На правах рукописи

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

Факультет	Кафедра
машиностроения и транспорта (наименование)	Сварочное, литейное производство и материаловедение (наименование)

Направление подготовки: 22.04.01 «Материаловедение и технологии материалов» (код и наименование)

Профиль: «Материаловедение и технологии новых материалов» (наименование)

МАГИСТЕРСКАЯ ДИСЕРТАЦИЯ

на тему:

«Влияние параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршней двигателя внутреннего сгорания»

Студент — 14.06.18 (подпись, дата) — *Бычков Валерий Игоревич* (фио полностью)

Научный руководитель
к.т.н., профессор — 14.06.18 (подпись, дата) — *Казанцев И.А.* (фамилия, инициалы)

Рецензент
к.т.н, инженер-технолог АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М.В. Проценко» — 14.06.18 (подпись, дата) — *Чижова Е.В.* (фамилия, инициалы)

Нормоконтролёр
к.т.н., доцент — 14.06.18 (подпись, дата) — *Хорин А.В.* (фамилия, инициалы)

Работа допущена к защите (протокол заседания кафедры от 04.06.18 № 11)

Заведующий кафедрой — 19.06.18 (подпись, дата) — *Логинов О.Н.* (фамилия, инициалы)

Работа защищена с отметкой хорошо (протокол заседания ГЭК от 20.06.2018г. № 1)

Секретарь ГЭК — 20.06.2018г. (подпись, дата) — *Гуськов М.С.* (фамилия, инициалы)
к.т.н., доцент

Пенза 2018

ФГБОУ ВО «ПЕНЗЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ФАКУЛЬТЕТ МАШИНОСТРОЕНИЯ И ТРАНСПОРТА
КАФЕДРА «СВАРОЧНОЕ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

«Утверждаю»
Заведующий кафедрой СЛПиМ
к.т.н., доцент _____ О.Н. Логинов
подпись
«01» 09 2017 г.

ЗАДАНИЕ
на магистерскую работу

Магистранта гр. 16МТм1 Факультета машиностроения и транспорта Политехнического института ПГУ, очной формы обучения по направлению подготовки 22.04.01 «Материаловедение и технология материалов»

Бычкова Валерия Игоревича.

Научный руководитель работы: *к.т.н., профессор Казанцев И.В.*
Время выполнения диссертации: *с 09.09.2017 г. по 19.06.2018 г.*
Место преддипломной практики: *ФГБОУ ВО «Пензенский Государственный Университет».*
Тема работы: *Влияние параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршней двигателя внутреннего сгорания*
Тема утверждена приказом ректора ПГУ *№ 920а/О 14 сентября 2016 г.*

Техническое задание на работу (назначение устройства, условия применения, внешние воздействия, специальные требования и т.п.): *выполнить исследование влияния параметров микродугового оксидирования на материал поршней двигателя внутреннего сгорания, провести лабораторные стендовые и натурные испытания.*

Объём и содержание основной части работы
Пояснительная записка (перечень вопросов, подлежащих разработке, расчетов, обоснований, описаний):
- введение с обоснованием актуальности темы исследования, установления объекта и предмета исследования, постановка целей и задач, публикации;
- анализ конструкторских и технологических решений поршней двигателей внутреннего сгорания – анализ возможных методов упрочнения поверхности поршня и МДО как один из перспективных видов покрытия;
- модельные представления о механизме формирования МДО-покрытий - описание процесса протекающих при МДО;
- преимущества и недостатки технологии МДО;

- особенности строения, свойства и области применения МДО-покрытий – описание строения и свойств покрытий, зависимость свойств от параметров МДО, области применения;
- программа и методика экспериментальных исследований – описание методики нанесения, описание лабораторных, стендовых и натурных испытаний;
- результаты проведенных исследований - описание результатов исследования и выявленных зависимостей;
- выводы – обоснования по теме работы и полученным результатам.

Презентация магистерской работы (перечень и содержание плакатов)

- тема диссертации *1л А4;*
- актуальность работы *1л А4;*
- цель и задачи исследований *1л А4;*
- объект и предмет исследований *1л А4;*
- анализ конструкторских решений повышения физико-механических свойств днищ поршня *1л А4;*
- микродуговое оксидирование *1л А4;*
- свойства МДО-покрытий получаемых на алюминиевых сплавах *1л А4;*
- износостойкость покрытия *1л А4;*
- преимущества и недостатки *1л А4;*
- зависимость пористости от плотности тока и длительности оксидирования *1л А4;*
-зависимость твердости от плотности тока и длительности оксидирования *1л А4;*
- применения МДО-покрытий в автомобильной промышленности- *1л А4;*
- программа и методика экспериментальных исследований *1л А4;*
- определение микротвердости покрытия *1л А4;*
- определение теплопроводности *1л А4;*
- микрофотографии поверхности излома *1л А4;*
- оборудование для стендовых испытаний *1л А4;*
- расход топлива при стендовых испытаниях *1л А4;*
- износ поршня при стендовых испытаниях *1л А4;*
- расход топлива при натурных испытаниях *1л А4;*
- износ поршней при натурных испытаниях *1л А4;*
- выводы *1л А4;*
- публикации *1л А4;*

Рекомендуемая литература:

1. **Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия** [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов, 1990. – Т. 6, № 3. 470с.

2. **Малышев, В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования.** А/р д.т.н. – Москва 1999, с.53.

3. **Марков, Г.А.Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий** / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Сб. науч. тр., 1999, 185с.

Дата выдачи задания: 09.09.2017 г.

Руководитель диссертации:

к.т.н, профессор _____ И.А. Казанцев

Задание к исполнению принял студент

гр. 16МТм1 _____ В.И. Бычков

09 сентября 2017 г.

Магистерскую диссертацию к защите допустить

Декан факультета машиностроения и транспорта

Политехнического института ПГУ _____ С.Ю. Киреев

ОПОП освоена в полном объеме.
К государственной итоговой
аттестации допустить

Содержание

Введение…… 4

1 Анализ конструкторских и технологических решений поршней двигателей внутреннего сгорания…….. 11

2 Модельные представления о механизме формирования МДО-покрытий 14

3 Преимущества и недостатки технологии МДО…… 17

4 Особенности строения, свойства и области применения МДО-покрытий…… 20

4.1 Строение и свойства……. 22

4.2 Области применения……. 24

5 Программа и методика экспериментальных исследований…… 24

5.1 Методика микродугового оксидирования поршней……... 24

5.2 Методика лабораторных исследований покрытия днища поршня 26

5.2.1 Методика определения микротвердости покрытия……... 26

5.2.2 Методика определения пористости покрытия …….. 28

5.2.3 Методика определения температропроводности ……. 29

5.2.4 Методика определения удельной теплоемкости……... 30

5.3 Методика стендовых исследований двигателя оснащённого оксидированными поршнями…….....** 31

5.3.1 Оборудование и приборное обеспечение……. 31

5.3.2 Методика подготовки двигателя УМЗ-417 к сравнительным стендовым исследованиям…… 35

5.4 Методика натурных испытаний двигателя оснащённого оксидированными поршнями ……..... 37

5.4.1 Оборудование и приборное обеспечение…….…….. 37

5.4.2 Методика подготовки двигателя ВАЗ 2107 к натурным испытаниям……...…….…… 39

5.5 Обработка результатов стендовых исследований двигателя, оснащённого типовыми и оксидированными поршнями……..... 41

6 Результаты проведенных исследований…….. 43

6.1 Результаты лабораторных исследований…… 46

6.2 Результаты стендовых испытаний……...…… 54

6.3 Результаты натурных испытаний…… 58

Заключения……... 63

Библиографический список……..……..... 64

Введение

Современное двигателестроение направлено на повышение технических характеристик (далее ТХ) двигателя внутреннего сгорания (далее ДВС). Это способствует увеличению механической и тепловой нагрузки на детали цилиндропоршневой группы (далее ЦПГ). Одной из нагруженных деталей ЦПГ является поршень. Перегрев поршня влияет на срок его службы и качество работы двигателя, чрезмерное перегревание поршня приводит к преждевременному износу контактных поверхностей, залеганию поршневых колец и их поломкам, заклиниванию поршней, прогарам днища поршня.

Поршень, гильза цилиндров, поршневые кольца являются наиболее нагруженными деталями ЦПГ. Поршень по особенностям строения двигателя испытывает различные нагрузки, на величину и направление которых влияет процесс сгорание топлива. Возвратно-поступательное движение поршня в цилиндре, с периодическим ускорением до скорости более 100 км/ч, вызывает перегрузки от 1500 до 2000 *g*, в след за которыми идет замедление до нуля, что неблагоприятно влияет на масляную пленку на его поверхности, с учетом высоких температур самого поршня и гильзы цилиндра. Повторяющийся цикл ускорение-замедление поршня при вращении коленчатого вала 4200 об/мин происходит с частотой около 150 Гц.

При сгорании топливно-воздушной смеси в бензиновом двигателе обеспечиваются рабочие циклы, при которых давление в цилиндре может достигать от 6,5 до 8 МПа.

Поступление избыточного количества воздуха в камеру сгорания, приводит к максимальным температурам газа в камере в диапазоне от 1800 до 2600 °С. Такая температура значительно превышает температуру плавления материала на основе алюминия применяемого при изготовление поршней (около 700 °С). Для обеспечения нормальной работы, поршень должен интенсивно охлаждаться. Это достигается посредствам контакта поршня и колец с гильзой и маслом, которые отбирают часть тепла и передают ее охлаждающей жидкости. Из-за высокой тем-

пературы снижается прочность материала, а в следствии его охлаждения прочность принимает первоначальные значения. Поэтому напряжения, возникающие при циклических нагрузках, складываются с напряжениями, возникающими при сгорании топлива. В целях уменьшения воздействий указанных напряжений, на поршень, необходимо определится с рациональным выбором материала. Материал поршня должен удовлетворять следующим требованиям:

– низкая плотность, позволяющая добиться минимальной инерции при возвратно-поступательных движениях деталей; вес деталей играет большую роль для высокофорсированных автомобильных двигателей;

– высокая теплопроводность, позволяющая максимально быстро рассеивать тепло;

– хорошие прочностные свойства при повышенных температурах, позволяющие при температурах, наблюдаемых на поршне обеспечивать высокое сопротивление деформации и усталостному разрушению;

– хорошая износостойкость при высоких температурах, обеспечивающая минимальный износ поршня и продлевая его срок службы;

– минимальный коэффициент теплового расширения, который при правильной подборке с материалом применяемого для изготовления гильзы позволит добиться минимальных зазоров при нагреве двигателя и в тоже время исключить заклинивание.

