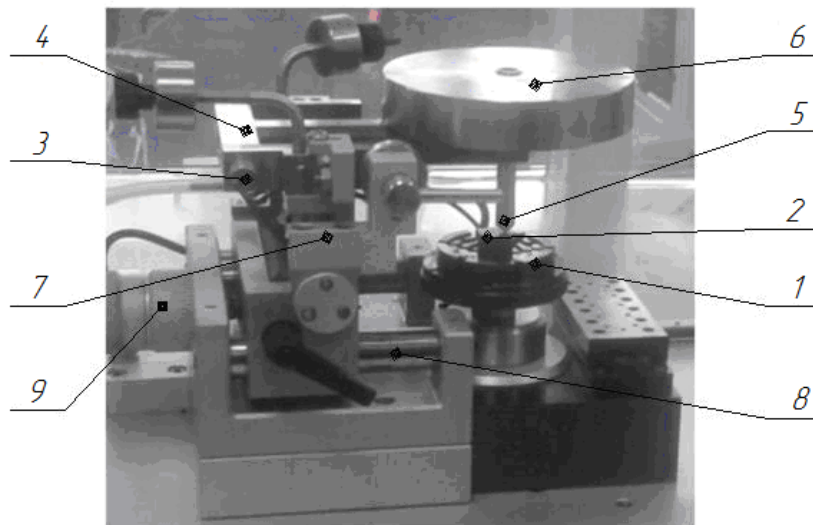


Рисунок 3.11 – Общий вид трибометра «TRB-S-DE»

Прибор имеет вращающийся столик 1, на котором крепится испытуемый образец 2 в виде диска. Над столиком, через ось 3 крепится подвижная стойка 4, к нижней части которой перпендикулярно поверхности образца устанавливается индентор 5. Подвижная стойка вместе с индентором и грузом крепится к корпусу 7, который может передвигаться по направляющим 8 за счет микрометрического винта 9. Благодаря этому изменяется радиус соприкосновения индентора и поверхности образца.

Для испытаний принимали образцы из антифрикционного алюминиевого сплава диаметром 20 мм с электроискровым покрытием из меди М1 и без него. В качестве индентора использовали шарик из стали ШХ15 диаметром 3 мм.

Скорость вращения образца, при которой отсутствует нагрев пары трения, составляет $9 \cdot 10^{-3}$ м/сек и автоматически поддерживается через программу управления *Instrum X*.

Нагрузка, действующая на индентор, подбирается экспериментально, при условии отсутствия резания. После нахождения координат первой точки, нагрузка снижается на 15–20 % и эксперимент повторяется.

По результатам испытаний строится график зависимости количества циклов от величины действующей нагрузки (рис. 3.12).

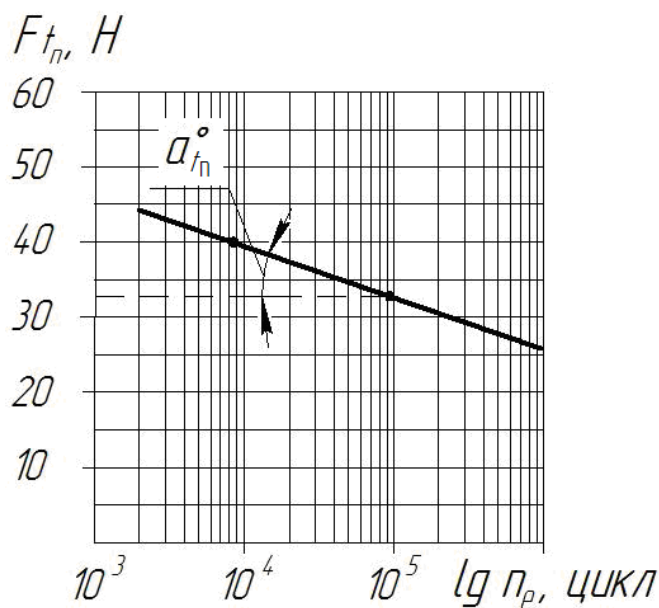


Рисунок 3.12 – График зависимости F_{t_n} от n_e

Угол наклона прямой к оси n_e определяли с использованием программы «Компас-3D». Тогда, по найденному углу наклона, коэффициент фрикционной усталости t_{II} будет равен:

$$t_{II} = ctg\alpha_{t_{II}} . \quad (3.13)$$

3.7 Лабораторные триботехнические испытания образцов пар трения

Сравнительные триботехнические испытания эталонных (без покрытий) и обработанных электроискровым методом поверхностей пар трения проводили на модернизированной машине трения СМТ-1М, представленной на рисунке 3.13, прототипом которой являлась машина 2070 СМТ-1 производства ЗАО «Точприбор».

1 – подставка; 2 – станина; 3 – камера испытательная; 4 – механизм нагружения; 5 – терминал для сбора информации; 6 – экран для вывода информации; 7 – силовые электроприводы; 8 – кнопка аварийного отключения

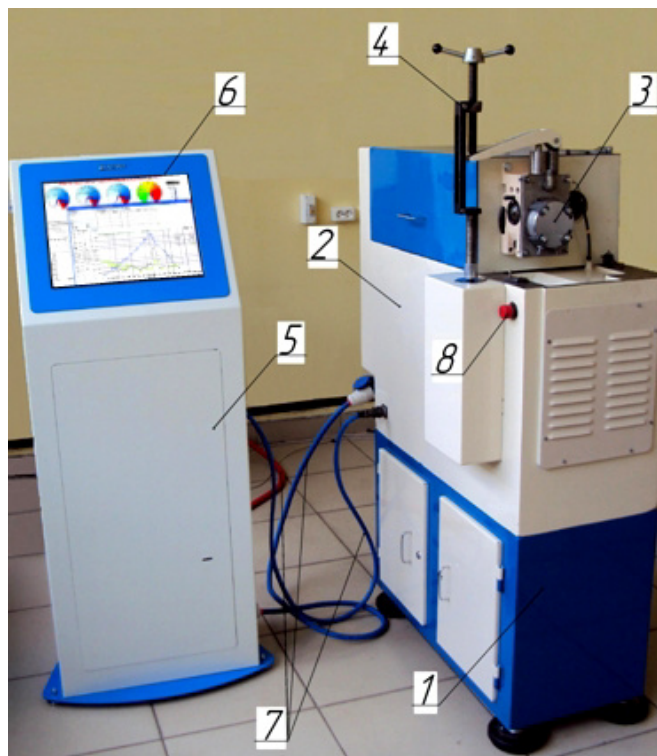


Рисунок 3.13 – Общий вид модернизированной машины трения СМТ-1М

В модернизированной машине трения сигналы от энкодера, датчиков измерения усилия и момента через коннекторный блок *NI SCB-68* и многофункциональную плату сбора данных *NI USB-6251* поступают на компьютер. На компьютере установлен виртуальный прибор *UTM 2070*, позволяющий анализировать информацию с датчиков машины трения.

На рабочем окне прибора отображается нагрузка, кН; частота вращения «ролика», об/мин; температура, град; момент трения, Н·м; коэффициент трения. Интерфейс виртуального прибора представлен на рисунке 3.14.

Образцы прирабатывали, так чтобы номинальная площадь прилегания составляла не менее 100 %. Контроль осуществляли методом планиметрирования пятен контакта, обеспечивающим погрешность не более 1 %. После достижения указанного прилегания образцы маркировали на нерабочих поверхностях с указанием взаимной ориентации при установке на испытательную машину, затем промывали в ацетоне, высушивали и взвешивали.

Подготовленные образцы устанавливали на испытательной машине и приводили в движение подвижный образец «ролик» с частотой 380 об/мин,

которая обеспечивает скорость скольжения пары трения 0,8 м/с. Смазочный материал – масло гидравлическое МГЕ-46В, подача смазки разовая в картер.

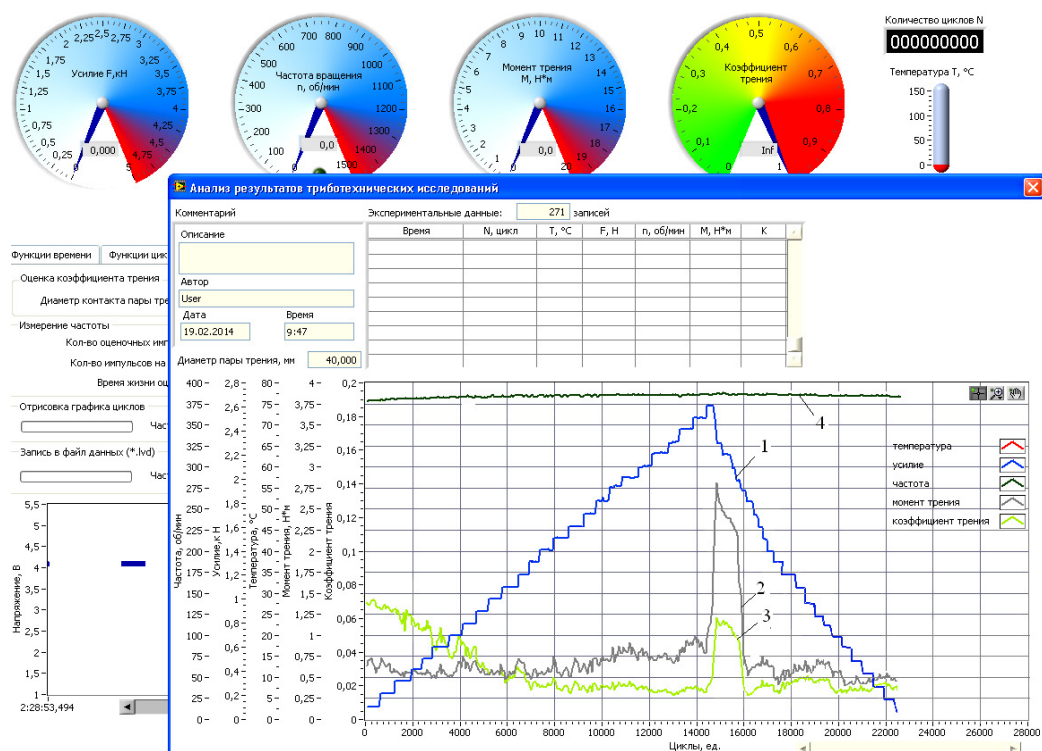


Рисунок 3.14 – Интерфейс рабочего окна виртуального прибора UTM 2070

Испытания пар трения проводили по типу «ролик-колодка». Материал и размеры образцов представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Размеры и материал образцов для триботехнических испытаний

Колодка			Ролик		
Размеры, мм					
A	B	C	D	E	F
Для экспериментальной нагрузки 34,2 МПа сила нагружения 3940 Н					
20	29	11	30 ⁰	40	12
алюминиевый сплав АК5М7			сталь 18ХГТ		
алюминиевый сплав АК5М7 с ЭИП из меди М1			сталь 18ХГТ с ЭИП из стали 65Г		

К образцам прикладывали дискретно нарастающую нагрузку, в соответствии РД 50-662-88 [27], и определяли значение давления, при котором отмечается заедание образца $P_{М.Н}$. Возникновение заедания контролировали по значительному («катастрофическому») повышению момента трения и температуры.

