

ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Институт механизации и технического сервиса

Кафедра эксплуатации и ремонта машин

Направление подготовки –35.04.06 «Агроинженерия»

Магистерская программа – «Технический сервис в сельском хозяйстве»

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)**

**ТЕМА: Повышение ресурса гильз цилиндров автотракторных
двигателей путём обоснования параметров электроэрозионно-
химико-механической обработки**

Студент магистратуры _____ Набиуллин Ф.Р.

Научный руководитель,

к. т. н., доцент _____ Шайхутдинов Р.Р.

Рецензент

к.с.х.н., доцент _____ Васильев С.П.

Обсуждена на заседании кафедры и допущена к защите
(протокол № 12 от 05 февраля 2018 г.)

Зав. кафедрой профессор
ученое звание

подпись

Адигамов Н.Р.
Ф.И.О.

Казань-2018

АННОТАЦИЯ

к выпускной квалификационной работе Набиуллина Фаннура Рафисовича на тему: «Повышение ресурса гильз цилиндров автотракторных двигателей путём обоснования параметров электроэрозионно-химико-механической обработки»

Выпускная квалификационная работа выполнена на страницах. Она содержит таблиц и рисунков. Список использованной литературы состоит из наименований.

Первой главе рассмотрены условия работы и причины износов гильз цилиндров, существующие способы ремонта гильз цилиндров, пути повышения долговечности гильз цилиндров, особенности и сущность анодно-механической обработки и электрохонингования. Наиболее приемлемым способом в нашем случае является способ электроэрозионно-химико-механической хонингования являющийся продолжением анодно-механической обработки.

Второй главе рассмотрены сущность и определены основные параметры процесса предлагаемого способа восстановления.

В третьей главе изложена программа и методика экспериментов исследований. Изложена методика определения толщины, микротвердости и износостойкости покрытия.

Четвертая глава посвящена результатам экспериментальных исследований. Приведены результаты микрометрических исследований. Получены экспериментальные данные влияния параметров процесса на микротвердость и износостойкость покрытия.

В пятом разделе приведена технико-экономическая оценка .

Работа оканчивается общими выводами и рекомендациями

ANNOTATION

to the final qualifying work of Nabiullin Fannur Rafisovich on the topic: "Increasing the service life of cylinder liners of automotive tractor engines by justifying the parameters of electroerosion chemical-mechanical treatment"

Graduation qualification work is performed on the pages. It contains tables and figures. The list of used literature consists of titles.

The first chapter deals with the operating conditions and causes of cylinder liner wear, existing methods for repairing cylinder liners, ways to improve the durability of cylinder liners, the features and nature of anodic-mechanical processing and electrochoning. The most acceptable method in our case is the method of electroerosion chemochemical honing that is a continuation of the anodic-mechanical treatment.

The second chapter deals with the essence and defines the main parameters of the process of the proposed recovery method.

The third chapter outlines the program and methodology of research experiments. The technique for determining the thickness, microhardness and wear resistance of the coating is described.

The fourth chapter is devoted to the results of experimental studies. The results of micrometric studies are presented. Experimental data on the influence of the process parameters on the microhardness and wear resistance of the coating are obtained.

The fifth section gives a technical and economic assessment.

The work ends with general conclusions and recommendations.

ВВЕДЕНИЕ	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	9
1.1 Условия работы и причины износов гильз	9
1.2 Существующие методы ремонта гильз	14
1.3 Пути увеличения ресурса гильз	19
1.4 Анодно-механическая обработка.....	25
1.5 Электрохонингование	32
1.6 Краткие выводы. Цель и задачи исследований.....	38
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	40
2.1 Шероховатость поверхности.....	40
2.2 Свойства и структура поверхностного слоя.....	50
2.3 Обоснование плотности и состава рабочей жидкости	53
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.	58
3.1 Программа экспериментов	58
3.2. Методика экспериментов.....	59
3.2.1 Объект исследований	62
3.2.2 Установка для лабораторных исследований	68
3.2.4 Методика изучения микроструктуры.....	66
3.2.5 Методика изучения микротвердости поверхностного слоя.....	68

3.2.6 Методика изучения микрорельефа поверхности	68
3.2.7 Методика испытаний на износостойкость.....	71
3.2.8 Планирование экспериментов.....	73
3.2.9 Методика обработки результатов и точность измерений	74
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ	74
4.1 Результаты опытов по изучения влияния плотности электролита.....	74
4.2 Результаты опытов по изучения микроструктуры и физико- механических свойств обработанной поверхности	75
4.3 Результаты серии экспериментов по электроэрозионно-химико- механическому хонингованию.	80
4.4 Результаты испытаний на износостойкость	84
5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ИССЛЕДОВАНИЙ	90
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	96
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	98
ПРИЛОЖЕНИЯ	

ВВЕДЕНИЕ

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является энергетической базой сельскохозяйственных мобильных агрегатов, на которые приходится 36 ... 52% от общего числа отказов. Одной из проблем повышения надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания является повышение износостойкости гильз цилиндров. Это стало особенно актуальным после начала производства высокоэффективных дизельных двигателей с турбонаддувом, что значительно увеличило требования к прочности и триботехническим свойствам поверхностей трения.

Для увеличения износостойкости и прочности поршневых колец пористый хром заменяется твердым хромом, что приводит к уменьшению расхода масла в покрытии и увеличивает склонность колец к сгоранию и захватывает поверхность гильз цилиндров. Все это, в свою очередь, приводит к увеличению потерь на трение в паре «гильза-поршневое кольцо», которое может составлять до 12% мощности двигателя.

Воздух поршневых колец способствует появлению прижогов и, естественно, ведет к уменьшению износостойкости гильз цилиндров двигателя.

Традиционное абразивное хонингование не обеспечивает достаточного поглощения масла поверхностью, способствует его шаржированию, что снижает износостойкость частей цилиндропоршневой группы.

В связи с этим существует необходимость в разработке и применении более совершенных методов обработки поверхности. Одним из таких методов является анодно-механическое хонингование (АМХ), которое относится к комбинированной электроэрозионно-химической механической обработке.

В отличие от существующих методов анодно-механического хонингования предлагается использовать металлические хонинговальные стержни из меди и латуни, что позволит использовать не только

электрохимические, но и электроэрозионные компоненты процесса анодно-механической обработки (АМО) и исключить шаржирование. Использование электродного инструмента из меди или латуни также позволит получить антифрикционный слой на последнем этапе обработки. Поэтому сочетание анодно-механического хонингования с последующим фрикционным латунным покрытием (относящееся к окончательной антифрикционной абразивной обработке - ФАБО) можно назвать электроэрозионно-химическим механическим хонингованием (ЭЭХМХ).

ЦЕЛЬ. Увеличить ресурс гильз цилиндров двигателей, обосновав параметры электроэрозионно-химического механического хонингования.

ОБЪЕКТ. Объектом является процесс электроэрозионно-химико-механического хонингования гильз цилиндров двигателя ЗМЗ-511.10.

ПРЕДМЕТ. Закономерности процесса электроэрозионно-химико-механического хонингования и формирования микрорельефа на поверхности, а также изменения в физико-механических свойствах материала.

НАУЧНАЯ новизна. Разработка метода получения износостойкого маслосъемного микрорельефа поверхности с применением антифрикционного покрытия, математической модели формирования поверхностного микрорельефа.

Практическая ценность работы заключается в возможности использования теоретических и экспериментальных результатов, полученных при обработке гильз цилиндров. По сравнению с обычным алмазным хонингованием разработанная технология хонингования металлическим инструментом с применением антифрикционного покрытия позволяет повысить маслосъемность в зеркале гильз цилиндров из-за образования лунок, снизить их износ на 20 -25%, сократить время обкатки, увеличить производительность труда.

Основные положения диссертации были представлены на научных конференциях Казанского государственного аграрного университета (Казань, 2015-2017 гг.) и на международной научно-практической конференции

«Аграрная наука XXI века. Актуальные исследования и перспективы», посвященной Волкову И.Е. (Казань, 2017).

Основное содержание диссертации, результаты исследований отражены в двух статьях в материалах международной конференции.

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

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Условия работы и причины износов гильз цилиндров

Улучшение качества ремонта машин и увеличение их ресурса имеют большое значение в современных экономических условиях. Основная задача ремонта - снизить затраты и улучшить качество ремонта.

Энергетической основой мобильных сельскохозяйственных процессов является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), на долю которого приходится 36 ... 52% от общего числа отказов [114, 26]. По данным В.Я. Лимарева М.Н. Ерохина Е.А. Пучина. [65], которые проанализировали отказы машин в течение гарантийного срока, относительное количество отказов двигателей тракторов, автомобилей и комбайнов колеблется от 16,9% в тракторе Т-4А до 80% в тракторе ВТ-100, с в среднем 43,25%. Поэтому увеличение срока службы двигателя требует особого внимания, особенно потому, что большинство машин в агрофирмах и КФХ оснащены двигателями после ремонта.

Проблемы надежности и долговечности двигателей внутреннего сгорания обсуждаются в работах авторами которых являются Б. Б. Генбом, М. А. Григорьев, Н. С. Ждановский С.В. Венцель, Д.Н. Гаркунов, Г.И. Суранов, И.Б. Гурвич, И.А. Мишин, Н.Н. Пономарев, Б.М. Асташкевич, В.Г. Заребин, М.Н. Ерохин, Е.А. Пучин, В.В. Стрельцов, В.Ф. Карпенков и др.

За весь срок службы двигателей автомобилей, тракторов и комбайнов ремонт до пяти раз. Ресурс двигателей после ремонта, по данным [114] составляет 35 ... 40% ресурса новых. Основными причинами небольшого ресурса двигателей после ремонта [70, 105] являются: низкое качество обработки поверхности деталей; плохое качество изготовления деталей после ремонта; низкая культура ремонтной продукции; недостаточная специализация производства на ремонтных предприятиях.

Долговечность и эффективность моторно-тракторных двигателей в значительной степени (на 70 ... 90%) определяются износостойкостью частей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) [22]. Износ частей процессора снижает тяговое усилие двигателя, увеличивает потребление горюче-смазочных материалов, загрязнение окружающей среды. Таким образом, 100 изношенных автомобильных двигателей загрязняют воздух, а также 125 новых автомобилей [22]. Нарушения в работе ЦПГ влияют на работу других узлов сборки двигателя, ускоряя их износ.

Одной из дорогостоящих и изнашиваемых частей ЦПГ является гильза цилиндра (ГЦ). На размер и характер износа гильзы цилиндра влияют конструктивные особенности и материал деталей ЦПГ, температуры, нагрузки и скорости работы двигателя, температуры и запыленности воздуха, качества и свойств горюче-смазочных материалов и многих других факторов [5,19,24,25,43, 44, 48,66,97,98,99].

Для изготовления гильз цилиндров автомобильных двигателей используется, главным образом, чугун, реже сталь, а также хромированное покрытие для стали и чугуна [32,68]. Предпочтение отдается использованию серого низко- или среднелегированного перлитного чугуна, реже перлитного чугуна с шаровидным графитом, аустенитного чугуна типа «нерзист» и высоколегированных чугунов. Рукава из стали менее громоздкие и износостойкие и требуют дополнительной обработки. Общие марки стали 55ПП, 40Х, 30ХЗВА, 50Г,38ХВФЮ и т. д. Для повышения износостойкости стальных оболочек используйте химическую термическую обработку и индукционное упрочнение.

Во время работы гильза цилиндра подвергается сложному действию температуры и химической силы, что приводит к различным дефектам. Дефект является доминирующим, по сравнению с другими дефектами (кавитационного разрушения наружной поверхности, износ нижней поверхности буртика и посадочных поясов, отложения накипи т.д.) и

наиболее существенное влияние на работу двигателя является износ внутренней рабочей поверхности цилиндра [3,5,19, 24,25,43,44, 48,66,97-99].

Внутренняя поверхность цилиндра изнашивается неравномерно по окружности и образующей. Средний размер износа отремонтированных гильз цилиндров двигателя ЗИЛ-130 составляет 2,6 мкм / 1000 км пробега, а для двигателя ЗМЗ-53 - 2,8 мкм / 1000 км. Для новых цилиндров двигателей ЗИЛ-130 и ГАЗ-53 средний износ составляет 0,9 мкм / 1000 км и 1,2 мкм / 1000 км соответственно []. Согласно Л. Танинг [103], износостойкость новых гильз цилиндров двигателей ГАЗ-53 составляет в среднем 0,42 мкм / 1000 км, а после первого капитального ремонта - 0,8 км / 1000 км.

Наибольший износ на окружности цилиндра чаще всего наблюдается в плоскости качания шатуна и связан в основном с действием нормальной силы в кривошипном механизме [3,19,24,25]. Исследования М. А. Григорьева [44] показали, что износ рабочей поверхности с загруженной стороны в 1,5 раза выше, чем у разгруженной стороны. Износ цилиндров увеличивается с их деформацией из-за разницы, неравномерного нагрева, недостаточной жесткости верхней стенки блока и т. д. В случае низкой жесткости коленчатого вала, изгиб шатуна, неправильная сборка.

Максимальный износ цилиндра вдоль образующей расположен в зоне верхней мертвой точки (ВМТ) верхнего поршневого кольца сжатия, что указывает на самые стрессовые условия его работы. Многочисленные исследования [3,5,6,19,24,25,43,44,48,97-99,] показали, что при сгорании топливно-воздушной смеси в цилиндре давление газа резко возрастает до 3 ... 6 МПа для бензиновых двигателей и до 5,5 ... 17 МПа для дизельных двигателей. Температура газов при сгорании смеси достигает 1800 ... 2200 ° С, из которой масляная пленка на стенке цилиндра нагревается до 350 ° С со средней температурой стенки 120 ... 160 ° С. Когда поршень перемещается в нижнюю мертвую зону (вмт.), давление и температура газов постепенно уменьшаются, а скорость его перемещения колеблется от 0 до 10 м / с. Характер изменения параметров показан на рисунке 1.1 [16].

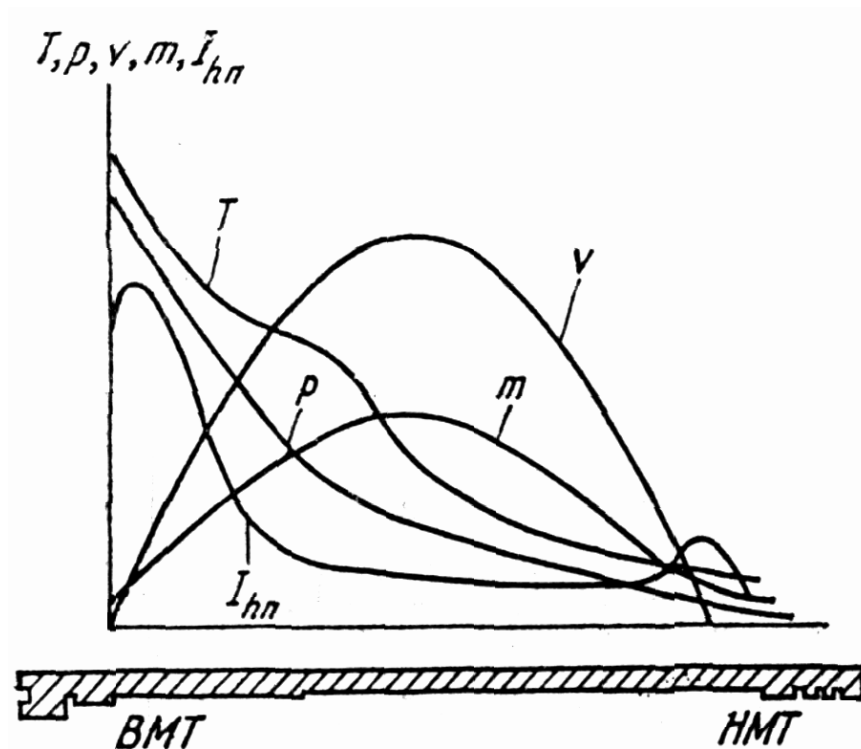


Рисунок 1.1 – Зависимости изменения температуры (T), давления газов (P), скорости поршня (V), толщины масляной пленки (m) и величины износа I_{hn} .

И.Б.Гурвич и другие исследователи [24,25,48] утверждают, что значительную долю износа частей цилиндропоршневой группы составляют схватывание и задиры. Повреждения возникают из-за искажения геометрической формы зеркала цилиндра; отсутствия и неудовлетворительное качество смазки; отсутствия зазора между поршнем и цилиндром; нарушения в кривошипном механизме; плохая приработка; значительное образование углеродных отложений и т. д.

В.Н. Андрейченко и В. Т. Занребин [3,39] считают, что причиной задира является измельчение хромового покрытия с первого поршневого кольца. Самым ценным антизадириным свойством поверхности является высокое содержание масла в поверхностном слое [5,24,25,48].

М.П. Зубитова и И.В. Пустовалов [42] утверждает, что доминирующим видом износа зеркала является абразив, на который приходится 80 ... 90% общего износа. Износ от абразивного материала обусловлен резанием пыли,

продуктов сгорания и износа, попадающих между поршневыми кольцами и цилиндром, а также частиц в потоке газа [43,44,53].

Эффективным методом борьбы с абразивным износом является повышение твердости рабочей поверхности цилиндра [24, 25, 35,43,44,48,50,77,97].

Наряду с абразивным износом велика роль химического контакта продуктов сгорания при изнашивании цилиндрического зеркала велика. Эти продукты, взаимодействующие с водяным паром, образуют кислоты - азотную, уксусную, серную, азотную, хлористоводородную и другие, которые в основном удаляются из камеры сгорания с выхлопными газами. Коррозия только усиливает износ, а удаление металла с ослабленной коррозией из-за окислительно-восстановительных реакций связями в конечном итоге осуществляется механически при относительном перемещении кольца [25,35,97].

Основными методами борьбы с коррозией и механическим износом являются увеличение маслостойкости и антикоррозионных свойств материала гильзы [9,25,35,36,97,88].

Наибольшее значение коррозионного износа достигается при запуске и прогреве двигателя, особенно при низких внешних температурах. В целом, по мнению разных авторов, доля начального износа составляет 50 ... 75% от общего износа [102]. Повышенный износ при запуске и прогреве двигателя обусловлен не только коррозией, но и плохими условиями смазки. После остановки двигателя горячее масло сливается со стен цилиндра. Зимой масляная пленка, оставшаяся на стенках, замерзает, а затем разрушается при перемещении поршневых колец. Подача того же масла в верхнюю рабочую зону нормализуется только через 3 ... 12 минут после запуска двигателя [56, 96,102]. Кроме того, несгоревшее топливо, конденсируясь приводит смыву масляной пленки с зеркала цилиндра. Это приводит к появлению задиров и интенсификации процессов коррозии. Очень важное и абразивное действие образовавшихся во время пуска частиц износа.

При запуске в условиях низких температур нагрузки на части цилиндро-поршневой группы резко возрастают из-за увеличения динамичности сжигания топлива. Таким образом, когда температура наружного воздуха уменьшается от $+20^{\circ}\text{C}$ до -40°C , жесткость горения топлива увеличивается в 2 ... 10 раз, а максимальное давление газа в цилиндре составляет 1,5 ... 2 раза, по сравнению с номинальным режимом [102].

Различные нарушения технических условий для сборки двигателей, по мнению нескольких авторов [48,97,107], также приводят к сокращению срока службы гильз цилиндров. Л. Тюнинг [105] отмечает, что 75% случаев снижения качества ремонта гильзы цилиндров составляют долю внутризаводских браков. В этом случае срок службы гильз цилиндров после капитального ремонта снижается в 1,9 раза по сравнению с ресурсом нового картриджа.

Таким образом, несмотря на многочисленные исследования, до сих пор нет консенсуса в отношении преобладающей формы износа внутренней рабочей поверхности гильзы цилиндра. Ресурс переработанного двигателя составляет 35 ... 40% ресурса нового двигателя. Скорость износа гильз цилиндров после капитального ремонта выше, чем для новых рукавов. Большинство авторов рекомендуют увеличить твердость и поглощение масла на поверхности для повышения износостойкости.

1.2 Существующие методы ремонта гильз

В науке и практике ремонтного производства накоплен определенный опыт в восстановлении гильз цилиндров. Все способы восстановить зеркало цилиндра можно условно разделить на две группы: с изменением начальных размеров и восстановлением начальных размеров детали.

Способ ремонта путем обработки с изменением начальных размеров включает в себя два метода: использование ремонтных размеров и установку дополнительных ремонтных деталей.

Наиболее распространенным способом восстановления внутренней рабочей поверхности гильз цилиндров является обработка размера ремонта. Суть метода заключается в том, чтобы восстановить геометрическую форму поверхности с увеличением ее диаметра для ремонтных поршней увеличенного размера. Для двигателей типа ЗМЗ имеются три ремонтных размера рукавов, а тип ЗИЛ - два, с интервалом 0,5 мм. Шины тракторных дизелей обычно имеют один размер ремонта, увеличенный на 0,5 или 0,7 мм [87, 106, 111].

Внутренняя рабочая поверхность цилиндра, чаще всего, протачивается, а затем подвергается двух- или трехкратной хонингованию. Расточка цилиндров осуществляется на вертикальном расточном станке в одном или двух проходах инструментами с пластинами из твердых сплавов ВК2, ВК8, ВК3 или Гексанит-Р или Эльбор-Р [104]. Основные поверхности при расточивании являются пояски и упор буртика. С помощью индикаторного устройства или шариковой оправки вдоль нерабочей верхней части втулки центрируют оси шпинделя машины и цилиндра.

Вместо расточки иногда используют внутреннее шлифование на бесцентровых шлифовальных станках типа СШ-64, СШ-22 и т. Д. Гильза устанавливается в инструмент и обрабатывается в два прохода - черновой и чистовой полировка [104]. Недостатками метода внутреннего шлифования являются появление ожогов, мест локального термического влияния на обработанной поверхности и насыщение абразивом зеркала цилиндра. Также возможно образование царапин и волнистости внутренней поверхности цилиндра из-за вибрации инструмента и детали.

После операций расточки или шлифования гильзы подвергают хонингованию в две или три стадии, для которых оставляют допустимая слой 0,05 ... 0,07 мм. Когда грубое хонингование удаляет основную часть припуска

и исправляется ошибки в геометрической форме изделия, а при доводочном и чистовом - шероховатость поверхности уменьшается.

Метод ремонта гильз цилиндров путем обработки под ремонтный размер является наименее трудоемким и имеет низкую себестоимость. Однако часто наблюдается, что срок службы цилиндров снижается на 20 ... 30% из-за уменьшения твердости поверхности и уменьшения прочности стенок [104].

Другим способом восстановления зеркала цилиндра является метод установки дополнительных деталей. Этот метод рекомендуется применять в присутствии глубоких царапин, трещин, а также в случае, когда цилиндр был предварительно обработан в соответствии с последним ремонтным размером. Чаще всего в цилиндр устанавливается чугунная или стальная втулка, за которой следует расточка и хонингование на номинальный размер. Учитывая износ гильз цилиндров, некоторые исследователи [6,94,114] предлагают установку в верхней части гильзы с натягом 0,04 ... 0,08 мм вставки из износостойкого чугуна или стали длиной от 50 до 70 мм.

Другие [98] предлагают использовать твердые и упругие (HRC 50 ... 55) износостойкие пластины из стали У8А, У10А, 65Г, 70С2ХА, которые удерживаются на внутренней поверхности цилиндра за счет упругости. При повторном восстановлении изношенные пластины выпрессовываются и заменяются новыми. Однако, когда цилиндр используется с такими вставками на границе пластины и втулки, образуется ступень, которая повышает износ поршневых колец. С этой точки зрения целесообразнее устанавливать цельные вставки по всей длине цилиндра.

В последнее время ряд ремонтных предприятий применяют метод восстановления цилиндров с использованием гильзовки обработкой под размер поршней, которые были в эксплуатации. Однако такое сбережение компенсируется дополнительными затратами на восстановление и уменьшением срока службы двигателя.

Общим недостатком методов восстановления цилиндров путем установки дополнительных деталей является деформация гильзы и повышенное тепловое напряжение деталей из-за ухудшения отвода тепла от цилиндра. Кроме того, при растачивании таких цилиндров вставка проворачивается или нарушается макрогеометрия отверстия в 4-5 раз выше, чем установленный допуск.

Гильзы цилиндров также могут быть восстановлены путем электродуговой наплавки внутренней поверхности стальной проволокой, лентой или порошковой проволокой. Л.С. Влоковичер и. Грехов Л.С. [42,102] предлагают метод центробежной индукционной наплавки зеркала цилиндра с зарядом порошка.

Методы электродуговой и индукционной наплавки сопровождаются высоким нагревом гильз цилиндров, в результате чего ухудшаются структура и физико-механические свойства основного металла детали, появляются значительные внутренние напряжения. В результате неравномерности деформаций цилиндра требуется удаление больших слоев материала (диаметр) при последующей обработке. Кроме того, наружная поверхность цилиндра тоже подвергается обработке, что значительно увеличивает трудоемкость ремонта.

Вышеупомянутые недостатки также характерны для методов термической усадки и термопластического обжатия гильз цилиндров. Метод В. Н. Хромова И.Н. Соколенко [97] обеспечивают нагрев цилиндра, плотно установленного в матрице, с помощью высокочастотных токов. В результате происходит термическая деформация цилиндра (усадка) с уменьшением его внутреннего диаметра. Кроме того, цилиндр подвергается растачиванию, хонингованию и нанесению медного покрытия с помощью головки с роликами.

Использование газотермических способов осаждения металлических покрытий позволяет получать различные покрытия различного состава и физико-механические свойства. Но для их использования при

восстановлении гильз существуют значительные препятствия, вызванные ограничениями конструкции ремонтируемой поверхности и используемым оборудованием. Усадка металлизированного слоя на внутренней поверхности цилиндра облегчает его отделение от основания. Прочность сцепления покрытия с основным металлом не превышает 40 ... 45 МПа [104] что не гарантирует надежную работу цилиндра. Последующая обработка металлизированной поверхности затруднена из-за значительной твердости металлизированного слоя.