Поэтому исследования в области разработки нанесений покрытий позволяющих повысить термостойкость, адгезионную прочность деталей камеры сгорания двигателя и, как следствие, повысить технические характеристики двигателя, являются актуальной научной и практически значимой задачей.

Степень разработанности темы. Применение высокоэффективных и надежных покрытий рассматривается в научных работах Батищева А.Н., Новикова А.Н., Федорова В.А., Малышева В.Н., Суминова И.В., Великосельской Н.Д., Черненко В.И, Эпельфельда А.В., Гордиенко П.С., и других [5-16]. Непрочная связь с основой материала одна из основных проблем при нанесении покрытий, что приводит к растрескиванию, отслаиванию и вспучиванию покрытия. Микродуговое оксиди-

рование (далее МДО) поршней позволяет формировать многофункциональные покрытия, отличающиеся от исходных свойств материала по износостойкости и теплостойкости. Применительно к поршням автомобильного двигателя недостаточно исследовано влияние теплозащитных оксидных слоев на днищах поршней, полученных МДО, на показатели рабочего цикла бензинового двигателя и эксплуатационные характеристики автомобиля. Поэтому данные вопросы требуют дальнейших исследований.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» с участием ФГБОУ ВО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина».

Цель исследований. Повышение технических двигателей с помощью микродугового оксидирования днищ поршней двигателей.

Задачи исследований:

– Изучить влияние параметров микродугового оксидирование на свойства материала поршней;

– Обосновать влияние микродугового оксидирования днищ поршня на технические характеристики двигателя;

– Выполнить расчет параметров рабочего цикла ДВС, оснащенного поршнями с оксидированным днищем;

– Изготовить опытные образцы поршней двигателя, обработанных методом микродугового оксидирования, провести лабораторные исследования механических и физико-химических свойств оксидированного слоя;

– Провести стендовые сравнительные эксплуатационные исследования двигателя, оснащенного штатными поршнями и поршнями с оксидированными днищами, оценить технико-экономическую эффективность от их использования;

– Провести натурные испытания по оснащению бензинового двигателя поршнями с оксидированным днищем и оценить мощностную и технико-экономическую эффективность от их использования.

Объект исследований. Рабочий процесс автомобильного бензинового двигателя с поршнями, днища которых обработаны методом микродугового оксидирования.

Предмет исследований. Стендовые показатели двигателя УМЗ-417 и эксплуатационные показатели автомобиля ВАЗ, оснащенных поршнями с оксидированным днищем.

Научную новизну работы составляют:

– обоснованные технологические режимы МДО, влияющие на формирование толщины покрытия, механических и физико-химических свойств оксидированного слоя;

– стендовые испытания двигателя, оснащенного штатными поршнями и поршнями с оксидированным днищем;

– эффективные показатели двигателя, оснащенного поршнями с оксидированным днищем;

– эксплуатационные и топливно-экономические показатели автомобильного двигателя оснащенного поршнями с оксидированным днищем.

Практическая значимость работы. Рекомендуемые режимы технологического процесса МДО днищ поршней позволяют получить оксидированный слой толщиной 8 мкм, пористостью 8…10 %, обеспечивающий снижение температуры поршня до 25 % по сравнению со штатными поршнями. Использование поршней с оксидированными днищами в двигателе УМЗ-417 снижает удельный эффективный расход топлива на 8,8 %, уменьшает путевой расход топлива автомобиля на 5,1 % при одновременном повышении эффективной мощности на 4,8 % по сравнению с двигателем, укомплектованным штатными поршнями.

Аналогичное применение режимов микродугового оксидирования к днищам поршней бензинового двигателя ВАЗ 2107, примененных на практике, показало, что общий расход топлива уменьшился на 2,6 %, а при движении в городском цикле на 5,5 %, по сравнению с расходом до применения покрытия.

Реализация результатов исследований. Натурные испытания продолжаются в настоящее время.

Методология и методы исследования. Исследования выполнены с использованием основных положений теории ДВС, методов математической статистики и сопоставления теоретических и экспериментальных данных.

Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных методик. За метод исследований принят метод сравнительных исследований двигателя в стендовых условиях и автомобилей в эксплуатационных условиях в штатной и экспериментальной комплектациях.

Результаты исследований, выносимые на защиту:

– обоснование влияния режимов микродугового оксидирования на формирование толщины и пористости оксидированного слоя;

– технологические режимы процесса оксидирования днища поршня;

– показатели бензинового двигателя и эксплуатационные показатели автомобиля с двигателем, оснащенным поршнями с оксидированным днищем.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность результатов подтверждается лабораторными исследованиями по параметрам микротвердости, пористости, измерению теплопроводности, а также стендовыми исследованиями двигателя и эксплуатационными исследованиями автомобиля с двигателем в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с оксидированными днищами) комплектациях.

Результаты исследований доложены на межвузовских и международной научно-практических конференциях ФГБОУ Пензенский государственный университет», ФГОБУ ВО Пензенский ГАУ.

Публикации:

– Бычков В.И. Теплофизические характеристики поршней двигателей внутреннего сгорания с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности / Казанцев И. А. Бычков В. И. Казанцев А. И. // Электронное периодическое издание «Аллея науки». – 2018. - № 5. С 25-41.

– Бычков В.И. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания / Казанцев И. А. Бычков В. И. Казанцев А. И. // Известия ВУЗ. Поволжский регион. – 2018. - № 2. С 37-57.

– Бычков В.И. Перспективы применения технологии микродугового оксидирования для поршней двигателей внутреннего сгорания / Казанцев И. А. Быч-

ков В. И. Казанцев А. И. // V Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Экономика. Социальная сфера». (Актуальные проблемы и их решения). – 2018. С 28-40.

Структура и объем диссертации. Диссертация изложена на 69с., состоит из введения, 6 разделов, общих выводов, библиографический список из 52 наименований, содержит 11 таблиц и 35 рисунков.

Автор считает своим долгом выразить благодарность ФГБОУ ВО «Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина» и МГУ им. Н. П. Огарева, за помощь в проведении стендовых испытаний и лабораторных исследований.

1 Анализ конструкторских и технологических решений поршней двигателей внутреннего сгорания

Для повышения эксплуатационных качеств поршней двигателя внутреннего сгорания, их поверхности подлежат различным видам обработки. Наиболее распространенным является нанесение покрытий, которые направлены на выполнение двух основных функции:

– повышение антифрикционных и физико-механических свойств поверхности поршня (твердости и износостойкости) и формирование на его поверхности покрытия на весь период срока службы, исключая растрескивание, эрозию;

– повышение качества приработки поршня. Покрытия наносят на поверхность поршня, и оно изнашивается в течение приработки двигателя.

Современные требования к качеству получаемой техники приводят к разработке новых технологий по упрочнению поверхности деталей, их назначение заключается в создании поверхностей с высокими физико-механическими свойствами, повышенной износо- и коррозионной стойкостью, высокой адгезионной прочностью.

Повысить сопротивление разрушению, деформации и увеличить срок службы заготовки (детали) возможно одним из методов упрочнения, к числу которых относится газотермическое напыление.

Газотермическое напыление – это процесс нагрева, диспергирования, и переноса конденсированных частиц распыляемого материала газовым или плазменным потоком для формирования на подложке слоя нужного материала. Разновидности газотермического процесса представлены на рисунке 1.1.

Рисунок 1.1 – Виды напыления

Плазменное напыление – процесс нанесения покрытия на поверхность изделия с помощью плазменной струи. Природа этого процесса заключается в следующем - в высокотемпературную плазменную струю подаётся распыляемый материал, который по мере нагрева приобретает высокую кинетическую энергию, и в виде двухфазного потока направляется на покрываемую поверхность. При их соударении и деформации частиц подложки происходит взаимодействие частиц и формирование покрытия.

Детонационное напыление – нанесение на поверхность покрытия используя для этого энергию продуктов детонации газокислородного топлива. Суть метода заключается в нагреве напыляемого материала (обычно порошка) с последующим его ускорением и переносом на напыляемую деталь с помощью продуктов детонации. Для процесса, в качестве горючего газа обычно применяется пропан-бутановая смесь.

Газопламенное напыление – наиболее простой и доступный из разновидностей газотермического напыления. Процесс нанесения покрытия состоит из образования капель (частиц) малого размера расплавленного металла и перенос их на поверхность подложки, где они удерживаясь формируют покрытие. В качестве материала используют металл и полимеры, проволочный либо шнуровой материал подается в пламя ацетилен-кислородной либо пропан-кислородной горелки, где под действием температуры и сжатого воздуха расплавляется и переносится на напыляемую поверхность, формируя покрытие. Метод прост в освоении и применении, может применяться как в ручном, так и в автоматизированном режиме.

Напыление с оплавлением – один из наиболее распространенных методов газотермического напыления, позволяющий получить плотные износо-коррозионностойкие покрытия с высокой адгезией. Метод, обеспечивает металлургическую связь покрытия с основой. Применяется, если высокий нагрев при оплавлении не ведет к риску изменения геометрии детали, либо такой риск считается оправданным.