Износостойкость и коэффициент трения образцов определяли при нагрузке, соответствующей расчетному давлению в сопряжении. Длительность износных испытаний составляла 8 часов.

Количество повторностей опытов – 8 (при доверительной вероятности 0,90, коэффициенте вариации 0,26, показателе надежности 15 %).

Оценку износостойкости проводили по формуле:

$$I = \frac{W}{L}, \quad (3.14)$$

где W – линейный износ образца, м; L – путь трения образца, соответствующий износу, м.

Линейный износ образца определяли по формуле:

$$W = \frac{\Delta G}{\gamma \cdot F_c}, \quad (3.15)$$

где ΔG – изменение массы образца при испытании, кг; γ – плотность изношенного материала, кг/м³; F_c – контурная площадь контакта образцов, м².

Путь трения образца, соответствующий линейному износу образца:

$$L = N \cdot l, \quad (3.16)$$

где l – линейный размер поверхности трения сопряженного образца в направлении скольжения, м; N – число циклов, за каждый из которых поверхности трения образца проходят путь l .

Интенсивность изнашивания пары в целом определяли как сумму интенсивностей изнашивания I_{Σ} элементов пары.

										МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата							63

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Оценка параметров шероховатости рабочих поверхностей деталей пар трения

Оценку параметров шероховатости проводили для поверхностей после механической и электроискровой обработки в соответствии с методикой, описанной в пункте 3.1 главы 3.

В таблице 4.1 представлены значения параметров шероховатости профилей, сформированных после механической обработки новых деталей круглых шестеренных насосов и обработанных электроискровым методом. Представленные значения обобщены по 42 профилограммам, снятым в продольном направлении относительно направления подачи.

Полученные результаты измерений согласуются с параметрами шероховатости, указанными на рабочих чертежах деталей, и коррелируют с результатами исследований поверхностей после различных видов механической обработки Комбалова В. С. [19] и Рыжова Э. В. [28].

Таблица 4.1 – Значения параметров шероховатости профилей, сформированных после механической обработки

Вид механической обработки	Деталь	Материал детали / покрытие	b	v	R_{max}	r	Δ
					МКМ		
<i>детали круглого шестеренного насоса</i>							
круглое шлифование	цапфа шестерни	сталь 18ХГТ	2,4	1,6	0,62	167	$2,1 \cdot 10^{-3}$
		сталь 18ХГТ / ЭИП сталь 65Г	2,7	1,5	0,47	125	$1,9 \cdot 10^{-3}$

4.2 Оценка механических свойств поверхностных слоев образцов пар трения

4.2.1 Микротвердость

Измерение микротвердости покрытий, сформированных методом электроискровой обработки, проводили с целью определить количественные значения и их градиент по глубине.

Рассмотрим результаты статистической оценки измерений микротвердости по глубине покрытий, сформированных на режимах, не изменяющих размеры детали.

Из таблицы 4.2 видно, что для всех исследуемых групп измерений микротвердости уровень значимости критерия Шапиро-Уилка p_W больше $p = 0,05$, что подтверждает нулевую гипотезу о нормальном распределении значений измерений в группах.

Значения уровня значимости критерия Левина двух исследуемых групп измерений микротвердости p_L больше принятого значения уровня значимости $p = 0,05$, что также подтверждает нулевую гипотезу о присутствии однородности дисперсий.

Таким образом, применение t -критерия Стьюдента для сравнения средних значений микротвердости двух групп измерений по глубине покрытия правомерно.

Рассмотрим результаты статистической оценки измерений микротвердости по глубине покрытий, сформированных на режимах, не изменяющих размеры детали, но направленных на повышение триботехнических характеристик поверхности за счет обработки антифрикционными материалами. Сравнивались последовательно две группы измерений: группа на i уровне с группой на предыдущем уровне $i-1$ (где $i = 10, 20, \dots, k$, мкм).

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		65

Таблица 4.2 – Характеристики статистической оценки измерений микротвердости по глубине

ИПС на алюминиевом сплаве АК5М7 электродом из меди М1 ($\overline{H}_{\mu}^{\text{медь}} = 82,2 \text{ МПа}$)

$h_{\text{ИПС}i}$, мкм	\overline{X} , МПа	V , %	p_W	p_L	p_t	$K_{\text{упр.}}$
2 режим генератора «ALIER-31»						
10	165,6	10	0,22020	--	--	1,9
20	137,4	7	0,07214	$p_L(20;10) = 0,664654$	$p_t(20;10) = 0,009542$	1,58
30	105,2	11	0,39735	$p_L(30;20) = 0,860056$	$p_t(30;20) = 0,001421$	1,21
40	89,6	5	0,93666	$p_L(40;30) = 0,221934$	$p_t(40;30) = 0,022331$	1,03
50	87,2	8	0,97958	$p_L(50;40) = 0,360342$	$p_t(50;40) = 0,519635$	--
3 режим генератора «ALIER-31»						
10	205,2	2	0,43674	--	--	2,36
20	184,8	2	0,56568	$p_L(20;10) = 0,408085$	$p_t(20;10) = 0,017135$	2,12
30	147,8	4	0,40955	$p_L(30;20) = 0,880227$	$p_t(30;20) = 0,000136$	1,69
40	121,6	3	0,91119	$p_L(40;30) = 0,620525$	$p_t(40;30) = 0,006158$	1,39
50	97,0	2	0,99980	$p_L(50;40) = 0,068088$	$p_t(50;40) = 0,002960$	1,11
60	90,4	5	0,36329	$p_L(60;50) = 0,232784$	$p_t(60;50) = 0,014117$	1,04
70	87,2	3	0,95464	$p_L(70;60) = 0,329528$	$p_t(70;60) = 0,182257$	--
4 режим генератора «ALIER-31»						
10	216,0	8	0,25223	--	--	2,52
20	193,4	3	0,57597	$p_L(20;10) = 0,166860$	$p_t(20;10) = 0,210015$	2,24
30	160,2	7	0,94808	$p_L(30;20) = 0,253421$	$p_t(30;20) = 0,000367$	1,86
40	138,0	8	0,59566	$p_L(40;30) = 0,867178$	$p_t(40;30) = 0,013645$	1,60
50	108,4	13	0,40161	$p_L(50;40) = 0,592262$	$p_t(50;40) = 0,005760$	1,26
60	90,0	5	0,93696	$p_L(60;50) = 0,054179$	$p_t(60;50) = 0,023286$	1,04
70	86,2	6	0,17203	$p_L(70;60) = 0,702114$	$p_t(70;60) = 0,271242$	--

Из таблицы 4.2 видно, что уровень значимости t -критерия Стьюдента сравнения средних двух соседних групп меньше принятого значения $p = 0,05$, то есть имеет место альтернативная гипотеза о равенстве средних.

На основании этого можно сделать заключение, что при электроискровой обработке на 2, 3 и 4 режимах генератора «ALIER-31» на поверхности образца образуется измененный поверхностный слой (ИПС), микротвердость которого статистически значимо снижается по глубине до значения микротвердости материала основы.

На рисунке 4.1 показаны графики распределения средних значений микротвердости по глубине сформированных покрытий на исследуемых режимах генератора «ALIER-31».

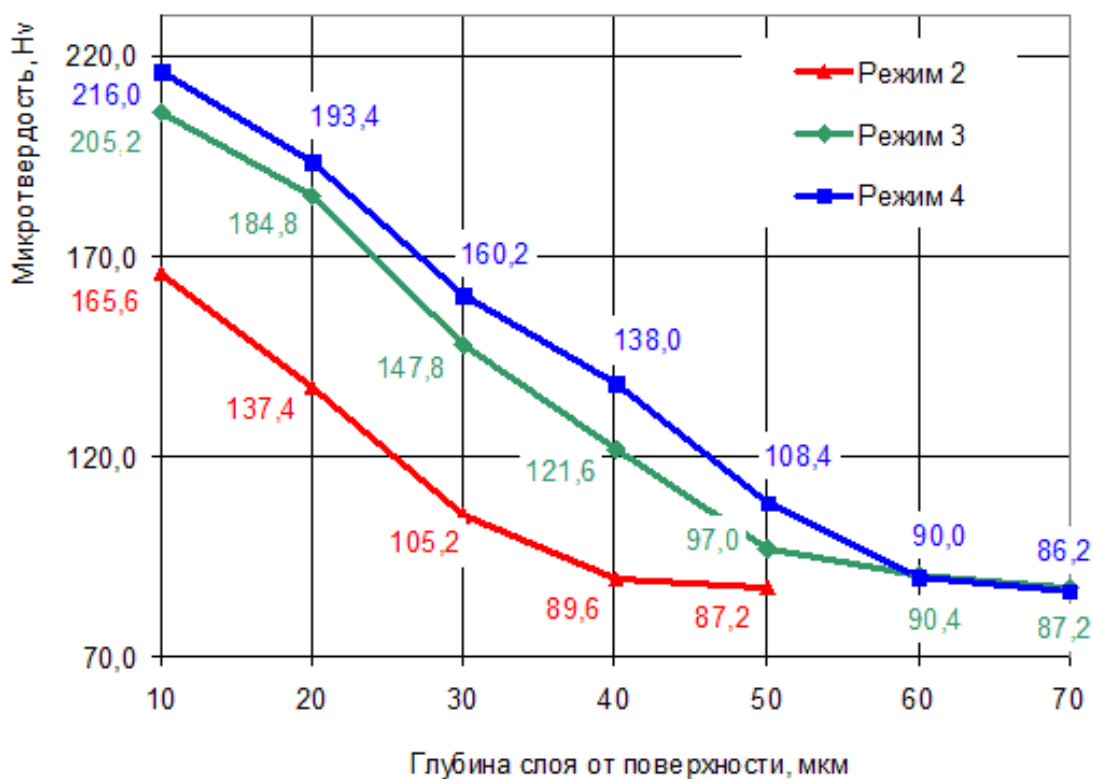


Рисунок 4.1 – Распределение микротвердости по глубине покрытия, сформированного на алюминиевом сплаве АК5М7 электродом из меди

Анализируя изменчивость вариационных рядов значений микротвердости на исследуемой глубине (не более 10 %), можно сделать вывод об однородности фазового состава, незначительном количестве пор и дефектов, высокой точности измерений.

4.2.2 Относительное удлинение поверхностных слоев

Благоприятное сочетание таких механических свойств поверхностных слоев материалов, как твердость и пластичность, существенно влияет на их износостойкость. При восстановлении и упрочнении рабочих поверхностей деталей предпочтение следует отдавать покрытиям, имеющим высокую твердость, в то же время способных к значительным деформациям без разрушения.