Известны технологические процессы восстановления зеркала цилиндра путем электролитического осаждения хрома, железа, никеля, их сплавов и других металлов [68,80,103,104, 107]. Применение гальванических покрытий осуществляется с помощью ванны, струй, проточки или электролитического натирания. Кроме того, компания Micromatic (США) предложила метод гальванического механического хонингования, который сочетает гальваническое осаждение металла с одновременной обработкой поверхности путем хонингования. Перед нанесением хрома зеркало цилиндра подвергают расточке с последующим хонингованием для удаления следов износа. После покрытия цилиндр снова обрабатывается.

Электролитическое осаждение металлов по сравнению с рассмотренными выше методами имеет ряд преимуществ: из-за отсутствия перегрева исходная структура металла компонента остается; высокая твердость (до 9000 ... 13800 МПа для хромированного покрытия), теплостойкость и коррозионная стойкость покрытия; возможность регулирования физико-механических свойств осадков; небольшие допуски для окончательной обработки (в пределах 0,2 ... 0,3 мм); возможность автоматизации технологического процесса.

Общими недостатками гальванических способов являются низкая производительность и высокая стоимость процессов, недостаточная адгезия покрытий к подложке, низкое поглощение масла и износостойкость

покрытий, трудность последующей обработки и токсичность используемых материалов.

В.М. Асканази [4] исследовал метод электромеханической обработки чугуновых цилиндров двигателей внутреннего сгорания. Суть этого метода заключается в том, что при контакте детали с нажимом инструмента пропускается электрический ток большой прочности и низкого напряжения, так, что в точке контакта небольшие объемы поверхностных слоев металла нагреваются до высокой температуры и деформируются под внешним давлением инструмента. В этом случае поверхностные слои сжимаются, и когда инструмент перемещается, спиральные выступы выступают над поверхностью детали. Твердость обрабатываемой поверхности увеличивается на 65%. Износ таких цилиндров на 56 ... 60% меньше, чем у обычных. Увеличение износостойкости обусловлено увеличением твердости, образованием «белого слоя», увеличением поглощения масла поверхностью. Недостатком этого метода является пренаклеп поверхности.

Таким образом, было разработано много методов восстановления зеркала цилиндров, как с нанесением слоя материала, так и без него. Однако наиболее распространенным методом обработка под ремонтный размер.

1.3. Способы увеличения износостойкости гильз цилиндров

Взаимодействие твердых тел с внешним трением локализуется в тончайших поверхностных слоях, физико-механические свойства которых существенно влияют на их работоспособное состояние. Следовательно, правильный выбор технологии, особенно операций отделки, способствует формированию оптимальных свойств поверхности детали и, в конечном счете, определяет рабочие характеристики.

Основными способами повышения износостойкости пары гильза цилиндров - поршневое кольцо является улучшение физических и

механических свойств контактных поверхностей и внешних условий их работы.

Внешние условия могут быть улучшены за счет использования высококачественных масел (например, введение различных добавок может увеличить пороговую температуру разрушения масляной пленки с 470 до 520 К) [22], а также увеличить количество масла на поверхности, создавая микролунки для масла в виде специального масляного профиля или канавки различной формы [7,33,116].

Основными методами получения регулярного микрорельефа на поверхности деталей являются виброобкатывание и накатка, которые относятся к методам поверхностно-пластической деформации [33,64,116]. Они позволяют укрепить поверхностный слой, сформировать требуемый микрорельеф, увеличить маслосъемность и износостойкость.

Маслосъемный профиль также может быть образован путем разрезания винтовых или радиальных канавок глубиной 0,04 ... 0,05 мм с жестким или вибрирующим инструментом. Ширина канавки не должна превышать 40% от толщины поршневого кольца.

Компания «VOLKSWAGEN» разработала процесс хонингования цилиндров в чугуна блоке струями жидкости под давлением до 12 МПа [93]. В результате микрорезервуары образуются произвольно на поверхности цилиндра. После этого выполняется двукратное хонингование. Оставшиеся канавки диаметром 30 ... 50 мкм и глубиной более 3 мкм образуют масляные резервуары, количество которых составляет до 40 на 1 см². Использование этого процесса также позволяет снизить потребление масла на 70%.

Несмотря на это, методы поверхностно-пластической деформации и канавки не были широко использованы в технике и ремонте из-за высокой трудоемкости, поскольку эти низкопроизводительные операции выполняются дополнительно после завершения хонингования. Кроме того, степень пластических деформаций во время обработки часто связана с переклепом, что недопустимо для цилиндров. Кроме того, часть

экструдированного металла образует маленькие бугры на поверхности зеркала, что способствует появлению царапин и задиrow.

Одним из способов увеличения износостойкости деталей является финишная антифрикционная абразивная обработка (ФАБО) цилиндров двигателя внутреннего сгорания [7, 75, 22]. Суть ФАБО заключается в том, что на поверхности за счет трения наносится слой мягкого антифрикционного металла (латунь, бронза, медь и т. Д.). Впервые этот метод, называемый фрикционным латунированием, был предложен В. Н. Лозовским и Д. Н. Гаркуновым, получившим слой из латуни на стальном стержне, когда его натирали латунным стержнем в среде глицерина [22]. При использовании латуни ЛС59 и Л62 со скоростью скольжения 0,15 ... 0,2 м / с и удельным давлением 102 ... 150 МПа стальная поверхность покрыта сплошным слоем латуни с толщиной 1 ... 3 мкм [18]. В работах Г. Ползера, В. Мюллера, И. Ланге и др. [80, 89] было показано, что во время стендовых испытаний двигателя с втулками, обработанных в области верхних мертвых точек, износ уменьшился на 20 ... 25%, а расход топлива снизился на 2,8%. В этом процесс приработки завершается через 30 ... 40 минут, что в 1,5 раза быстрее, чем после хонингования. Увеличение износостойкости после ФАБО связано с увеличением несущей способности благодаря сглаживанию шероховатости поверхности (на 15 ... 30%), росту площади фактического контакта, упрочнению поверхности детали на глубину до 70 мкм, упрочнения поверхности трения, повышения смачиваемости поверхности.

Недостатками методов ФАБО являются значительное удельное давление инструмента, которое вызывает деформацию тонкостенных деталей; перенаклеп поверхности детали; необходимость предварительной очистки и обезжиривания поверхности.

Электролитическое покрытие поверхности цилиндров покрытиями из хрома, железа, никеля, их сплавов и других металлов также позволяет повысить износостойкость. Тем не менее, покрытие из хрома плохо смачивается маслами, что приводит к увеличению износа в результате

задирав. Чтобы уменьшить задиры, необходимо увеличить объем масла на поверхности покрытия, создавая поры, впадины и каналы на его поверхности. Для этого предварительно зеркало цилиндра деформируют раскаткой перед хромированием, прибегают к химическим или электрохимическим травлениям нанесенного покрытия.

Электрохимический метод основан на анодном травлении покрытий в различных растворах, имеющих сеть микротрещин, в результате чего может быть получена канальная или точечная пористость. Пористость лучше получается при использовании трафаретов с сеткой отверстий, что позволяет получить необходимые размеры пор и желаемое место. Химический метод основан на химическом травлении покрытий в соляной и серной кислотах, что приводит к расширению и углублению микротрещин. Также для подготовки пор используется механический метод для нанесения углублений путем прокатки, дробо- и пескоструйной обработки и других методов перед электролитическим осаждением покрытия. Однако из-за низкой производительности эти методы широко не использовались.

Методы химико-термической обработки - науглероживание, нитрование, сульфирование, фосфатирование - позволяют повысить износостойкость гильз цилиндров [70,89]. Тем не менее, эти методы мало полезны в производстве, особенно для ремонта, из-за их низкой производительности (например, средняя скорость науглероживания составляет 0,08...0,1 мм / ч), сложность, энергоемкость, необходимость больших затрат оборудования, дополнительные области и средства защиты окружающей среды. Большинство методов химико-термической обработки проводят при температуре 500 ... 900С, что вызывает деформацию деталей и требует последующей дополнительной обработки.

Для получения высококачественной закаленной поверхности можно использовать лазерную обработку [10,112]. На зеркале гильз цилиндра параллельные канавки наносится лазерным лучом под углом 10...30 к образующей цилиндра. Частота расположения полос в области ввт.

поршневое кольцо является максимальным и уменьшается вдоль длины цилиндра. Глубина находится в пределах 0,1 ... 0,5 мм, и образуются канавки, в которых смазка сохраняется. Этот метод отличается простотой технологии и отсутствием деформации детали. В то же время этот процесс является довольно дорогостоящим и требует очень дорогого оборудования.

Традиционный способ отделки внутренней рабочей поверхности гильз цилиндров - абразивный или алмазный хонингование [109, 38,]. Хонингование позволяет уменьшить шероховатость поверхности, улучшая форму отверстия. Обработка производится алмазными или абразивными брусками, закрепленными в хонголовке, которая выполняет возвратно-поступательное и вращательное движение. Бруски изготовлены из электрокорунда, карбидов кремния, кубического нитрида бора, синтетических алмазов, таких как ASO, ASV, ACP, ASA, ACM и т. Д. Хонингование осуществляется в 2 ... 3 этапа по разным зернистости и на соответствующих режимах. На черновых и чистовых режимах хонингования форма цилиндра корректируется, после чего шероховатость поверхности окончательно доводится.

На обработанной поверхности следы, оставленные зернами брусков, образуют своего рода сетку с разными углами пересечения линий. Для гильз цилиндров наиболее выгодным, с точки зрения работоспособности, угол пересечения рисков является $45^\circ \dots 75^\circ$ [38,61]. Большой угол вызывает увеличение потребления масла, а меньший вызывает задир. В глубине микрополостей 1,0 ... 1,6 мкм этой сетки смазка сохраняется. Согласно исследованиям [111], расход масла такой поверхности очень мал, что приводит к появлению схватывания.

Институт сверхтвердых материалов Академии наук СССР совместно с Пермским политехническим институтом предложил способ хонингования плосковершинного . Обработка осуществляется в 2 этапа. на первом этапе с помощью крупнозернистых брусков создается основная шероховатость, глубина которой достигает 20 ... 25 мкм. Затем мелкозернистые блоки

удаляют слой 12 ... 17 мкм. В результате, образуется поверхность с плоскими вершинами с опорной площадью 50 ... 80%, в которые воспринимают основную нагрузку, и впадинами глубиной 3 ... 6 мкм являются микронными водоемами смазочный материал. Маслосъемность такой поверхности в 5 ... 12 раз выше, чем после традиционного хонингования. Такая поверхность наиболее близка к параметрам поверхности, сформированной во время приработки, которая характеризуется наименьшей изнашиваемостью .

Недостатками хонингования являются: использование дорогостоящих алмазных инструментов; возможность появления прижогов и царапин на обрабатываемой поверхности; наличие по крайней мере двух переходов; необходимость в инструменте с разным размером зерна. Недостатком абразивного и алмазного хонингования является также насыщение обработанной поверхности абразивными частицами (шаржирование). Эти частицы вызывают повышенный износ поршневых колец и поршня, уменьшая ресурс деталей. В этом свете особенно опасен алмазный инструмент.

Использование алмазных инструментов в операциях, по крайней мере, доводки, не рекомендуется, так как поверхность сильно деформируется из-за плохих режущих свойств алмазных зерен. Таким образом, при обработке чугуна, хотя обеспечивается большее удаление металла, металл деформируется и закрываются графитовыми включения (поверхность цилиндра становится матово-светло-серого цвета). В результате образуется так называемый «жестяной слой», который значительно снижает ресурс деталей .

Таким образом, исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что основными способами увеличения износостойкости зеркала гильзы цилиндра являются увеличение твердости и маслоудерживающей способности поверхности зеркала.

Маслоудерживающую способность поверхности можно увеличить, разрезая микро-канавки, методами поверхностно-пластической деформации, химическим и электрохимическим травлением поверхности и т. Д.

Повышение твердости обрабатываемой поверхности достигается путем термообработки; путем нанесения твердого слоя хромированием, остаиванием, наплавкой и закалков, электромеханической обработкой и т. д. Последующая обработка цилиндров затруднена из-за высокой твердости восстановленной поверхности. Использование абразивных и алмазных инструментов при отделке приводит к насыщению обработанной поверхности абразивными частицами, что, в свою очередь, уменьшает срок службы деталей. Поверхность во время хонингования сильно деформируется, что приводит к возникновению больших остаточных напряжений.

1.4 Анодномеханическая обработка

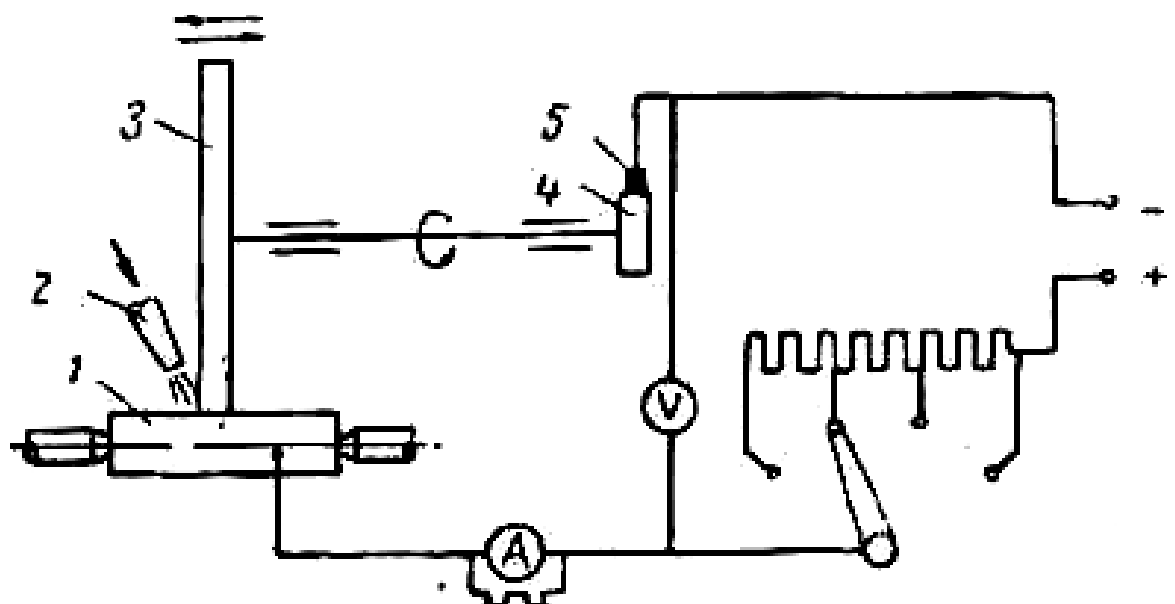
Как показано выше, повышение твердости рабочей поверхности деталей является одним из основных способов улучшения износостойкости и ресурсных деталей. Однако механическая обработка таких поверхностей очень сложна. В связи с этим существует потребность в разработке и применении новых более совершенных и прогрессивных способов обработки твердых поверхностей. К таким методам относятся электрофизические и электрохимические методы обработки. Они становятся все более важными с каждым годом в промышленности и ремонте.

Электрохимические и электрофизические методы обработки используются для описания группы методов, в которых электрическая энергия используется для удаления материала с обрабатываемой поверхности. Одним из таких методов является метод анодно-механической обработки [2,131,12,13,15,45,63,64,65,67, 75,76,106,108,].

Метод анодно-механической обработки был изобретен в 1931 г. В.Н. Гусев (В.Н. Гусев, заключение автора № 34253, 1931 [95]). Способ

заключается в том, что «обрабатываемая поверхность подвергается электролитическому анодному растворению в электролите, который во время электролиза дает нерастворимое осаждение на обработанном металле, которое механически удаляется». Однако наиболее известная анодно-механическая обработка приобрела в качестве процесса электрообработки в жидком стекле после 1943 года VN. Гусев И.Я. Bogorad и др. Предложили использовать жидкое стекло в качестве электролита и инструмента с металлическим электродом (EI) [45.46].

Когда выполняется анодная обработка, электрод рабочего инструмента подключается к отрицательному полюсу источника постоянного тока, а заготовка позитивна. ЭИ связывает основное рабочее движение относительно заготовки и движения подачи. Рабочая жидкость (электролит) подается в зазор между электродами. Принципиальная схема анодно-механической обработки показана на рисунке 1.2.

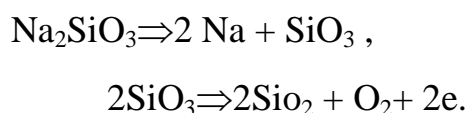


1 — обрабатываемая деталь; 2 — сопло; 3 — чугунный круг (инструмент); 4 — контактное кольцо; 5 — щеточное устройство.

Рисунок 1.2 – Схема процесса анодно-механического круглого шлифования.

Во время обработки электроды инструмента движутся вдоль поверхности анодной части таким образом, что промежуток между ними

постоянно заполняется электролитом. Анодная пленка формируется на поверхности заготовки, которая обладает высоким электрическим сопротивлением и достаточной механической прочностью. Существует много теорий образования анодной пленки. 125] идентифицирует основные три: химические, электролитические и коллоидные.[А.Г. Саркисов Электролитическая теория, из которых АГ является сторонником. Саркисов, объясняет образование пленки на аноде в результате электрохимического разложения электролита. Когда электрический ток проходит через водный раствор жидкого стекла, на аноде выделяются диоксид кремния и кислород:



Газовые пузырьки кислорода, выделяющиеся при электролизе, создают поры в пленке.

Сторонники химической теории утверждают, что анодная пленка образуется в результате взаимодействия электролита с металлическими частями.

Коллоидная теория объясняет формирование пленки в результате электрофореза жидкого стекла. Жидкое стекло представляет собой коллоидный раствор, так что под воздействием электрического тока отрицательно заряженные частицы силиката высвобождаются на аноде в твердом состоянии. Растворение обработанного металла объясняется действием примесей (ионы хлора и сульфаты всегда присутствуют в жидком стекле).

Полученная пленка предотвращает дальнейшее растворение поверхности детали. Инструментный электрод, перемещающийся вдоль поверхности анодной части, удаляет из него пленку, поддерживая непрерывный поток процесса анодного растворения. В этом случае микропроекции поверхности подвергаются растворению, в то время как

микропроходы остаются изолированной анодной пленкой, что приводит к постепенному выравниванию микротвердости поверхности детали. Аналогичная картина процесса удаления металла типична для обработки в режимах с малыми значениями тока и напряжения (до 8 ... 10 В). Обработанная поверхность гладкая с малой высотой микротвердости, но производительность обработки в этом случае чрезвычайно мала. В соответствии с В.Н. при обработке железа в режиме с плотностью анодного тока $1 \text{ А} / \text{см}^2$ и рабочим напряжением 4 ... 5 В, скорость удаления металла равна 0,02 мм / мин, а шероховатость $R_a = 0,04 \dots 0,16 \text{ мкм}$ ($R_z = 0,2 \dots 1,6 \text{ мкм}$). Поэтому обработка в этих режимах рекомендуется в качестве завершающей операции с удалением небольшой надбавки.

При высоких значениях напряжения и силы тока удаление металла увеличивается из-за теплового воздействия электрического тока. Некоторые исследователи [75, 111, 112] считают, что термическое разрушение вызвано действием тепла Джоуля, выделяемого в металле. Поверхности электродного инструмента и деталей касаются только в самых выступающих точках, то есть создается так называемый «контакт сетки». Из-за небольшой площади контактных участков плотность тока на них достигает значительных значений, что приводит к электрическому разряду. Теплота разряда расплавляет микровыступы поверхности анодной части. М.К. Алексеев И.А. Богорад, Н.Р. Четыркин и др. считают, что при анодно-механической обработке тепловыделение происходит в пленке на микропроекциях поверхности анода.]2[Электрический ток, проходящий через анодную пленку, обладающий высоким электрическим сопротивлением, нагревает его из-за тепла Джоуля. В процессе нагрева нарастание тока имеет лавинообразный характер из-за отрицательного температурного коэффициента, что приводит к мгновенному высвобождению большого количества тепла в пленке и на соседних участках анода. В результате эти микровыступы плавятся, в том месте, где образуются лунки. Продукты разрушения электродов удаляются из зоны обработки

инструментом вращающегося электрода. Специфическим явлением этого процесса является отсутствие одновременного слияния больших площадей и краткосрочного процесса плавления, что предотвращает проникновение тепла внутрь металла. В.Н.Гусев пишет: «Условием поверхностного плавления металла является: кратковременность и интенсивность нагрева поверхности и немедленное прекращение нагрева после удаления расплавленного металла, т. е. Нагревание мощными тепловыми импульсами».

.]118[При напряжении 17 ... 20 В эрозионная эрозия анодной части наблюдается из-за разрядов между ближайшими точками электродов без контакта

При жестких электрических условиях часть выделяемого тепла может проникать глубоко в металл из-за теплопроводности и приводит к разработке термически измененного слоя на части. Толщина и свойства термически измененного слоя определяются глубиной проникновения температуры структурных превращений. Слой металла, нагретый до температуры выше температуры тушения, называется «белым слоем». Этот слой обладает высокой твердостью, износом и кислотостойкостью, который успешно используется в производстве

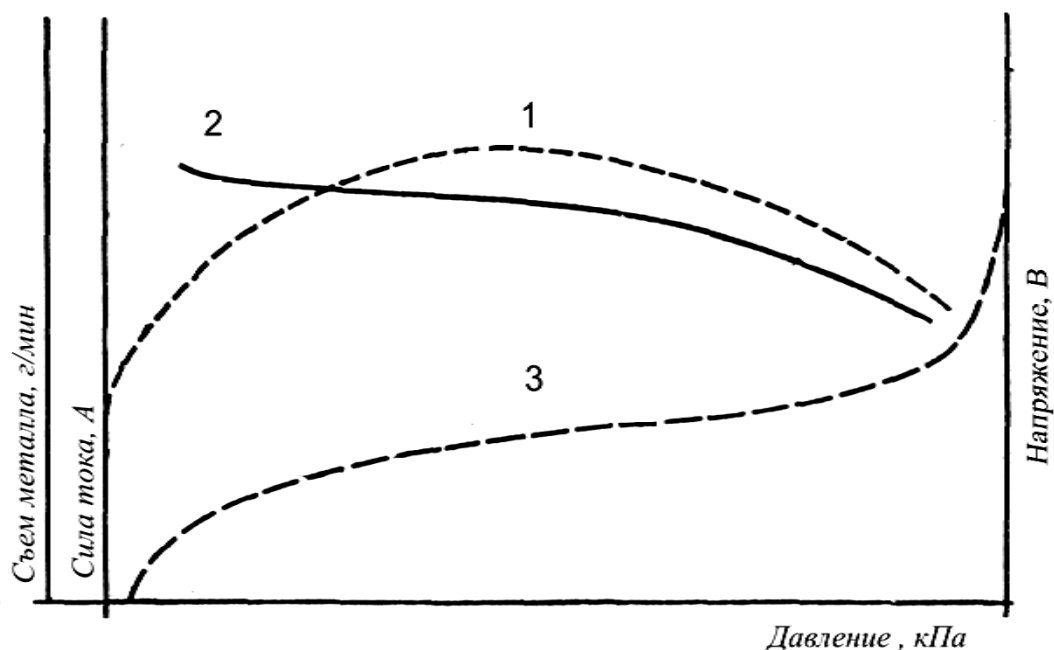
Процесс анодно-механической обработки зависит от большого количества механических и электрических параметров. Наиболее значительными являются напряжения, сила тока, удельное давление инструмента на заготовке, скорость относительного перемещения электродов [12,13,15,45,63,64,65].

Напряжение на электродах определяет характер происходящих процессов. При напряжении до 8 ... 10 В удаление металла из детали происходит, главным образом, путем анодного растворения. Увеличение напряжения выше этого приводит к преобладанию электроэрозионного пикапа. При напряжении более 30 ... 40 В может произойти короткое

замыкание электродов из-за заполнения межэлектродного зазора частицами расплавленного металла.

Электрический режим определяет интенсивность процесса и качество обрабатываемой поверхности. Таким образом, при резке стали при рабочем напряжении 20 ... 28 В и плотности тока 0,7 ... 5 А / мм² скорость удаления металла составляет 2000 ... 6000 мм³ / мин и высоту неровностей $R_z = 40 \dots 160$ мкм. При тонком измельчении с напряжением 14 ... 16 В и плотностью тока 0,03 ... 0,07 А / мм² скорость удаления составляет 2 ... 15 мм³ / мин, а шероховатость составляет 0,8 ... 3,2 мкм [2, 13, 15, 63, 65].

Важным фактором является удельное давление инструмента на поверхности заготовки. Он определяет величину межэлектродного промежутка и связанное с ним электрическое сопротивление. Зависимости удаления металла, тока и рабочего напряжения от удельного давления инструмента показаны на рисунке 1.3 [75]



- 1 — давление — съем металла;
- 2 — давление — напряжение;
- 3 — давление — сила тока.

Рисунок 1.3 - Зависимости между параметрами режима и результатами АМО.

При давлении, недостаточном для разрыва пленки на аноде, сила тока равна нулю и удаление металла отсутствует. По мере увеличения давления сопротивление межэлектродного зазора уменьшается, а ток и удаление металла увеличиваются. Дальнейшее увеличение удельного давления приводит к разрыву анодной пленки на большие площади, в результате чего часть тока будет проходить непосредственно через металлический контакт между электродами. Эта часть тока не участвует в удалении металла, что снижает производительность.

Свойства жидкого стекла оказывают большое влияние на процесс. Величина межэлектродного зазора напрямую зависит от плотности его раствора. Скорость относительного движения электродов, определяющая количество тепла в рабочей зоне, влияет на скорость и степень нагрева поверхностного слоя детали. С увеличением скорости движения электродов шероховатость поверхности и толщина термически измененного слоя в этом электрическом режиме уменьшаются.