Одной из наиболее актуальных задач науки и техники в настоящее время является разработка технологий по получению качественных покрытий для упрочнения и защиты изделий из металла применяющихся в агрессивных средах, и являющихся также экологически чистыми. Микродуговое оксидирование на данном этапе развития является одним из перспективных методов по упрочнению деталей машин, с помощью которого можно получать многофункциональные керамические покрытия с различным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, декоративные и электроизоляционные, имеющие высокие эксплуатационные показатели. Суть процесса заключается в возникновение на поверхности детали микродуговых разрядов вследствие которых формируется высокопрочное износостойкоое покрытие (МДО-покрытие), состоящее преимущественно из α-$Al_2.O_3$ (корунда) и других окислов алюминия.

2 Модельные представления о механизме формирования МДО-покрытий

Процесс микродугового оксидирования заключается в последовательно протекающих нескольких стадий изображенных на рисунке 2.1.

– в безыскровом режиме происходит формирование диэлектрической пленки, что аналогично процессу, протекающему при традиционном анодировании металлов в водных электролитах, (область 1) ток протекает по электрохимическим законам М. Фарадея, поэтому ее чаще называют «Фарадеевкой областью»;

– в искровом режиме (область 2) на поверхности детали (анода) происходит возникновение свечение мелких искр перемещающихся по детали;

– в микродуговом режиме (область 3) происходит движение более крупных желто- красных разрядов;

– в дуговом режиме (область 4) происходит частичное разрушение покрытий.

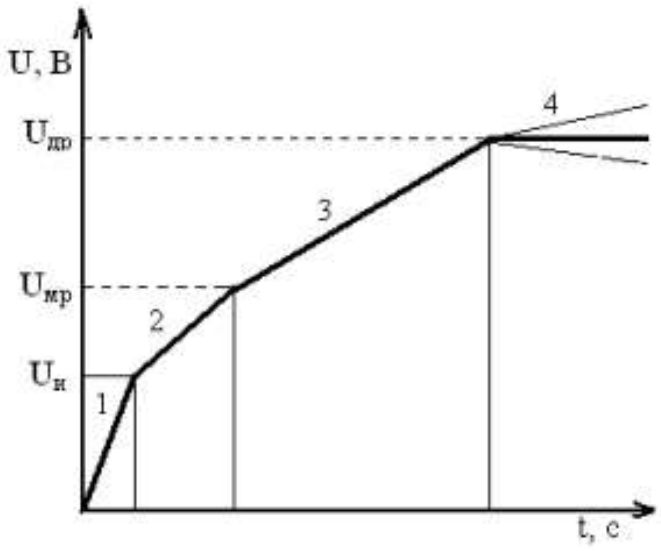


Рисунок 2.1 – Полная формовочная кривая процесса МДО: 1– анодирование, 2 – искрение, 3 – микродуговой разряд, 4 – дуговой разряд.

За счет изменения в структуре покрытие в области объемного заряда электрических и тепловых параметров осуществление микроплазменных разрядов происходит переход от одной стадии процесса оксидирования к другой [17].

Из-за значительной сложности протекающих физико-химических процессов до сих пор отсутствует общепринятая модель формирования МДО-покрытий, это связано с тем, что описании роста оксидных покрытий при МДО алюминиевых сплавов основываются на классических электрохимических представлениях [18, 19] или построенные в рамках феноменологической модели [20, 21]. Мнения о механизме и локальных местах микроплазменных пробоев в системе «металл - оксидная пленка - парогазовая фаза – электролит» противоречивы. Многочисленные предлагаемые теории пробоя и возникновения искрения можно разделить на две группы [21]:

– Ионный пробой, причиной которого считают внедрение в оксид ионов электролита и соответственно локальный рост его ионной проводимости,

– Электронный пробой, причиной которого считают «инжектирование» электронов в зону проводимости оксида и электронную лавину, возникающую вследствие ударной ионизации.

Вторую теорию поддерживают большее количество исследователей.

По мнению ряда исследователей, рост покрытия происходит вследствие протекания следующих процессов:

– Взаимодействие расплавленного вещества пленки в каналах разряда с компонентами электролита, с последующем наплавлением и встраиванием анионов [22];

– Плазмохимический синтез, термические или термоэлектрохимические превращения компонентов плазмы в каналах разряда [9, 12];

– Электрохимический механизм (анодирование и электрофорез) [7, 23, 24].

О механизме протекания процесса МДО можно выделить, модельные представления, разработанные авторами работ [25, 26], в основе которых лежат следующие положения:

– пробой парогазовой фазы, сформированной в сквозных порах покрытия;

– вынос плазмы на поверхность каналов микро-разрядов;

– параллельно протекающие процессы: экзотермическое взаимодействие окислителей с ювенильной поверхностью дна каналов микроразрядов с последующим окислением испаряющихся атомов металлических компонентов сплава;

– осаждение на поверхности покрытия или втягивание в каналы микроразрядов оксидов после плазмо- и термохимических преобразований составляющих электролита.

Модели с более корректным представлением о процессе могут стать инструментом, который позволит управлять процессом и получать МДО-покрытия с необходимыми свойствами.

3 Преимущества и недостатки технологии МДО

Микродуговое оксидирование берет свое начало от традиционного анодирования, поэтому в случае перехода на технологию МДО ее следует сравнить с существующей. Основным отличием между анодированием и МДО является использование энергии электрических разрядов, распространяющихся по обрабатываемой поверхности погруженной в раствор электролита, которые оказывают особое, плазмохимическое и гидродинамическое воздействия на поверхность металла основы, электролит и само покрытие, в следствии чего формируются керамические покрытия с регулируемыми элементным и фазовым составом, структурой и свойствами [27]. В таблице 1 приведено сравнение традиционного анодирования и МДО. МДО позволяет поднять качество защитных покрытий на более высокий уровень, сочетая в себе сущность процесса классического анодирования с положительными технологическими особенностями. В результате изучения технологии получения в технологии МДО были выделены преимущества, связанные с особенностями электролита:

– малая концентрация, неагрессивность электролитов и экологичность самого процесса, так как в раствор на основе воды вводятся относительно небольшие концентрации нетоксичных химических компонентов, возможность нанесение покрытий на сложнопрофильные детали благодаря высокой рассеивающей способности электролита;

– отсутствие необходимости, в начале технологической цепочки, в длительной предварительной подготовке поверхности детали, что способствует сокращению рабочих производственных площадей и сокращение времени технологического процесса;

– оборудование позволяет получать покрытия большой толщины без применения дополнительного холодильного оборудования, легкоуправляемое и простое оборудование, возможность автоматизировать технологический процесс;

– возможность получать многофункциональные керамические покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками и высокой адгезией, обрабаты-

ваемое изделие не изменяет начальных размеров детали, так как покрытие формируется за счет преобразования поверхностного слоя, стабильность характеристик покрытий.

При замене анодирования на МДО будет наблюдаться повышение производительности труда и, как следствие, расширится ассортимент предлагаемой продукции высокого качества при постепенном снижении себестоимости обработки. Однако, ряд недостатков в технологии МДО препятствует широкому применению в промышленности, этими недостатками являются:

– высокая энергоемкостью процесса препятствует повышению производительности МДО, так как при получении толстых покрытий возникает необходимость в повышение плотности переменного тока, или увеличение длительности процесса МДО. Снизить энергозатраты при получении покрытий возможно, к примеру, за счет использования новых источников питания и технологических приемов, которые позволили бы максимально уменьшить негативные последствия жестких режимов по напряжению и плотности тока, или разработки комбинированных энергосберегающих режимов проведения процесса МДО, что позволит повысить экономическую эффективность.

– сложность получения равномерного покрытия, с требуемой толщиной и свойствами покрытий на изделиях сложной геометрической формы.

Таблица 3.1 – Сравнение технологии МДО и традиционного анодирования

Характеристики	Классические анодные процессы в растворах электролитов	МДО
Тип электролита	кислотный	Слабощелочной
Экологичность	использование агрессивных электролитов, требуются сложные очистные сооружения	экологичность и неагрессивность электролитов, не требуются очистные сооружения
Подготовки поверхности детали перед нанесением покрытия	многочисленные этапы подготовки (травление, обезжиривание), после каждого этапа требуется промывка детали	нет необходимости специальной предварительной подготовки поверхности (в электрическом разряде происходит очистка обрабатываемой поверхности)
Системы охлаждения	использование сложной дорогостоящей системы охлаждения в случае получения износостойких покрытий	возможность получения толстых (до 400 мкм) покрытий без применения сложного и экологически вредного холодильного оборудования
Напряжение, В	10…30	100…300
Плотность тока, $А/дм^2$	до 10 (постоянный ток)	20…100 (переменный и импульсный)
Толщина, мкм	до 60,00	до 400,00
Твердость, ГПа	до 6,00	до 25,00

4 Особенности строения, свойства и области применения МДО-покрытий

4.1 Строение и свойства

В процессе микродугового оксидирования покрытие формируется в результате окисления химических элементов сплава и термических превращений компонентов электролита под влиянием микроплазменных разрядов. При этом структура покрытия состоит из соединений как электролита, так и сплава [28]. Покрытия, получаемые на основе алюминия и его сплавах в щелочном электролите на основе силикатов, образует трехслойную структуру, и распределение компонентов происходит неравномерно [23, 29, 30]: наружный технологический слой (от 30 до 100 мкм), основной рабочий слой (от 150 до 250 мкм) и переходной слой (от 3 до 5 мкм). Повышенное содержание элементов, перешедших в покрытие из электролита, наблюдается в переходном, и особенно в наружном технологическом слое [29].