В таблице 4.3 представлены результаты исследования относительного удлинения поверхностей образцов без покрытий и с покрытиями, сформированными методом ЭИО.

Таблица 4.3 – Результаты оценки относительного удлинения поверхностных слоев образцов без покрытий и с покрытиями, сформированными методом ЭИО

Материал поверхности	Глубина внедрения конуса h , мм	Диаметр отпечатка \bar{d}_{omn} , мм	Параметр $y = \frac{h}{\bar{d}_{omn}}$	Относительное удлинение, δ_{5B}
алюминиевый сплав АК5М7	0,2	0,98892	0,20224	0,25
алюминиевый сплав АК5М7 с ЭИП из меди М1	0,04	0,20628	0,19391	0,13

Анализируя полученные результаты, видно, что значения относительного удлинения поверхностных слоев после электроискровой обработки отличаются от поверхностей без покрытий. При этом после обработки алюминиевого сплава АК5М7 значение относительного удлинения на поверхности образца снизилось, т.е. поверхность стала менее пластичной.

Сопоставляя результаты исследований относительного удлинения покрытий с результатами исследования микротвердости, прослеживается очевидная закономерность. При обработке алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди М1 микротвердость на поверхности увеличилась в 2,36 раза, при этом значение относительного удлинения снизилось в 1,92 раза.

Таким образом, на данном этапе исследований можно с уверенностью предположить, что при упрочнении поверхностей методом ЭИО триботехнические характеристики пар трения будут выше, чем у образцов пар трения без покрытий.

4.2.3 Условный предел текучести

Анализируя зависимость условия внешнего трения $\frac{h}{r} + \frac{\tau_n}{c\sigma_T} \leq \frac{1}{2}$, видно,

что вторая составляющая суммы в значительной степени зависит от предела текучести поверхностного слоя. С увеличением этого значения, отношение $\frac{\tau_n}{c\sigma_T} \rightarrow \min$, следовательно, можно ожидать, что нарушение фрикционной связи будет происходить по поверхности раздела двух тел, не затрагивая слои основного металла.

Целью данного эксперимента является определение значений условного предела текучести на поверхностях образцов без покрытий и с покрытиями, сформированными методом ЭИО. Результаты оценки представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты оценки условного предела текучести поверхностных слоев образцов без покрытий и с покрытиями, сформированными методом ЭИО

Материал поверхности	Нагрузка на индентор F , Н	Твердость на пределе текучести $H_{0,2}$, МПа	Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа
алюминиевый сплав АК5М7	338	530	150
алюминиевый сплав АК5М7 с ЭИП из меди М1	608	954	270

Из таблицы видно, что после электроискровой обработки поверхности образца из алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди М1 значение условного предела текучести увеличилось на 80 %.

Исследования влияния электроискровой обработки металлических поверхностей на их механические характеристики, проведенные А.И. Михайлюком [29], показали, что при определенных условиях процесса формируется субструктура, границы зерен которой представляют собой области, ограниченные дислокационной сеткой. То есть на поверхностях образцов формируются структуры и субструктуры наноразмерной величины, с присущими им совершенно новыми механическими свойствами, что объясняет полученные в результате эксперимента результаты.

4.3 Исследование фрикционных свойств поверхностей деталей пар трения

4.3.1 Удельная сдвиговая прочность молекулярных связей

Фрикционный контакт, как правило, характеризуется наличием между твердыми телами промежуточного слоя, представляющего собой пленку смазки, окисла, адсорбированных паров воды и пленку деградированного материала основы. Эта прослойка должна иметь меньшее сдвиговое сопротивление, чем основные материалы. Область, состоящую из пленки и деградированного материала основы, называют третьим телом.

Схематический разрез контакта двух твердых тел показан на рисунке 4.2. Третье тело состоит из нескольких слоев. Верхний слой представляет собой граничную пленку смазки, адсорбированную или хемосорбированную.

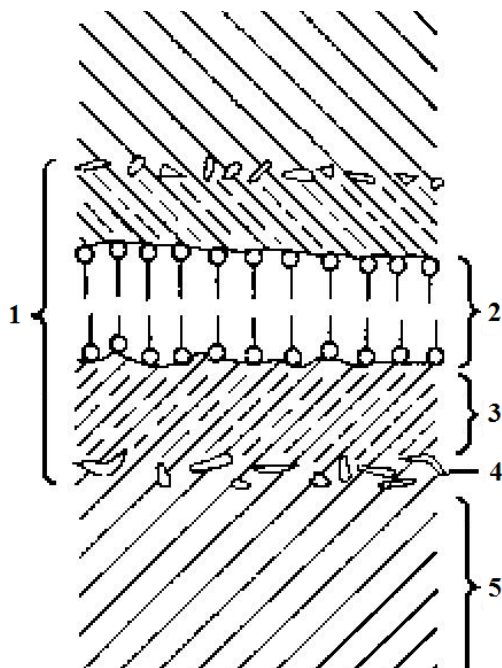


Рисунок 4.2 – Строение контакта (схема): 1 – третье тело; 2 – адсорбированный слой; 3 – окислы и другие химические соединения; 4 – разрыхленный слой; 5 – основной материал

Под этой пленкой обычно располагается пленка окислов металла или другого химического соединения – сульфида, хлорида, фосфида, и наконец, под этой пленкой лежит тонкий слой разрыхленного материала основы.

Молекулярное взаимодействие поверхностей приводит к образованию более или менее прочного соединения.

При тангенциальном перемещении одного тела относительно другого третье тело находится в режиме непрерывного формоизменения. Подвижности третьего тела на металлах способствует то, что поверхностный слой становится насыщен вакансиями, плотность которых примерно на два порядка больше [30], чем в объеме металла. Сдвиговое сопротивление третьего тела изменяется в широких пределах и зависит от свойств образующих его частей.

Экспериментально доказано, что удельная сдвиговая прочность молекулярных связей на границе раздела двух твердых тел подчиняется биномиальному закону:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta \cdot p_r, \quad (4.1)$$

где τ_0 – сдвиговое сопротивление при экстраполяции нормального давления к нулю, МПа; β – коэффициент упрочнения молекулярной связи; p_r –

фактическое давление на контакте при пластическом контакте, $p_r \approx HB$, МПа.

Тогда с учетом (4.1) молекулярную составляющую коэффициента внешнего трения можно записать:

$$f_a = \frac{\tau_0}{HB} + \beta. \quad (4.2)$$

Определение составляющих удельной сдвиговой прочности молекулярных связей τ_0 и β проведено в соответствии с методикой, описанной в главе 3. Результаты эксперимента представлены в таблицах 4.5 и 4.6.

Анализ результатов исследования фрикционных параметров молекулярной составляющей коэффициента внешнего трения, представленных в таблице 4.6, показал, что во всех исследуемых парах, в которых на поверхность образцов нанесено покрытие методом электроискровой обработки, значение удельной сдвиговой прочности снижается. Установленную закономерность можно объяснить высокой маслосемкостью электроискровых покрытий. По данным исследований Б.В. Дерягина и В.П. Лазарева, с увеличением толщины пленки смазки значение τ_0 уменьшается, а коэффициент β остается неизменным.

При формировании измененного поверхностного слоя электродом из меди М1 методом электроискровой обработки на поверхности из алюминиевого сплава АК5М7, значение удельной сдвиговой прочности молекулярных связей увеличилось. При этом из формулы (4.2) видно, что влияние оказало увеличение твердости поверхности. При этом коэффициенты τ_0 и β изменились незначительно.

Таблица 4.5 – Результаты определения зависимости $\tau_n = f(p_r)$

Пара, образующая фрикционный контакт	Параметры испытаний										$W, ^\circ$						
	шаровой индентор (изнашивающий)	плоскопараллельные пластины (изнашиваемые)	F_{N1}		F_{mp1}		$r_{ог1},$ мм		координата первой точки			F_{N2}		F_{mp2}		$r_{ог2},$ мм	
Н			МПа		МПа		МПа		МПа		Н		Н		МПа		МПа
сталь 18ХГТ		алюминиевый сплав АК5М7	6000	68,2	4,4	4,8	98,7	5100	54,2	4,1	4,7	96,6	10				
сталь 18ХГТ с ЭИП из стали 65Г		алюминиевый сплав АК5М7 с ЭИП из меди М1	6000	99,3	4,3	7,5	103,3	5100	79,1	4,0	7,4	101,5	13				

Таблица 4.6 – Фрикционные параметры молекулярной составляющей коэффициента внешнего трения

Пара, образующая фрикционный контакт	Экспериментальные данные					Расчетные значения	
	$\tau_0,$ МПа	β	$HB,$ МПа	$\tau_n,$ МПа по формуле (4.6)	f_a по формуле (4.7)		
шаровой индентор (изнашивающий)							
сталь 18ХГТ	1,3	0,03	87	3,91	0,045		
сталь 18ХГТ с ЭИП из стали 65Г	2,7	0,05	205,2	12,96	0,063		

4.3.2 Фрикционная усталость

Привлечение концепции механики трибофатических систем имеет решающее значение для раскрытия механизма разрушения при трении.

Анализ характера воздействий, выполненный на модели жесткого сферического выступа, скользящего по деформируемому полупространству, показал, что в последнем возникает сложное напряженное состояние: перед выступом существует зона сжатия, а за ним – зона растяжения. В результате возникает знакопеременный цикл нагружения материала. Многократные повторные деформации приводят к накоплению повреждений под поверхностью материала, где образуются поры. Под воздействием напряжений они перерастают в трещины, приводящие к отделению частицы износа.

Для определения значений параметра фрикционной усталости поверхностных слоев образцов без покрытий и с покрытиями, сформированными методом ЭИО, поставлены модельные эксперименты в соответствии с методикой, представленной в главе 3.

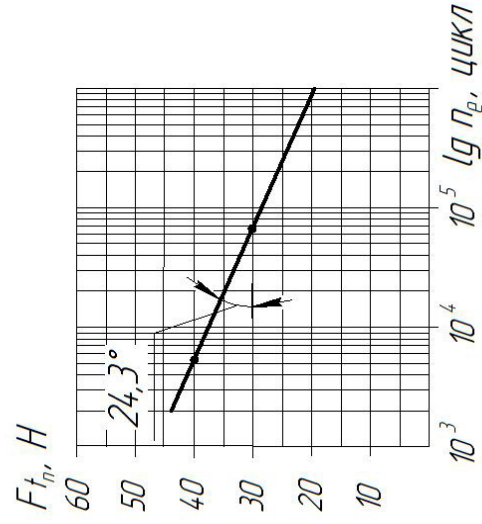
Результаты оценки параметра фрикционной усталости представлены в таблице 4.7.

На рисунке 4.3 представлена графическая интерпретация зависимостей фрикционно-механической усталости исследуемых образцов.