Анодированная обработка имеет важное преимущество перед абразивной обработкой и механической обработкой - производительность и качество обработки практически не зависят от твердости металла заготовки. Среди преимуществ АМО также можно отнести: высокоточную обработку, сокращение трудозатрат, снижение расхода материала на детали, отсутствие необходимости в термической подготовке деталей для обработки, без вывоза, без усилий по резке. Последнее очень полезно при обработке металлизированного покрытия и деталей, восстановленных путем установки дополнительных деталей.

Анодно-механическая обработка также позволяет повысить износостойкость деталей. После анодно-механической притирки обработанная поверхность представляет собой коллекцию большого количества эрозионных отверстий глубиной 2 ... 4 мкм, которые не сообщаются друг с другом. По словам А.С. Казанцев [63], в этих углублениях (дырах) сохраняется аварийный запас смазочного материала, в результате

чего «повышенный износ предотвращается в условиях высоких удельных давлений, неравномерных скоростей и отсутствия смазки». Эти отверстия заполнены анодной пленкой, которая придает поверхности глянцево-серый цвет. В то же время частицы анодной пленки, адсорбирующие смазку, способствуют ее удержанию в лунках. Тонкодисперсные силикатные и оксидные образования анодной пленки, оставшиеся в лунках, являются абразивными и создают условия для полировки поверхностей интерфейса на начальном этапе их работы. Это ускоряет прирост и формирование оптимальной микрогеометрии поверхностей, что приводит к снижению их износа. Например, коэффициент трения в конце обкатки на поверхностях, обработанных при напряжении 6 В и силе тока 10А, коэффициент трения составляет $\mu = 0,03$, тогда как для поверхностей, обработанных тонким абразивным шлифованием ($R_z=1,6...3,2$ мкм) - $\mu=0,06$, а у полированной поверхности ($R_z=0,4...0,8$ мкм) - $\mu=0,05$ [63].

Кроме того, термическое разложение жидкого стекла с выделением диоксида кремния происходит в жестких электрических условиях анодно-механической обработки, которая реагирует с железом при высокой температуре. Часть кремния переходит в ферросилиций, а некоторые образуют силицид с железом. Насыщение поверхности детали кремнием, как известно, оказывает положительное влияние на его износостойкость [46,].

Благодаря всем вышеперечисленным, анодно-механическая обработка нашла применение в машиностроении и ремонте для резки, заточки инструмента, резки, шлифования, шлифования спаривания, обработки сварных деталей после ремонта [2,29,45,51, 63,64,65,106,108,]. Наиболее изученными из них являются процессы анодно-механической резкости резцов и резки, для которых разработаны многочисленные рекомендации по технологиям обработки [46,51,74,75,76]. Существуют некоторые рекомендации по обработке отдельных деталей анодно-механическим способом [26,30,54,62,63], но их не так много. Например, в Казанском сельскохозяйственном институте проблемы анодно-механической обработки

обрабатывались В.И. Жуленков Г.С. Фашутдинов, Е.М. Краюшкин, Шайхутдинов Р.Р. и др. [54, 62, 79].

Тем не менее этот прогрессивный метод не нашел широкого применения в машиностроении и, особенно, в ремонтном производстве.

1.5 Электрохонингование

Метод электрохимического хонингования был предложен В.Н. Гусев и Н.Н. Гусев в 1947 г., № 47, и является разновидностью метода анодно-механической обработки. Вопросы электрохимического хонингования были рассмотрены В.Н. Гусев и Н.Н. Гусев, Б.И. Кан, Ю.Н. Петров, С. Н. Некрасов, Л. Л. Шор, И. Е. Фрагин, И.Н. Верховецкий И.Д. Кейбаш, А.А. Ягуткин, Фрагин И.Е. , Сафронов В.Г., В.В. Веричев Е.И. Плиско, А.П. Лавриненко, В.Ф. Карпенков и др.

Суть этого метода заключается в одновременном механическом удалении металла надбавки с помощью абразивного инструмента и его электрохимического растворения. В этом методе заготовка соединена с положительным, а корпус хонинговальной головки с отрицательным полюсом источника постоянного тока. Хонинговальная головка, оборудованная абразивными или алмазными стержнями, вставляется в обрабатываемое отверстие. Электролит подается в межэлектродный зазор 0,5-1,2 мм (рис. 1.4). В качестве электролита чаще всего используются водные растворы фосфорной кислоты и нитратных солей. Электроды снабжены напряжением 3 ... 30 В, а плотность анодного тока составляет 0,1 ... 10 А / см² (наиболее часто используется 0,2 ... 1 А / см²). Прибор информирован о вращательном движении со скоростью 1 ... 10 м / с и возвратно-поступательном движении 30 ... 80 дв / мин. Удельное давление стержней на штуку составляет 0,05 ... 0,3 МПа.

1 - катодная пластина; 2 - абразивный стержень; 3 - притирающая головка; 4 - рабочая кость; 5 - заготовка; 6 - панель управления

Рисунок 1.4. Схема анодно-механического хонингования отверстия втулки

Во время обработки поверхность детали подвергается анодному растворению в электролите с образованием на нем пленки пассивации. Движущийся инструмент удаляет эту пленку, тем самым активируя поверхность для дальнейшего растворения. Шероховатость поверхности формируется в конце обработки несколькими двойными ходами, при отключенном технологическом токе и зависит от гранулярности используемых стержней, как и при обычном абразивном хонинговании. Высота шероховатости обычно не превышает $R_z = 1,25 \dots 0,32$ мкм, а среднее арифметическое отклонение профиля $R_a = 0,32 \dots 0,08$ мкм. Доля механической резки в зависимости от материала и режима может варьироваться в широких пределах - от 3 до 5% при обработке деталей с хромированным покрытием, до 40 ... 60% при обработке деталей из стали и чугуна [176,27,28].

И.Ф. Хоргон в исследовании электрохиографии попытался использовать хонинговальные камни в качестве катода. Но были явления, которые мешали процессу. Зазор между инструментом и деталью мал и составляет величину выступов зерна из пучка. Такой небольшой зазор затрудняет доступ к электролиту и удаляет продукты обработки из межэлектродного промежутка. Это стало причиной сокращения металлолома и ухудшения качества поверхности из-за короткого замыкания.

В [26] в качестве катода использовались хонинговальные камни, были получены следующие результаты с электрофонированием оставшихся шатунов: чистота обработанной поверхности составляет 1 ... 2 класса выше, удаление металла составляет 10 .. В 12 раз выше, а удельный расход бриллиантов в 10 ... 15 раз меньше, чем при обработке алмазами из одних и тех же шатунов.

Результаты исследования электрохимического хонингования японских ученых приведены в работе [[31]. При обработке деталей из незакаленных сталей с корундовыми блоками (раствор 20% NaCl + 5% NaNO₃) металлический отстойник составляет около 15 г / мин, шероховатость обрабатываемой поверхности составляет 2 ... 3 мкм, а износ инструмента незначителен. При оттачивании деталей из закаленной стали скорость удаления увеличивается в 13 раз. Высота шероховатости увеличивается до 12 ... 15 мкм, а после электроабразивного хонингования требуется шлифование алмазов.

В работе Фрагина И.Е. и Сафронова В.Г. представлены результаты исследования электроабразивного хонингования образцов из стали 20ХНМ, цементированного и закаленного до HRC 58. По сравнению с алмазным хонингованием удаление металла увеличилось в 2 раза, но с электроалмазным хонингованием наблюдалось растворение связующего стержня.

Как отмечают авторы, при электроалмазном хонинговании с помощью наиболее целесообразно использовать непроводящие стержни.

В работах [29.52] предложенная схема электрохимического хонингования, в которой вместо абразивных стержневых инструментов используются стержни из электрически нейтральных материалов (дерево, пластик и т. Д.), А в электролите добавляют абразивные порошки (оксид хрома, алюминий). Такая схема обработки также может быть использована для обработки вязких материалов. Чистота обрабатываемой поверхности очень высока. Например, при обработке деревянными ресницами и порошком оксида хрома, суспендированными в электролите, шероховатость поверхности может достигать $Ra = 0,04$ мкм.

Существует еще одна схема электроочистки, где катод представляет собой металлический стержень, закрепленный перед хонинговальной головкой [29]. При плотности тока 0,2 ... 2 А / см² и напряжении 6 ... 12 В

скорость удаления достигается в пределах 0,04 ... 0,06 мм / мин. Шероховатость обрабатываемой поверхности достигает 1 мкм.

В работе [1] показано, что по сравнению с обычным алмазным хонингованием при хонинговании электроалмажем удаление металла увеличивается на чугун 5 раз; стали ШХ 15 и ХВГ - 7 раз и стали 40Х и 45 в 1,5 ... 2 раза. Изменение зазора между электродами в диапазоне 0,2 ... 1,0 мкм вызвало колебание удаления металла всего на 12%, причем наибольшее высвобождение на зазоре равнялось 0,6 мкм. Поэтому нецелесообразно использовать гонголовки с подвижными электродами.

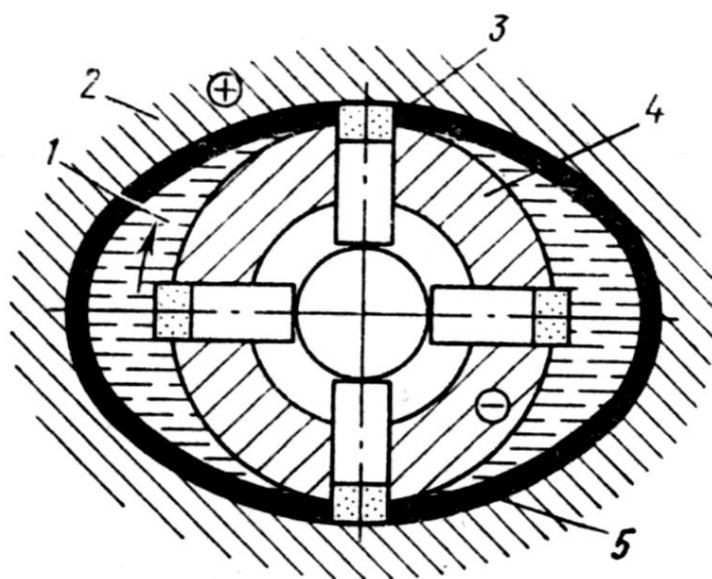
А. П. Лавриненко [85] исследовал процесс электроалмазного хонингования термообработанных тонкостенных гильз цилиндров и получил следующие результаты. Переход от алмазного к электроалмазному при обработке закаленного чугуна (гильза цилиндра двигателя СМД-14) приводит к уменьшению сил резания в 2 ... 4 раза. Потребление баров в оптимальных условиях снижается на 4 ... 5 раз. Доля электрохимического удаления составляет 28 ... 40% от общего удаления. Износостойкость гильз цилиндров после хонингования электродвигателем увеличивается в среднем на 17% по сравнению с рукавами, обработанными алмазным хонингованием.

Исследование Плиско [108] также продемонстрировал обещание анодно-механической отделки для ремонта затвердевших гильз цилиндров тракторных двигателей. По его словам, при обработке гильз цилиндров двигателя Д-54 с абразивными блоками К36Т1К в водных растворах хлорида натрия (NaCl - 100 г / л) время отделки уменьшается в 2,13 раза по сравнению с хонингованием алмазов.

Большой интерес представляют работы по гальваническому электрохонингованию [27,28,72], выполненные в Кишинёвском сельскохозяйственном институте под руководством академика Ю.Н. Петрова. В этих работах представлены результаты исследований по выбору механических и электрических видов электрообработки, выбору электролита, кинетике электродных процессов.

Электрохимия имеет ряд преимуществ перед традиционным хонингованием, а именно: большая производительность обработки; сокращение потребления алмазных инструментов; низкое удельное давление стержней и, как следствие, небольшие остаточные деформации в поверхностном слое.

Преимущества АМХ могут быть объяснены и более эффективная коррекция формы ошибки обрабатываемой дыры. Из схемы электрохимического хонингования (см. рис. 1.6 [148]) следует, что анодная пленка удаляется только в зоне меньшего диаметра, а в других областях она предотвращает растворение. Поэтому отклонение от округлости быстро уменьшается, и для его удаления не требуется удаление большого слоя металла, т.е. погрешности могут быть уменьшены.



- 1 - электролит; 2 - деталь (анод); 3 - проводники;
4 - корпус корпуса (катод); 5 - пассивная пленка.

Рисунок 1.5 - Схема уменьшения начальной погрешности при электрохимическом хонинговании

Из приведенного выше краткого литературного обзора видно, что разные исследователи дают противоречивые данные.

Например, исследователи [101, 100, 118] считают, что оптимальная периферийная скорость инструмента для электрохимического хонингования

деталей закаленного чугуна составляет скорость около 90 м / мин и скорость 200 ... 250 м / мин рекомендуется в [111].

В [108] указывается, что электрохонинг рационально осуществляется в двух переходах с напряжением 24 В и 12 В, а по данным других исследователей [75,28] напряжение не должно превышать 10 В.

Также противоречивые данные от разных авторов на используемых барах. Некоторые авторы [26] рекомендуют использовать проводящие стержни, в то время как другие [29,52,69] категорически указывают на необходимость использования стержней, которые не проводят электрический ток. В [69] предлагается применить ток к катодам на шасси, тогда как согласно данным [14] использование мобильных катодов считается неуместным

Имеются различные данные о наилучшем составе электролита. Водный раствор хлорида натрия (NaCl) признан лучшим в [108], в других случаях растворами азотной кислоты или солей фосфорной кислоты натрия или кальция.

Таким образом, в настоящее время накоплен определенный материал на абразивном и алмазном электрохимическом хонинговании. Однако в этих процессах используется только электрохимический компонент процесса анодной обработки. Использование анодно-механического хонингования с электроэрозионным компонентом слабо освещено.

1.6. Краткий вывод. Цель и задачи исследования

Основываясь на обзоре и анализе результатов экспериментальных и теоретических исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Несмотря на многочисленные исследования, до сих пор нет консенсуса в отношении преобладающей формы износа внутренней рабочей поверхности гильзы цилиндра. Ресурс переработанного двигателя составляет

35 ... 40% ресурса нового двигателя. Интенсивность износа гильз цилиндров после капитального ремонта в 2 ... 3 раза выше, чем для новых гильз.

2. Для увеличения срока службы гильз цилиндров ICE при производстве и ремонте, как правило, повышается твердость рабочей поверхности и расход масла, а также применяются антифрикционные покрытия. Для повышения твердости используются различные методы термической обработки и применения твердых материалов. Высокая твердость поверхности вызывает большие трудности при последующей обработке.

3. Электроэрозионно-химико-механическая обработка с электроэрозией позволяет получать поверхности с заданными физико-механическими свойствами и шероховатостью и позволяет увеличить срок службы деталей.

4. В разработанных схемах электрохимического хонингования используется только явление электрохимического растворения анодной поверхности с абразивным удалением продуктов удаления. Существует метод электрохимического хонингования, но метод электроэрозионно-химического механического хонингования гильз цилиндров двигателей с помощью металлического электродного инструмента с использованием электроэрозионных явлений и последующего латунирования слабо освещен.

В связи с вышеизложенным целью этой работы является увеличение срока службы цилиндров путем электроэрозионно-химического механического хонингования.

Основываясь на этой цели исследования, его основными задачами являются:

1. Теоретически обосновать параметры электроэрозионно-химического механического хонингования, что обеспечивает увеличение износостойкости гильз цилиндров.

2. Исследовать влияние различных факторов процесса электроэрозионно-химического механического хонингования на удаление

металла и качество обрабатываемой поверхности, а также обосновать рациональные режимы лечения.

3. Провести исследование физико-механических свойств и структуры материала обрабатываемой поверхности, а также сравнительные испытания на износостойкость гильз цилиндров, обработанных электроэрозионно-химическим и абразивным хонингованием.

5. Провести оценку их технико-экономической эффективности.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО-ХИМИКОМЕХАНИЧЕСКОГО ХОНИНГОВАНИЯ

2.1 Шероховатость обработанной поверхности

Известно, что начальный микрорельеф поверхностей трения определяет не только продолжительность обкатки и начального износа, но также скорость нормального износа, расхода масла, несущей способности, сопротивления истиранию, температуры в зоне трения и т. д. Поэтому важно знать, как шероховатость зависит от условий обработки.

Бег - это самый важный этап работы по трению деталей, определение условий и характера их работы после обкатки и продолжительности сохранения рабочих функций. Во время обкатки высота микроуровня уменьшается, увеличивается количество пятен и фактическая площадь контакта и формируется так называемая равновесная шероховатость, что обеспечивает наименьшую скорость износа. Процесс формирования равновесной шероховатости схематически показан на рис. 2.1 [35, 78].

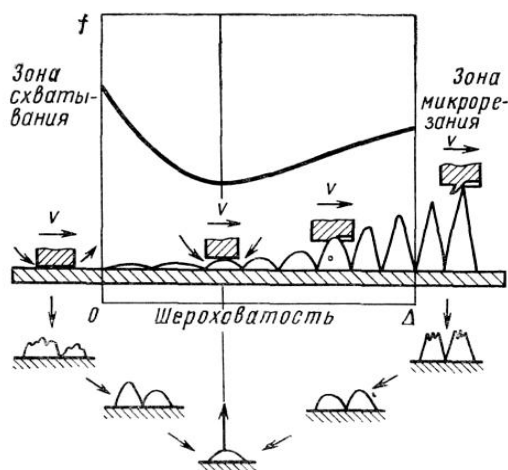


Рисунок 2.1. Формирование равновесной шероховатости при образовании выступов и сглаживании выступов.

На левой стороне показан контакт совершенно гладких поверхностей. Из-за чрезмерно большой площади контакта гладких поверхностей и низкого потребления масла основная роль в трении начинает играть феномен адгезии

и молекулярной адгезии, что приводит к образованию микроповерхностей. Возникающие микросферы вызывают появление микровагенов для сохранения смазки, и постепенно поверхность становится более грубой.

В правой части рисунка 2.1 показан микропрофиль поверхности с большой высотой микротвердости. В этом случае площадь контакта слишком мала и давление на микровершины достигает огромных значений, что приводит к микрорезанию и захвату вершин микровыступов. В результате микровыступы сглаживаются и также достигают некоторой равновесной шероховатости.

Кривая на рис 2.1 показывает зависимость коэффициента трения от шероховатости. Как вы можете видеть, зависимость нелинейна и существует определенный интервал оптимальных значений, что соответствует равновесной шероховатости. Как известно, поверхностный износ, при прочих равных условиях, прямо пропорционален коэффициенту трения. Следовательно, можно предположить, что зависимость износа от высоты микротрещин будет аналогичной (рис. 2.2).

Рисунок 2.2 - Зависимость износа от высоты шероховатости.

Для определения шероховатости поверхности после ЭЭХМХ при прочих равных условиях известна следующая зависимость [56]:

$$R_z = k_R \cdot U \cdot I, \quad (2.1)$$

где k_R – коэффициент, учитывающий свойства материала детали;

I - величина тока, А;

U - величина напряжения, В.

Как видно из формулы (2.1), шероховатость возрастает с увеличением тока и напряжения. Однако эта формула не полностью отражает зависимость шероховатости от других параметров процесса. Известно, что при анодно-механической обработке металл удаляется из-за электроэрозионных и электрохимических явлений. В любом режиме

соответствующие электрохимические процессы происходят в межэлектродном промежутке, так как рабочая жидкость является электролитом. В жестких электрических режимах удаление металла происходит в основном из-за электроэрозионных процессов. Термическое разрушение вызвано действием джоулева тепла, которое выделяется в металле. Поверхности электродного инструмента и деталей касаются только в самых выступающих точках, то есть создается так называемый «контакт сетки». Из-за небольшой площади контактных зон плотность тока на них достигает значительных значений, что приводит к электрическому разряду. Теплота разряда расплавляет микровыступы поверхности анодной части.

Специфическим явлением является отсутствие одновременного плавления всей поверхности и короткая продолжительность процесса плавления, в результате чего микродуги, возникающие между электродами и вызывающие электрическую эрозию, можно рассматривать как электрические разряды, так как отдельные точечные источники тепла движутся быстро над поверхностью анода. В этом случае тепло распространяется глубоко в металл в соответствии с законами теплопроводности. Глубина проникновения тепла будет зависеть от мощности электрического разряда, скорости движения электродов, свойств окружающей среды и т. Д. Вокруг быстро движущейся точки образуются температурные зоны сферической формы. В зоне, где нагрев достигает точки плавления и выше, расплав металла частично испаряется и, удаляя поток электролита и инструмент, образует отверстия. После обработки в электрическом режиме с преобладанием эрозионных процессов поверхность анодной части представляет собой комбинацию большого количества эрозионных отверстий. Эти отверстия пересекаются друг с другом и имеют форму, близкую к форме части сферы. Глубина проникновения тепла в общем случае определяется из дифференциального уравнения теплопроводности. Частное решение этого уравнения для нашего случая (быстро движущегося точечного источника

тепла), которое выражает температуру на разных расстояниях от источника тепла, можно определить по приближенной формуле [63]:

$$T_r = \frac{0,368 \cdot q}{\frac{\pi}{2} \cdot v \cdot C_\gamma \cdot r^2}, \quad (2.2)$$

где T_r - максимальная температура на расстоянии r от источника тепла, °C;

q - интенсивность точечного источника тепла, кал / с;

v - скорость источника тепла, м / с;

C_γ - объемная теплоемкость обрабатываемого металла, cal / м³ • °C;

r - радиус изотермической сферы, т.

Из равенства (2.2) можно определить радиус изотермической сферы r с температурой T_r по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{0,368 \cdot q}{\frac{\pi}{2} \cdot v \cdot C_\gamma \cdot T_r}}, \quad (2.3)$$

Интенсивность источника тепла определяется по формуле [63]:

$$q = 0,24 \cdot I_p \cdot U_p, \quad (2.4)$$

где I_p - значение рабочего тока, А;

U_p - значение рабочего напряжения, V.

Из формулы (2.4) следует, что один разброс происходит по всей площади межэлектродного контакта в единицу времени. Однако в нашем случае хонбрусок контактирует с поверхностью рукава не со всей номинальной площадью поверхности, а только в нескольких точках и так называемый «контакт сетки» (рис. 2.3).

Рисунок 2.3 - Схема контактирования электродов с ЭЭХМХ. Поэтому необходимо учитывать общее количество точечных источников,

которые происходят одновременно при контакте. Следовательно, электрическую энергию, выделяемую в контакте, необходимо разделить на количество одновременно возникающих разрядов

Тогда интенсивность точечного источника тепла (разряда) можно определить по формуле:

$$q = 0,24 \cdot I_p \cdot U_p / n_p, \quad (2.5)$$

где I_p - величина тока, А;

U_p - величина напряжения, В;

n_p – число одновременно возникающих разрядов, ед.

Число возникающих одновременно разрядов n_p можно примерно определить по формуле:

$$n_p = N_p \cdot F_k, \quad (2.6)$$

где N_p – удельное число одновременных разрядов на единицу площади контакта, ед./ м²;

F_k - площадь контакта ЭИа с поверхностью детали в текущий момент времени, м².

Удельное число одновременных разрядов на единицу площади контакта N_p можно найти экспериментальным путем изучения микроструктуру поверхности.

Тогда формула (2.5) примет следующий вид:

$$q = 0,24 \cdot I_p \cdot U_p / N_p \cdot F_k. \quad (2.7)$$

Глубина образовавшейся лунки h_l будет равна радиусу r_{nl} ($h_{\bar{e}} = r_{\bar{e}}$) изотермической сферы, нагретой до температуры плавления T_{nl} .

Высота неровности профиля поверхности $R_Z^{y\delta}$, обработанной серией электрических разрядов определяется из известного выражения [118,112,]:

$$R_Z^{y\delta} = \frac{1}{3} h_{\bar{e}} \quad (2.8)$$

Подставляя выражения (2.3) и (2.7) в уравнение (2.8) получим:

$$R_Z^{\gamma\delta} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{0,17664 \cdot I_P \cdot U_P}{\pi \cdot \tilde{N}_\gamma \cdot \dot{O}_{i\tilde{e}} \cdot v \cdot N_\delta \cdot F_{\hat{e}}}} \quad (2.9)$$

Суммарная скорость инструмента при хонинговании [81]:

$$v = \sqrt{v_{i\tilde{e}}^2 + v_{A\tilde{r}}^2}, \quad (2.10)$$

где v – суммарная скорость инструмента, м/с;

$v_{ок}$ – окружная скорость инструмента, м/с;

v_{en} – возвратно-поступательная скорость инструмента, м/с.

Окружная скорость вращения инструмента [84]:

$$v_{ок} = \pi \cdot D \cdot n_I, \quad (2.11)$$

где D – диаметр отверстия, м;

n_I – частота вращения хонголки, с⁻¹;

Скорость возвратно-поступательного инструмента [130]:

$$v_{en} = 2L \cdot n_2, \quad (2.12)$$

где n_2 – число двойных ходов хонголки, с⁻¹;

L – длина рабочего хода хонголки, м;

Длина рабочего хода хонголки [10,55]:

$$L = l_{отв} + 2 l_{пер} - l_{бр}, \quad (2.13)$$

где $l_{отв}$ – длина хонinguемого отверстия, м;

$l_{пер}$ – перебежка бруска за пределы отверстия, м;

$l_{бр}$ – длина хонинговального бруска, м;

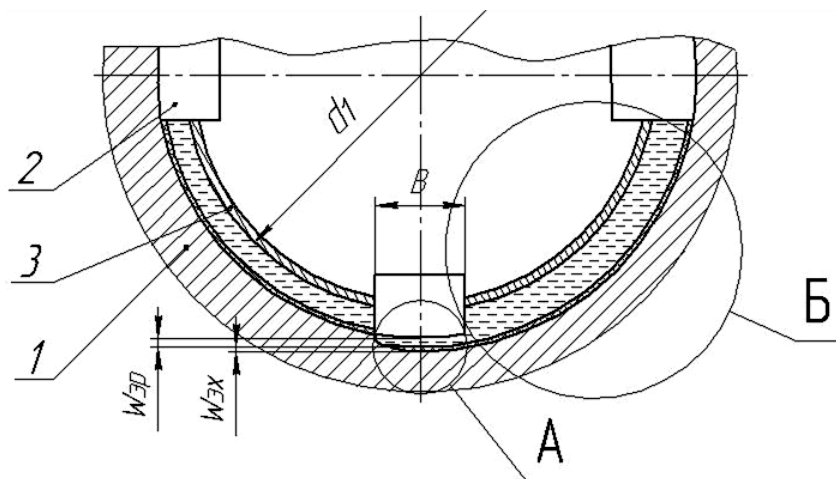
Площадь контакта ЭИа (рисунок 2.4):

$$F_k = l_{бр} \cdot i \cdot k \cdot L_k, \quad (2.14)$$

где L_k – длина дуги поверхности хонинговального бруска, м;

i – количество хон брусков, шт.

k – коэффициент, учитывающий уменьшение площади контакта из-за перебега брусков (при перебежке на треть длины бруска принимаем $k = 0,66$).