В результате плазмохимических и термохимических процессов при микродуговом оксидирование на алюминиевых сплавах образуется покрытие переменного фазового состава, содержащее различные аллотропические модификации оксида алюминия: α-$A1_2{\cdot}O_3$, δ-$A1_2{\cdot}O_3$, γ-$A1_2{\cdot}O_3$ и муллита $2Si{\cdot}O_2{+}3A1_2{\cdot}O_3$ [30, 31]. В составе покрытий, образуемых обычным анодированием алюминиевых сплавов, стабильная высокотемпературная модификация α-$A1_2{\cdot}O_3$ не обнаруживается, так как переход метастабильной модификации оксида алюминия γ-$A1_2{\cdot}O_3$ в α-$A1_2{\cdot}O_3$ становится возможным лишь при температурах около 1000°С (в других источниках от 600 до 1800°С). Различная химическая природа ионов стабилизаторов фазы γ-$A1_2{\cdot}O_3$ при оксидировании разных сплавов объясняет отличие температуры перехода γ-$A1_2{\cdot}O_3$ → α-$A1_2{\cdot}O_3$. При МДО температура в местах образования микродуг может достигать от плюс 2000 до плюс 3000°С, в то время как деталь (анод) и электролит остаются сравнительно холодными [31].

Рассмотрим свойства и особенности фазового состава каждого слоя

МДО-покрытия. Основу наружного рыхлого (технологического) слоя покрытия, по данным рентгеноструктурного анализа, составляет муллит ($3Al_2{\cdot}O_3{\cdot}2Si{\cdot}O_2$), который представляет собой игольчатые кристаллы-двойники [31], встречаются также отдельные участки из α- и γ-$Al_2{\cdot}O_3$. Такие типичные кристаллы муллита имеют место только в основной приповерхностной зоне, в переходном слое муллит находится в мелкокристаллическом состоянии. Поверхностный слой отличается высокой шероховатостью, а также низкой твердостью и износостойкостью. Основной слой (рабочий) в большом количестве содержит фазу α-$Al_2{\cdot}O_3$ (корунд), которая способствует высокой микротвердости и износостойкости данного слоя. Максимальное содержание α-$A1_2{\cdot}O_3$ в основном слое, наиболее удаленного от двух возможных охлаждающих сред (подложки и электролита) устанавливается тем, что импульс высокой температуры в этой зоне наиболее длителен [25]. Переходный слой, который образуется в зоне соединения металла и покрытия, состоит из оксидов алюминия (α-, γ-$A1_2{\cdot}O_3$), муллита ($2Si{\cdot}O_2{\cdot}3A1_2{\cdot}O_3$) и частиц алюминия [31].

МДО-покрытия на алюминиевых сплавах не уступают по свойствам твердым сплавам и превосходят - газотермические (микротвердость в 2,5 раза выше, чем у газотермических, и в 4,5 раза, чем у закаленной стали, износостойкость выше показателя закаленной стали в 2,5 раза, а адгезионная прочность – в 3,5 раза выше, чем при технологии плазменного напыления. Сплавы А1 обработанные методом МДО, показывают повышенную стойкость к абразивному износу, характерную стойкости композитов на основе WC, и покрытиям полученных на основе корунда и боридов [32, 33].

Исследование влияния технологических параметров МДО на комплекс функциональных свойств алюминиевых сплавов для поршней ДВС, изучение их физико-механических свойств, с применением физических методов диагностики, является основой для дальнейшей разработки практических рекомендаций по определению рациональных технологических параметров МДО-покрытий с необходимыми характеристиками.

4.2 Области применения

Сочетание высоких показателей характеристик МДО-покрытий, простота технологии в их нанесения определяет возможность широко применение в различных отраслях промышленности. Выделим основные области, где МДО находит широкое применение:

– замена дорогих композитных материалов и тяжелых металлических сплавов на легкие металлы (Al, Ti, Mg и их сплавы) с МДО-покрытиями;

– получение керамических покрытий методом МДО дает возможность повысить срок службы деталей. Эффективность технологии МДО позволяет выполнить замещение традиционных технологий (анодирование) на микродуговое оксидирование, обеспечивающее более высокие физико-механические характеристики;

– широко регулируемая пористость (размеры пор от 0,01 до 10 мкм) путем изменения режимов МДО и составом электролитов покрытие может служить матрицей применяемой в полимерном производстве (фторопластов, полиамидов, лаков) что позволяет увеличить износостойкость поверхности основного материала в несколько десяток раз, а также может служить как подслой под дальнейшее нанесение лакокрасочных покрытий, при котором осуществляется высокопрочное сцепление красителей с поверхностью детали и повышая ее коррозионную стойкость.

В машиностроении МДО-покрытия нашли применение в парах трения, подшипниках скольжения, поршнях, зубчатых передач, цилиндрах, торцевых уплотнениях для двигателей внутреннего сгорания, машин и станков, так же применяются в судостроении, сельскохозяйственной техники, авиационной промышленности [34, 27-31]. Нанесение покрытия на детали ЦПГ позволяет повысить износостойкость, снизить механические затраты от 40 до 50 %, уменьшить массу, металлоемкость и теплонагруженность, повысить КПД [34, 35].

Области применения МДО-покрытий и технологии МДО не ограничиваются приведенными примерами, поскольку возможности метода исследованы еще не

полностью, и номенклатура деталей с МДО-покрытиями будет постоянно корректироваться и несомненно расширяться.

5 Программа и методика экспериментальных исследований

Программа по проведению экспериментальных исследований включала в себя следующие этапы:

– лабораторные исследования влияние параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршней; исследование опытных образцов с МДО-покрытием по твердости, пористости, теплопроводности и теплоемкости.

– сравнительные стендовые исследования бензинового двигателя УМЗ-417 в комплектации со штатными поршнями, с поршнями, оснащенными МДО-покрытиями при различных нагрузках, скоростных режимах.

– сравнительные натурные испытания ДВС со штатными поршнями и поршнями с МДО-покрытием на автомобиле ВАЗ 2107.

5.1 Методика микродугового оксидирования поршней

В лаборатории ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет» проводилось микродуговое оксидирование днищ поршней на установке показанной на рисунке 5.1, состоящей из:

– силового оборудования – специализированных источников питания;

– ванн, предназначенных для подготовки поверхности, обработки и промывки;

– металлоконструкций для размещения ванны;

– вспомогательного оборудования – дистиллятор, насос-фильтр для очистки и перекачки растворов, резервных емкостей, приборов контроля качества покрытия и состояния электролита [48].

В ванну с водным раствором электролита, показанную на рисунке 5.1, помещают днище поршня. Подводят ток на электроды, один из которых (анод) закреплен на обрабатываемом поршне, другой (катод) прикрепляется на внутренней поверхности ванны. При поступлении электрического тока, и под действием электролита на материале днища поршня происходит формирование покрытия. В про-

цессе нанесение покрытия на днище поршня его перемещают по ванне с электролитом, при этом охлаждая противоположную сторону днища сжатым воздухом. Это влияет на равномерную скорость охлаждения поршня и как следствие, создаются одинаковые условия формирования покрытия на всем этапе нанесения покрытия.

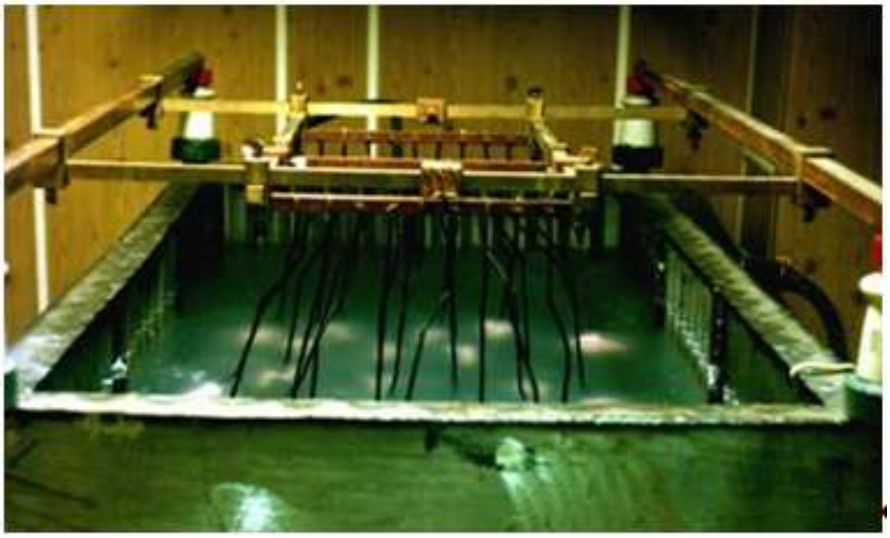


Рисунок 5.1 – Установка для микродугового оксидирования

Последовательность технологических операций микродугового оксидирования поршней показанного на рисунке 5.2.

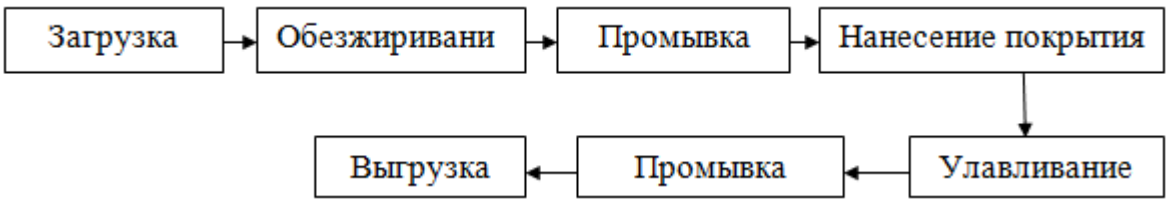


Рисунок 5.2 – Технологические операции МДО

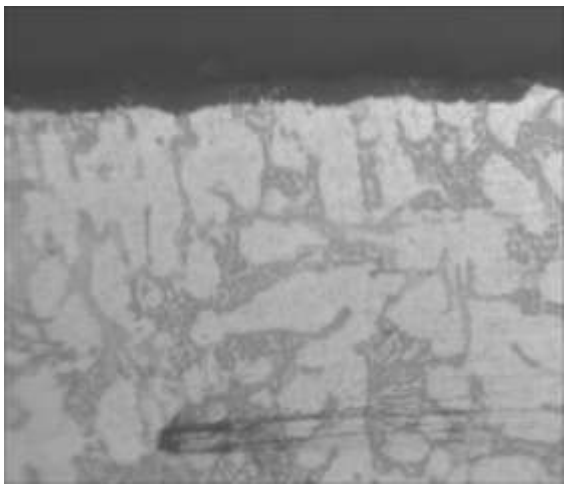
Для проведения испытаний по нанесению покрытием методом МДО поршней, был выбран сплав АК12. Для процесса МДО были выбраны наиболее рациональные режимы основываясь на ранее проведенных экспериментах: (плотность тока j – 5А/дм^2; напряжение U–120 В; время – 5 мин) и состав электролита (силиката натрия (nNa$_2$O·mSiO$_2$) – 80 г/л; фосфата натрия (Na$_3$PO$_4$) – 5 г/л и гидроксида натрия (NaOH) – 5 г/л).