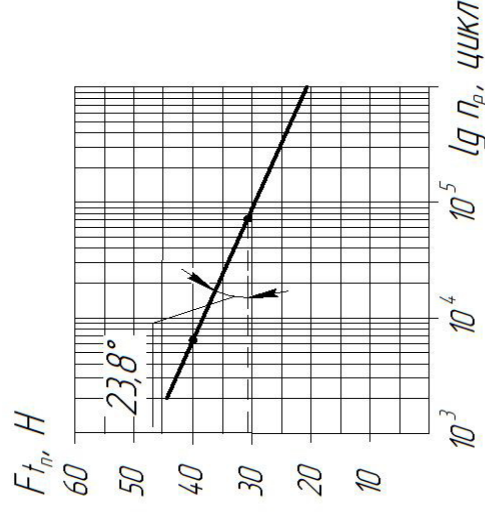
Из таблицы 4.7 видно, что для исследуемых материалов значения параметра фрикционной усталости изменяются в диапазоне от 2 до 3 единиц, что характерно для упруго-пластического контакта поверхностей. Электроискровая обработка на параметр фрикционной усталости оказывает незначительное влияние. При этом видно, что упрочнение алюминиевого сплава электродом из меди позволило повысить данный параметр. При нанесении на поверхность серого чугуна покрытия из нихрома Х20Н80 фрикционная усталость снизилась, а после последующей электроискровой обработки медью стала выше, даже по сравнению с образцом без покрытия.

Таблица 4.7 – Результаты оценки параметра фрикционной усталости

Изнашиваемые образцы	Нагрузка, Н	Сила трения, Н	Глубина внедрения, мкм	Количество циклов, n_{e1}	Нагрузка, Н	Сила трения, Н	Глубина внедрения, мкм	Количество циклов, n_{e2}	Угол наклона, $\alpha_{t_{п}}$	$t_{п}$
Al	40	2,8	24	5600	32	2,1	18	40200	24,3	2,21
Al+M1 эио	40	2,7	20	6400	32	1,8	14	50350	23,8	2,27



алюминиевый сплав АК5М7



алюминиевый сплав АК5М7
с ЭИП из меди М1

Рисунок 4.3 – Зависимости фрикционно-механической усталости

4.4 Коэффициент трения и интенсивность изнашивания

В таблице 4.8 представлены результаты экспериментальной оценки параметров трибосопряжений.

Из таблицы видно, что нагрузка до предзадира в исследуемых парах трения выше, чем расчетное максимальное напряжение на площадке контакта трибосопряжения, а электроискровая обработка поверхности образцов из алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди способствовала увеличению коэффициента трения

Исследование изнашиваемых образцов в парах трения при расчетной эксплуатационной нагрузке показало, что в исследуемой паре трения после нанесения электроискрового покрытия интенсивность изнашивания изнашиваемого образца снизилась относительно образца пары трения без покрытия.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		76

Таблица 4.8 – Статистические характеристики выборки параметров трибосопряжения круглых шестеренных насосов

Параметры трибосопряжений	\bar{X}	Значения 95-процентного доверительного интервала		p_{95}	Параметры закона распределения выборки	
		нижнее	верхнее		μ	σ
<i>пара трения: ролик – 18ХГТ; колодка АК5М7 (N=10)</i>						
Нагрузка до предзадира, $P_{мп}$, МПа	37,5	35,1	39,8	0,77755	37,5	3,27
Коэффициент трения при нагрузке 34,2 МПа, $f_{34,2}$	0,071	0,069	0,074	0,16776	0,071	0,0035
Интенсивность изнашивания колодки при нагрузке 34,2 МПа, I_k	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^{-5}$	$4,36 \cdot 10^{-5}$	0,81453	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$8,67 \cdot 10^{-6}$
Интенсивность изнашивания ролика при нагрузке 34,2 МПа, I_p	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$2,05 \cdot 10^{-9}$	0,85140	$1,8 \cdot 10^{-9}$	$3,50 \cdot 10^{-10}$
Суммарная интенсивность изнашивания при нагрузке 34,2 МПа, ΣI	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$3,12 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-5}$	0,81445	$3,74 \cdot 10^{-5}$	$8,67 \cdot 10^{-6}$
Суммарная износостойкость при нагрузке 34,2 МПа, ϵ	$2,81 \cdot 10^4$	$2,32 \cdot 10^4$	$3,31 \cdot 10^4$	0,60312	$2,81 \cdot 10^4$	$6,89 \cdot 10^3$
<i>пара трения: ролик – сталь 18ХГТ с ЭИП из стали 65Г; колодка АК5М7 с ЭИП из меди М1 (N=8)</i>						
Нагрузка до предзадира, $P_{мп}$ МПа	38,4	36,86	40,01	0,99578	38,4	1,884
Коэффициент трения при нагрузке 34,2 МПа, $f_{34,2}$	0,086	0,083	0,088	0,97737	0,086	0,003
Интенсивность изнашивания колодки при нагрузке 34,2 МПа, I_k	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	0,08751	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-6}$
Интенсивность изнашивания ролика при нагрузке 34,2 МПа, I_p	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$1,68 \cdot 10^{-9}$	$2,25 \cdot 10^{-9}$	0,12741	$1,97 \cdot 10^{-9}$	$3,41 \cdot 10^{-10}$
Суммарная интенсивность изнашивания при нагрузке 34,2 МПа, ΣI	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$2,14 \cdot 10^{-5}$	$3,31 \cdot 10^{-5}$	0,08756	$2,73 \cdot 10^{-5}$	$6,96 \cdot 10^{-6}$
Суммарная износостойкость при нагрузке 34,2 МПа, ϵ	$3,88 \cdot 10^4$	$3,08 \cdot 10^4$	$4,69 \cdot 10^4$	0,06763	$3,88 \cdot 10^4$	$9,67 \cdot 10^3$

5 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА КРУГЛЫХ ШЕСТЕРЕННЫХ НАСОСОВ

Результаты исследований, представленные в предыдущих главах, и их анализ в полной мере раскрывают подходы к разработке технологического процесса ремонта круглых шестеренных насосов, обеспечивающих средний межремонтный ресурс на уровне среднего доремонтного.

5.1 Технологические рекомендации по ремонту круглых шестеренных насосов

На рисунке 5.1 представлена блок-схема технологии ремонта круглых шестеренных гидронасосов.

Восстановление поверхностей ведущего и ведомого вала шестерни.
Изношенные поверхности цапф шестерен восстанавливают методом электроискровой обработки с использованием комплекса БИГ-3 ТУ 3312-001-21655395-2012 [31], состоящего из независимого генератора импульсов тока «ELITRON-22B» и обрабатывающего устройства ВИ-1, которое монтируется в резцедержателе модернизированного токарно-винторезного станка (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Наплавка цапф шестерен с использованием комплекса БИГ-3

										Лист
										78
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

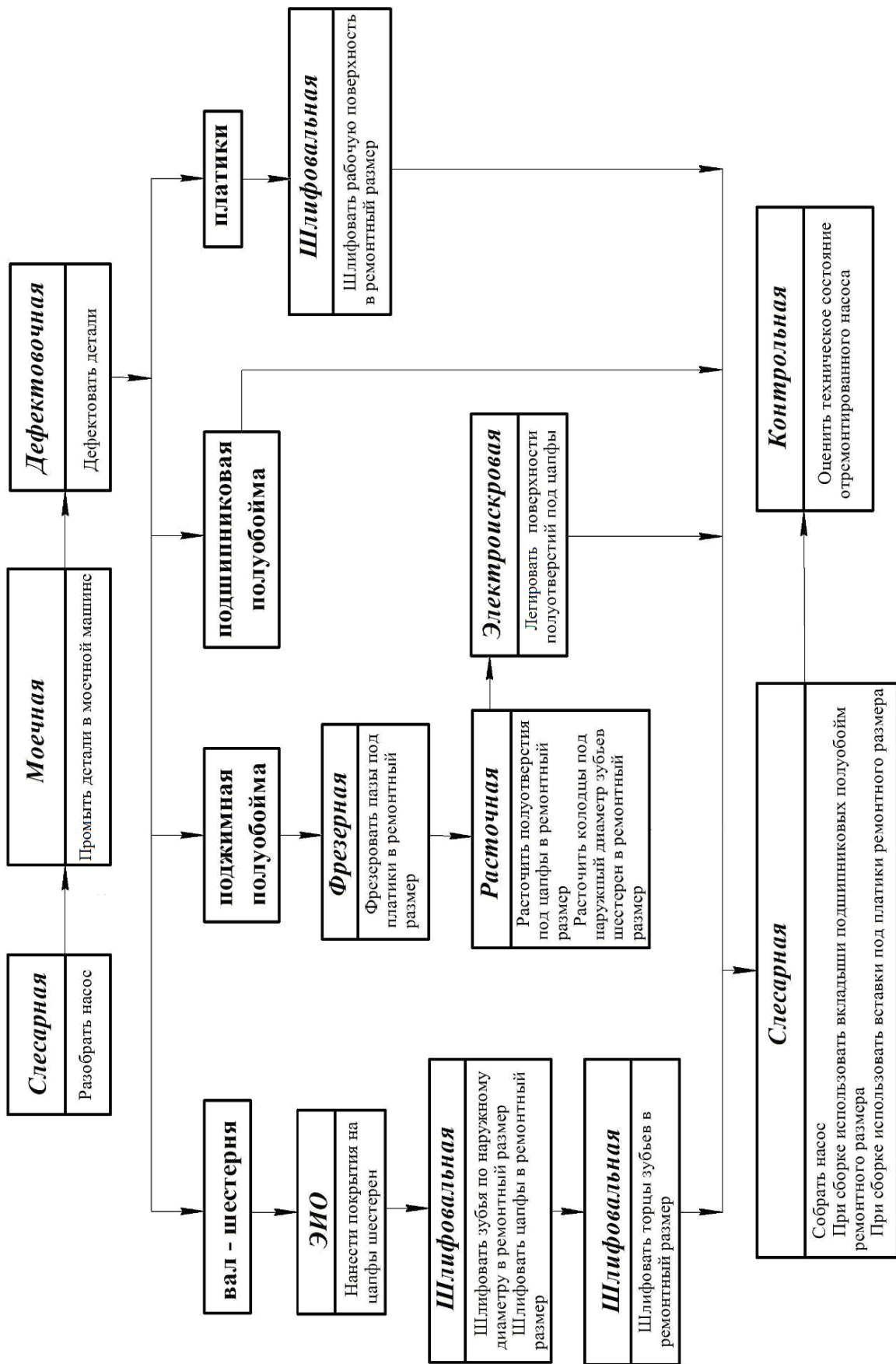


Рисунок 5.1 – Блок-схема технологии ремонта круглых шестеренных насосов

Шестерню закрепляют в трехкулачковом патроне. На противоположную цапфу наносят слой металлопокрытия электродом из стали 65Г Ø3,8 мм за один проход. Режим генератора 5; частота вращения детали $n_d=1,52$ об/мин; продольная подача $S_{пр}=0,26$ мм/об. Полученная на указанных режимах обработки толщина покрытия составляет около 250 мкм на диаметр.