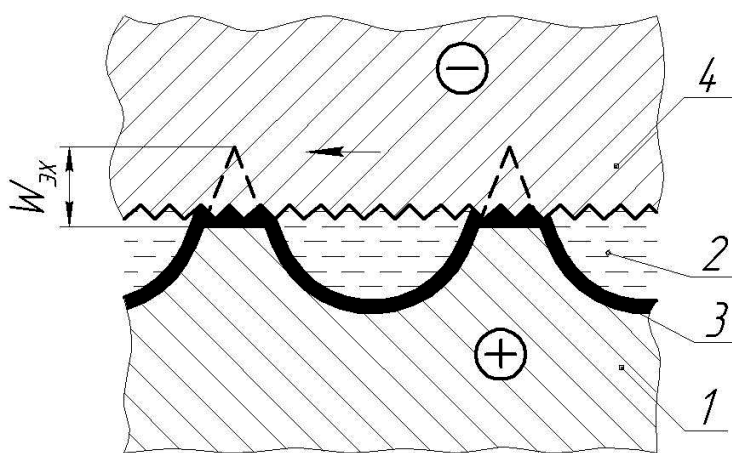
1- обрабатываемая деталь; 2 – брусок; 3- катодная пластина; А и Б - зоны электрохимического растворения; $W_{Эр}$ - величина электроэрозионного съема; $W_{ЭХ}$ – величина электрохимического съема

Рисунок 2.4 – Схематичное расположение катодных пластин и брусков

Длина дуги поверхности хонинговального бруска определяется по формуле:

$$L_{\epsilon} = \frac{\pi \cdot D}{180 \cdot 2} \arctg \frac{2 \cdot B}{D} . \quad (2.15)$$

Как указывалось выше, при любом режиме происходит электрохимическое растворение поверхности детали. Растворение поверхности может происходить в двух зонах: в зоне контакта бруска с поверхностью (зона А) и в зазоре между катодными пластинами (зона Б) и обрабатываемой поверхностью. При этом электрохимическому растворению в основном подвергается микроворшины поверхности детали, где выше интенсивность электрического поля и постоянно удаляется образующаяся анодная пленка (рисунок 2.5). Микровпадины защищены анодной пленкой, поэтому съемом во впадинах можно пренебречь.



1- обрабатываемая деталь; 2 – электролит; 3- анодная пленка; 4- брусок

Рисунок 2.5 – Схема сглаживания микропрофиля поверхности

Следовательно, окончательную высоту неровностей профиля поверхности можно определить из выражения:

$$R_Z = R_Z^{\text{уд}} - W_{\text{уд}}, \quad (2.16)$$

где $W_{\text{уд}}$ - съем металла в районе вершин за счет электрохимического растворения, м.

Масса металла удаляемого с детали за счет электрохимического растворения определяется согласно первому закону Фарадея по формуле [123]:

$$W = \varepsilon_m \cdot I_p \cdot \tau_{\phi}, \quad (2.17)$$

где ε_m - весовой электрохимический эквивалент металла, г/(А·с) ;

τ_{ϕ} - фактическое время электрохимического растворения, с.

Линейную величину электрохимического съема можно определить по формуле, вытекающей из закона Фарадея:

$$W_{\text{уд}} = \frac{\varepsilon_m \cdot I_{\delta}}{\gamma \cdot F_a} \eta \cdot \tau_{\delta}, \quad (2.18)$$

где γ - плотность металла, кг/м³;

F_a – площадь анода подвергающаяся растворению, м²;

η - выход по току.

Площадь электрохимического растворения поверхности детали F_a будет равна площади межэлектродного зазора. Для зоны А (рисунок 2.4) F_a равна площади контакта F_k . Незначительным электрохимическим съемом в зоне Б можно пренебречь.

Весовой электрохимический эквивалент для сплава [111,112]:

$$\varepsilon_m = \frac{100}{\frac{P_1}{\varepsilon_{m1}} + \frac{P_2}{\varepsilon_{m2}} + \dots + \frac{P_n}{\varepsilon_{mn}}}, \quad (2.19)$$

где P_1, P_2, \dots, P_n – содержание в сплаве отдельных составляющих, %;

$\varepsilon_{m1}, \varepsilon_{m2}, \dots, \varepsilon_{mn}$ – весовые электрохимические эквиваленты каждого из составляющих сплав металлов, г/(А·с).

Фактическое время электрохимического растворения металла в зазоре можно определить по формуле:

$$\tau_{\delta} = \frac{L_z}{v}, \quad (2.20)$$

где L_z – длина дуги межэлектродного зазора, м.

Для зоны А (рисунок 2.4) L_z равна площади контакта L_k .

Тогда уравнение (2.16) с учетом выражений (2.9) и (2.18) примет вид:

$$R_z = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{0,17664 \cdot I_p \cdot U_p}{\pi \cdot \tilde{N}_\gamma \cdot \dot{O}_{i\bar{e}} \cdot v \cdot N_\delta \cdot F_{\hat{e}}}} - \frac{\eta \cdot \varepsilon_m \cdot I_D \cdot \tau_{\delta}}{\gamma \cdot F_a}, \quad (2.21)$$

Используя формулу (2.21), можно определить шероховатость поверхности после анодно-механического хонингования.

По результатам теоретических исследований строим график (рисунки 2.6 и 2.7)

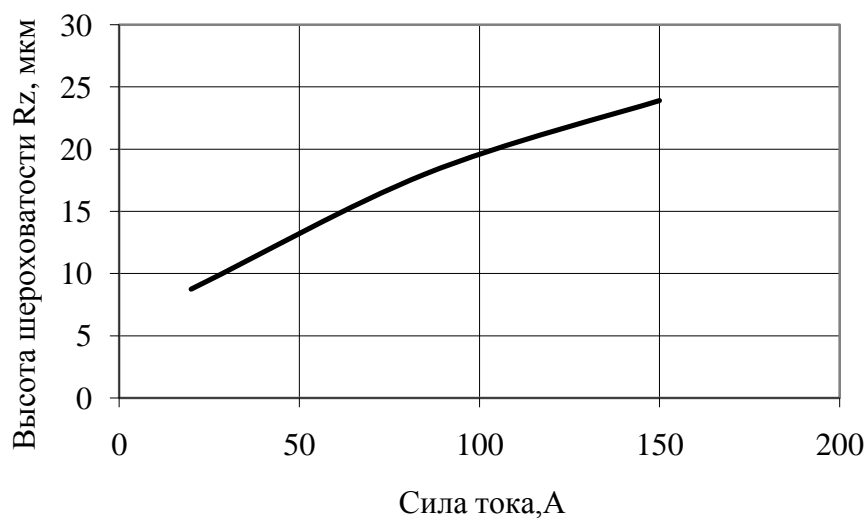


Рисунок 2.6 - Зависимость высоты шероховатости Rz от силы тока.



Рисунок 2.6 - Зависимость высоты шероховатости Rz от скорости движения бруска.

2.2. Структура и свойства поверхностного слоя

Известно, что свойства поверхностного слоя значительно меняются при электроэрозионной химической обработке. Во время обработки образуется зона с расплавленным металлом, белый слой, зона термически измененного металла. Кроме того, наблюдается покрытие обработанной поверхности

тонким слоем материала электрода-инструмента и элементов рабочей жидкости.

Исходя из вышесказанного, поверхностный слой можно условно разделить на несколько зон (рис. 2.7):

1. зона насыщения элементами рабочей жидкости;
2. осаждение материала электрода;
3. белый слой;
4. зона теплового воздействия.

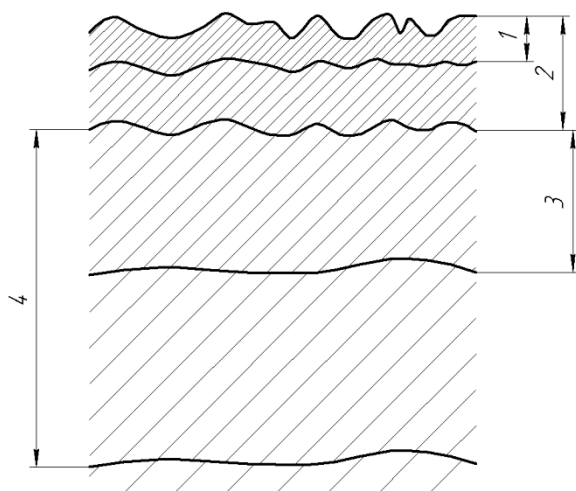


Рисунок 2.7 - Схематическая структура поверхностного слоя

Количество зон, их структура и свойства, последовательность местоположения сильно зависят от режимов и условий обработки, обработанного материала, используемого электролита, материала инструмента электрода и т. Д.

Зона насыщения с элементами рабочей жидкости и осаждением материала электродного инструмента является первой.

В процессе обработки под воздействием тепла от электрического разряда рабочая жидкость разлагается. Его отдельные элементы проникают в поверхностный слой заготовки и образуют химические соединения с материалом заготовки. Спектральный анализ обработанных частей показывает повышенное содержание в поверхностном слое кремния [14]. На жестких электрических условиях анодно-механической обработки

термическое разложение жидкого стекла происходит с выделением кремнезема, который реагирует с железом при высокой температуре. Часть кремния переходит в ферросилиций, а некоторые образуют силицид с железом. Насыщение поверхности детали кремнием, как известно, оказывает положительное влияние на его износостойкость. Минеральное масло, которое добавляется в жидкое стекло для уменьшения липкости, способствует появлению карбидов в поверхностном слое.

Многие исследователи отметили присутствие на обработанной поверхности покрытия из материала электрода-инструмента. Насыщение обработанной поверхности материалом электродного инструмента обусловлено различными причинами. На электроэрозионной стадии процесса это связано с переносом части энергии на заготовку факелами, состоящими из пара материала электрода-инструмента. Материал инструмента электрода может быть не только расположен на поверхности, но также диффундировать в более глубокие слои (например, в слой расплавленного металла, белый слой) и образовывать различные соединения в нем. Этот эффект широко используется в процессе электроискрового легирования [60].

Второй причиной образования покрытия является механическое трение материала инструмента электрода на обрабатываемой поверхности. Это покрытие особенно заметно при использовании электродных инструментов из меди и его сплавов. В этом случае поверхность становится медной или желтой. В.Н. Гусев, А.А. Рябинок, А.С. Казанцев и другие исследователи [45,63,12] отмечают повышенный износ электродных инструментов из меди и его сплавов в режиме отделки и финиша. В то же время износ инструмента увеличился в режимах чистовой обработки, когда значения напряжения и тока минимальны. Очевидно, это связано с механическим износом электродного инструмента и переносом части его металла на поверхность детали. К сожалению, авторы не приводят данные о зависимости значений износа от параметров электрической и механической обработки, типа и свойств рабочей жидкости и материала инструмента электрода.

При нанесении пластичного металлического покрытия на заготовку прочность на сдвиг покрытия ниже, чем у металла подложки. Благодаря этому коэффициент трения и скорость износа покрытой поверхности снижаются из-за уменьшения установки и глубокого разрушения металла. Все это особенно важно при высоких нагрузках. Слой меди или ее сплавов, нанесенный на поверхность, позволяет избежать зачистки и ускорить работу этой поверхности.

Ниже находится зона, в которой температура металлического слоя превышала 721°C (температура закалки) 768°C (температура вторичного закалки). Этот слой характеризуется высокой химической стабильностью, что затрудняет его идентификацию путем травления и появляется на микросекундах белого цвета (отсюда и название). Кроме того, белый слой имеет высокую твердость и износостойкость. Толщина, непрерывность и свойства белого слоя зависят от многих факторов (свойств обрабатываемого материала, режима обработки, свойств электролита и т. Д.). В этом слое сплавы компонентов материала заготовки могут быть сформированы с помощью материала инструмента электрода и элементов рабочей жидкости, а также оксидов. Структура белого слоя зависит от исходной структуры материала заготовки, режима обработки и свойств рабочей жидкости.

В зону теплового использования материалов, нагретого до температуры структурных превращений. Он больше всего слоя и включает его. Структура зоны теплового воздействия, сильно зависит от материала заготовки, свойства рабочей жидкости, режимов обработки и т. Д.

Таким образом, обобщая вышеизложенное, можно сделать вывод, что анодно-механическая обработка может повысить износостойкость обработанной поверхности путем легирования ее материала инструмента электрода, силицирования (насыщение кремнием), нанесением антифрикционного слоя с использованием электродного инструмента из нецветных сплавов, получая твердый и износостойкий белый слой.

2.3 Обоснование состава и плотности электролита

Анодно-механическая обработка представляет собой сложный комбинированный процесс, эффективность которого зависит от механических параметров движения инструмента, электроэрозионных явлений и электрохимических реакций. Для проведения анодно-механической обработки необходимо использовать электролиты, которые подставляют поля на поверхности анодной части труднорастворимые твердые пленки. Это необходимо для поддержания постоянного межэлектродного зазора и позволяет значительно упростить конструкцию машин, отказавшись от систем подачи специального инструмента.

В АМО используются различные электролитические материалы (водные растворы солей (хлорид, азотная кислота и фосфат натрия, бура и т. д.). Недостатками этих электролитов являются их узкая применимость - для каждого отдельного материала необходимо выбрать его состав в зависимости от преобладающего компонентов удаления.

Универсальный электролит для обработки любых металлов и сплавов представляет собой жидкость, полученную из жидкого стекла и воды. Электролит получают разбавлением жидкого стекла модулем 2,25 ... 2,75 и плотностью 1,43 ... 1,55 г / см³ дистиллированной водой. Пропорции должны быть такими, чтобы плотность рабочей жидкости составляла 1,28 ... 1,32 г / см³ для резки и 1,36 ... 1,38 г / см³ для заточки.

Несмотря на свою универсальность и преимущества, водный раствор жидкого стекла также имеет недостатки - высокая липкость и быстрое затвердевание, когда он попадает на оборудование и одежду рабочего. Но ни один из других электролитов не заменяет жидкое стекло в условиях электроэрозионной обработки по производительности и качеству обработки при использовании металлического инструмента.

Снижение липкости может быть достигнуто за счет снижения плотности электролита. Однако производительность обработки несколько

снижается. Рябинок А.Г. [123], исследуя влияние, установила следующее. Уменьшение плотности силикатного электролита с 1,36 до 1,20 г / см³ благодаря скорости удаления при электроэрозионной обработке твердого сплава на 30%. Максимальная производительность достигать 1,3 ... 1,38 г / см³. Дальнейшее увеличение плотности электролитов приводит к уменьшению подвижности, что обеспечивает интенсивность образования анодированных фильмов и скорости удаления, а также приводит к увеличению прилипания электролита и скорости его затвердевания. Поэтому, несмотря на снижение производительности, автор рекомендует использовать электролиты с низкой плотностью.

При электроэрозионном химико-механическом хонинговании рабочего шлифовального электрода слоя электролита с поверхностью заготовки, отбирается по краю стержня, что значительно уменьшает количество электролита, попавшего в межэлектродный зазор. Поэтому, чтобы улучшить проникновение электролита в зазор между электродами, необходимо уменьшить плотность электролита, используемого для 1,15 ... 1,22 г / см³

Чтобы уменьшить плотность используемого электролита, существуют также предпосылки с точки зрения формирования шероховатости и специфического удаления металла. Электролит с высокой плотностью образует анодную пленку большой толщины на поверхности и приводит к уменьшению количества точек контакта «сетчатого» электрода, в результате чего плотность тока в точках контакта и, следовательно, мощность разряда увеличивается. Анодная пленка большой толщины также предотвращает размывание тепла электрического разряда по поверхности детали, что приводит к концентрации тепла и более полному выбросу расплавленного металла из скважины. В этих условиях высота шероховатости поверхности увеличивается, а толщина и непрерывность белого слоя уменьшается. В то же время удаляется также конкретное удаление металла.

При дальнейшем уменьшении плотности электролита до 1,05 ... 1,1 г / см³ анодная пленка становится слишком тонкой, неустойчивой и легко

удаляется прибором на больших площадях, что приведет к короткому замыканию и процессу нарушения. Это уменьшит шероховатость, специфическое удаление, толщину и непрерывность белого слоя. Суммируя вышеизложенное, можно отметить, что природа зависимостей вышеуказанных параметров от плотности электролита должна быть исследована экспериментально.

Чтобы уменьшить липкость и уменьшить загрязнение оборудования, рекомендуется также добавить глицин или трансформаторное масло в раствор.

В дополнение к уменьшению липкости добавление глицерина может облегчить перенос металла электродного инструмента на поверхность детали, как в латуни. Глицерин ослабляет и восстанавливает оксидные слои металла инструмента и детали, что приводит к появлению адгезионных связей и образованию покрытия. При отделении деталей содержание глицерина в рабочей жидкости может варьироваться от 30 ... 100%. Однако, когда латунные литые чугуны, сильно хромистые и хромоникелевые стали, глицерин не может ослабить и восстановить более плотные и сильно связанные с оксидами исходных металлов, состоящими из соединений хрома и других элементов. Поэтому к глицерину добавляются активаторы (хлорид цинка, хлористоводородная, ортофосфорная, серная и другие кислоты), которые восстанавливают оксиды на поверхности детали и облегчают селективную передачу инструментального металла на деталь. Когда латунный перлитовый чугун рекомендовал добавить 4 ... 10% раствор соляной кислоты [35].

С ЭЭХМХ содержание глицерина рекомендуется в пределах 5 ... 10% об. [45, 13]. Для улучшения трения количество глицерина в электролите должно быть увеличено. Однако слишком много глицерина, очевидно, уменьшит производительность обработки.

Исходя из всего вышеизложенного, мы использовали электролит на основе жидкого стекла с добавлением глицерина и хлорида натрия для

проведения ЭЭХМХ. Содержание глицерина должно быть таким, чтобы улучшить осаждение инструмента металлического электрода на поверхности детали в доводном режиме без тока при достаточной эффективности ЕЕССМ. Оптимальное содержание глицерина и активаторов должно определяться экспериментально.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Программа экспериментальных исследований

В соответствии с поставленными задачами, во время работы были проведены экспериментальные исследования для проверки достоверности теоретических допущений и определения характера влияния факторов на процесс электроэрозионно-химического механического хонингования.

В экспериментальную исследовательскую программу были включены следующие темы:

1. Разработка принципиальной схемы экспериментальной установки для электроэрозионно-химическо-механического хонингования гильз цилиндров автомобильных тракторных двигателей с целью повышения их износостойкости после ремонта.
2. Определение границ изменения параметров процесса электроэрозионно-химическо-механического хонингования гильз цилиндров автомобильных тракторных двигателей.
3. Исследование влияния отдельных факторов на процесс обработки.
4. Исследование влияния рассматриваемого метода обработки на микрогеометрию и некоторые физико-механические свойства поверхности.
5. Проведение сравнительных испытаний на износостойкость поверхностей, обработанных электроэрозионно-химическим-механическим хонингованием и абразивным хонингованием.

3.2. Методы экспериментальных исследований

Как показывают многочисленные исследования жизни пары поршневых колец, гильза цилиндра во многом зависит от физических и механических свойств и микрогеометрии поверхностей трения. Поэтому

изучение этих параметров при изучении химиихимического хонингования электроэрозии является важной задачей.

Любой способ обработки может быть оценен по нескольким показателям, характеризующий этот метод. В качестве индикаторов контроля при оценке метода электроэрозионно-химического механического хонингования использовались:

- шероховатость поверхности гильз цилиндров;
- специфическое удаление металла;
- износостойкость обрабатываемой поверхности.

На основе проведенных теоретических исследований и обзора научно-технической литературы было выявлено несколько факторов, влияющих на процесс анодно-механического хонингования:

- плотность электролита;
- сила тока;
- напряжение;
- электродный материал инструмента.

В качестве рабочей жидкости использовались водные растворы силиката натрия (жидкое стекло) (ГОСТ 13078-81) с плотностью 1,15, 1,22, 1,29, 1,36 г / см³. Плотность рабочей жидкости определяли с помощью денсиметров (ГОСТ 1300-57) с делением 0,001 г / см³.

Электродные инструменты изготавливались из различных металлов: медь М1 (ГОСТ 859-78), латунь ЛС-63 (ГОСТ 15527-78), сталь 3 (ГОСТ 380-94), алюминий А7 (ГОСТ 11069-74), чугун МФ 24 -44 (ГОСТ 1412-85) и другие.

Образцы и хонинговальные бруки перед экспериментом промывали ацетоном, сушили в шкафу при температуре 60 ... 80 ° С в течение 15 ... 20 минут и взвешивали по шкале VLR-200 (с точностью до $\pm 0,1$ мг). После обработки гильзы промывали горячей водой, затем ацетоном и снова взвешивали.

Удельное удаление металла оценивалось по количеству металла (в граммах), взятому за единицу времени:

Удельный съём металла оценивался количеством металла (в граммах) снятого за единицу времени:

$$\dot{I} = \frac{Q_M}{T_o}, \quad (3.1)$$

где M – удельный съём металла, г/мин;

Q_M - масса снятого металла за время обработки, г;

T_o - время обработки, мин.

После этого из образцов вырезались сегменты для металлографических и других исследований.

Удельный износ ЭИ определялся по формуле:

$$m = \frac{q_0 - q_1}{T_o}, \quad (3.2)$$

где m – удельный износ ЭИ, г/мин;

q_0, q_1 – масса ЭИ до и после обработки, г.

Цилиндрические вкладыши перед экспериментами тщательно очищали от загрязнений и подвергали микрометрии. Затем лайнеры обрабатывались анодно-механически в различных режимах. После отключения технологического тока насос проводился в другое время для удаления анодной пленки с поверхности.

Удаление металла определяли путем измерения диаметров рукавов в трех плоскостях и пяти секциях с индикатором NI 50-100-1 по ГОСТ 868-82 с делением 0,01 мм до и после хонингования.

Удельное удаление металла определяли по формуле (3.1).

Вес удаляемого металла Q_m рассчитывали по формуле:

$$Q_m = V_m \cdot \gamma, \quad (3.3)$$

где V_m - объем удаляемого металла, см³;

γ - плотность металла гильзы, г / см³.

Объем удаляемого металла определяли по формуле:

$$, \quad (3.4)$$

где L - длина обработанного цилиндра, мм;

D_0 - диаметр цилиндра перед обработкой; мм;

D_1 - диаметр отверстия после обработки, мм.

Шероховатость поверхности определялась на профилограммах, полученных на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P (Япония) до и после оттаивания. Шероховатость измерялась в двух плоскостях и пяти срезах в точках, где был измерен диаметр. Перед измерением диаметров и шероховатости обработанные вкладыши промывали в горячей воде $150 \dots 60^\circ \text{C}$ и сушили в шкафу при температуре $60 \dots 80^\circ \text{C}$ в течение $15 \dots 20$ минут.

Скорость возвратно-поступательного движения считается минимальной ($8,1 \text{ м / мин}$), чтобы уменьшить инерционную нагрузку на привод. Чтобы установить и контролировать значение скорости вращения инструмента, магнитный тахометр IO-30 использовался с точностью 2%.

Величину тока короткого замыкания и напряжения холостого хода определяли по амперметрам и вольтметрам, выполненным в соответствии с ГОСТ 8711-60 (точность 1,5%).

Удельное давление электродного инструмента на заготовке с плоским анодно-механическим хонингом определялось по формуле:

$$P = p / F_k, \quad (3.5)$$

где p - среднее значение силы зажима ЭИ для части Н;

F_k - площадь контакта, м^2 .

Удельное давление электродного инструмента на обрабатываемой детали при обработке целых гильз определялось по формуле [30]:

$$, \quad (3.6)$$

где S , - площадь поршня, м^2 ;

p_c - давление сжатого воздуха в цилиндре, МПа;

f - коэффициент передачи усилий от стержня цилиндра к штифту, нажимая головку конусного валика;

F_k - площадь стержней рабочей поверхности EI, м^2 ;

α - угол наклона конусного генератора к оси конического ролика;

θ - угол трения материалов конуса и конуса.

Манометром контролировалось давление сжатого воздуха в цилиндре. Площадь рабочей поверхности ЭИ определялась по формуле (2.14).

3.2.1 Объект исследования

В качестве объекта для исследования процесса электроэрозионно-химического механического хонингования использовались гильзы цилиндров двигателя ZMZ-511.10 с учетом широкого использования транспортных средств с этим двигателем. Кроме того, эти рукава небольшого размера, что снижает сложность и стоимость экспериментальных исследований.

Цилиндрические вкладыши ZMZ-511.10 изготовлены из не подвергнутого термической обработке чугуна марки ИЧГ-33М с твердостью HB-217-241. Химический состав чугуна в%: С - 3,0 ... 3,8; Mn - 0,5 ... 0,5; Si - 0,5 ... 3,0; Ni-ур до 0,10; Cr -0,5 ... 0,6; P-0,2 ... 0,4; S до 0,12; Cu - 0,5 ... 0,8 [68]. Прочность на разрыв чугуна составляет 240 МПа, а изгиб - 440 МПа.