5.2 Методика лабораторных исследований покрытия днища поршня

5.2.1 Методика определения микротвердости покрытия

Определение микротвердости оксидированных покрытий, полученных при МДО, проводили методом восстановленного отпечатка с использованием прибора ПМТ-3М изображенного на рисунке 5.3, на поперечных микрошлифах показанных на рисунке 5.4 по толщине оксидированного слоя по ГОСТ 9450-76 [36].

Рисунок 5.3 – Прибор ПМТ-3М



×400

а) б)

Рисунок 5.4 – Микрошлиф поршня с оксидированной поверхностью: а) – общий вид; б) – фотография микрошлифа

Суть метода восстановленного отпечатка, заключается в нанесении на испытуемую поверхность изделия (образца) отпечатка под действием статической нагрузки, приложенной к алмазному наконечнику в течение определенного времени. После удаления нагрузки и измерения параметров полученного отпечатка число микротвердости рассчитывается по формуле [36]:

$$\mathrm{HV} = \frac{F}{S} = \frac{0{,}102 \cdot 2F \sin d/2}{d^2} = 0{,}189\frac{F}{d^2}, \quad (1)$$

где F – нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику, Н;

S – площадь боковой поверхности полученного отпечатка, мм^2;

d – среднее арифметическое длин обеих диагоналей квадратного отпечатка, мм.

Образцы для исследований шлифовали для удаления рыхлого слоя покрытия (муллита), с последующей полировкой. Для измерений применяли наконечник, в виде четырехгранной пирамиды с углом при вершине 136°20', нагрузка 1,96 Н. Погрешность измерений не более 0,3 мкм.

5.2.2 Методика определения пористости покрытия

Определение пористости днища поршня проводили по ГОСТ 9.302-88 [37].

Перед определением пористости, поршни выдерживали до температуры помещения, в котором проводили контроль, и обезжиривали этиловым спиртом.

После удаления жирной поверхности с поршней их промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе, затем протравливали раствором состоящем из:

– калий железосинеродистый - 3 г/дм^3;
– натрий хлористый - 10 г/дм^3.

При проведении контроля, днище поршня погружалось в раствор как показано на рисунке 5.5, и выдерживалось в течение 5 мин при комнатной температуре.

Рисунок 5.5 – Обработка оксидированного поршня раствором

Пористость покрытия определяли как отношение площади образуемую порами к площади рассматриваемого участка в процентах.

Приблизительное число пор ($N_{ср}$) вычисляли по формуле [36]:

$$N_{ср} = N_{общ} / S, \quad (1)$$

где $N_{ср}$ – число пор;

$N_{общ}$ – общее количество пор на исследуемой поверхности;

S – площадь исследуемой поверхности, м^2.

5.2.3 Методика определения температуропроводности

Измерение коэффициента температуропроводности и теплопроводности определяли методом лазерной вспышки *LFA* 427.

При подготовке к измерению поверхности образца очищаются спиртом и покрываются коллоидным графитом (согласно инструкции по эксплуатации прибора и для лучшего поглощения теплового импульса), после чего помещается в держатель прибора.

Измерение проводится в атмосфере инертного газа – аргона. При установлении заданной температуры измерения фронтальная сторона пробы поглощает импульс энергии излучения лазера. После поглощения энергии образцом в нем происходит выравнивание температуры. При этом с помощью ИК-детектора регистрируется относительное изменение температуры на обратной стороне образца. Математический анализ этого изменения температуры со временем позволяет определить коэффициент температуропроводности α. При адиабатических условиях α определяют по формуле [36]:

$$\alpha = 0{,}1388 \cdot \frac{l^2}{t_{0.5}}, \qquad (2)$$

где α – коэффициент температуропроводности;

l – толщина пробы, мм;

$t_{0.5}$ – время достижения 50 % значения от максимальной температуры.

5.2.4 Методика определения удельной теплоемкости

Измерение удельной теплоемкости проводили на дифференциальном сканирующем калориметре *DSC*823. Согласно методике измерения на данном приборе масса образца должна быть сравнима с массой эталона, в качестве которого используется сапфировый диск.

Подготовка измерения начинается с изготовления навески из массивного образца. Форма и размеры навески определяются двумя факторами:

– объем тигля, в котором находится навеска при измерении, составляет 40 микролитров;

– навеска должна иметь максимально возможную площадь контакта с дном тигля.

Расчета значений удельной теплоемкости Ср из экспериментального сигнала основан на соотношении [36]:

$$C_p = \frac{DSC_{S+pan} - DSC_{zeroline}}{DSC_{St+pan} - DSC_{zeroline}} \frac{m_{St}}{m_S} C_{p,St} \qquad (3)$$

где DSC_{S+pan}, – экспериментальный сигнал от образца *S* и тигля *pan*, в который образец помещен;

DSC_{St+pan} – экспериментальный сигнал от образца *St* и тигля *pan*, в который образец помещен;

$DSC_{zeroline}$ – экспериментальный сигнал от пустого тигля (нулевая линия или бланковый сигнал);

m_S, m_{St} – масса образцов (навески) и эталона, г;

$C_{p,S}$ – удельная теплоемкость образца, Дж/кг$_\times$К;

$C_{p,St}$ – удельная теплоемкость эталона, Дж/кг$_\times$К.

Расчет теплопроводности осуществляется согласно выражению [36]:

$$\lambda(\mathrm{T}) = a(\mathrm{T}) \cdot \rho(\mathrm{T}) \cdot c_P(\mathrm{T}), \qquad (4)$$

где α(Т) – температуропроводность образца

ρ(T) – плотность образца;

C_p(T) – удельная теплоемкость образца.

Объекты испытаний представляли собой образцы материалов на основе алюминиевого сплава АК12 с оксидным покрытием и без него. Размер образцов 10 × 10 мм, толщина 5 мм. Плотность образцов составляла 2720 кг/м^3.

Структуру теплозащитных оксидных слоев исследовали методом растровой электронной микроскопии и рентгеновского микроанализа [38].

5.3 Методика стендовых исследований двигателя оснащённого оксидированными поршнями

5.3.1 Оборудование и приборное обеспечение

Для стендовых испытаний был выбран бензиновый двигатель УМЗ-417 со штатными поршнями (без теплозащитных оксидных слоев) имеющего следующие характеристики, представленные в таблице 1.

Таблица 5.1 – Характеристики двигателя УМЗ-417

Характеристика	Значение
Рабочий объем, см^3	2445,00
Диаметр цилиндра, мм	92,00
Ход поршня, мм	92,00
Мощность, л.с./мин$^{-1}$	92/4000
Крутящий момент, Нм/мин$^{-1}$	172/2200
Вес двигателя, кг	166,00
Тактность	4
Количество цилиндров	4
Тип двигателя	Бензиновый
Расход топлива на 100 км	10,6 л

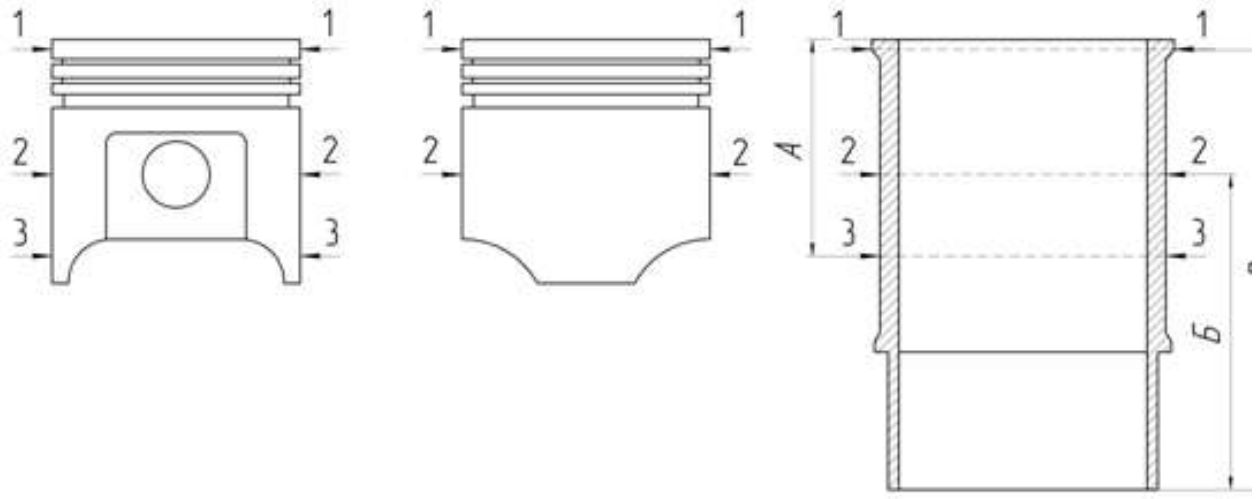
Сравнительные стендовые исследования бензинового двигателя в штатной и экспериментальной комплектации проводились по ГОСТ 14846-81 на тормозном стенде КИ-5543 ГОСНИТИ показанного на рисунке 5.6 со штатными контрольно-измерительными приборами.