Затем шестерню переворачивают, закрепляют и обрабатывают противоположную цапфу.

Качество покрытия оценивают визуально, сравнивая с эталоном.

Наплавленные поверхности цапф шестерен $d_{ш}^Ц$, зубья по наружному диаметру $d_{ш}^3$ и их торцовые поверхности шлифуют до ремонтных размеров (табл. 5.1) на круглошлифовальных станках.

Таблица 5.1 – Ремонтные размеры деталей соединения «цапфы – полуотверстия полуобойм» шестеренного насоса НШ32 А

Поверхности шестерен	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
диаметр цапф, $d_{ш}^Ц$	$30,2_{-0,060}^{-0,045}$	$30,4_{-0,060}^{-0,045}$	$30,6_{-0,060}^{-0,045}$
диаметр зубьев, $d_{ш}^3$	$59,1_{-0,030}$	$58,4_{-0,030}$	$57,7_{-0,030}$
ширина зубьев, $B_{ш}$	$19,84_{-0,02}$	$19,64_{-0,02}$	$19,44_{-0,02}$

При шлифовании ведущих и ведомых валов шестерен для передачи крутящего момента используют рифленый центр, что позволяет обработать цапфы шестерен и зубья по наружному диаметру с одной установки. Частота вращения вала шестерни 1200...1300 мин⁻¹. Марка шлифовального круга по ГОСТ 2424-83 : 25А 40-16 СМ2-С2 6-7 В1 – 35 м/с. Тип круга 1, 5, 7.

Для контроля диаметров зубьев $d_{ш}^3$ применяется специальное приспособление 70-8701-1669 [32], оснащенное индикаторной головкой с ценой деления 0,01 мм – ИЧ02 кл. 0 ГОСТ 577-68, а для измерения цапф применяется микрометр МК 50-1 ГОСТ 6507-90.

При шлифовании торцовых поверхностей зубьев вал – шестерню устанавливают в центрах, один из которых рифленый.

Шлифуют левый торец шестерни с припуском $t_{л.т}$, равным 0,1 мм для каждого ремонтного размера, и с этой же установки правый, обеспечив размер $B_{ш}$ (табл. 5.1).

Режимы шлифования: скорость круга $v_{кр} = 30...35$ м/с; скорость заготовки $v_3 = 25...30$ м/мин; продольная подача (в направлении оси круга) $S_{пр}^{шл} = (0,2...0,4) \cdot B_{кр}$, где $B_{кр}$ – толщина круга. Марка шлифовального круга по ГОСТ 2424-83: 25А 40-16 СМ2-С2 6-7 В1 – 35 м/с. Тип круга 1, 5, 7, 23, 26.

Качество шлифования торцов зубьев проверяют лекальной линейкой, установленной на торцевую поверхность зуба. Просвет между линейкой и плоскостью торцов зубьев не допускается. Допустимое значение отклонения от параллельности торцевых поверхностей зубьев шестерни не более 0,01 мм.

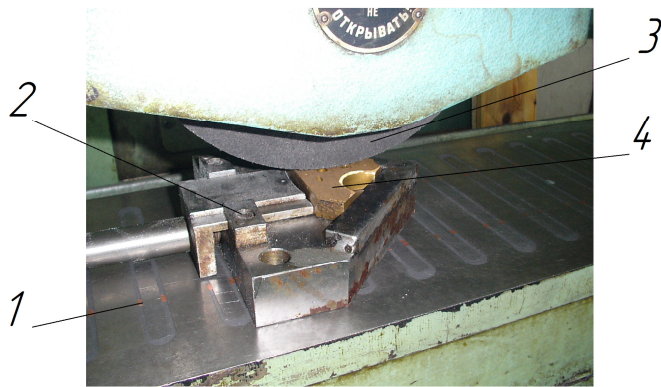
Восстановление поверхностей платиков. Изношенную поверхность платиков перешлифовывают в ремонтный размер, $B_{пл}$ мм (табл. 5.2).

Таблица 5.2 – Ремонтные размеры платиков шестеренного насоса НШ32 А

Размер детали	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
ширина платиков, $B_{пл}$	11,50 ^{-0,02} _{-0,05}	11,00 ^{-0,02} _{-0,05}	10,50 ^{-0,02} _{-0,05}

Для шлифовки платиков применяют специальное приспособление, устанавливаемое на магнитный стол плоскошлифовального станка (рис. 5.3).

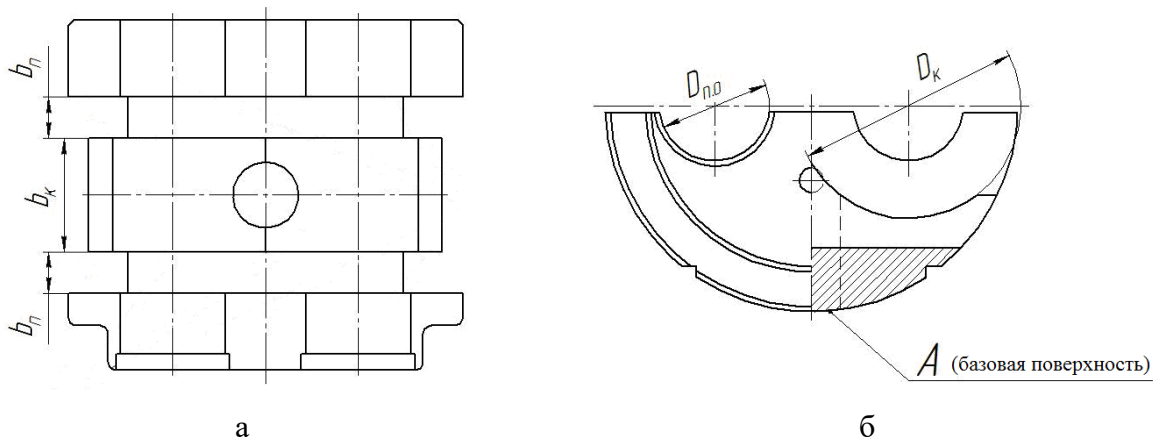
Режимы шлифования: скорость круга $v_{кр} = 30...35$ м/с; скорость заготовки $v_3 = 18...25$ м/мин; продольная подача (в направлении оси круга) $S_{пр}^{шл} = (0,2...0,3) \cdot B_{кр}$. Марка шлифовального круга по ГОСТ 2424-83: 25А 40-16 СМ2-С2 6-7 В1 – 35 м/с. Тип круга 1, 5, 7.



1 – магнитный стол станка; 2 – зажим для пластиков; 3 – круг абразивный; 4 – пластик
Рисунок 5.3 – Шлифовка пластика

Допустимые значения отклонений при шлифовке от параллельности плоскостей не более 0,01 мм. Параллельность контролируется индикаторной головкой с ценой деления 0,01 мм – ИЧ02 кл. 0 ГОСТ 577-68, закрепленной на стойке С-IV М-8-160×100 ГОСТ 10197-70.

Восстановление поджимной полуобоймы. В поджимной полуобойме (рис. 5.4) обрабатываются пазы под пластики с внутренней стороны, колодцы под зубья шестерен и полуотверстия под цапфы шестерен до ремонтных размеров (табл. 5.3) на горизонтально-фрезерном станке.



$b_{п}$ – ширина пазов под пластики; $b_{к}$ – ширина колодцев под шестерни; $D_{п.о.}$ – диаметр полуотверстий под цапфы шестерен; $D_{к}$ – диаметр колодцев под шестерни

Рисунок 5.4. – Размеры конструктивных элементов поджимной полуобоймы:
а – вид сверху, б – вид сбоку

Таблица 5.3 – Ремонтные размеры конструктивных элементов поджимной полуобоймы шестеренного насоса НШ32 А

Конструктивный элемент	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
ширина паза, $b_{п}$	12,1 ^{+0,05}	12,2 ^{+0,05}	12,3 ^{+0,05}
ширина колодца, $b_{к}$	19,80 _{-0,05}	19,60 _{-0,05}	19,40 _{-0,05}

Для обработки внутренних поверхностей пазов под платики 1 поджимную полуобойму 2 базируют по поверхности А в призмах специального приспособления 3, закрепленного на столе фрезерного станка 4, и фиксируют по поверхностям Б и В (рис. 5.5).

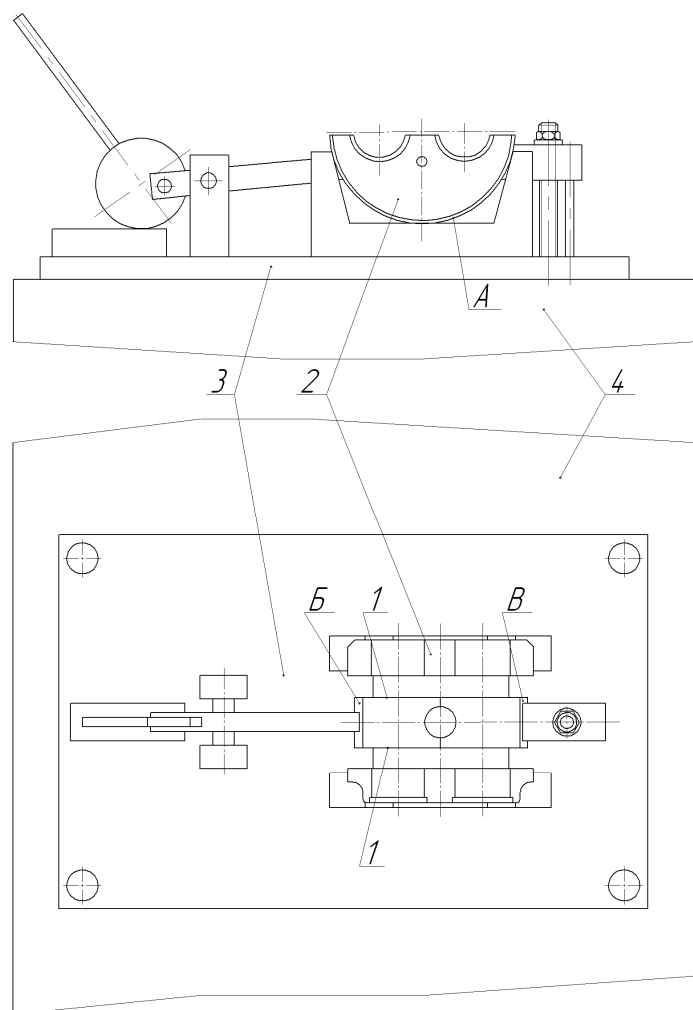
Точность базирования полуобоймы в горизонтальной плоскости контролируют индикаторной головкой с ценой деления 0,01 мм – ИЧ02 кл. 0 ГОСТ 577-68, закрепленной на стойке С-IV М-8-160×100 ГОСТ 10197-70. Контроль осуществляют по поверхностям Б и В (рис. 5.5).