3.2.2 Описание установки для лабораторных исследований анодно-механического хонингования

В связи со значительной трудоемкостью, продолжительностью и стоимостью экспериментальные исследования в крупном производстве интересны лабораторные методы исследования.

Общий вид установки показан на рисунке 3.1. Исследования проводились на модернизированной вертикальной хонинговальной машине 3В833, дополненной источником постоянного тока, токоведущими проводами, электрическим измерительным и коммутационным оборудованием и технологическим оборудованием. В кинематической схеме базовой машины никаких изменений не было внесено



а) электрический щит
установки



б) механическая часть

Рисунок 3.1 – Общий вид установки ЭЭХМ хонингования

Машина оснащена пневматическим цилиндром, который работает от пневматической сети лаборатории через воздушный транспорт и редуктор с манометром.

Для обеспечения подачи электрического тока было создано, изготовлено и собрано токоприемное устройство на кронштейне хонинговальной машины. Устройство состоит из узла щетки и медного кольца, прижатого к валу пневматического цилиндра. Для обеспечения надежного питания тока пневматический цилиндр подключается к хонголке гибкими токопроводящими шинами.

На столе станка установлен проводник с корпусом на стальном основании. Проводник опирается на текстолитовый лист и крепится к столу с помощью зажимов через текстолитовые стержни, которые обеспечивают электрическую изоляцию проводника. Крепление обработанной втулки осуществляется путем нажатия на нее изолированными язычками через токоподводящее кольцо, которое соединено с положительным полюсом источника тока. Корпус проводника имеет передник, вдоль которого рабочая жидкость течет обратно в резервуар.

Машина оснащена дополнительным резервуаром для электролита. Это делается для предотвращения загрязнения резервуара продуктами разложения жидкого стекла. Бак состоит из корпуса, верхней пластины и электрического насоса. Корпус имеет внутреннюю перегородку, которая делит ее на приемный отсек и отсек для насоса. Электролит поступает сначала в приемный отсек, где металл и другие загрязняющие вещества падают на дно, а затем выливают перегородку и поступают в насосную комнату. Подача электролита регулируется краном.

Напряжение от сети через коммутатор и предохранители подается на первичную обмотку выпрямительного блока. Выпрямители подключены к аккумулятору, что позволяет вам регулировать выходное напряжение батареи, как путем изменения количества рабочих источников, так и напряжения каждого выпрямителя путем изменения переключателей.

Для измерения значения технологического тока установлены вольтметры.

Ток регулируется в широком диапазоне реостатом R4. Ток измеряется с помощью амперметров с пределами измерения 500А, 300А, 200А, 100А и 30А. Для повышения точности измерения значений тока и напряжения используется контурный осциллограф Н-115 с системой шунтов и гальванометров.

Установка работает следующим образом. Втулка, подлежащая обработке, фиксируется в проводнике, изолированном от веса машины. При

нажатии на гильзе цилиндра с язычками зажима проводника через токоподводящее кольцо, которое подключено к положительному полюсу источника питания, ток подается на деталь. Зажимное усилие должно быть достаточным для надежного электрического контакта. Кроме того, хонинговальная головка вставляется в отверстие обрабатываемой муфты и включает в себя ее возвратно-поступательное и вращательное движение. Одновременно с активацией вращательного движения начинается подача рабочей жидкости в зону обработки. Подача рабочей жидкости осуществляется по нескольким схемам: полив из шланга; полив из сопла много сопел; кормление снизу является центральным; погружение. Затем, чтобы отвинтить хонинговальные головки, необходимо включить сжатый воздух в пневматический цилиндр, поворачивая ручку пневматического крана, поршень и стержень которого, действуя на передающий механизм, будут перемещать стержень хонголки. Последний расширяет кольцевые пружины хонгулки и нажимает колодки с брусками на обрабатываемую поверхность. Прижимное усилие регулируется путем изменения давления в пневматическом цилиндре с помощью редуктора.

Затем к обрабатываемой детали и инструменту применяется технологический ток, для которого электрическая цепь закрывается с помощью переключателей. Ток течет через щеточное устройство и медное кольцо, прижатое к валу пневматического цилиндра, дополнительные отводящие токи и далее к катодным пластинам и хонинговальным головным блокам. Изменение напряжения рабочего тока осуществляется путем последовательного выключения выпрямителей из цепи. Ток регулируется реостатом. Амплитуды и вольтметры использовались для установления и контроля значений тока и напряжения.

В конце эксперимента необходимо отключить технологический ток и подачу воздуха в воздушный цилиндр. Затем выньте хонголку из отверстия втулки, нажав кнопку «Конец цикла» на пульте дистанционного управления.

В то же время вращательное движение хонголовки и подача рабочей жидкости будут обрезаны.

Используемым инструментом была модернизированная стандартная хонинговальная головка (рис. 3.2). Для предотвращения контакта тела хонинговальной головки пластинчатые пластины фиксируются на корпусе. Катодные пластины установлены на корпусе для возможности изменения зазора между корпусом хонинговальной головки и обрабатываемой поверхностью. Электроды установлены на держателе, изготовленном из электроизоляционного материала. Подача тока на металлические бруски производится отдельным токопроводом. Корпус головки электрически изолирован от провода пластиковой втулкой, и ток подается на корпус головки с помощью отдельного провода.



Рисунок 3.2 - Общий вид хонинговальной головки

Перед обработкой все стержни были закреплены на хонголовке, которая была установлена на специальной оправке (рис. 3.3). Затем поверхность стержней поворачивали на токарном станке до тех пор, пока следы необработанной поверхности не удалялись (рис. 3.4).



Рисунок 3.3 –Оправка для
токарной
обработки хонинговальных брусков



Рисунок 3.4– Общий вид
головки
после токарной обработки

3.2.3 Методология исследования микроструктуры

Секции размером $11 \times 11 \times 5$ были отрезаны от образцов электроэрозионно-химико-механического хонингования, обработанных вручную. Шлифование секции проводилось на вращающемся абразивном колесе с охлаждением и низким давлением. Перегрев образца не допускается. Плоская поверхность была получена без засоров [165]. Затем образец тщательно промывали водой и полировали на круге войлока (20 ... 140 рад / с). Для полировки использовалась паста GOI. После полировки секцию промывали водой, затем спиртом и сушили, нанося на фильтровальную бумагу.

Чтобы выявить микроструктуру материала, микрошлифы были вытравлены в 4% -ном растворе азотной кислоты в этиловом спирте. После этого сначала промывают водой, а затем протирают спиртом и сушат.

Как показали предварительные эксперименты, «белый» слой не приводит к травлению в этом электролите. Для выявления структуры

«белого» слоя использовали электролитическое травление в 10% -ном водном растворе ангидрида хрома.

Структура микроструктуры изучалась на металлографическом микроскопе МИМ-7 при различных увеличениях ($\times 70$, $\times 130$, $\times 200$, $\times 360$, $\times 500$, $\times 1080$). Полюсы были сфотографированы в светлом и темном освещении с помощью микрофотосъемки MFN-3 с камерой Zenit на пленке FN-64 ГОСТ 24876-81.

Кроме того, металлографические исследования проводились в Лаборатории физики металлов канцелярии Главного металлурга ОАО «КМПО» на металлографическом микроскопе «Эпиквант». Кроме того, поверхность образцов исследовали на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM6460-LV.

Толщину упрочненного слоя измеряли на фотографиях, сделанных с помощью металлографического микроскопа при различных увеличениях. Толщина слоя измерялась в пределах 0,5 ... 10 мкм, в зависимости от увеличения микроскопа.

Толщину белого слоя h_{bc} определяли по формуле:

$$h_{bc} = h/V_g, \quad (3.7)$$

где h_{bc} - толщина белого слоя по фотографии, мм;

V_g – увеличение изображения.

При оценке сплошности «белого» слоя по фотографии микрошлифа определяли протяженность слоя и общую протяженность исследуемого участка. Сплошность слоя определяли по формуле:

$$\tilde{N} = \frac{L_{AN}}{L_{AU}} 100\%, \quad (3.8)$$

где S – сплошность слоя, %;

L_{BC} – суммарная протяженность белого слоя, мм;

$L_{ОБЩ}$ – общую протяженность исследуемого участка, мм.

3.2.4. Метод определения микротвердости поверхностного слоя

Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76 на устройстве ПМТ-3 с накладной нагрузкой 0,98 Н. Перед проведением измерений поверхность секции была тщательно отполирована и обезжирена. Расстояние от края образца и между соседними отпечатками было как минимум двумя диагоналями больше, чем печать [40].

Значение микротвердости рассчитывали по формуле:

$$HV = 1,854 * P / d^2, (3,9)$$

где HV - твердость;

P - номинальная нагрузка (на 10 ... 15 с) на алмазный наконечник (тетраэдрическая пирамида с квадратным основанием), Па;

d - среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка, измеренное с помощью фотоэлектрического микрометра FOM -2-16, мм.

Количество секций было подготовлено из расчета 3 штук для каждого эксперимента. В каждом разделе повторяемость измерений трижды, после чего было получено его среднее значение. Затем, данные были построены с графиками $HV = f(h)$, где h - расстояние от края образца (мм).

3.2.5. Метод исследования микрорельефа поверхности

Поверхности, полученные электроэрозионно-химико-механической обработкой, представляют собой комбинацию большого числа отверстий, перекрывающихся друг с другом и нерегулярно расположенных в пространстве.

При изучении микрорельефа поверхности были зафиксированы следующие параметры:

- высота шероховатости профиля Rz и Rmax;
- глубина скважины hl;
- диаметр отверстий dl;
- длина контрольного профиля tp.

Измерения шероховатости проводились на профилографе Mitutoyo SJ-201P (Япония) (рисунок 3.5).



Рисунок 3.5 - Общий вид профилометра Mitutoyo SJ-201P.

Этот SJ-201P оценивает различные параметры шероховатости, имеет широкий диапазон измерения до 350 мкм (от -200 мкм до +150 мкм) и отображает структуру поверхности с использованием различных параметров шероховатости. Результаты измерений согласуются со многими стандартами, включая новый JIS (JIS-B-0601-1994), старый JIS (JIS-B-0601-1982), DIN, ISO и ANSI. Результаты измерений отображаются на большом легко читаемом жидкокристаллическом дисплее. Если устройство подключено к компьютеру, его можно контролировать (для вывода данных или команд измерения) через интерфейс RS-232C. Запись проводилась с использованием иглы 2 мкм. Точность устройства составляет 2 ... 3%.

Расход масла на поверхности определялся методом расчета в соответствии с международным стандартом DIN EN ISO 13565-2: 1998.

В настоящее время, качество поверхности обычно оценивается с использованием кривой опорной поверхности (кривая Аббота), который стоил по профилограмм. В соответствии с международным стандартом DIN EN ISO 13565-2: 1998, с этой кривой определяются следующие параметры: уменьшенная высота пика Rpk ; основная глубина шероховатости Rk ; Уменьшенная глубина полости Rvk ; заполненный пиковым профилем материала A1 (в $\mu\text{м}^2 / \text{мм}$); заполненный смазочным профилем A2 (в $\mu\text{м}^2 / \text{мм}$); материальная доля $Mr1$ (отношение материала в% от линии

пересечения, которая отделяет выдающиеся пики от основного профиля шероховатости); материальная доля Mr_2 (отношение материала (в%) линии пересечения, которое отделяет глубокие углубления от основного профиля шероховатости).

На рисунке 3.6 показана диаграмма для определения вышеуказанных параметров Аббота

Рисунок 3.6 - Схема расчета параметров поверхностного микропрофиля

Через точки А и В, которые отличаются на 40% от коэффициента кривизны m_r , прямая линия рисуется в центральной части кривой Аббота. Глубина сердцевины профиля R_k представляет собой расстояние между ординатными значениями точек С и D, которые определяются на пересечениях линии АВ с вертикальными линиями $m_r-0\%$ и $m_r-100\%$. Параметры R_{pk} и R_{vk} берутся как высоты прямоугольных треугольников (CHJ и DEG), построенных по принципу, что они имеют ту же площадь, что и «площадь пика» CHI и «область депрессии» DEF соответственно, A1 и A2 - области этики треугольников, Mr_1 и Mr_2 являются основами треугольников.

Используя кривую аббота, можно также оценить расход масла на поверхности, который называется объемом масла V_o и определяется замкнутой зоной EFD и измеряется в mm^3 на $1\ cm^2$ поверхности.

Все эти параметры автоматически определяются современными профилометрами-профилографами, например, Mitutoyo SJ-201P (Япония). Определение емкости масла с помощью этого устройства занимает всего 1 ... 1,5 минуты.

3.2.6 Метод лабораторных испытаний на износостойкость

Для изучения влияния анодно-механического хонингования на триботехнические характеристики обработанных поверхностей были проведены сравнительные испытания образцов, обработанных методом ЕЕСММ и методом хонингования алмазов.

Анализ лабораторных испытаний износостойкости показал, что следующие характеристики поверхности соответствуют наиболее полным эксплуатационным характеристикам гильз цилиндров: времени срабатывания, износостойкости, скорости износа используемой поверхности и противодавления.

Цель триботехнических испытаний образцов, отобранных различными методами, заключалась в определении:

1. Интенсивность износа.
2. Время выполнения.
3. Выносливость.

Лабораторные испытания проводились на фрикционной машине 77 МТ-1 (рисунок 3.7), что позволяет воспроизводить обратимый характер движения и использовать образцы, изготовленные непосредственно из серийных рукавов и поршневых колец. Триботехнические характеристики стандартных ГЦ и ГЦ после АМХ.

Испытания пары пробоотборников проводились со скоростью скольжения 0,026 ... 0,107 м / с, частотой 100 ... 400 двойных ударов в минуту. В качестве смазки использовалось моторное масло М-8Б (ГОСТ 10541-78), которое подавалось в зону трения в количестве 1 капли смазки на 200 м пути трения. Именно это количество смазки соответствует режиму смазки границ, когда двигатель автомобиля работает на холостом ходу, с интенсивным износом рукава и поршневым кольцом [204].

Для сегментов образца $60 \times 25 \times 5$ мм были вырезаны из гильзы цилиндра двигателя ЗМЗ-511.10. Сегменты поршневого кольца (верхнее поршневое кольцо использовалось из чугуна, покрытый гладким хромом и без него), толщиной 10 мм и толщиной 2 мм, служил в качестве контртела соответственно, площадь контактного трения составляла 20 мм².



Рисунок 3.7 - Общий вид машины 77 МТ-1.

Испытания на прочность были проведены в два этапа. На первом этапе - ступенчатая загрузка пары с удельными нагрузками 0,5; 2,5; 4 и 5,5 МПа. Удельная нагрузка 0,5 МПа соответствует давлению поршневого кольца на стенке облицовки от его эластичности [204]. Давление 2,5 МПа соответствует режиму горячего обкатки без нагрузки, давление 4 МПа - горячий ход с нагрузкой и давление 5,5 МПа - работают при номинальной нагрузке. Продолжительность каждого этапа составляет 15 минут. В каждом эксперименте конец периода запуска контролировался стабилизацией температуры. После этого были сделаны профилограммы траекторий трения и определялись износ образца и тела каждые 15 минут. Износ оценивался гравиметрически с использованием весоизмерительной машины VLR-200 с величиной деления 0,1 мг. Перед взвешиванием образцы и протирка промывали в бензине В-70 и ацетоне, а затем сушили в сушильном шкафу при температуре 60-80 ° С в течение 30-40 минут. После этого они снова были установлены на машине, а использованные пары не были обезличены.

Каждый эксперимент повторяли 3 раза. Ошибка измерения не превышала 5% при уровне достоверности 0,95. Затем мы построили зависимость износа от времени. На втором этапе 24-часовые испытания

проводились при нагрузке 5,5 МПа. Первые 3 часа испытаний на износ измеряли каждые 20 минут, а затем каждые 5 часов.

Сопротивление износу поверхностей определялось по времени воздействия нагрузки без подачи дополнительной смазки до начала установки и заточки, что было зафиксировано резким увеличением шума, вибрации и температуры поверхности. Исследования [35] показали, что в этом случае на поверхности образца и контртела появляются смятые, расплавленные области и полосы светлого и темно-коричневого цвета вдоль направления скольжения, что аналогично случаям сжигания поршневых колец в ICE.

Температуру поверхностей трения регистрировали цифровым мультиметром DT-838, оснащенный термопарой для измерения температуры в диапазоне от -20 до 1357 ° С с точностью $\pm 3\%$. Чтобы измерить температуру, в образце было сделано слепое отверстие, и термопару хром-копеллер спаивали на глубину 0,5 мм от поверхности.

Сопротивление тележки определяли с момента достижения температуры 403 К со скоростью скольжения 0,107 м / с и нагрузкой 5,5 МПа.

3.2.7 Планирование экспериментов

Чтобы изучить влияние каждого отдельного фактора на процесс обработки и установления оптимальных значений режима обработки, необходимо спланировать эксперименты. При изучении влияния одного или двух факторов на конкретный процесс лучше всего применять дисперсионный анализ. Но в случае изучения большего числа влияющих факторов общее количество возможных комбинаций значений факторов будет огромным, и, следовательно, время и стоимость будут увеличиваться.

В таких случаях используются методы планирования [21, 41 применения, которые распределяют факторы до более и менее значительных,

что резко сокращает количество экспериментов. матрицы приведены в приложении

3.2.8. Процедура обработки результатов и точности измерения

Данные микрометра и других измерений обрабатывались методами математической статистики [23]. Чтобы определить закон распределения его параметров, статистический ряд был разделен на интервалы и был представлен в виде графика. Параметры закона распределения были определены следующими формулами:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (\bar{x}_i - M)^2 \times n_i}{n}}, \quad (3.10)$$

где σ - среднеквадратичное отклонение;

\bar{x}_i - среднее значение интервала;

n_i - количество вариантов в интервале;

n - общее количество вариантов в серии;

M - среднее арифметическое ряда;

k - количество интервалов.

Ожидание было определено из выражения:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^k x_i n_i}{n}, \quad (3.11)$$

где m - математическое ожидание.

Соответствие выбранного закона статистическому распределению проверялось в соответствии с критерием Пирсона:

$$\chi^2 = \sum \frac{(m_i - n * p_i)^2}{n * p_i}, \quad (3.12)$$

где p_i - теоретическая вероятность случайной величины в интервале;

m_i - количество значений в интервале.

Точность измерений оценивалась по коэффициенту вариации и по наибольшей возможной ошибке. Коэффициент вариации определялся по следующей формуле [23]:

$$V = \frac{\sigma}{M}, (3,13)$$

где V - коэффициент вариации;

σ - среднеквадратическое отклонение;

M - среднее арифметическое ряда.

Наибольшую возможную ошибку определяли из следующего выражения [23]:

$$\Delta n (M) = 3\sigma (3.14)$$

Определение погрешности измерения, повторение экспериментов и количество измерений для получения достоверных данных были определены методом Г. В. Веденяпина [23], в зависимости от погрешности эксперимента, выраженной в долях среднеквадратичного отклонения и указанная надежность. Метрика считается отклонением больше 3σ в ее значении. Такие измерения в дальнейших расчетах не учитывались. Для данной надежности 0,95% и наибольшей экспериментальной погрешности 3σ необходима тройная репликация экспериментов.

Ошибка измерения круговой скорости вращения электродного инструмента определяется по формуле:

$$\frac{\Delta V_{ok}}{V_{ok}} = \pm \left[\frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta n_1}{n_1} \right], (3,15)$$

где $\frac{\Delta D}{D}$ ошибка измерения диаметра 0,5 ... 1%;

$\frac{\Delta n_1}{n_1}$ - ошибка в измерении скорости инструмента, 1 ... 2%.

Общая погрешность измерения не превышает 3%.

Рабочие значения тока, напряжения и силы прижимания электродного инструмента к детали были записаны с использованием осциллографа линейной цепи

Н-115.

Ошибка определения значений рабочего напряжения определяется по формуле:

$$\frac{\Delta U_p}{U_p} = \pm \left[\frac{\Delta \ddot{I}}{\ddot{I}} + \frac{\Delta \dot{O}_o}{\dot{O}_o} \right], \quad (3.26)$$

где $\frac{\Delta \ddot{I}}{\ddot{I}}$ - предельная ошибка осциллографа 1,5...3%;

$\frac{\Delta \dot{O}_o}{\dot{O}_o}$ ошибка при тарировки гальванометра, 1...2%.

Суммарная ошибка при определении не превышает 5%.

Ошибка измерения толщины слоя определяется по формуле:

$$\frac{\Delta h_{\dot{a}\ddot{n}}}{h_{\dot{a}\ddot{n}}} = \pm \left[\frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta V_g}{V_g} \right], \quad (3.25)$$

где $\frac{\Delta h}{h}$ - ошибка измерения толщины по фотографии 1...2%;

$\frac{\Delta V_g}{V_g}$ - ошибка определения увеличения фотографии, 1...2%.

Общая ошибка измерения не превышает 4%.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4. 1 Результаты экспериментов по определению влияния плотности электролита

Целью исследования было установить характер влияния плотности электролита на процесс электроэрозионно-химическо-механического хонингования и качество обрабатываемой поверхности.

Серия экспериментов проводилась с электролитами с плотностью 1,05; 1,15; 1,22; 1,29 и 1,36 г / см³. Остальные факторы считались постоянными со следующими значениями: давление инструмента на заготовку $P = 1$ кг / см²; напряжение холостого хода источника питания постоянного тока $U_{xx} = 32$ В; сила тока короткого замыкания $I_{кз} = 150$ А; инструмент - медные стержни.

Результаты контрольной серии показаны на рисунках 4.1 и 4.2.

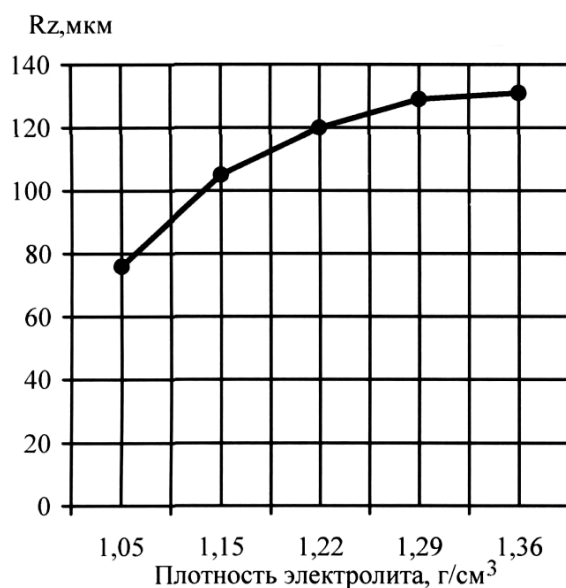


Рисунок 4.1 - Зависимости шероховатости от плотности электролита.

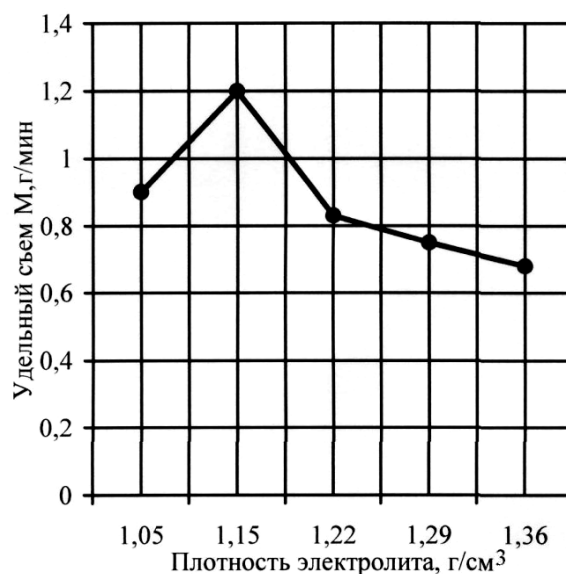


Рисунок 4.2 - Зависимости удельного съема от плотности электролита.

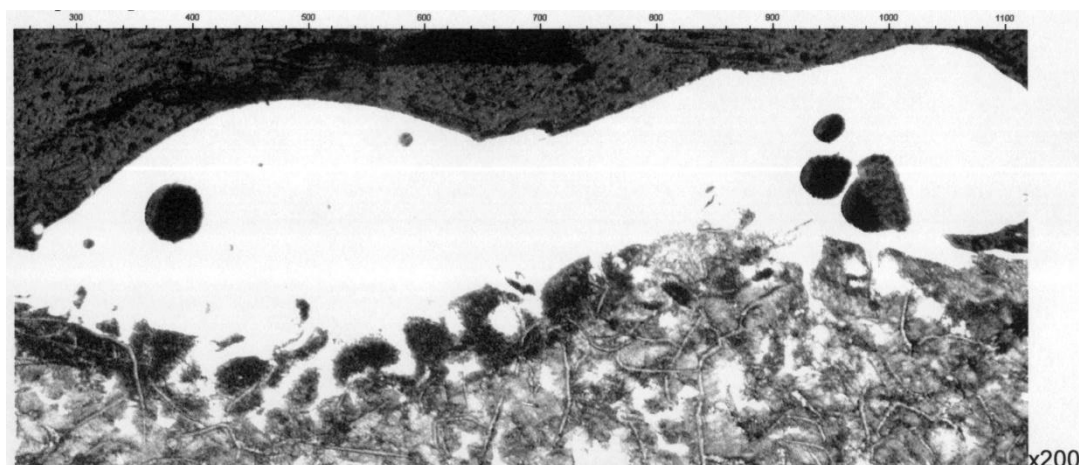
Как видно из представленных графиков, наибольшая толщина слоя была получена при плотности электролита 1,15 г / см³. Это можно объяснить следующим образом.

Электролит с более низкой плотностью лучше проникает в межэлектродный зазор и лучше охлаждает поверхность сформированной скважины. При этом анодная пленка является менее сильной, что способствует размыванию пятна выгрузки на обработанной поверхности и, соответственно, глубине эрозионных отверстий и уменьшению шероховатости.