Рисунок 5.6 – Экспериментальный стенд: 1 – тормозной стенд КИ-5543; 2 - двигатель бензиновый УМЗ-417; 3 – система удаления отработавших газов

Для проведения испытаний ДВС со штатным поршнем и поршнем с МДО была разработана методика, в которой описываются режимы и время работы двигателя, подготовка двигателя к пуску, порядок приготовления топлива и т.д., а так же регламентируются проводимые измерения. В ходе испытаний контролировались следующие параметры: частота вращения коленчатого вала ДВС, температура головки цилиндра, расход топлива. Время испытаний для каждого комплекта поршней было определено и состояло из двух циклов. После завершения каждого цикла испытаний производилась разборка двигателя для измерения износа гильзы и поршня.

Износ гильзы контролировался замером ее диаметра в 12-ти точках в соответствии со схемой на рисунке 5.7б. Необходимо отметить, что в плоскости каждого пояска измерение диаметра проводилось 4 раза, через каждые 45°, по такой же схеме осуществлялось измерение поршня, но из-за конструктивных особенно-

стей в плоскости 3-го пояска поршня замер проводился один раз. Для оценки износа юбки поршня выбрали зону на поршне, расположенную на 6 мм ниже края поршневого кольца, где, согласно [42], диаметральный износ максимален. Износ гильзы определялся с помощью нутромера индикаторного повышенной точности, тип НИ, диапазон от 75 мм до 100 мм, цена деления 0,01 мм по ГОСТ 868-82 [43]. Износ поршня определялся с помощью микрометра гладкого, типа МК от 75 мм до 100 мм с ценой деления 0,01 мм по ГОСТ 6507-90 [44], в соответствии со схемой на рисунке 5.7а.



а) б)

Рисунок 5.7 – Схематическое изображение точек замера геометрии поршня и гильзы: а) – схема измерения размеров поршня. Б) – схема измерения размеров гильзы; высота поясков гильзы: А – 82 мм; Б – 112 мм; В – 166 мм; высота поясков под компрессионные кольца 2 мм, под поясок маслосъемного кольца 5 мм; пояс первый – 4 мм от верхней кромки; пояс второй - 56 мм от верхней кромки; пояс третий – 82 мм от верхней кромки.

Снятие показаний проводилось с использованием скомплектованного измерительно-регистрирующего комплекса (далее ИРК) показанного на рисунок 5.8.

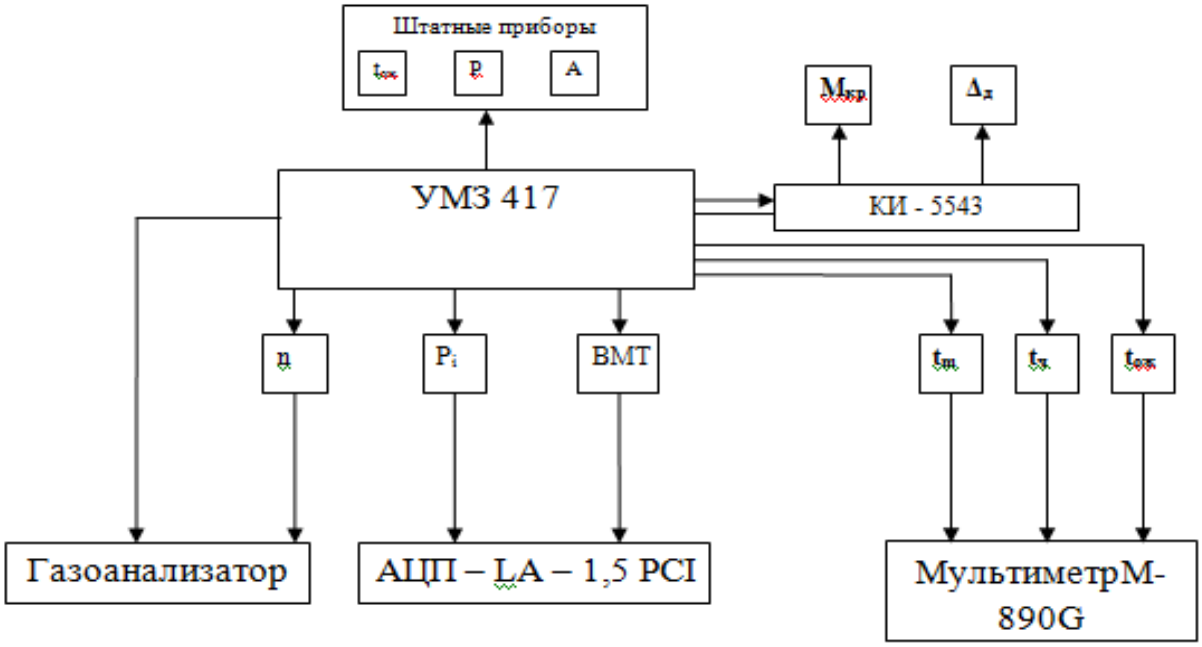


Рисунок 5.8 – Структура измерительно-регистрирующего комплекса: электрический тормозной стенд КИ-5543.(аналого – цифровой преобразователь; газоанализатор Инфракар М1-01; P_i – датчик УДПС-001; *n* – датчик измеребния частоты вращения коленчатого вала; ВМТ – датчик определения положения поршня в цилиндре; $t_м$. $t_ч$. $t_{ож}$ – термопары; $\Delta_д$ – весовой расходомер топлива.

По термодатчикам (термопар типа ТХК), установленных в места показаных на рисунке 5.9, замера температуры проводили измерение температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя, моторного масла в главной масляной магистрали двигателя, и выхлопных газов в выпускном коллекторе.

а) б) в)

Рисунок 5.9 – Расположение термодатчиков: а – температуры отработавших газов; б – температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения; в – температуры моторного масла в масляной магистрали

5.3.2 Методика подготовки двигателя УМЗ-417 к сравнительным стендовым исследованиям

Сравнительные стендовые исследования проводились с бензиновым двигателем в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с МДО-покрытием) комплектациях.

Подготовка двигателя осуществлялась в следующем порядке. Перед испытаниями поршни были подобраны с учетом обеспечения зазора между юбкой поршня и зеркалом цилиндра от 0,02 до 0,04 мм. Разница в весе между поршнями изображенных на рисунке 5.10 не превышала 4,00 г. Отверстия в бобышках под поршневой палец были выбраны с допуском – от 0,005 до 0,015 мм. Конусность и овальность отверстия – не более 0,0025 мм. Перпендикулярность оси отверстий к оси поршней составляло не более 0,04 мм на длине 100 мм. Также были подобраны поршневые кольца. Один комплект подвергался оксидированию днищ.

Рисунок 5.10 –Исследуемые поршни

Сборку двигателя и установку поршней, показанную на рисунке 5.11, производили в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобилей УАЗ.

Рисунок 5.11 – Вид двигателя со стороны картера

Поршни в цилиндры устанавливали с помощью специализированных приспособлений. При установке поршней в цилиндры были соблюдены направления меток на поршне. При запрессовке втулок в шатун обеспечивалось совпадение отверстия во втулке с отверстием в верхней головке шатуна. Расстояние между ося-

ми отверстий нижней и верхней головок шатуна соответствовало техническим параметрам. Допустимая непараллельность осей в двух взаимно перпендикулярных плоскостях на длине 100 мм составляла не более 0,04 мм; овальность и конусность не превышала 0,005 мм.

Кольца на поршень устанавливали с помощью специализированного приспособления проточками вверх, в сторону днища поршня. Нижнее компрессионное кольцо устанавливалось на поршень острой кромкой «скребком» вниз. Маслосъемные кольца подбирали с обеспечением зазора в замке от 0,3 до 0,5 мм в обоих комплектах.

Перед установкой поршней в цилиндры стыки поршневых колец разводились под углом 120° друг к другу.

Поршневой палец устанавливали в поршень с натягом от 0,0025 до 0,0075 мм. Для обеспечения правильной балансировки двигателя проводилось взвешивание поршней в сборе с шатунами, разница в весе не превышала 8 г.

Сборку двигателя проводили согласно требованиям, предъявляемым к затяжке резьбовых соединений. Динамометрическим ключом производителя *Gedore* контролировали затяжку 83 Н·м.

После сборки двигателя с типовыми поршнями была проведена его обкатка:

– холодная без нагрузки – 15 мин при оборотах коленчатого вала от 500 до 700 об/мин, 10 мин при оборотах от 700 до 900 об/мин;

– горячая без нагрузки – 15 мин при оборотах 1400 об/мин;

– горячая под нагрузкой согласно инструкции И37.316.272-2003 г. завода изготовителя в течении 35 часов.

После сборки двигателя с оксидированными поршнями была проведена его холодная и горячая обкатка без нагрузки по режимам, аналогичным обкатке двигателя с типовыми поршнями.

Стендовые исследования бензинового двигателя по мощностным и экономическим показателям проводились по ГОСТу 14846-81 [52], в условиях скоростной и нагрузочной характеристик.

По окончанию стендовых исследований с типовыми поршнями двигатель УМЗ-417 был разобран, с последующей установкой на него поршней с оксидированными днищами, с соблюдением всех требований инструкции по эксплуатации и ремонту автомобилей УАЗ.

5.4 Натурные испытания поршней с микродуговым оксидированием и методика исследований.

5.4.1 Оборудование и приборное обеспечение

Для натурных испытаний был выбран автомобиль ВАЗ 2107 оснащенный бензиновым двигателем со штатными поршнями (без теплозащитных оксидных слоев) имеющих следующие характеристики, представленные в таблице 2.

Таблица 5.2 – Характеристики двигателя ВАЗ 2107

Характеристика	Значение
Рабочий объем, $см^3$	1568,00
Диаметр цилиндра, мм	76,00
Ход поршня, мм	80,00
Мощность, л.с./$мин^{-1}$	74 / 5300
Крутящий момент, Нм/$мин^{-1}$	116 / 3000
Вес двигателя, кг	121,00
Тактность	4
Количество цилиндров	4
Тип двигателя	Бензиновый
Расход топлива, л/100 км	9.6

Для проведения испытаний ДВС со штатными поршнями и поршнями с МДО-покрытием была разработана методика, в которой описываются режимы и время работы двигателя, подготовка двигателя к пуску. В ходе испытаний контролировались следующие параметры: частота вращения коленчатого вала ДВС, температура блока цилиндра, расход топлива, пройденный путь. После заверше-

ния испытаний каждого комплекта поршней производилась разборка двигателя для измерения износа гильзы и поршня.