В качестве инструмента используют трехстороннюю фрезу 1 2240-0211 (тип 2, исполнение 2) ГОСТ 28527-90 с пластинами из твердого сплава ВК3.

Для фрезерования поверхностей пазов под платики приняты режимы: частота вращения шпинделя $n_{шп} = 800...1000 \text{ мин}^{-1}$; подача стола $S_{ст} = 0,25...0,4 \text{ мм/об}$.

Перед обработкой, перемещая стол, фрезу устанавливают до касания с дном и внутренней поверхностью паза. Выставляют индикатор на ноль. Выводят инструмент из зоны обработки и по индикатору устанавливают припуск $t_{п}^1$, равный 0,1 мм для каждого ремонтного размера.

Ширину колодца после обработки поверхности первого паза $b_{к}^1$ измеряют цифровым штангенциркулем типа ШЦЦ-II-200-0,01 ГОСТ166-89. Второй паз обрабатывают так же, но с припуском, равным $t_{п}^2 = b_{к}^1 - b_{к}$ (табл. 5.3).



1 – обрабатываемые поверхности; 2 – поджимная полуобойма; 3 – приспособление для крепления полуобойм; 4 – стол фрезерного станка
 Рисунок 5.5 – Схема базирования поджимной полуобоймы в приспособлении

превышать 0,01 мм. Шероховатость после фрезерования – $R_a 3,2$.

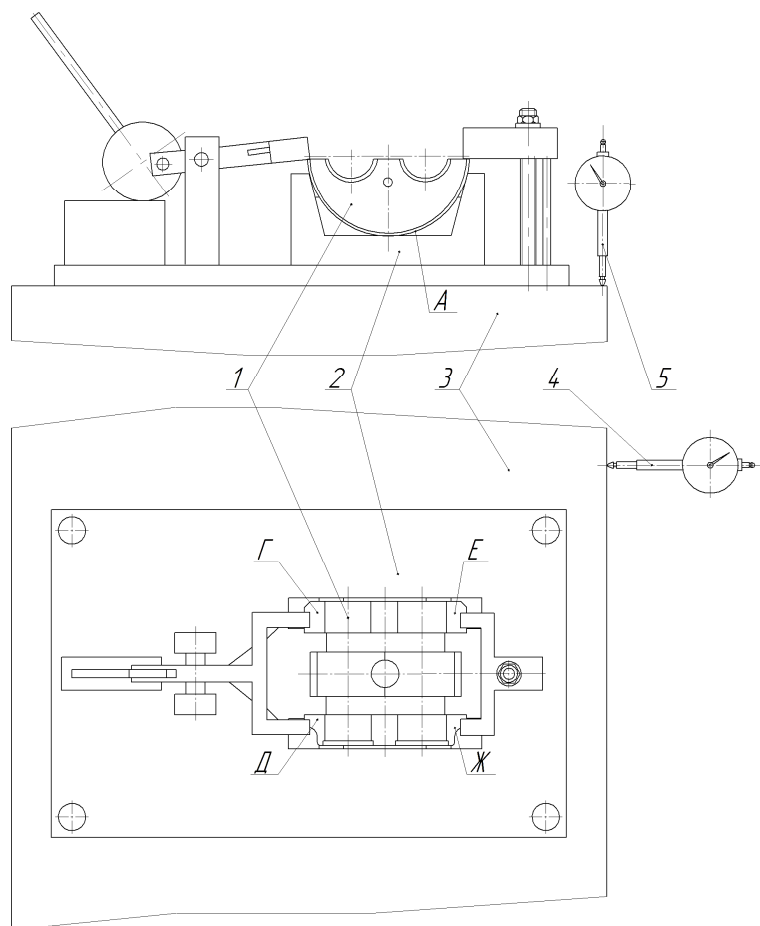
Для обработки *полуотверстий и колодцев* полуобойму 1 базируют по поверхности А в призмах специального приспособления 4, закрепленного на столе фрезерного станка, и фиксируют по поверхностям Г, Д и Е, Ж (рис. 5.6).

Контролируют полученную ширину колодца цифровым штангенциркулем типа ШЦЦ-II-200-0,01 ГОСТ166-89, она должна находиться в допуске размера b_k , указанного в таблице 5.3.

Ширина пазов под пластики после фрезерования должна соответствовать размеру b_{II} , указанному в табл. 5.3. Размер контролируют индикаторными нутромерами типа НИ-10-18-1 с ценой деления шкалы измерительной головки 0,01 мм ГОСТ 868-89.

Отклонение параллельности обработанных поверхностей не должно

Точность базирования полуобоймы в горизонтальной плоскости контролируют индикаторной головкой с ценой деления 0,01 мм – ИЧ02 кл. 0 ГОСТ 577-68, закрепленной на стойке С-IV М-8-160×100 ГОСТ 10197-70. Контроль осуществляют по поверхностям Г, Д и Е, Ж (рис. 5.6).



1 – обрабатываемая поджимная полуобойма; 2 – приспособление для крепления полуобойм; 3 – стол фрезерного станка; 4 – индикатор часового типа ИЧ50 ГОСТ 577-68; 5 – индикатор часового типа ИЧ10 ГОСТ 577-68

Рисунок 5.6 – Схема базирования поджимной полуобоймы для обработки полуотверстий и колодцев

Полуотверстия $D_{по}$ и колодцы $D_{к}$ поджимной полуобоймы обрабатывают до ремонтных размеров (табл. 5.4) специальной расточной головкой диаметром $30_{-0,01}$ мм (рис. 5.7).

Таблица 5.4 – Ремонтные размеры для обработки поверхностей поджимной полуобоймы шестеренного насоса НШ32 А

Обозначение размера	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
диаметр колодца, $D_{к}$	$59,60^{+0,030}$	$59,40^{+0,030}$	$59,20^{+0,030}$
диаметр полуотверстия, $D_{п.о}$	$19,80_{-0,050}$	$19,60_{-0,050}$	$19,40_{-0,050}$

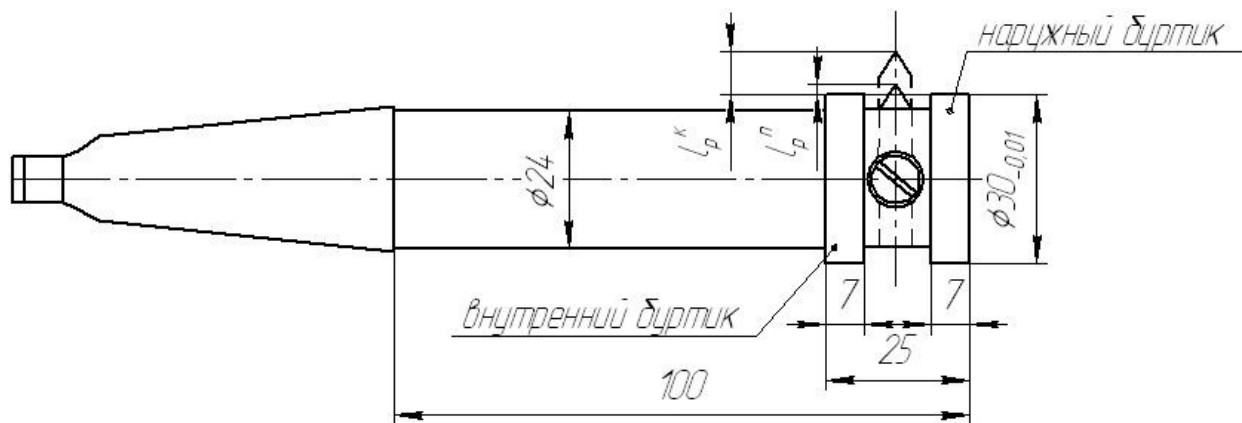


Рисунок 5.7 – Расточная головка для обработки полуотверстий и колодцев поджимной полуобоймы

Вылет резца для обработки полуотверстий $l_p^п$ и колодцев $l_p^к$ для каждого ремонтного размера настраивают в соответствии с размерами, представленными в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Вылет резца для обработки полуотверстий и колодцев поджимной полуобоймы шестеренного насоса НШ32 А

Вылет резца	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
для обработки полуотверстий, $l_p^п$	$0,10_{-0,015}$	$0,20_{-0,015}$	$0,30_{-0,015}$
для обработки колодцев, $l_p^к$	$14,80^{+0,030}$	$14,70^{+0,030}$	$13,60^{+0,030}$

Материал режущей части резца – твердый сплав ВК3.

Режимы обработки полуотверстий под цапфы: частота вращения резцовой головки $n_{р.г.} = 600...800 \text{ мин}^{-1}$, поперечная подача стола с закрепленным на нем приспособлением $S_{поп} = 12...20 \text{ мм/мин}$.

Стол с закрепленной в приспособлении полуобоймой подводят до соприкосновения крайнего буртика оправки (рис. 5.7) и неизношенной части полуотверстия. Прилегание контролируют на просвет.

Сначала растачивают полуотверстия под цапфы одного вала шестерни. Затем стол фрезерного станка перемещают на величину межцентрового расстояния $50 \pm 0,015 \text{ мм}$, контролируя его по индикатору 4, и растачивают полуотверстия под цапфы второго вала шестерни.

После механической обработки полуотверстия поджимной полуобоймы обрабатывают методом электроискровой обработки с использованием генератора «ALIER-31» электродом из меди М1 диаметром 3 мм на 3-м энергетическом режиме, с коэффициентом энергии 1. Время обработки $t_{л} = 1,8$ мин/см².

Для обработки колодцев стол с закрепленной в приспособлении полуобоймой подводят до соприкосновения внутреннего буртика оправки (рис. 5.7) и полуотверстия. Прилегание контролируют на просвет. Затем оправку смещают в сторону колодца до выхода внутреннего буртика за край полуотверстия и перемещают стол фрезерного станка по индикатору 5 вверх на величину $0,20_{-0,01}$ для каждого ремонтного размера.

После растачивания первого колодца стол фрезерного станка опускают и перемещают на величину межцентрового расстояния $a_p = 50 \pm 0,015$ мм, контролируя ее по индикатору 4 (см. рис. 5.6). Настройку положения расточной головки осуществляют аналогично обработке первого колодца. Растачивают второй колодец.