При увеличении плотности электролита (и вязкости, соответственно) его вход в межэлектродный зазор уменьшается, в результате чего поверхностное охлаждение колодцев ухудшается. Это приводит к уменьшению градиента температуры в поверхностном слое анода и, соответственно, к уменьшению толщины «белого слоя». С другой стороны, увеличение плотности электролита приводит к увеличению толщины и прочности анодной пленки. Такая анодная пленка лучше изолирует смежные области поверхности и, следовательно, тепловую энергию разрядных концентраторов на меньшей площади, что способствует более интенсивному нагреванию микрообъемов и более полному высвобождению металла из скважины. Это увеличивает глубину отверстий и шероховатость поверхности, а непрерывность белого слоя уменьшается.

4.2. Результаты исследования микроструктуры и физико-механических свойств обрабатываемой поверхности

Как видно из приведенных выше данных, электроэрозионно-химическо-механическое хонингование металлическими брусками позволяет получить на обработанной поверхности белый слой (рис. 4.3) толщиной до 0,42 мм.



а)



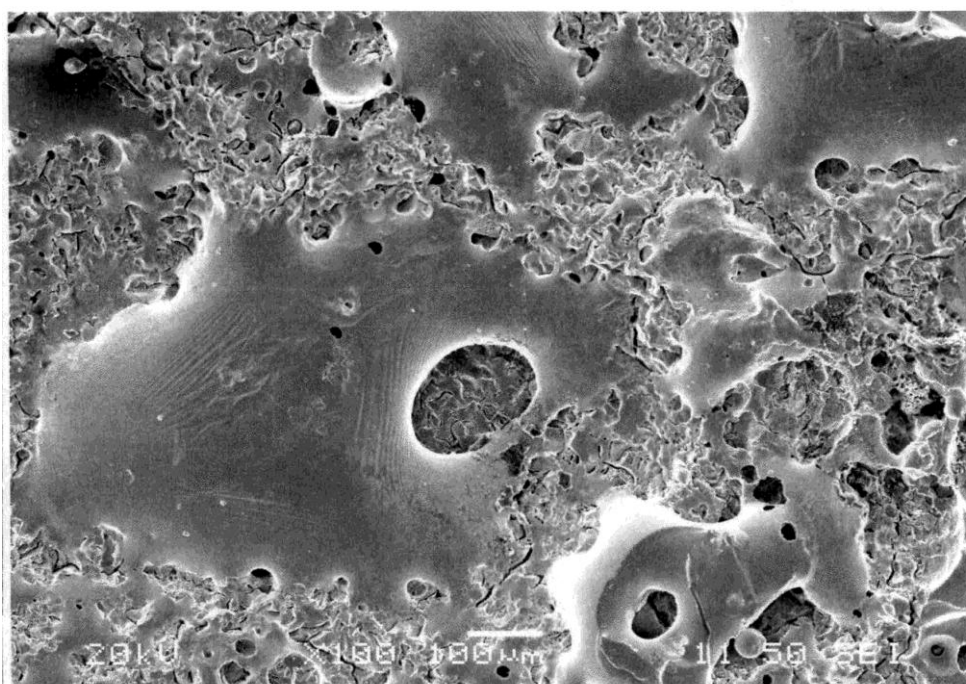
б)

Рисунок 4.3 - Белый слой с увеличением $\times 200$ (а) и $\times 250$ (б)

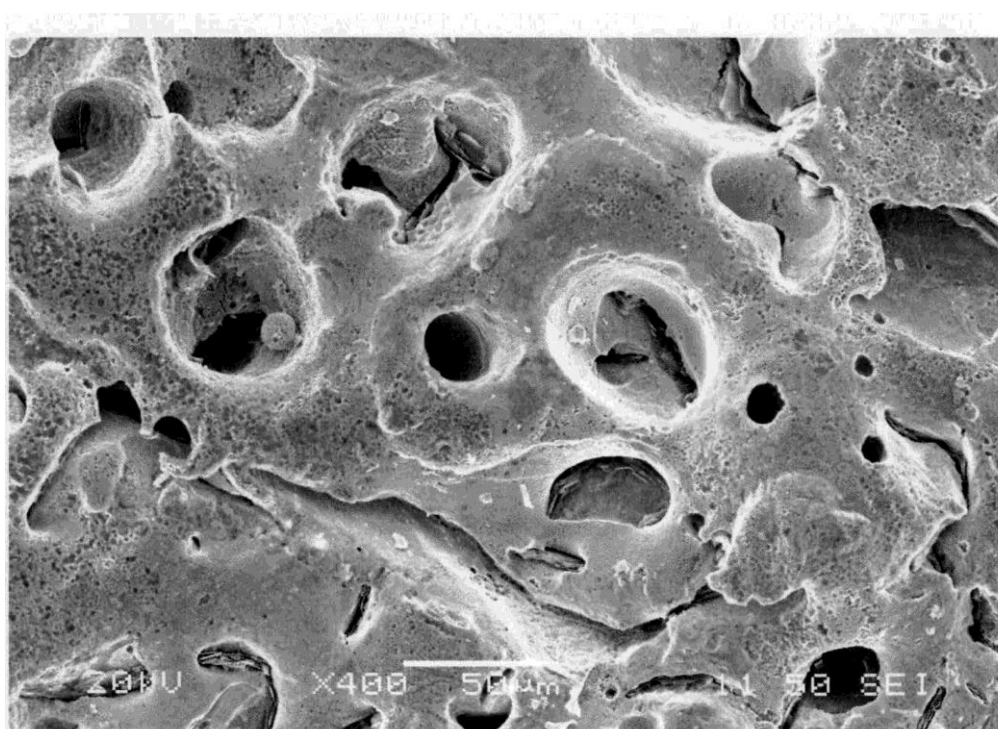
Белый слой имеет поры и трещины, связанные с перегревом металла во время плавления и его быстрым охлаждением.

Белый слой имеет неровную толщину и непрерывность. Максимальная непрерывность покрытия поверхности белым слоем при микроскопии составляет 98% для образцов эксперимента № 1.

При изучении поверхности образцов с использованием электронного микроскопа (рис.4.4) можно отметить, что поверхностный слой не обладает хорошей однородностью и непрерывностью.



a)



б)

Рисунок 4.4. Поверхности образца при увеличении $\times 100$ (a) и $\times 400$ (b)

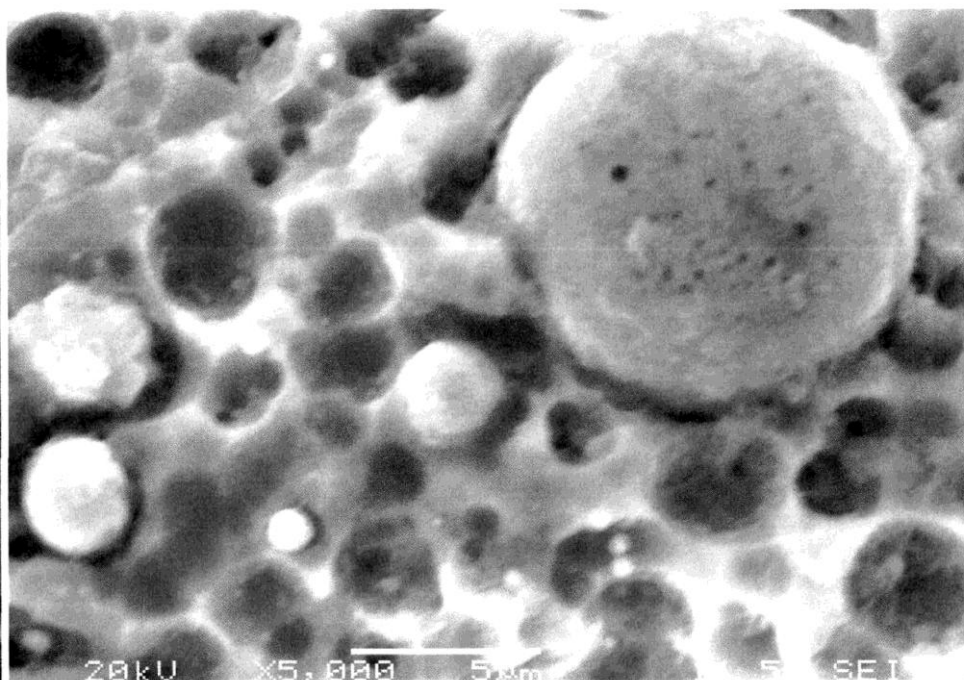


Рисунок 4.5 - Внешний вид с увеличением $\times 5000$

Обработанная поверхность представляет собой коллекцию эрозионных отверстий различной степени, заполненных металлической и анодной пленкой. Графитовые включения свободны.

На микрошлифах четко видны зоны распределения температуры. Как видно из рисунка 4.6, смежные лунки имеют разные размеры, что указывает на случайный характер образования электрических разрядов.

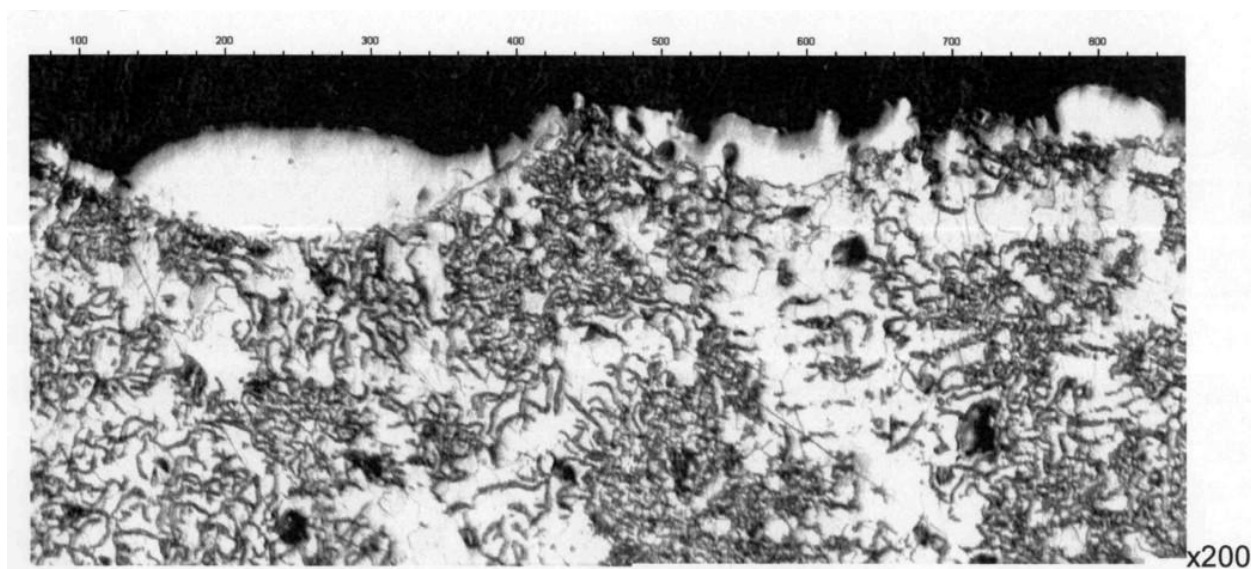


Рисунок 4.6 - Микрошлиф с увеличением $\times 200$.

Определение микротвердости поверхностного слоя проводилось (в соответствии с требованиями ГОСТ 9450-76) на устройстве ПМТ-3 с

удельной нагрузкой 100 г. Результаты измерений микротвердости приведены в Приложении К.

Как видно из приложения К, микротвердость после АМХ образцов, обработанных в разных режимах, значительно возрастает. Максимальное значение микротвердости Н100 достигает 450 МПа.

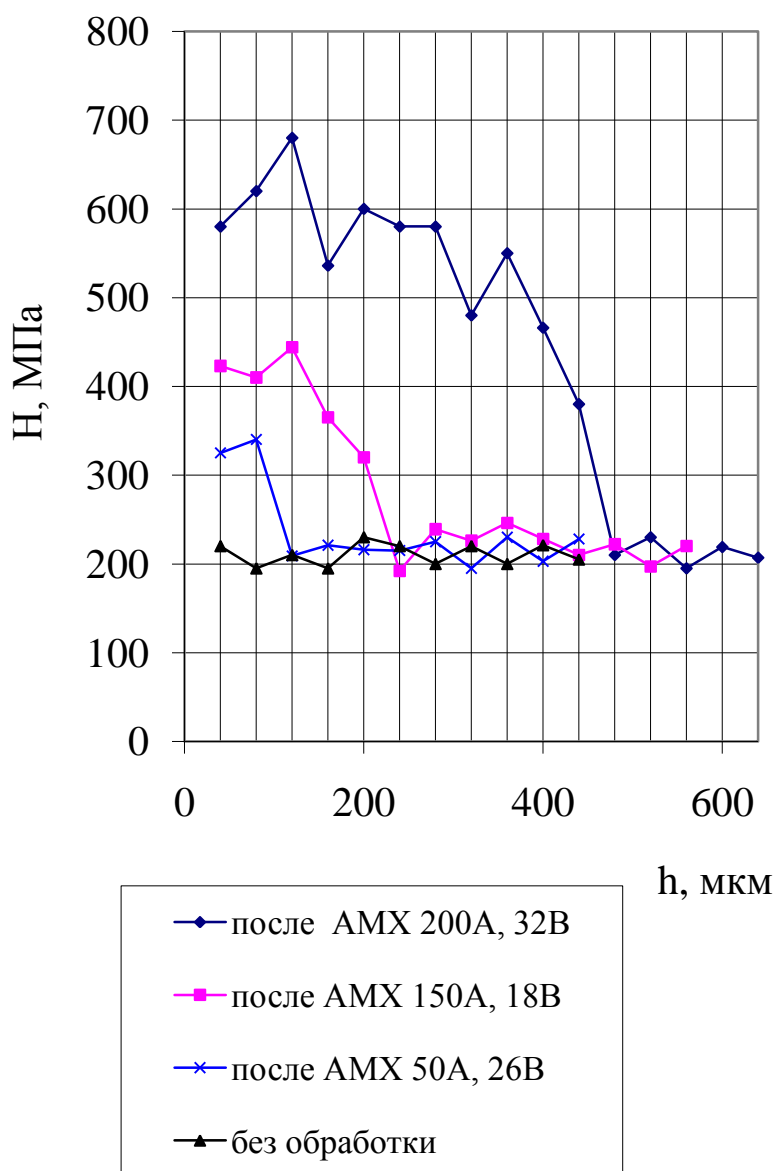


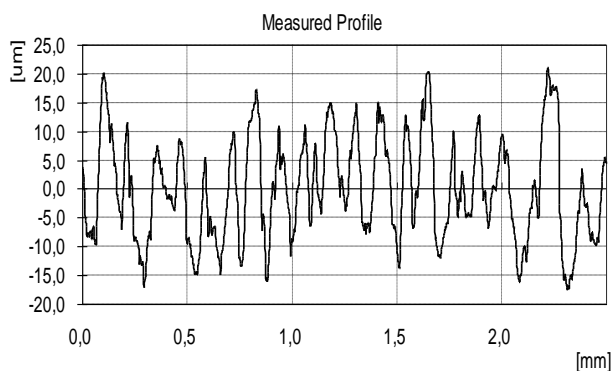
Рисунок 4.8. Изменение микротвердости H в глубине поверхностного слоя.

Шероховатость поверхности сильно зависит от тока и напряжения.

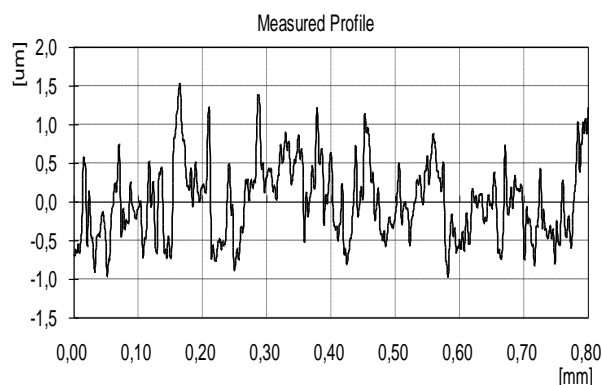
4.4. Результаты контрольной серии экспериментов по полномасштабному электроэрозионно-химическо-механическому хонингованию.

После проведения основной серии экспериментов мы решили выбрать электрические режимы так, чтобы белый слой с большой толщиной не появлялся на поверхности, а шероховатость R_z не превышала допустимого хонингования слева после растачивания (0,04 мм на сторону). Было также установлено, что наиболее значимыми факторами являются ток короткого замыкания и напряжение холостого хода. Наиболее рациональные значения удельного давления составляют 0,1 ... 0,15 МПа.

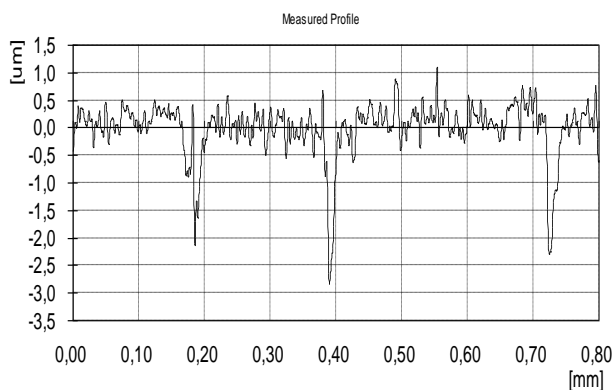
Матрица плана серии экспериментов приведена в Приложении М. Профилограммы поверхностей, обработанных различными методами, взятые с помощью профилографа-профилометра Mitutoyo SJ-201P, показаны на рисунке 4.9.



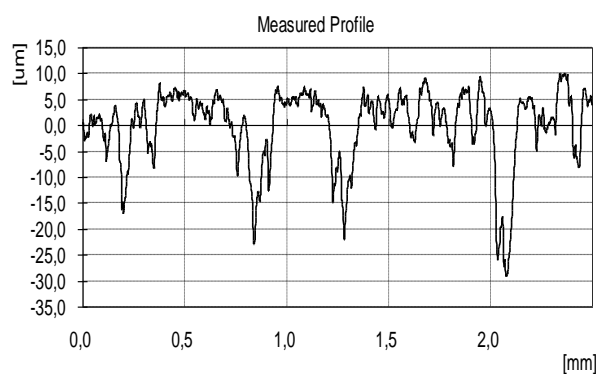
а) после расточки



б) после абразивного хонингования



в) микропрофиль после
плосковершинного хонингования



г) микропрофиль после АМХ

Рисунок 4.9 - Профилограммы поверхности после различных видов обработки.

Как видно из рисунка 4.10, микропрофили поверхностей после шлифовки с плоской вершиной (ПВХ) и АМХ представляют собой чередование относительно плоских областей и желобов для удержания смазки. Этот профиль аналогичен профилю, сформированному во время работы. В этом случае глубина полостей на поверхностях после АМХ больше, чем после абразивного хонингования и, соответственно, больший расход масла.

Численные значения индексов шероховатости, полученные с профилометром, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Значения показателей шероховатости после различных обработок

Наименование показателя	Ед. измер.	Вид обработки			
		расточка	абразивное 2-х кратное хонингование	плоско-вершинное хонингование	АМХ
Ra	мкм	6,96...7,68	0,18...0,32	0,30...0,57	2,52...2,81
Rz	мкм	38,15...67,31	1,98...3,14	2,81...5,04	15,76...30,29
$t50$	%	23...40	3...45	87...95	89...92
Rpk	мкм	8,19...11,92	0,30...0,44	0,23...0,40	1,48...1,52
Rvk	мкм	4,37...9,31	0,14...0,61	1,03...2,31	14,31...17,97
Rk	мкм	23,64...26,32	0,48...1,21	0,74...1,51	8,80...10,69
Vo	мм ³ /см ²	0,012...0,027	0,001...0,004	0,016...0,024	0,042...0,105

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что двукратное АМХ позволяет получить плосковершинную поверхность с наибольшей маслоскостью Vo порядка 0,052...0,105 мм³/см², что в 2..4 раза выше чем после плосковершинного хонингования при практически одинаковой опорной длине профиля поверхности.

Результаты опытов приведены на рисунках 4.10 и 4.11.

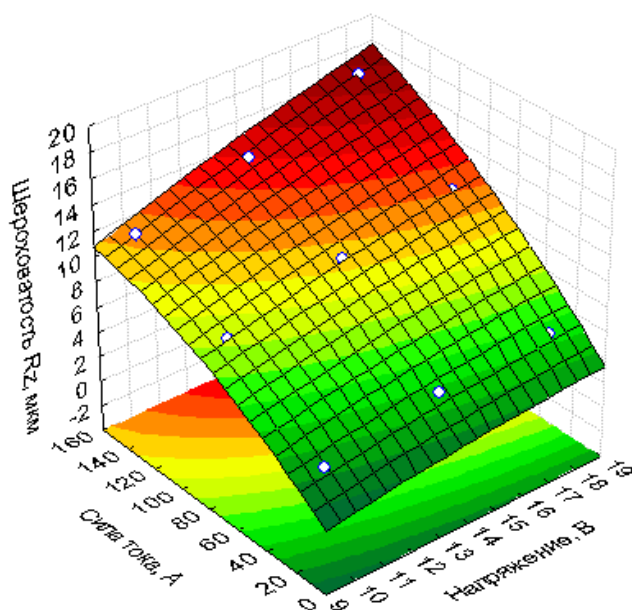


Рисунок 4.10 – Зависимость шероховатости Rz от и силы тока и напряжения

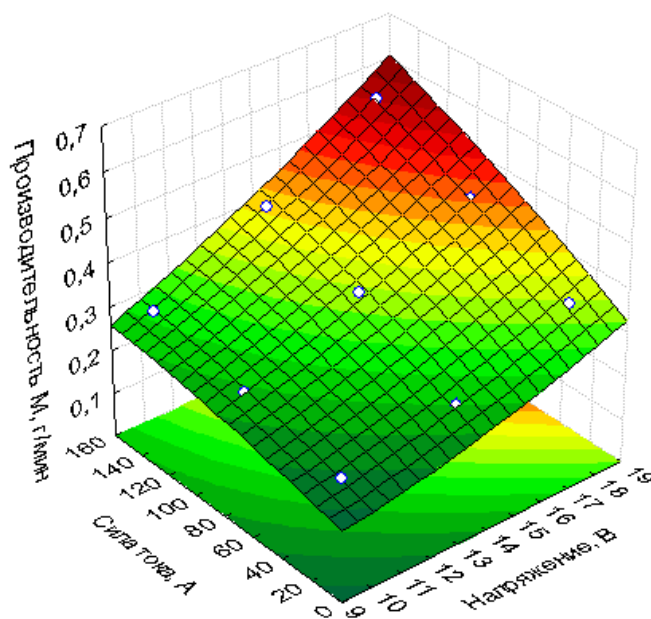


Рисунок 4.11 – Зависимость удельного съема металла от напряжения и силы тока.

Результате матобработки серии опытов по обработке гильз выведены зависимости следующие:

$$Rz = -2,93 + 0,56 \cdot Up - 0,0122 \cdot Up^2 + 0,07 \cdot Ip - 0,00023 \cdot Ip^2 + 0,00303 Up \cdot Ip, \quad (4.1)$$

$$M = 0,14 - 0,0039 \cdot Up + 0,00073 \cdot Up^2 - 0,000126 \cdot Ip - 0,0000019 \cdot Ip^2 + 0,0001154 Up \cdot Ip, \quad (4.2)$$

Используя полученные зависимости можно определить величину шероховатости и удельного съема металла в ходе анодно-механического хонингования.

По результатам экспериментальных исследований строим графики (рисунки 4.12 и 4.13). При следующих постоянных значениях других параметров $B=0,005\text{ м}$; плотность электролита 1200 кг/м^3 ; $V=1,58\text{ м/с}$.

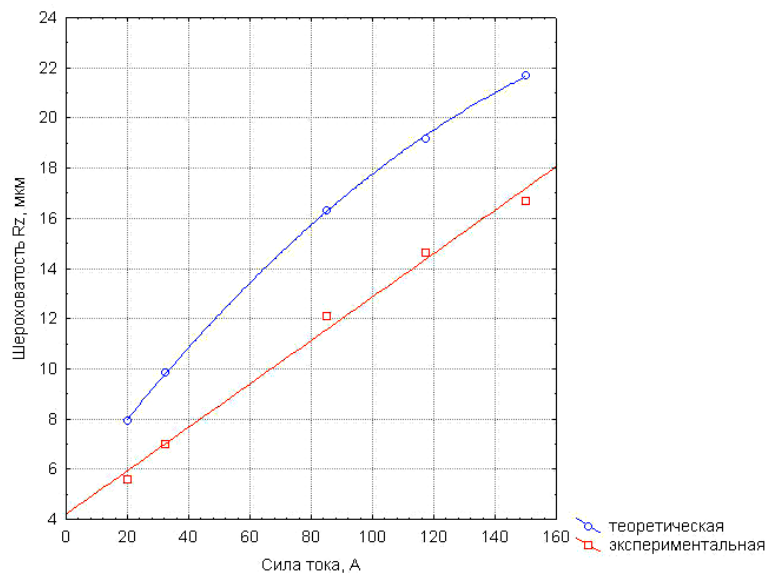


Рисунок 4.12 - Зависимость высоты шероховатости Rz от силы тока (при $U_p=18\text{ В}$).