Измерения показателей температуры блока цилиндров проводились с использованием цифрового мультиметра *dt*830 (температура охлаждающей жидкости не регистрировалась, контролировалось отсутствие перегрева двигателя). Заправка автомобиля топливом АИ-92 производилась исключительно на одной и той же автозаправочной станции в одной и той же бензоколонке (заправка осуществлялась до первого щелчка пистолета, затем фиксировалось количество залитого топлива и пройденный путь). Частота вращения коленчатого вала не допускалась более 4500 об/мин.

5.4.2 Методика подготовки двигателя ВАЗ 2107 к сравнительным стендовым исследованиям

Сравнительные исследования проводились с бензиновым двигателем в штатной и экспериментальной (поршни с МДО-покрытием) комплектациях. Поршни штатной комплектации штатной показанные на рисунке 5.12

Подготовка двигателя осуществлялась в следующем порядке. Перед началом исследований двигатель оснащенный штатными поршнями был разобран и исследован методикой описанной в пункте 5.3.1.

Рисунок 5.12 – Комплект поршней с двигателя ВАЗ 2107

После снятие геометрических размеров, сборку двигателя показанную на рисунке 5.13 и установку поршней производили в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобилей ВАЗ.

Рисунок 5.13 – Вид двигателя со стороны картера

Поршни и кольца в цилиндры устанавливались по аналогичной схеме, что и на двигатель УМЗ, но с соблюдением требований руководства к двигателю ВАЗ.

После сборки двигателя с типовыми поршнями была проведена его обкатка:

– холодная без нагрузки – 15 мин при оборотах коленчатого вала от 900 до 1000 об/мин;

– горячая без нагрузки – 5 мин при оборотах от 1600 до 1650 об/мин;

– далее двигатель эксплуатировался в прежних режимах.

После установки штатных поршней был зафиксирован ранее пройденный путь. По истечению трех месяцев пройденный путь составил 6417 км, двигатель был разобран для снятия геометрических размеров и установки комплекта поршней с МДО-покрытием. Для нанесение покрытий были применены снятые с двигателя штатные поршни, предварительно прошедшие очистку от загрязнений и нагара.

После сборки двигателя с оксидированными поршнями была проведена его холодная и горячая обкатка без нагрузки по режимам, аналогичным обкатке двигателя с типовыми поршнями. Для чистоты проведения испытаний в системе двигателя перед испытаниями со штатными и оксидированными поршнями было заменено масло той же марки, было влито одинаковое количество антифриза, заменен воздушный, масляный и топливный фильтр, замен комплект свечей той же марки и производителя.

По окончанию практических испытаний и истечению трех месяцев пройденный путь составил 6122 км, двигатель был вновь разобран для снятия геометрических размеров и визуальной оценки состояния ЦПГ.

5.5 Обработка результатов стендовых исследований двигателя, оснащённого типовыми и оксидированными поршнями

Крутящий момент двигателя определялся по формуле [52]:

$$M_K = P_{ПИУ} l., \quad (5)$$

где $M_к$ – крутящий момент двигателя, Н·м;

$P_{ПИУ}$ – показания измерительного устройства тормоза стенда, Н;

l – плечо тормоза стенда, м.

Плечо тормоза стенда принимаем равным 0,7162.

Эффективную мощность двигателя определяли по формуле [52]:

$$N_e = \frac{M_K \cdot n \cdot 1{,}36}{716{,}2}, \quad (6)$$

где $N_е$ – эффективную мощность, кВт;

n – частота вращения коленчатого вала двигателя, об/мин.

Расход топлива исследуемого двигателя определяли весовым способом с последующим расчетом по формуле [52]:

$$G_T = \frac{3{,}6\,\Delta G}{\tau}, \quad (7)$$

где $G_т$ – расход топлива, л;

ΔG – количество топлива, г;

τ – время проведения измерения расхода топлива, с.

Удельный расход топлива исследуемых двигателей определяли по формуле [52]:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3, \quad (8)$$

где g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч;

N_e – мощность двигателя, установленная при исследованиях, кВт;

$G_т$ - расход топлива, кг/ч.

6 Результаты проведенных исследований

Микродуговое оксидирование является сложным процессом, при котором на формирование покрытия и его свойства решающее влияние оказывают состав и концентрация электролита, электрические показатели (сила тока, плотность тока, напряжения), временные параметры режима МДО и химический состав оксидируемого сплава.

Для определения рациональных режимов были проведены экспериментальные исследования влияния плотности тока, время оксидирования и напряжения на твердость, толщину и пористость оксидного покрытия. При этом неизменными параметрами оставались состав и температура электролита силикат натрия ($n Na_2O \cdot m SiO_2$) – 80 г/л; фосфат натрия (Na_3PO_4) – 5 г/л и гидроксид натрия (NaOH) – 5 г/л), сплав (АК12). На основании проведенных исследований:

– определены зависимости микротвердости и толщины покрытия от одного из выбранных режимов МДО при фиксированных значениях остальных технологических параметров;

– построены графики, изображенные на рисунках 6.1 - 6.9, зависимости моделируемых показателей от технологических параметров МДО. Результаты исследований подтвердили, что варьируя напряжение, плотностью тока и продолжительностью оксидирования можно изменять в широких пределах структуру и свойства покрытий, сформированных методом микродугового оксидирования.