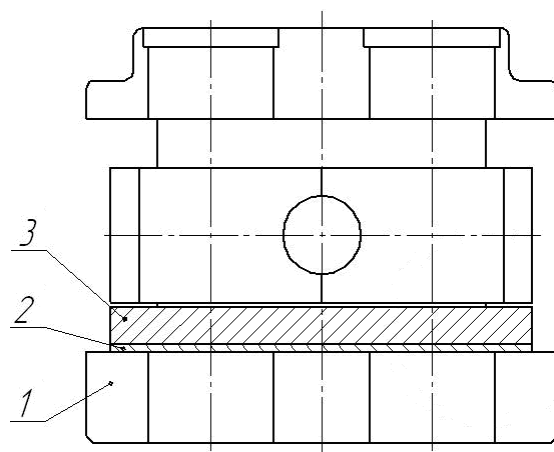
Режимы обработки колодцев такие же, как и у полуотверстий под цапфы.

Радиусы колодцев контролируют специальным приспособлением – 70-8701-1663 [32].

Зазор в соединении «колодец поджимной обоймы – шестерня» должен находиться в пределах $s_{к.-ш.} = -0,030... + 0,012$ мм.

Для компенсации зазора между платиком 3 и наружной стороной паза под пластик устанавливается вставка 2 (рис. 5.8).

Вставки изготавливаются трех ремонтных размеров (табл. 5.6).



1 – поджимная полуобойма;
2 – вставка; 3 – платик

Рисунок 5.8 – Компенсация зазора в соединении «платик – паз под платик»

Таблица 5.6 – Ремонтные размеры вставок для насоса НШ32 А

Размер вставки	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
толщина, $b_{вст}$	$0,58^{+0,062}_{+0,002}$	$1,18^{+0,062}_{+0,002}$	$1,88^{+0,062}_{+0,002}$

Для обеспечения технологического зазора между корпусом и качающим узлом применяют вкладыши ремонтного размера, устанавливаемые в полуотверстия подшипниковой полуобоймы.

Вкладыш представляет собой стальное основание с баббитовым напылением. Толщина ремонтных вкладышей представлена в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Вкладыши ремонтных размеров для насоса НШ32 А

Размер вкладыша	Значение ремонтного размера, мм		
	P1	P2	P3
толщина, $b_{вст}$	$1,40^{-0,085}_{-0,100}$	$1,25^{-0,085}_{-0,100}$	$1,10^{-0,085}_{-0,100}$

Технологический процесс ремонта шестеренных насосов НШ серии А оформлен в соответствии с требованиями ЕСКД и представлен в виде альбома технологических карт [33].

					<i>МД-02069964-35.04.06-20-19</i>	Лист
						88
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

6 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗРАБОТАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕМОНТА КРУГЛЫХ ШЕСТЕРЕННЫХ НАСОСОВ

6.1 Себестоимость ремонта круглых шестеренных насосов

Себестоимость услуг по ремонту круглых шестеренных насосов является одним из главных показателей, характеризующих основную деятельность ремонтных предприятий. Данные о себестоимости широко используются в управлении производством для контроля соответствия фактических затрат принятым нормативам, для выявления резервов дальнейшего снижения производственных затрат. Величина себестоимости продукции свидетельствует об эффективности производственного процесса, относительно низкая себестоимость повышает конкурентоспособность продукции. Величина себестоимости реализованной продукции определяет величину финансового результата от реализации и влияет на сумму требуемого к уплате налога на прибыль.

Расчет себестоимости $C_{\text{рем.}}$, р. проведен по формуле

$$C_{\text{рем.}} = ЗП + Н_{\text{св.}} + C_{\text{м.}} + C_{\text{пр.}} + A, \quad (6.1)$$

где ЗП – заработная плата за ремонт гидроагрегата с отчислениями на социальные нужды, р.; $H_{\text{св.}}$ – сумма страховых взносов (30,2 %), р.; $C_{\text{м.}}$ – стоимость материалов, р.; $C_{\text{пр.}}$ – производственные расходы, р.; A – амортизационные отчисления, р.

Заработная плата производственных рабочих ЗП, р.:

$$ЗП = m \cdot t_{\text{шт.-к.}}, \quad (6.2)$$

где m – средняя часовая тарифная ставка, р./ч; $t_{\text{шт.-к.}}$ – среднее штучно-калькуляционное время ремонта одного вида гидроагрегата, ч.

Средняя часовая тарифная ставка m , р./ч:

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		89

$$m = \frac{M_3}{P_{\text{мес.}}},$$

где M_3 – средняя месячная заработная плата рабочего, р.; $P_{\text{мес.}}$ – продолжительность работы в 1 мес., ч (166 ч).

По данным Мордовиястата средняя месячная заработная плата по отраслям в регионе в 2018 г. составляет 21600 руб.

Тогда, средняя часовая тарифная ставка m , р./ч:

$$m = \frac{21600}{166} = 130,12. \quad (6.3)$$

По данным хронометражных исследований операций технологического процесса значение штучно-калькуляционного времени ремонта круглых шестеренных насосов $t_{\text{шт.-к.}}$ составило 4,91 часа.

Зарботная плата производственных рабочих, рассчитанная по формуле 6.2, представлена в таблице 6.3.

Страховые взносы $H_{\text{с.в.}}$, р.:

$$H_{\text{с.в.}} = \frac{ЗП \cdot 30,2}{100}. \quad (6.4)$$

Страховые взносы, рассчитанные по формуле 6.4, представлены в таблице 6.3.

Расходы на материалы, необходимые для осуществления технологического процесса ремонта круглых шестеренных насосов, находим по калькуляции расходов материалов, представленных в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Калькуляция расхода материалов на ремонт круглых шестеренных насосов *

№ п/п	Вид материала	Количество на 10 шт.	Цена за единицу, р.	Итого, р.	Итого, на 1 шт., р.
1	Масло И-20, л	2	216	432	43,2
4	Ремонтный комплект гидронасоса, шт.	10	60	600	60
10	Лента антифрикционная с баббитовым слоем, кг	0,3	4420	1326	133,6

Продолжение табл. 6.1

№ п/п	Вид материала	Количество на 10 шт.	Цена за единицу, р.	Итого, р.	Итого, на 1 шт., р.
11	Ремонтные вставки, комплект – 2 шт.	10	88,6	886	88,6
14	Моющее средство, кг	3	60	180	18
15	СОЖ, л	0,6	347,6	208,6	20,8
16	Ветошь, кг	2	50	100	10

* Данные взяты из интернет-источников компаний и фирм производителей.

По данным таблицы 6.2, затраты на материалы $C_{м.}$, р. составят 374,2 р.

Производственные расходы $C_{пр.}$, р.:

$$C_{пр.} = C_{эл.} + C_{ком.} + (m + 0,302 \cdot m) \cdot t_{обсл.}, \quad (6.5)$$

где $C_{эл.}$ – стоимость затраченной электроэнергии, р.; $C_{ком.}$ – затраты на коммунальные услуги, р.; $t_{обсл.}$ – время, затрачиваемое на техническое обслуживание оборудования, $t_{обсл.} = 0,8$ ч [34].

Стоимость затраченной электроэнергии $C_{эл.}$, р.:

$$C_{эл.} = W_{потр.} \cdot t_{эл.} \cdot K_{загр.} \cdot T_{эл.}, \quad (6.6)$$

где $W_{потр.}$ – суммарная активная мощность потребителей тока, участвующих в технологических процессах, кВт; $t_{эл.}$ – время работы потребителей тока по операциям технологического процесса, ч; $K_{загр.}$ – коэффициент загрузки электродвигателя по мощности ($K_{загр.} = 0,8...0,9$); $T_{эл.}$ – тариф на потребление электрической энергии, $T_{эл.} = 4,70$ р./кВт·ч.

Стоимость затраченной электроэнергии, рассчитанная по формуле 6.6 для различных видов гидроагрегатов, представлена в таблице 6.3.

Затраты на коммунальные услуги $C_{ком.}$, р.:

$$C_{ком.} = \frac{Q_{пом.} \cdot T_{отопл.}}{N_{г.}} + \frac{S_{пом.} \cdot T_{ком.}}{N_{г.}} + \frac{W_{осв.} \cdot T_{эл.} \cdot t_{осв.}}{N_{г.}}, \quad (6.7)$$

где $Q_{\text{пом.}}$ – объем помещения, необходимого для организации цеха ремонта гидроагрегатов, м^3 ; $T_{\text{отопл.}}$ – среднегодовой тариф на отопление, $T_{\text{отопл.}} = 5,29$ р./ м^2 ; $S_{\text{пом.}}$ – площадь помещения, необходимого для организации ремонта гидроагрегатов, м^2 ; $T_{\text{ком.}}$ – годовой тариф на коммунальные услуги, $T_{\text{ком.}} = 64$ р./ м^2 ; $W_{\text{осв.}}$ – мощность источников освещения, кВт; $t_{\text{осв.}}$ – время горения источников освещения в год, $t_{\text{осв.}} = 960$ ч; N_{Γ} – годовая программа ремонта гидроагрегатов, шт.

Годовую программу ремонта рассчитывали по наиболее трудоемкой операции или по совокупности однотипных операций, выполняемых на одном оборудовании или рабочем месте N , шт.:

$$N = \frac{k_{\text{см}} \cdot \Phi_{\text{до}}}{\sum T_i}, \quad (6.8)$$

где $k_{\text{см}}$ – количество рабочих смен на предприятии, $k_{\text{см}}=1$; $\Phi_{\text{до}}$ – действительный годовой фонд времени работы оборудования, $\Phi_{\text{до}} = 2035$ ч; $\sum T_i$ – суммарное технологическое время работы единицы оборудования, имеющего максимальную загрузку по технологическому процессу, при выполнении ремонта одного агрегата, ч.

Тогда годовая программа ремонта круглых шестеренных насосов составит 2713 шт. По данным отдела технической политики Минсельхоза Республики Мордовия полученные данные в полной мере коррелируют с потребностью в ремонте гидроагрегатов сельскохозяйственной техники в республике.

Стоимость затрат на коммунальные услуги, рассчитанная по формуле 6.7 для различных видов гидроагрегатов, представлена в таблице 6.3.

После вычисления всех составляющих формулы (6.5) находим стоимость производственных расходов. Значения представлены в таблице 6.3.

Амортизационные отчисления $A_{\text{отч.}}$, р.:

$$A_{\text{отч.}} = \frac{B_{\text{об.}} \cdot a_{\text{об.}}}{100 \cdot N} + \frac{T_{\text{с.м.}} \cdot a_{\text{с.м.}}}{100 \cdot N}, \quad (6.9)$$

где $B_{об.}$ – балансовая стоимость оборудования, р.; $a_{об.}$ – норма амортизационных отчислений оборудования, принимаем $a_{об.} = 12,5\%$; $T_{с.м.}$ – стоимость строительно-монтажных работ, $T_{с.м.} = 10\%$ от $B_{об.}$; $a_{с.м.}$ – норма амортизационных отчислений здания, принимаем $a_{с.м.} = 3\%$.

Амортизационные отчисления, рассчитанные по формуле 6.9 для различных видов гидроагрегатов, представлены в таблице 6.3.