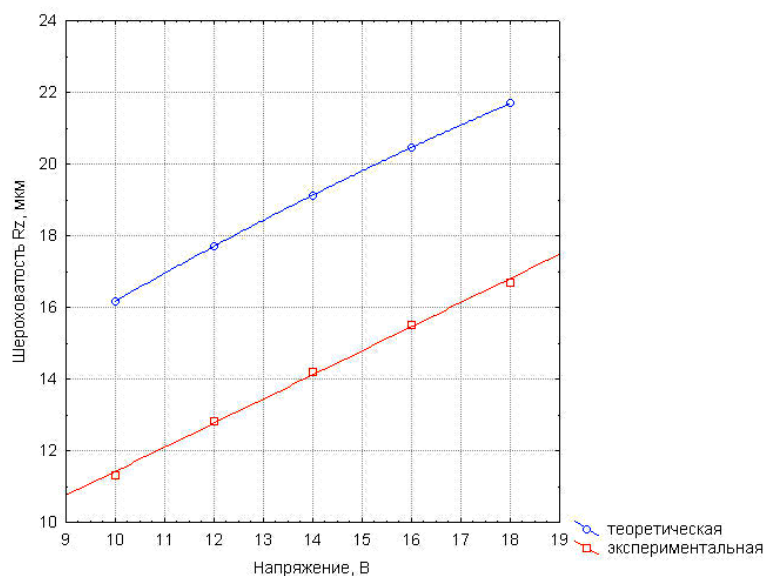


Рисунок 4.13 - Зависимость высоты шероховатости Rz от напряжения (при $I_p=150\text{ А}$). Полученные зависимости имеют достаточную сходимость с теоретической зависимостью.

4.5 Результаты сравнительных испытаний на износостойкость

Исследование износостойкости образцов было проведено на машине 77МТ-1. Изучались образцы, обработанные алмазным и электроэрозионно-химико-механическим хонингованием на разных режимах. В качестве образца использовался сегмент размером 60×25×5 мм вырезанный из ГЦ (рисунок 4.14). Сегменты поршневых колец ремонтного размера с хромовым покрытием служили контртелом.



Рисунок 4.14 - Образцы и контртела до начала износных испытаний

Перед началом испытаний на износ с образцов снимались профилограммы (рисунок 4.15) на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P (Япония).

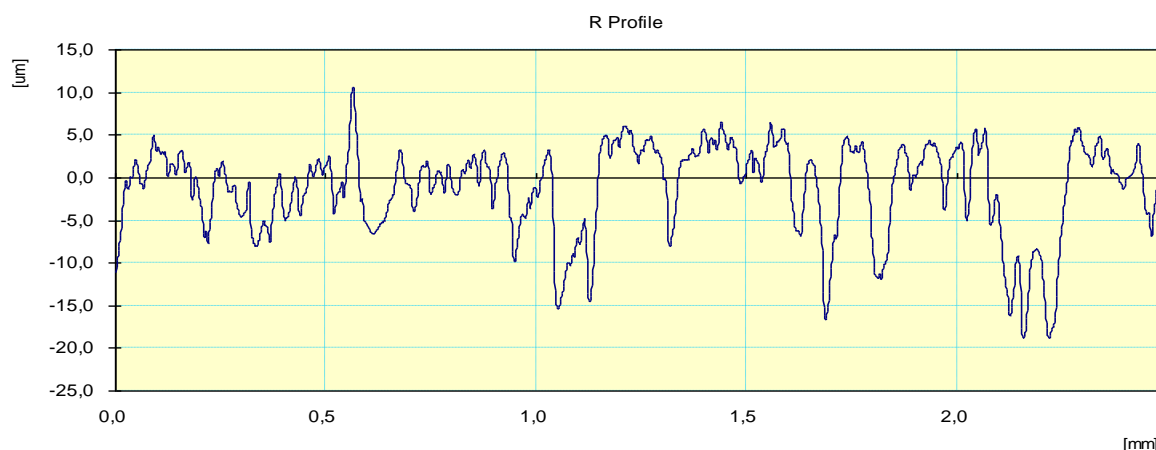


Рисунок 4.15 - Профилограмма обработанной ЭЭХМХ поверхности до начала испытаний.

Износ образцов определялся весовым методом на весах ВЛР-200. Взвешивание проводили по следующей схеме первый час испытаний каждые 15 мин, следующие 4 часа - каждый час, а затем каждые 5 часов. Образцы нагружались ступенчато на 0,5; 2,25; 4 и 5,5 МПа. Общее время испытаний составило 25 часов. Смазкой являлось моторное масло М-8В по ГОСТ 10541-78. Смазка вводилась со скоростью 5 капель/час.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены профилограммы поверхностей после 25 часовых испытаний.

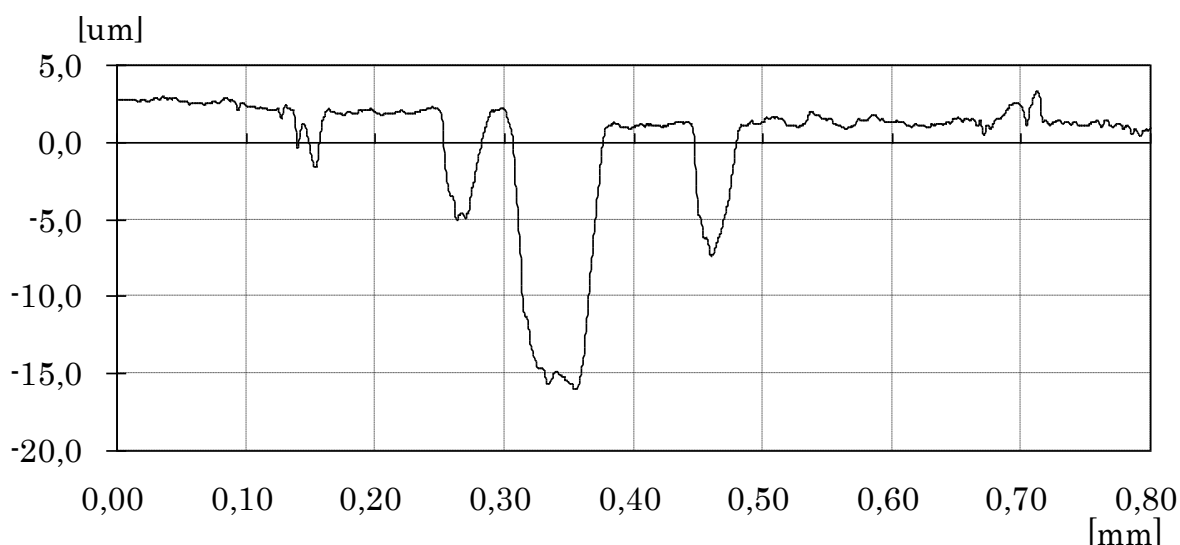


Рисунок 4.16 - Профилограмма поверхности обработанной ЭЭХМХ после 25 часов испытаний на износ.

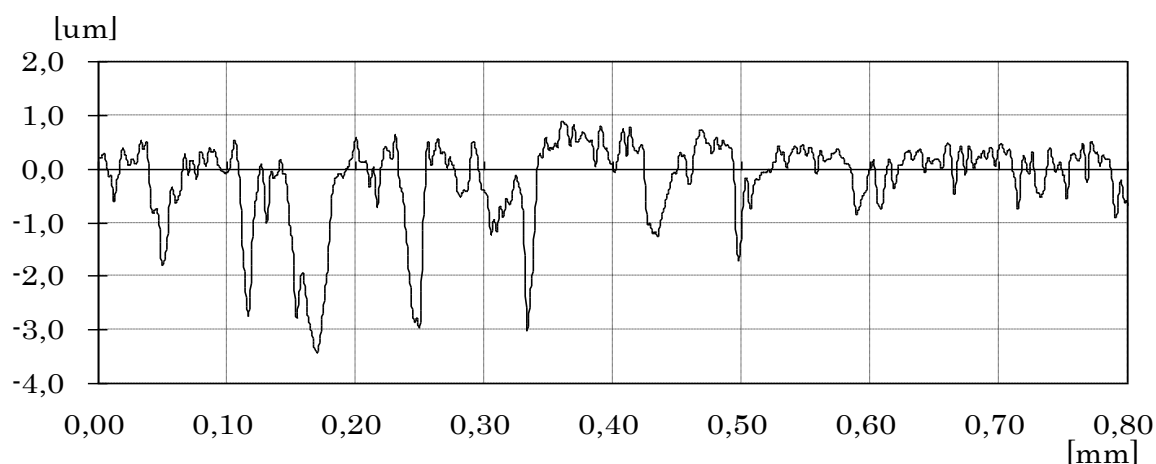
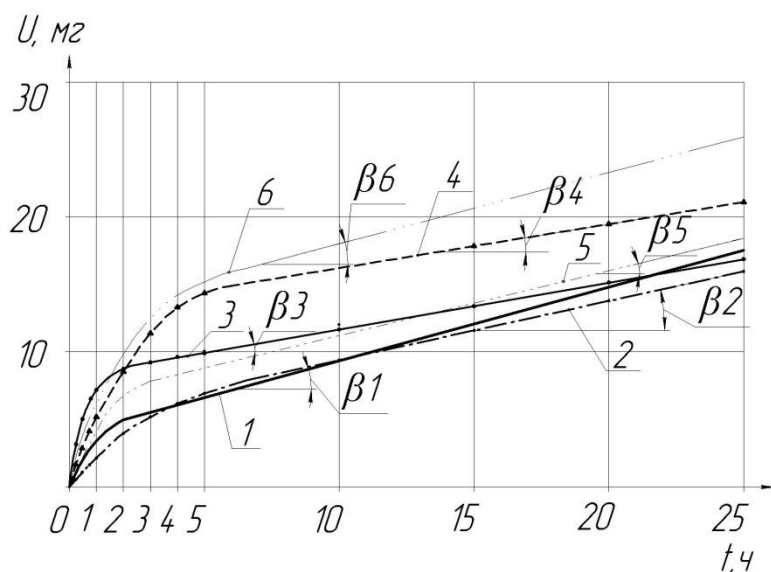


Рисунок 4.17 - Профилограмма поверхности обработанной алмазным хонингованием после 25 часов испытаний на износ.

На рисунке 4.18 представлены зависимости величины износа образцов обработанные электроэрозионно-химико-механическим хонингованием на разных режимах.



1- $Rz=3,45$ мкм ; 2 – $Rz=15,6$ мкм; 3- $Rz=22,5$ мкм; 4 - $Rz=30,45$ мкм ; 5 – $Rz=38,4$ мкм;
6- $Rz=49,56$ мкм

Рисунок 4.18 – Зависимость износа образцов обработанных АМХ при различной высоте шероховатости .

Как видно из рисунка 4.18, износ образца № 1 с чрезмерной малой шероховатостью оказался выше, что указывает на недостаточное поглощение масла на его поверхности. В то же время износ образца № 6 был еще больше. Это можно объяснить большей шероховатостью с меньшим значением контрольной области микрорельефа. В этом случае образцы имеют другой угол наклона прямой линии износа.

Используя методику В.Ф. Карпенко [69] может предсказать детали ресурса. Этот метод позволяет оценить результаты эксперимента с учетом углов наклона β прямой секции кривых износа до оси X. Общий износ рабочей поверхности i -й пары U_i можно определить из формулы

$$U_i = U_o + U_p = U_o + \tau_p \times tg\beta , \quad (4.5)$$

где U_i - полный износ рабочей поверхности i -й пары, мг;

U_o -износ рабочей поверхности в период обкатки, мг;

U_p - износ рабочей поверхности после обкатки, мг;

τ_p - время работы до ремонта, ч;

β - угол наклона кривой износа.

Значения углов β возьмем из данных, приведенных на рисунке 4.49.

Результаты расчетов износостойкости образцов, обработанных разными способами при времени работы $\tau_p = 4000$ ч, приведены в таблице 4.2 .

Таблица 4.2- Результаты расчета износостойкости образцов (г)

Номер образца	Начальная высота шероховатости образца Rz, мкм	Расчетный износ образца , г
1	3,45	1022,49
2	15,6	731,24
3	22,5	701,12
4	30,45	742,04
5	38,4	976,48
6	49,56	1287,35

Если принять время работы двигателя до капитального ремонта равным 4000 часов, то прогнозируемый износ меньше на 20...25% будет наблюдаться у образцов с шероховатостью 22,5 мкм. Зависимость износа от высоты шероховатости по результатам расчета представлена на рисунке 4.19.

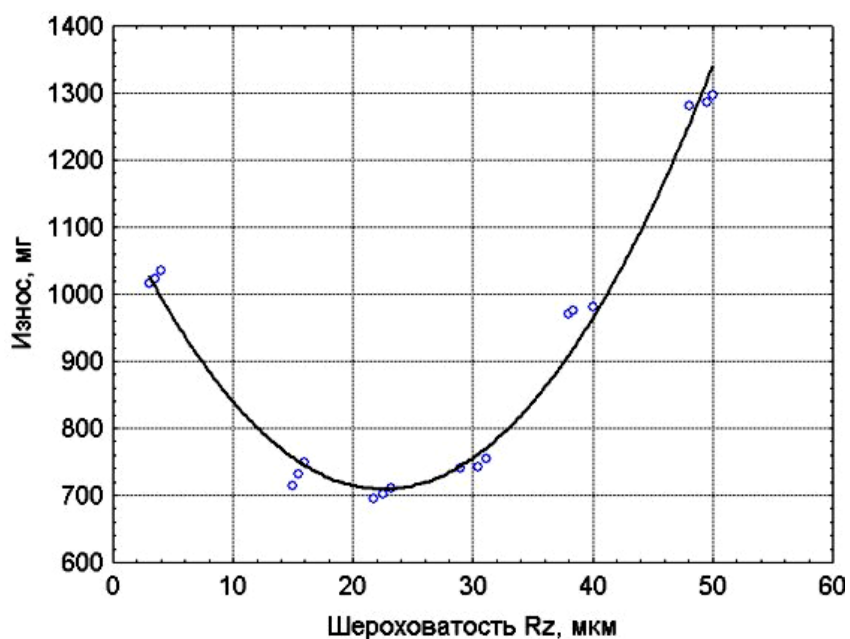


Рисунок 4.19 - Зависимость износа образцов от начальной высоты шероховатости.

Как видно из рисунка 4.19 подтвердились теоретические предположения о наличии оптимума шероховатости (см рис. 2.2)

Проводились также испытания на задиростойкость, которая определялась по времени появления резкого шума, сопровождающего наступление задира и достижения температуры 403 К (130°C). Нагрузка на приработанные образцы составляла 5,5 МПа. На поверхность образца наносилось 2 капли моторного масла М-8-В.

Результаты испытаний на задиростойкость приведены на рисунке 4.20.

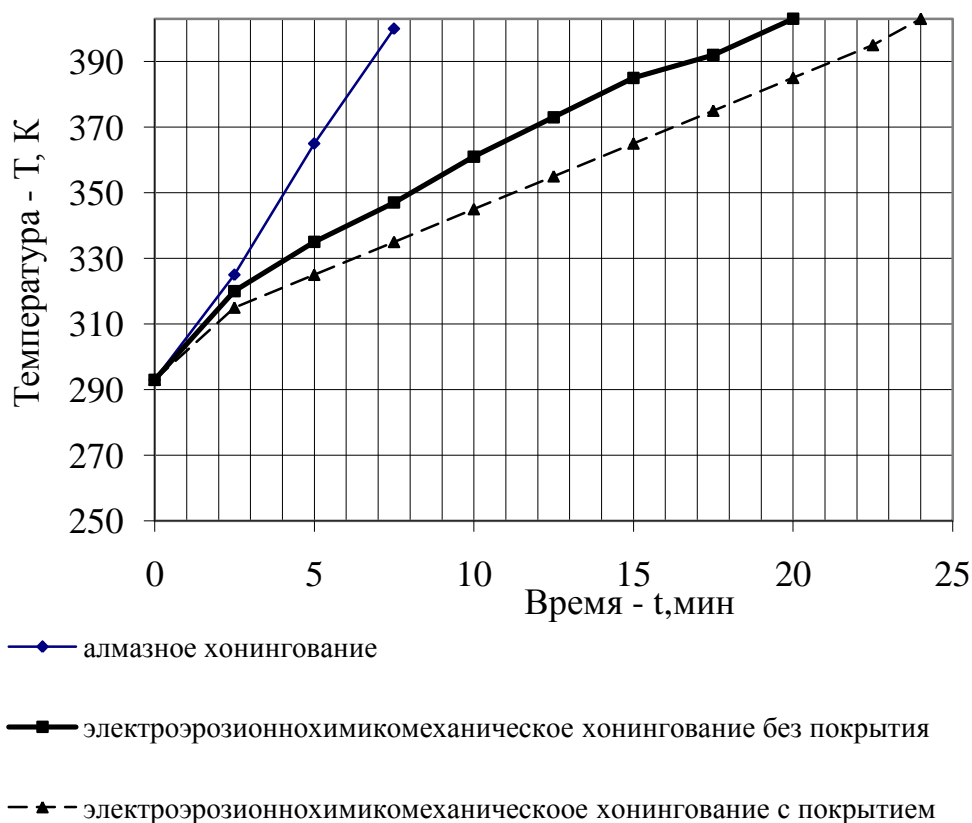


Рисунок 4.20 –Зависимость температуры образцов от времени испытания.

Как видно из рисунка 4.51, в образце обработанного ЭЭХМХ без антифрикционного покрытия время подсчета составляло около 20 минут, что почти в три раза выше, чем для образца, обработанного алмазным хонингованием. Это можно объяснить увеличенным в 2 ... 3 раза потреблением масла. В то же время для образца с медной оболочкой время для издевательства еще больше на 4 минуты, что указывает на то, что слой меди действует как твердая смазка.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экономическая оценка - заключительный этап любого исследования.

Разработанный метод ЕЕСММ оказывает положительное влияние на следующие показатели:

1. Износостойкость гильз цилиндров увеличивается за счет формирования специального микрорельефа поверхности с увеличенной емкостью масла.
2. Применение антифрикционного покрытия в конце цикла обработки позволяет сократить время обкатки и повысить износостойкость поверхности зеркала цилиндра.
3. Повышает производительность труда, устраняя необходимость изменения хонинговальных головок при переключении с грубого хонингования на чистовую и наоборот.

Для технико-экономического сопоставления предлагаемой технологии мы проводим абразивное хонингование в два этапа алмазными стержнями на вертикальной хонинговальной машине 3В833.

Перед хонингованием для обоих вариантов сверление выполнялось на вертикальной расточной машине 278Н с резакром с пластинами ВК3 при подаче 0,125 мм / об., частотой вращения 315 мин-1. Учет хонингования составлял 0,08 мм на диаметр. Основное время бурения было 4 минуты. Кроме того, требуется время для установки детали в проводнике, центрирования вкладыша с помощью индикаторного устройства, установки выхода резака, цены и снятия детали с проводника.

Общее время цикла бурения для бурения с последующим алмазным хонингованием составляло 10,2 мин, а для предлагаемой технологии ЭЭХМХ после растачивания - всего 9,2 мин. Расчет технико-экономической эффективности проводился в соответствии с общепринятым методом [67].

Исходные данные для расчета технико-экономических показателей приведены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 - Исходные данные для расчета технико-экономических параметров.

Наименование	Варианты	
	исходный (базовый)	проекти – руемый
Масса конструкции, кг	956	1024
Балансовая стоимость, руб.	450250	501325
Потребляемая (установленная) мощность, кВт	4	6,8
Количество обслуживающего персонала, чел.	1	1
Разряд работы	4	4
Тарифная ставка, руб./чел.-ч.	160	160
Норма амортизации, %	10,3	8,2
Норма затрат на ремонт и ТО, %	4	4
Годовая наработка, час	1901	1901
Время цикла, мин	10,2	9,2
Технический ресурс, мото-час.	4000	5000
Годовая программа, ед.	6000	6000

Почасовая производительность машин в стационарных операциях периодического действия определяется по формуле:

$$W_{\text{ч}} = \frac{60 \cdot n}{T_{\text{ц}}}, \quad (5.1)$$

где n - количество обрабатываемых деталей (в нашем случае число гильзы цилиндров) в одном рабочем цикле;

T - время одного рабочего цикла, мин.

Энергоемкость процесса определяется по формуле:

$$\mathcal{E}_e = \frac{N_e}{W_{\text{ч}}}, \quad (5.2)$$

где N_e - мощность, потребляемая устройством, кВт.

Капиталоемкость процесса извлечения определяется по формуле:

$$F_e = \frac{C_{\sigma}}{N}, \quad (5.3)$$

Металлоемкость процесса определяется по формуле:

$$M_e = \frac{G}{W_{\text{ч}} \cdot T_{\text{год}} \cdot T_{\text{сл}}}, \quad (5.4)$$

где n_p - количество обслуживающего персонала, чел.

Производительность процесса определяется по формуле:

$$\dot{O}_a = \frac{n_{\delta}}{W_{\text{ч}}}, \quad (5.5)$$

где T_g - годовая нагрузка устройства, ч;

$T_{\text{ср}}$ - это срок службы устройства, лет.

Себестоимость восстановления базовыми и новыми методами восстановления рассчитывается по формуле:

$$S = C_{\text{зн}} + C_{\text{соц}} + C_{\text{э}} + C_{\text{рто}} + A + C_{\text{оп}} + C_{\text{ох}} + C_{\text{вп}}, \quad (5.6)$$

$C_{\text{зн}}$ – затраты на оплату труда, руб./ед.;

$C_{\text{соц}}$ - отчисления на социальные нужды, руб.;

$C_{\text{э}}$ – затраты на электроэнергию, руб./ед.;

$C_{\text{рто}}$ – затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования, руб./ед.;

A – амортизационные отчисления по оборудованию, руб./ед.;

$C_{\text{оп}}$ - общепроизводственные расходы, руб./ед.;

$C_{\text{ох}}$ - общехозяйственные расходы, руб./ед.;

$C_{\text{вп}}$ - внепроизводственные расходы, руб./ед.

Стоимость труда для промышленных рабочих рассчитывается по формуле:

$$C_{\text{зн}} = C_{\text{сп}} + C_{\text{доп}}, \quad (5.7)$$

где $C_{\text{сп}}$ - базовая заработная плата промышленных рабочих, рублей;

$C_{\text{доп}}$ - дополнительная заработная плата рабочих, рублей;

Основная заработная плата рабочих определяется по формуле:

$$C_{\text{зн}} = z \times T_e, \quad (5.8)$$

где z - тарифная ставка, руб. / чел.

T_e - трудоемкость процесса, человеко-часы.

Дополнительная заработная плата рабочих $C_{доп}$ включает в себя оплату отпуска, компенсацию за неиспользованный отпуск, доплаты за ночную работу, а также выплату льготных часов для подростков и т. Д. Согласно [67], дополнительная заработная плата работников составляет 10 % от основной заработной платы работников.

Сумма отчисления на социальные нужды определяется по формуле [92]:

$$C_{соц} = (C_{пф} + C_{соц} + C_{фз} + C_{мс}) \cdot C_{зп}, \quad (5.9)$$

где $C_{пф}$ - отчисления в пенсионный фонд, 28% от $C_{зп}$;

$C_{соц}$ – отчисления в фонд социального страхования, 4% от $C_{зп}$;

$C_{стр}$ – отчисления на страхование от несчастных случаев, 1,8% от $C_{зп}$;

$C_{мс}$ – отчисления на медицинское страхование, 3,6% от $C_{зп}$.

Затраты на электроэнергию определяются по формуле:

$$C_э = Ц_э \cdot Э_э, \quad (5.10)$$

где $Ц_э$ – отпускная цена электроэнергии, руб./кВт·ч,

Затраты на ремонт и техническое обслуживание оборудования определяются по формуле:

$$C_{рмо} = \frac{C_о \cdot a_n}{100 \cdot N}, \quad (5.11)$$

Амортизационные отчисления по оборудованию определяются по формуле:

$$A = \frac{C_о \cdot a_n}{100 \cdot N}, \quad (5.12)$$

Согласно [67] общепроизводственные цеховые расходы $C_{оп}$ составляют 100...120% от заработной платы рабочих (принимается 110%). По данным [67] общехозяйственные $C_{ох}$ и внепроизводственные расходы принимаем равным 50% и 10% от заработной платы рабочих соответственно.

Приведенные затраты определяются по формуле:

$$C_{прив} = S + E_n \cdot k, \quad (5.13)$$

где E_n – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений, равный 0,15;

k – удельные капитальные вложения или фондоемкость процесса, руб./ед.

Годовая экономия восстановления деталей с применением технологии, повышающей их износостойкость, может быть подсчитан по формуле [88]:

$$\mathcal{E}_Г = N_1 \cdot (S_1 - \eta_{и} \cdot S_2), \quad (5.14)$$

где $\mathcal{E}_Г$ — годовая экономия от внедрения новой технологии восстановления деталей, руб.;

N_1 — количество деталей, которое необходимо восстановить, ед.;

S_1 — себестоимость восстановления детали по старой технологии руб.;

S_2 — себестоимость восстановления детали по новой технологии, руб.;

$\eta_{и}$ — коэффициент относительной износостойкости.

Коэффициент относительной износостойкости $\eta_{и}$ можно определить по формуле [67]:

$$\eta_{и} = T_1 / T_2, \quad (5.15)$$

где T_1 , T_2 — технический ресурс детали, восстановленной по старой и новой технологии соответственно, моточас;

Эксплуатация показала, что средний межремонтный ресурс гильз цилиндров, отремонтированных по базовой технологии составил 4000 моточасов, а по новой технологии - 5000 моточасов.

Отсюда коэффициент относительной износостойкости будет равен

$$\eta_{и} = 4000 / 5000 = 0,8.$$

Срок окупаемости дополнительных капитальных вложений

определяется по формуле: $T_{ок} = \frac{C_{б1}}{\mathcal{E}_{год}}, \quad (5.16)$

где $C_{б1}$ - балансовая стоимость спроектированной конструкции, руб.

Коэффициент эффективности дополнительных капитальных вложений определяется по формуле:

$$E_{эф} = \frac{\mathcal{E}_{год}}{C_{б1}} = \frac{1}{T_{ок}}, \quad (5.17)$$

Результаты расчета технико-экономической эффективности выполнены с помощью табличного процессора Excel и сведены в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Показатели технико-экономические эффективности

Наименование показателей	Варианты		Проект. в % к базовому
	Исходный (базовый)	Проектируемый	
Часовая производительность, ед./ч	5,88	6,52	1,109
Фондоемкость процесса, руб./ед.	75,042	83,554	1,113
Энергоемкость процесса, кВт/ед.	0,680	1,043	1,533
Трудоемкость процесса, чел.-ч.	0,170	0,153	0,902
Затраты на оплату труда, руб./ед.	29,920	26,987	0,902
Затраты на электроэнергию, руб./ед.	3,298	5,057	1,533
Затраты на ремонт и ТО, руб./ед.	1,611	1,617	1,004
Амортизационные отчисления, руб./ед.	4,147	3,316	0,800
Отчисления на социальные нужды, руб./ед.	10,652	9,607	0,902
Общепроизводственные расходы, руб./ед.	3,628	1,800	0,496
Общехозяйственные расходы, руб./ед.	0,805	0,809	1,004
Внепроизводственные расходы, руб./ед.	0,415	1,180	2,846
Уровень эксплуатационных затрат, руб./ед.	54,475	50,374	0,925
Уровень приведенных затрат, руб./ед.	65,731	62,907	0,957
Годовая экономия, руб.	-	85057,8	-
Годовой экономический эффект, руб.	-	92436,3	-
Срок окупаемости кап.вложений, лет	-	5,894	-
Коэффициент эффективности капвложений	-	0,170	-

Как видно из результатов расчета внедрение анодно-механического хонингования гильз цилиндров позволит получить годовой экономический эффект 92436,3 руб. при программе 750 двигателей в год.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Основываясь на проведенных теоретических и экспериментальных исследованиях, можно сделать следующие основные выводы:

1. Анализ литературных источников показал, что в существующих работах был исследован процесс удаления металла путем электрохимического растворения с последующим удалением продуктов растворения абразивной обработкой. Использование анодно-механической обработки гильз цилиндров с электроэрозионным компонентом слабо освещено.

2. Для ЭЭХМХ наиболее подходящим электролитом является водный раствор жидкого стекла с плотностью 1,15 ... 1,22 кг / м³ с добавлением 15 ... 20% глицерина и 3 ... 5% хлорида натрия. Удельное давление в контакте между электродами также существенно не влияет на оценочные значения, рациональные значения удельного давления находятся в диапазоне 0,1 ... 0,15 МПа. Наиболее рациональные способы обработки: режим отделки - напряжение 16 ... 18 В, плотность тока на электродном инструменте 5 ... 7 А / см²; унитаз - напряжение 10 ... 12 В, плотность тока 0,5 ... 1 А / см². Нанесение антифрикционного слоя должно выполняться в конце этапа доводочной обработки отключенным технологическим током в течение 10 ... 15 секунд. В это время анодная пленка удаляется с поверхности зеркала и наносится медный слой.

3. Предлагается использовать металлические электродные инструменты в виде брусков. Это позволит использовать не только электрохимический, но и электроэрозионный компонент процесса АМО, чтобы получить износостойкий микрорельеф поверхности с повышенным потреблением масла, чтобы исключить шаржирование. При проведении электроэрозионно-химико-механического хонингования необходимо использовать стержневые электроды из меди или медьсодержащих сплавов. Износ таких электродных инструментов ниже, чем у стали или чугуна, и их

использование также позволяет наносить антифрикционный слой на обрабатываемую поверхность.

4. Проведенные теоретические исследования позволили получить математическую модель, характеризующую зависимость шероховатости поверхности от параметров электрической и механической обработки.

5. Лабораторные испытания показали, что износостойкость поверхности гильзы цилиндра, обработанной ЭЭХМХ на 20 ... 22% выше, чем сопротивление износу поверхности после алмазов шлифования. Время обкатки поверхности также уменьшилось.

6. Экономический эффект внедрения технологии ЭЭХМХ составляет 92436,3 руб. с программой из 750 двигателей в год.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев М.К. Анодно-механическая обработка металлов / М.К. Алексеев, И.Я. Богорад, Н.Р. Четыркин. - Л.: Машгиз, 1958. - 89 с.
2. Анатенко М.В. Электрохимическое хонингование / М.В. Анатенко, В.И. Долматов // Техника в сельск. хоз-ве. - 1977. - №12. - С. 69 - 70.
3. Андрейченко В.Н. Причины натиров гильз цилиндров дизеля КАМАЗ - 740 / В.Н. Андрейченко, М.А. Григорьев, В.Т.Занребин // Автомобильная пром-ть. - 1991. - №4. - С. 19 - 20.
4. Аскинази Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электромеханической обработкой / Б.М. Аскинази. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1989. - 200 с.
5. Асташкевич Б.М. Механизм изнашивания деталей ЦПГ тепловозных дизелей / Б.М. Асташкевич // Повышение износостойкости деталей ДВС. - М.: 1992. - С. 5 - 12.
6. Асташкевич Б.М. Хромированные вставки в гильзы цилиндров / Б.М. Асташкевич, Д. Зияев // Техника в сельском хозяйстве.-1988.-№2.-С.15-17.
7. Балабанов В.И. Триботехнологии в техническом сервисе машин / В.И. Балабанов, С.А. Ищенко, В.И. Беклемышев. - М: Изумруд, 2005. -192 с.
8. Богомолова М.А. Практическая металлография / М.А. Богомолова. - М.: Высш. шк., 1987. - 240 с.
9. Богорад И.Я. Анодно-механическая заточка резцов и фрез с пластинками из твердых сплавов / И.Я. Богорад. - М.-Л.: Машгиз, 1949.-101 с.
10. Борисов Ю.С. Плазменные порошковые покрытия / Ю.С. Борисов, А.Л. Борисова. - Киев: Техника, 1986. - 222 с.
11. Бугаев В.И. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей / В.И. Бугаев. - М.: Колос, 1981. - 208 с.
12. Бурштейн Л.М. Температура масляной пленки и стенки цилиндра ДВС/Л.М.Бурштейн, А.Р.Пикман // Двигателестроение.-1982.- № 4.-С.18 - 20.
13. Бродский В.З. Введение в факторное планирование эксперимента / Бродский В.З. - М.: Наука, 1976. - 224 с.
14. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментальных исследований и обработка опытных данных / Г.В. Веденяпин.- М.: Колос,1973.- 56с.
15. Венцель С.В. Смазка и долговечность двигателей внутреннего сгорания / С.В. Венцель. - Киев: Техника, 1977. - 208 с.
16. Веричев В.В. Электрохимикоалмазное хонингование восстанавливаемых деталей / В.В. Веричев - М.: ГОСНИТИ, 1968.-87с.
17. Верховецкий И.Н. Исследование процесса электрохимического хонингования и разработка технологии ремонта гильз цилиндров

автотракторных двигателей: автореф. дис....канд. техн. наук/ И.Н. Верховецкий. - Кишинев, 1970. - 21 с.

18. Вишницкий А.Л. Электрохимическая и электромеханическая обработка металлов / А.Л. Вишницкий, И.З. Ясногородский, И.П. Григорчук. - Л.: Машиностроение, 1977. - 212 с.

19. Витлин В.Б. Электрофизикохимические методы обработки в металлургии / В.Б. Витлин, А.С. Давыдов. - М.: Металлургия, 1988. - 127 с.

20. Волков, Ю.Е. Исследования в области размерной электрохимической обработки, проводимые компанией «Мицубиси» (Япония) / Ю.Е. Волков // Электрофизические и электрохимические методы обработки. – М., 1970. - №1. – С.128-132.

21. Гальванические покрытия в машиностроении : Справочник / М.А. Шлугер; под ред М.А. Шлугера.. – М.: Машиностроение, 1985. - Т. 1. - 240 с.

22. Гаркунов, Д.Н. Триботехника. Износ и безызносность / Д.Н.Гаркунов.- М.:Машиностроение, 2001. – 616 с.

23. Генбом Б.Б. Механизм влияния серы на износ двигателей внутреннего сгорания /Б.Б. Генбом // Борьба с коррозией ДВС и газотурбинных установок. - М.: Машиностроение, 1992. – С.56-45.

24. Глазов В.М. Микротвердость металлов / В.М. Глазов, В.И. Вигдорович. - М.: Машиностроение, 1977. - 224 с.

25. Горский В.Г. Планирование промышленных экспериментов / В.Г. Горский, Ю.П. Адлер. - М.: Металлургия, 1974. - 264 с.

26. Григорьев М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н.Пономарев. – М.: Машиностроение, 1976.- 248с.

27. Григорьев М.А. Основные причины изнашивания деталей цилиндропоршневой группы двигателей ЯМЗ/ М.А. Григорьев, С.В. Лебедев, С.Н.Федоров // Автомобильная промышленность.–1994.- №2.– С.10 - 13.

28. Гусев В.Н. Анодно-механическая обработка металлов / В.Н. Гусев. - М.-Л.: Машгиз, 1952. - 78 с.

29. Гусев В.Н. Исследование процесса электроэрозионной обработки металлов: дис. ... канд. техн. наук / В.Н. Гусев. - М., 1954. - 195 с.

30. Гусев Н.Н. Электрохонингование / Н.Н. Гусев // Электрические и ультразвуковые методы обработки материалов. - Л.: Лениздат, 1958. - С. 5-8.

31. Гурвич И.Б. Износ и долговечность автомобильных двигателей / И.Б. Гурвич. – Горький: Волго – Вятское изд., 1970. – 175 с.

32. Двигатели внутреннего сгорания: Конструкция и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова.. – М.: Машиностроение, 1984. - 384 с.

33. Демкин Н.Б. Качество поверхности контактирующих деталей / Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов. – М.: Машиностроение, 1981. - 242 с.
34. Дикушин Г.А. Выбор технологических режимов при анодно-механическом профилировании/ Г.А. Дикушин // Новое в электрофизической и электрохимической обработке металлов. - Л.: Лениздат, 1959. - С. 86-92.
35. Жандаров Д.А. Высокочистовая анодно-механическая полировка материалов / Д.А. Жандаров // Новое в электрофизической и электрохимической обработке металлов. - М.-Л.: Машиностроение, 1966. - С. 91-97.
36. Ждановский Н.С. Надежность и долговечность автотракторных двигателей / Н.С.Ждановский, А.В.Николаенко.- Л.: Колос,1981.-295с.
37. Жуленков В.И. Исследование некоторых вопросов оценки ремонтных предприятий в сельском хозяйстве : дис. ... канд. техн. наук/ В.И. Жуленков.- Ульяновск, 1974. -151 с.
38. Зайцев С.А. Хонингование и суперфиниширование в автотракторостроении / С.А. Зайцев. – М.: Машиностроение, 1985. - 88 с.
39. Занребин В.Г. Исследование режимов приработки автомобильных двигателей при ремонте / В.Г.Занребин, А.Х.Касумов. - М.: Транспорт, 1983. - 78 с.
40. Защита от водородного износа в узлах трения / А.А. Полякова [и др.]; под ред. А.А.Полякова.– М.: Машиностроение, 1980.-133 с.
41. Зеленцова В.Д. Некоторые особенности износа цилиндров двигателей / В.Д. Зеленцова [и др.]// Автомобильная пром-ть. - 1979. - №8. - С. 4–5.
42. Зубиетова М.П. Влияние условий работы двигателя Д-240 на износостойкость его деталей/ М.П. Зубиетова, И.В. Пустовалов // Тракторы и сельхозмашины. - 1988. - №2. - С. 6-8.
43. Иванов Г.П. Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин / Г.П. Иванов. - М.: Машгиз, 1961. - 267 с.
44. Исследование и разработка технологических параметров и установки для обработки фасок клапанов двигателей анодно-механическим способом : отчет о НИР (заключ.): № 11 - 79/ Казанский с.-х. ин-т.; рук. работы Е.М. Краюшкин. - Казань, 1981. - 138 с.
45. Казанцев А.С. Анодно-механическое шлифование металлов в ремонтном производстве / А.С. Казанцев. - М.-Л.: Машгиз,1955.- 88 с.
46. Кан Б.И. Анодно-механическая чистовая обработка / Б.И. Кан, И.Г. Космачев. - М.-Л.: Машгиз, 1952. – 45 с.
47. Кан Б.И. Точность анодно-механической и абразивной доводки брусками внутренних цилиндрических поверхностей / Б.И. Кан // Прогрессивная технология машиностроения: труды Ленинград. научно-произ. технол. конф. – Л.: Машгиз, 1951. – Кн. 23. – Ч.1. – Вып. 2. – С. 34-39.
48. Канарчук Е.Д. Влияние неустановившихся режимов на износ двигателя внутреннего сгорания / Е.Д. Канарчук.- Киев:КТЭИ,1970.–167с.

49. Карпенков В.Е. Исследование способа твердого осталивания применительно к восстановлению цилиндров ДВС: дис. ... канд. техн. наук/ В.Е. Карпенков. - Саратов, 1968. - 118 с.
50. Карпенков В.Ф. Исследование процесса электроалмазного хонингования, применительно к ремонту деталей тракторов автомобилей и сельхозмашин: дис. ...канд. техн. наук/ В.Ф.Карпенков.– М., 1975.– 148 с.
51. Карпенков В.Ф. Финишная антифрикционная безабразивная обработка / В.Ф. Карпенков, В.В. Стрельцов, И.Л. Приходько, В.Н.Попов.- Пущино, 1996. – 107 с.
52. Катец, Н.В. Металлизация напылением / Н.В. Катец [и др.]. – М.: Машиностроение, 1966. - 200 с.
53. Кейбаш И.Д. Влияние некоторых параметров на производительность электрохимического хонингования / И.Д. Кейбаш, И.Н. Верховецкий // Электрофизические методы обработки восстановленных деталей / Тр. Кишиневского СХИ. - Кишинев, 1973. - Т. 107. - С. 13-16.
54. Китаев Ю.В. Влияние алмазного электрохимического хонингования на качество последующего хромирования деталей / Ю.В. Китаев, С.В. Чижов, В.А. Пушкарев // Электрофизические и электрохимические методы обработки металлов. - Тула: ТПИ, 1980. - С. 128-130.
55. Космачев И.Г. Анодно-механическое затачивание твердосплавного инструмента / И.Г. Космачев, П.С. Крыжановский, П.Д. Климченков. - М.-Л.: Машгиз, 1952. - 107 с.
56. Космачев И.Г. Обработка металлов анодно-механическим способом / И.Г. Космачев. - М.-Л.: Машгиз, 1961. - 84с.
57. Костецкий Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колесниченко. - Киев: Техника, 1969. - 215 с.
58. Костецкий Б.И. Механохимические процессы при граничном трении/Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский.- М.: Наука, 1973. 107.
59. Корнейчук И.Н. Гальваномеханический способ восстановления деталей машин / И.Н. Корнейчук // Новые технологические процессы восстановления деталей машин. - Кишинев: Штиинца, 1988. - С. 10-21.
60. Кремень З.И. Хонингование и суперфиниширование деталей / З.И. Кремень, И.Х. Стратиевский. – М.: Машиностроение, 1988.-137с.
61. Куликов, С.И. Прогрессивные методы хонингования / С.И. Куликов, В.А. Ризванов В.А. Романчук. – М.: Машиностроение, 1983. -135 с.
62. Куликов, С.И. Хонингование : справ. пособие/ С.И. Куликов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1973. - 168 с.
63. Лавриненко А.П. Исследование процесса электроалмазного хонингования гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания в ремонтном производстве : дис. ... канд. техн. наук / А.П. Лавриненко - Волгоград, 1977. - 21 с.

64. Ларин Т.В. Хромирование как метод увеличения срока службы деталей локомотива / Т.В. Ларин, Б.М. Асташкевич // Вестник машиностроения. - 1972. - №2. - С. 15-17.

65. Лимарев В.Я. Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса / В.Я. Лимарев, М.Н. Ерохин, Е.А. Пучин. - М.: Известия, 2002. - 464 с.

66. Маневич Ш.С. Простейшие статистические методы анализа результатов наблюдения и планирования экспериментов / Ш.С. Маневич. - Казань: КСХИ, 1970. – 108с.

67. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. Рекомендация НТС МСХ СССР . – М., 1979. – 79с

68. Масино М.А. Автомобильные материалы: Справочник инженера механика / М.А. Масино [и др.] - М.: Транспорт, 1979. - 288 с.

69. Меркулов Е. Восстановление гильз цилиндров автомобилей методом теплового формоизменения: Экспресс-информ./ Е. Меркулов, Б. Гомзяков//ЦБНТИ. - М., 1981. - Вып.4. - С.1-19.

70. Методы повышения долговечности деталей машин / В.Н. Ткачев, М.Б. Фиштейн, В.Д. Власенко. – М.: Машиностроение, 1971. - 271 с.

71. Микулин Ю.В. Пуск холодных двигателей при низкой температуре /Ю.В.Микулин, В.В. Карницкий, Б.А. Энглин. - М.: Машгиз, 1971. -216с.

72. Мишин А.И. Долговечность двигателей / А.И. Мишин. - Л.: Машиностроение, 1976. - 288 с.

73. Моисеев В.В. Повышение межремонтного ресурса гильз цилиндров автомобильных двигателей центробежным индукционным напеканием в условиях ремонтных предприятий Госагропрома : дис. ... канд. техн. наук / В.В. Моисеев. - М., 1987. - 283 с.

74. Мухин Е.М. Приработка и испытание автомобильных двигателей / Е.М. Мухин, И.И. Столяров. - М.: Транспорт, 1981. - 257с.

75. Намаконов Б.В. Повышение долговечности гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания способом ФАБО / Б.В. Намаконов, В.В. Кисель, В.П. Лялякин // Долговечность трущихся деталей машин. - М.: Машиностроение, 1990. - Вып. 4. - С. 139-144.

76. Надежность и ремонт машин / В.В. Курчаткин [и др.]; под ред. В.В. Курчаткина. - М.: Колос, 2000. - 776 с.

77. Петров Ю.Н. Ремонт автотракторных деталей гальваническими покрытиями / Ю.Н. Петров, В.П. Косов, М.П. Стратулат. - Кишинев: Карте Молдавениянска, 1976. - 152 с.

78. Плиско Э.И. Исследование процесса анодно-механической доводки применительно к ремонту закаленных гильз цилиндров тракторных двигателей: дис. ... канд. техн. наук/ Плиско Э.И.. - Горки, 1972.-19с.
79. Повышение срока службы гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания: монография / Фасхутдинов Х.С., Шайхутдинов Р.Р. - Казань: КГТУ, 2011. - 188 с.
80. Польцер Г. Финишная антифрикционная обработка (ФАБО) и избирательный перенос / Польцер Г. [и др.]// Долговечность трущихся деталей машин. - М.: Машиностроение, 1990. - Вып. 5. - С. 86-123.
81. Попилов Л.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка металла: справочник / Л.Я. Попилов. - М.: Машиностроение, 1982. - 400 с.
82. Прецизионная обработка деталей алмазными и абразивными брусками /М.С.Наерман, С.А.Попов.–М.:Машиностроение,1971.-224с.
83. Пучин Е.А. Надежность технических систем: учебное пособие для инженерных специальностей вузов / Е.А. Пучин, А.В. Коломейченко, В.Н. Логачев и др. – Орел, Изд-во ОрелГАУ, 2012. – 96 с.
84. Пучин Е. А. Практикум по ремонту машин: учеб. пособие / Е.А. Пучин, В.С. Новиков, Н.А. Очковский и др. ; под общ. ред. Е. А. Пучина. – М. : КолосС, 2009. – 327 с.
85. Рабочий процесс и теплонапряженность автомобильных дизелей / Г.Д. Чернышев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1986. – 216 с.
86. Размерная электрическая обработка металлов / В.А.Артамонов, Ю.С. Волков, А.В. Глазков. - М.: Высшая школа, 1978. - 336 с.
87. Рекомендации по восстановлению гильз цилиндров автотракторных двигателей. - М.: ГОСНИТИ, 1977.-36 с.
88. Руттенбер Г.Б. О коррозионном износе цилиндров современных двигателей / Г.Б. Руттенберг// Автомобильная пром-ть. - 1971. - №6. - С. 6-8.
89. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. - Киев: Наука думка, 1984. - 271 с.
90. Рябинок, А.Г. Электрохимическая размерная обработка металлов и сплавов / А.Г. Рябинок. - Л.: Лениздат, 1965. -152с.
91. Стрельцов В. В. Трибологические основы повышения ресурса машин: практикум / В. В. Стрельцов, А. М. Колокотов, И. Л. Приходько, и др. – М.: ФГОУ ВПО МГАУ, 2010. – 168 с.
92. Саркисов А.Г. Физико-химические основы анодно-механического резания металлов / Саркисов А.Г. // Тр. ин-та / Куйбыш. Гос. Пед. Ин-т. - 1960. - Вып 28. - С. 185 - 190.
93. Сек Эрик. Новый способ хонингования цилиндров / Эрик Сек, Юрген Штробел // МТЗ: Моторечн. - 2001. - №2. - С. 184-189.

94. Сергеевичев А.П. Исследование электрохимического шлифования применительно к ремонту автотракторных деталей : автореф. дис. ... канд. техн. наук/ А.П. Сергеевичев. - Красноярск, 1970. - 21 с.
95. Способ анодно-механической обработки металлов
А.С. 90516. / В.Н. Гусев. - Оpubл. 08.09.1943. - Бюл. №4.
96. Способ восстановления внутренней поверхности гильз цилиндров : Пат. 2025248 Рос. Федерация/ Воробьев С.К., Ивлев А.Я., Агапитов Н.И. - №5043880/27; Заявл. 25.02.92; Оpubл. 30.12.94. - Бюл. №24.
97. Способ восстановления гильзы цилиндров ДВС : А.С. 1505738 СССР/И.Н. Соколенко, В.Н.Хромов.-Заявл.19.07.80.Оpubл.07.04.83.-Бюл. 3.
98. 134. Способ восстановления изношенной боковой поверхности деталей типа втулки: А.С. 1205423 СССР / В.П. Нечаев, В.И. Ахатов, Б.Л. Таубин. -Заявл. 29.07.75. Оpubл. 27.04.78. - Бюл. №3.
99. Способ восстановления изношенных гильз цилиндров : А.С. 2006358 СССР / А.В. Дмитриев. - Оpubл. 30.01.94. - Бюл. №12.
100. Способ восстановления отверстий в деталях : А.С. 1806904 СССР/ Ш.У. Юлдашев, И.А. Аширбеков. №4867933/27. - Заявл. 19.07.90. Оpubл. 07.04.93. - Бюл. №13.
101. Способ обработки поверхности гильзы цилиндра: Пат. 3126840 / Пакраси Субхас (ФРГ). - № 3186840; Заявл. 08.07.81; Оpubл.27.08.83.
102. Суранов Г.И. Уменьшение износа автотракторных двигателей при пуске / Г.И. Суранов.- М.: Колос, 1982. - 89 с.
103. Таннинг Л. Исследование закономерностей изнашивания и совершенствование технологии и организации ремонта двигателей моделей ЗМЗ : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10/ Л.Таннинг. - Л., 1979. - 285 с.
104. Хасуй А. Техника напыления / А. Хасуй. - М.: Машиностроение, 1975. - 288 с.
105. Трение, изнашивание и смазка : Справ: в 2 т. / И.В. Крагельский [и др.]; под ред. И.В. Крагельского, В.В. Алисина. - М.: Машиностроение, 1978. - Т. 1-2.
106. Унифицированный технологический процесс восстановления гильз цилиндров /В.П. Лялякин [и др.]; ВНПО «Ремдеталь». - М.,1982.-25 с.
107. Усенко В.И. Исследование размерно-упрочняющей обработки гильз цилиндров автомобильных двигателей : дис. ... канд. техн. наук / В.И. Усенко.- Владимир, 1974. - 247 с.
108. Фасхутдинов Х.С. Исследование и оценка технологии восстановления конических сопряжений анодно-механическим способом: дис. ... канд. техн. наук/ Х.С. Фасхутдинов. - Казань, 1976. - 155 с.
109. Фрагин И.Е. Новое в хонинговании / И.Е. Фрагин. - М.: Машиностроение, 1980. - 96 с.
110. Фотеев Н.К. Технология электроэрозионной обработки / Н.К. Фотеев. - М.: Машиностроение, 1980. - 184 с.

111. Хрулев А.Э. Ремонт двигателей зарубежных автомобилей: производственно-практическое издание /А.Э.Хрулев.– М.:За рулем,1999.–40 с.

112. Чекалова, Н.Т. Исследование влияния излучений СО₂ лазера на структуру и свойства чугунов применительно к автомобилестроению : дис. ... канд. техн. наук/ Н.Т. Чекалова - М., 1982. - 205 с.

113. Чеповецкий, И.Х. Механика контактного взаимодействия при алмазной обработке / И.Х. Чеповецкий. - Киев: Наук. Думка,1978. - 228 с.

114. Черепанов, С.С. Проблемы повышения технического уровня и надежности сельскохозяйственной техники / С.С. Черепанов, М.А. Халфин // Техника в сельском хозяйстве. - 1995.-№6. - С. 3-6.

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

116. Шнейдер, Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю.Г.Шнейдер.- СПб:СПбГИТМО, 2001.-264 с.

117. Электрохонингование А.С. 86377. / В.Н. Гусев, Н.Н. Гусев. - 20.11.1947.

118. Ягуткин, А.А. Исследование процесса электрохимического хонингования внутренних цилиндрических поверхностей стальных деталей : дис. ... канд. техн. наук/ А.А. Ягуткин. - Тюмень: ТПИ, 1971. - 20 с.

Публикации автора:

1. Повышение износостойкости гильз цилиндров автотракторных двигателей / Набиуллин Ф.Ф., Валиев И.И. Закиров Р.Р.,Шайхутдинов Р.Р. // Аграрная наукаXXI века. Актуальные исследования и перспективы / Труды 2-ой международной научно-практической конференции.- Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2017.- С.118-120.

2. Анализ устройств для ФАБО гильз цилиндров автотракторных двигателей / Набиуллин Ф.Ф, Валиев И.И. Закиров Р.Р., Шайхутдинов Р.Р. // Аграрная наукаXXI века. Актуальные исследования и перспективы / Труды 2-ой международной научно-практической конференции.- Казань: Изд-во Казанского ГАУ, 2017.- С.118-120.