После вычисления всех составляющих формулы (6.1) находим себестоимость ремонта одного круглого шестеренного насоса. Значения представлены в таблице 6.3.

Полная себестоимость затрат на ремонт гидроагрегатов $C_{полн.}, р.:$

$$C_{полн.} = C_{рем.} + C_{н.пр.}, \quad (6.10)$$

где $C_{н.пр.}$ – непроизводственные расходы, связанные со сбором ремфонда, транспортными расходами, рекламой и др., принимаем 18% от $C_{пр.}, р.$

Полученные значения полной себестоимости представлены в сводной таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Показатели себестоимости ремонта агрегатов навесных гидросистем сельскохозяйственной техники

Параметр	Значения показателей
Заработная плата производственных рабочих ЗП, р.	638,89
Страховые взносы $H_{с.в.}, р.$	192,94
Сумма затрат на материалы $C_{м.}, р.$	374,2
Стоимость затраченной электроэнергии $C_{эл.}, р.$	52,77
Затраты на коммунальные услуги $C_{ком.}, р.$	9,23
Производственные расходы $C_{пр.}, р.$	197,53
Непроизводственные расходы $C_{н.пр.}, р.$	35,56
Амортизационные отчисления $A_{отч.}, р.$	167,19
Себестоимость ремонта $C_{рем.}, р.$	1570,75
Полная себестоимость ремонта $C_{полн.}, р.$	1606,31

Продолжение табл. 6.2

Параметр	Значения показателей
Себестоимость ремонта круглого шестеренного насоса НШ 32А отремонтированного по существующей технологии	3470
Стоимость нового круглого шестеренного насоса НШ 32А	5800

Из таблицы видно, что себестоимость ремонта круглых шестеренных насосов по новой технологии в 2,1 раза ниже, чем по существующей.

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В соответствии с поставленными в магистерской диссертационной работе задачами, по результатам проведенных исследований сделаны **выводы**:

1. С использованием положений молекулярно-механической теории трения определено, что рабочие поверхности ресурсопределяющего сопряжения круглого шестеренного насоса работают в режиме внешнего трения, а в зонах контакта имеет место пластический насыщенный контакт.

Расчетно-экспериментальная оценка интенсивности изнашивания подшипниковой обоймы при данных условиях взаимодействия показала, что применение метода ЭИО позволит получать покрытия, износостойкость которых выше, чем у пар трения без покрытий.

2. Проведены исследования микрогеометрии, механических, фрикционных и триботехнических свойств покрытий, полученных методом электроискровой обработки.

Исследование микротвердости электроискровых покрытий показало, что при обработке алюминиевого сплава АК5М7 на 4 режиме генератора «ALIER-31» электродом из меди микротвердость увеличивается на 205,8 %, на 3 режиме – на 136 %, на 2 режиме – на 89 %.

Установлено, что при электроискровой обработке образца из алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди М1 значение относительного удлинения снизилось в 1,92 раза по сравнению с образцом без покрытия.

После электроискровой обработки поверхности образца из алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди М1 значение условного предела текучести увеличилось на 80 %.

Результаты исследования фрикционных параметров молекулярной составляющей коэффициента внешнего трения показали, что при электроискровой обработке алюминиевого сплава АК5М7 электродом из меди М1 значение удельной сдвиговой прочности молекулярных связей увеличилось.

										Лист
										95
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					

Установлено, что для исследуемого электроискрового покрытия из меди М1 на алюминиевом сплаве АК5М7 значение параметра фрикционной усталости находится в диапазоне от 2 до 3 единиц, что характерно для упруго-пластического контакта поверхностей.

Результаты экспериментальной оценки параметров трибосопряжений показали, что нагрузка до предзадира в исследуемой паре выше, чем расчетное максимальное напряжение на площадке контакта трибосопряжений гидроагрегатов.

Установлено, что после нанесения электроискровых покрытий интенсивность изнашивания изнашиваемых образцов снижается относительно образцов пар трения без покрытий.

3. Разработана новая технология ремонта круглых шестеренных насосов, включающая восстановление, упрочнение и легирование изношенных поверхностей деталей ресурсопределяющего сопряжения подшипниковая 00

					МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
						96
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

Список литературы

1. Официальный сайт Правительства РФ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://government.ru/news/9800>.

2. Белоцерковский, М. А. Триботехнические характеристики газопламенных покрытий / М. А. Белоцерковский. // Трение и износ. – 2000. – Т.21. – № 5. – С. 534-540.

3. Домбровский, Ю. М. Физические основы и технология плазменного поверхностного упрочнения / Ю. М. Домбровский. // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2007. – № 3. – С. 16-20.

4. Буров, В. Г. Лазерная термообработка с оплавлением поверхности для различных прикладных задач промышленности с целью повышения эксплуатационных свойств / В. Г. Буров, А. Г. Маликов, А. М. Оришич, А. Г. Тюрин, А. Н. Черепанов. // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: в 2-х ч. Часть 2: Материалы 15-й Междунар. науч.-практ. конф. – Санкт-Петербург. – 2013. – С. 53-57.

5. Гаркунов, Д. Н. Триботехника: учебник для студентов ВУЗов / Д. Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1989. – 328 с.

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

7. Бирюков, В. П. Определение трибологических характеристик пар трения скольжения после лазерной обработки / В. П. Бирюков. // Трение и смазка в машинах и механизмах. – 2012. – №1. – С. 31-34.

8. Батаева, Е. А. Влияние исходного состояния на неоднородность структуры углеродистых сталей, упрочненных методом электронно-лучевой обработки при атмосферном давлении / Е. А. Батаева, И. А. Батаев, В. Г. Буров, Л. И. Тушинский, М. Г. Голковский. // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2009. – №3(645). – С. 3-6.

9. Быковский, Ю. А. Ионная и лазерная имплантация металлических

							МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
								97
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата				

материалов / Ю. А. Быковский, В. Н. Неволин, В. Ю. Фоминский. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 135 с.

10. Поляченко, А. В. Восстановление деталей контактной приваркой присадочных материалов / А. В. Поляченко, В. И. Бурмистров. // Техника в сельском хозяйстве. – 1985. – № 5. – С. 60.

11. Поляченко, А. В. Контактная приварка перспективный метод восстановления и упрочнения деталей / А. В. Поляченко. // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1988. – № 12. – С. 40–41.

12. Хатеев, В. М. Современные методы восстановления деталей в ремонтном производстве / В. М. Хатеев, О. А. Шнековский. // Сварочное производство. – 1985. – С. 9.

13. Электроискровое легирование титана и его сплавов металлами и композиционными материалами / А. Д. Верхотуров, Н. А. Подчерняева, В. М. Панашенко, Л. А. Коневцов ; под ред. чл.-корр. РАН А. А. Буренина. – Комсомольск-на-Амуре : ИмиМ ДВО РАН, 2014. – 320 с.

14. Лазаренко, Н. И. Технологический процесс изменения исходных свойств металлических поверхностей электрическими импульсами / Н. И. Лазаренко // Электроискровая обработка материалов. – 1960. – Вып. 2. – С. 36–66.

15. Гитлевич, А. Е. Электроискровое легирование металлических поверхностей / А. Е. Гитлевич, В. В. Михайлов, Н. Я. Парканский, В. М. Ревутский ; под ред. акад. АН МССР Ю. Н. Петрова. – Кишинев : Штиинца, 1985. – 196 с.

16. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М. : Машиностроение, 1977. – 526 с.

17. Мартынов, А. В. Совершенствование технологии ремонта гидрораспределителей восстановлением и упрочнением деталей методом электроискровой обработки : дис. ... канд. техн. наук 05.20.03 / Мартынов Алексей Владимирович. – Саранск, 2011. – 254 с.

						МД-02069964-35.04.06-20-19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата			98

18. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. – М. : Стандартинформ, 2006. – 7 с.
19. Комбалов, В. С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ / В. С. Комбалов. – М. : Наука, 1974. – 111 с.
20. Трение, изнашивание и смазка : справочник. В 2-х кн. Кн. 1 / под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. – М. : Машиностроение, 1978. – 400 с.
21. Демкин, Н. Б. Контактное шероховатых поверхностей / Н. Б. Демкин. – М. : Наука, 1970. – 227 с.
22. ГОСТ 9450-76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 35 с.
23. РД 50-460-84 РД 50-460-84. Методические указания. Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки пластичности поверхностных слоев деталей машин. – М. : Издательство стандартов, 1976. – 35с.
24. Леоненко, А. Н. Исследование параметра пластичности поверхностного слоя деталей из специального легированного чугуна / А. Н. Леоненко, Б. В. Савченков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил ім. І. Кожедуба. – 2007. – Вып. 1 (13). – С. 90–93.
25. ГОСТ 22762-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости на пределе текучести вдавливанием шара. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 12 с.
26. Методы испытания на трение и износ / Л. И. Куксенова, В. Г. Лаптева, А. Г. Колмаков, Л. М. Рыбакова. – М. : Интернет Инжиниринг, 2001. – 152 с.
27. РД 50-662-88 Методические указания. Методы экспериментальной оценки фрикционной совместимости материалов трущихся сопряжений. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 30 с.
28. Рыжов, Э. В. Контактная жесткость деталей машин / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1966. – 193 с.
29. Михайлюк, А. И. Влияние электроискрового легирования металлических поверхностей на их износостойкость : дис. ... канд. техн. наук :

05.02.01 / Михайлюк Алексей Иванович. – Кишинев, 1990. – 210 с.

30. Рыбакова, Л. М. Исследование структуры тонкого поверхностного слоя деформированного металла / Л. М. Рыбакова, Л. И. Куксенова // Физика и химия обработки металлов. – 1975. – № 1. – С. 104–109.

31. Установки для электроискровой обработки серии БИГ. Технические условия. ТУ 3312-001-02069964-2012. Внесен в реестр 06.02.2012 г. № 033/004103. / С. А. Величко, Н. В. Раков, Ф. Х. Бурумкулов, В. И. Иванов, А. А. Гришко. – Саранск : ФАТРИМ ФБУ «Мордовский ЦСМ», 2014. – 17 с.

32. Чертежи технологической оснастки для капитального ремонта шестеренных насосов гидроприводов сельскохозяйственной техники. – М. : ГОСНИТИ, 1984. – 153 с.

33. Величко, С. А. Технологический процесс ремонта круглых шестеренных насосов навесных гидросистем тракторов : прил. к учеб. пособ. «Ремонт агрегатов навесных гидросистем автотракторной техники» Серия ресурсосберегающие технологии / С. А. Величко, Е. А. Нуянзин. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014. – 46 с.

34. Матвеев, В. А. Техническое нормирование ремонтных работ в сельском хозяйстве / В. А. Матвеев, И. И. Пустовалов. – М. : Колос, 1979. – 288 с.

										Лист
										100
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата	МД-02069964-35.04.06-20-19					