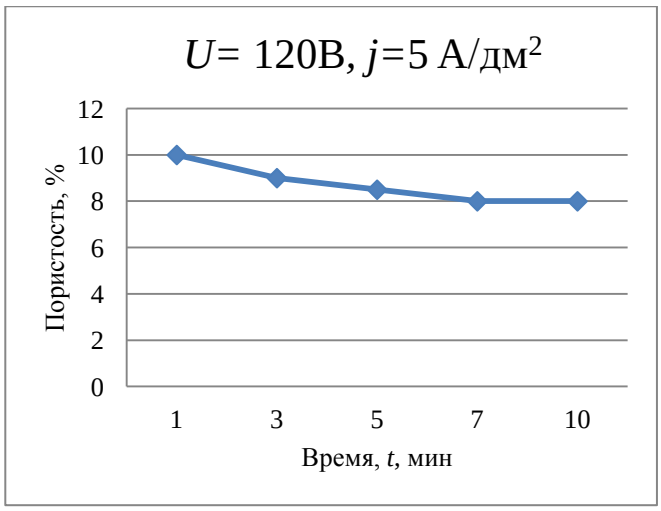


Рисунок 6.1 – Изменение пористости от времени оксидирования

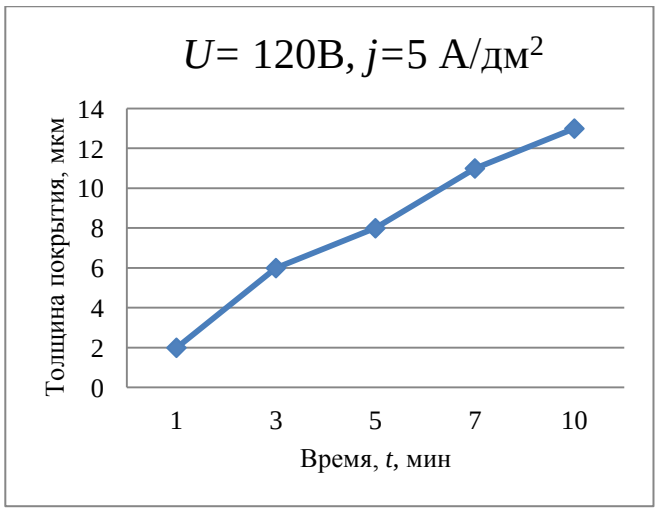


Рисунок 6.2 – Изменение толщины покрытия от времени оксидирования

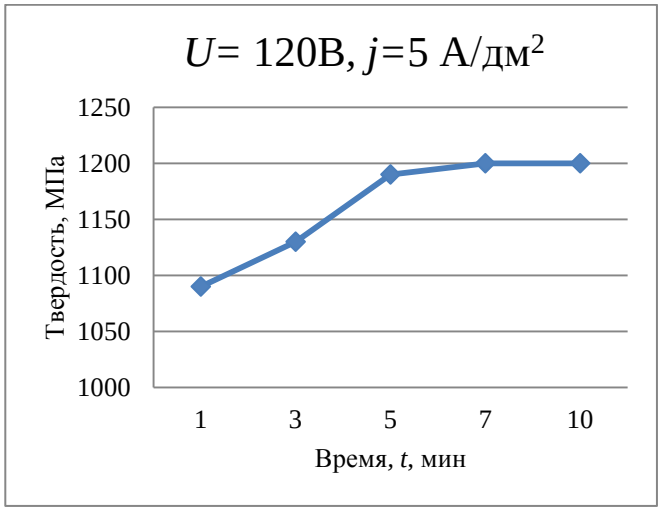


Рисунок 6.3 – Изменение твердости от времени оксидирования

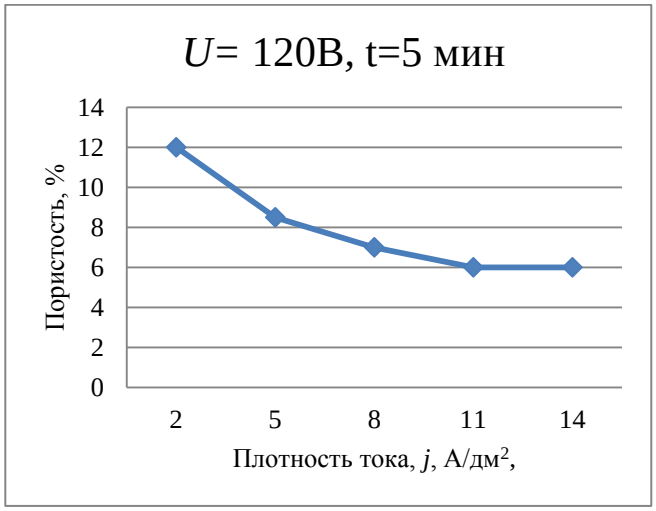


Рисунок 6.4 – Изменение пористости от плотности тока

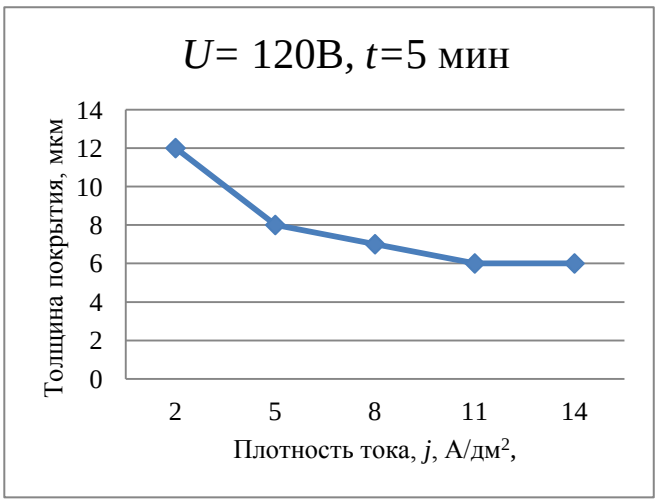


Рисунок 6.5 – Изменение толщины покрытия от плотности тока

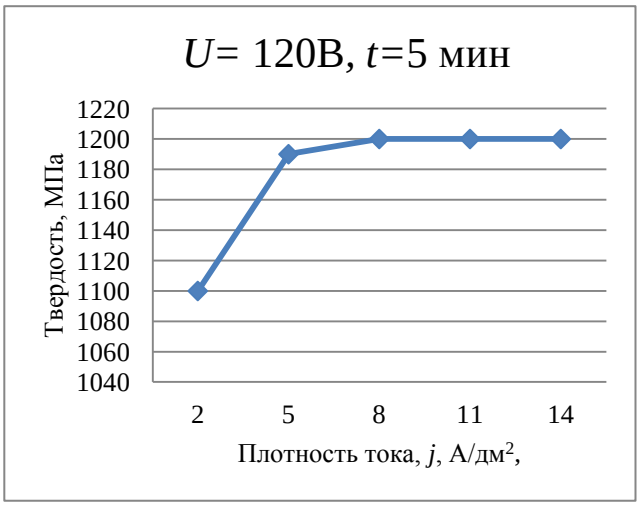


Рисунок 6.6 – Изменение твердости от плотности тока

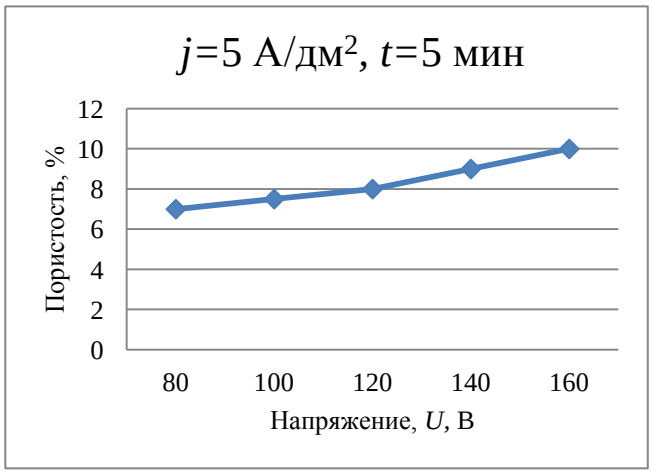


Рисунок 6.7 – Изменение пористости от напряжения

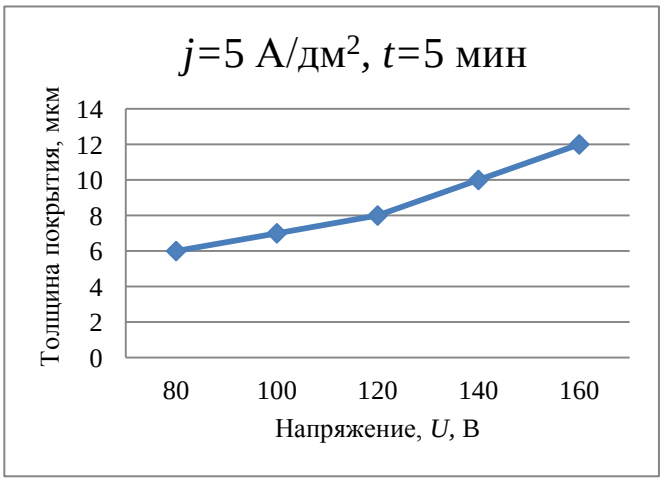


Рисунок 6.8 – Изменение толщины покрытия от напряжения

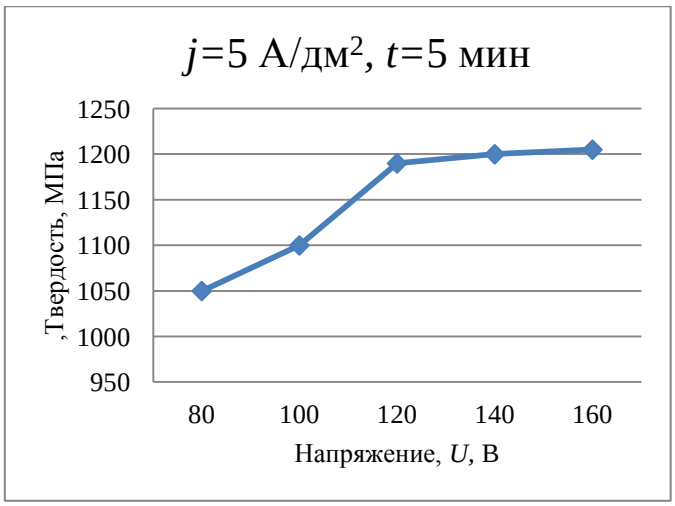
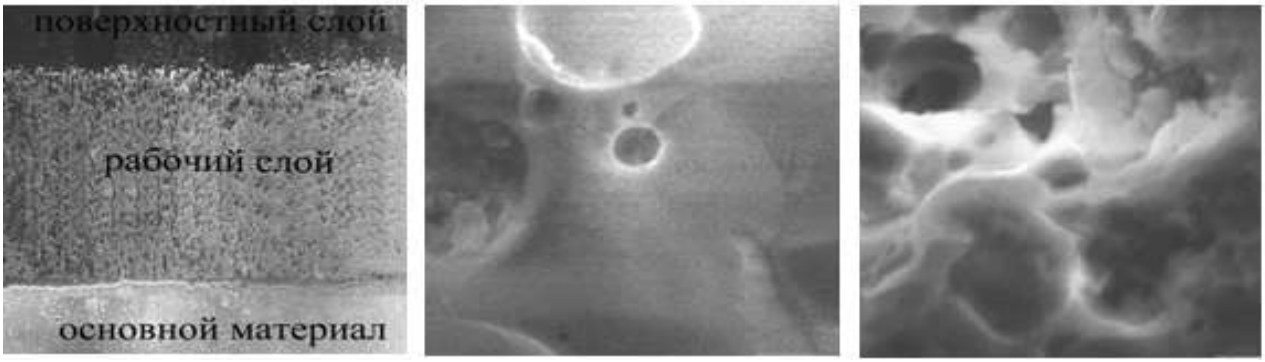


Рисунок 6.9 – Изменение твердости от напряжения

На основание проведенных исследований можно сделать вывод, что твердость., пористость и толщина покрытия растет с увеличением напряжения, плотности тока, и длительности оксидирования.

6.1 Результаты лабораторных исследований

В результате анализа макро - и микрошлифа, показанного на рисунке 5.4, установлено, что толщина теплозащитных оксидных слоев составила 8 мкм – от 2 до 3 мкм поверхностного слоя от 5 до 6 мкм рабочего [45, 46].



×200 ×4000 ×4000

а) б) в)

Рисунок 6.10 - Структура и пористость теплозащитных оксидных слоев днища поршня: а) – макроструктура; б) – пористость рабочего слоя; в) – пористость поверхностного слоя

Микротвердость штатного поршня составила 540 МПа, а оксидированного-1010 МПа, что в 1,87 раза выше, чем у штатного.

Теплофизические характеристики материала штатного поршня и поршня с теплозащитными оксидными слоями представлены в таблице 3.

Результаты исследования теплопроводности материалов днища поршня, обработанных микродуговым оксидированием (покрытие с одной стороны), при различных температурах испытания показали значительное влияние на коэффициент теплопроводности λ наличие оксидных слоев. Установлено, что после микродугового оксидирования днища поршня коэффициент теплопроводности λ снизился на 25 % и составил в среднем $\lambda \sim 97{,}30$ Вт/(м·К), тогда как у материала поршня (сплав АК12 без теплозащитных оксидных слоев) коэффициент теплопроводности $\lambda \sim 122 - 126$ Вт/(м·К).

Таблица 6.1 – Характеристики теплопроводности

Объект испыта ний	Температура и пытаний, °С	Наименование параметра		
		Теплоемкость, Дж/кг*К	Температуро-проводность, мм^2/с	Теплопро-водность, Вт/м*К
Сплав АК12 бе покрытия	130	0,87	52,33	123,73
	150	0,86	52,20	122,46
	170	0,88	51,93	124, 26
	190	0,88	51,72	123,82
	210	0,89	51,60	124,92
	230	0,91	51,19	126, 40
Сплав АК12 с крытием	130	0,87	42,33	100,54
	150	0,86	42,15	98,96
	170	0,86	41,89	98,06
	190	0,84	41,67	95,56
	210	0,84	41,45	95,05
	230	0,87	41,12	97,30

На основе полученных данных после проведения исследований были построены график, показанный на рисунке 6.11-6.13.

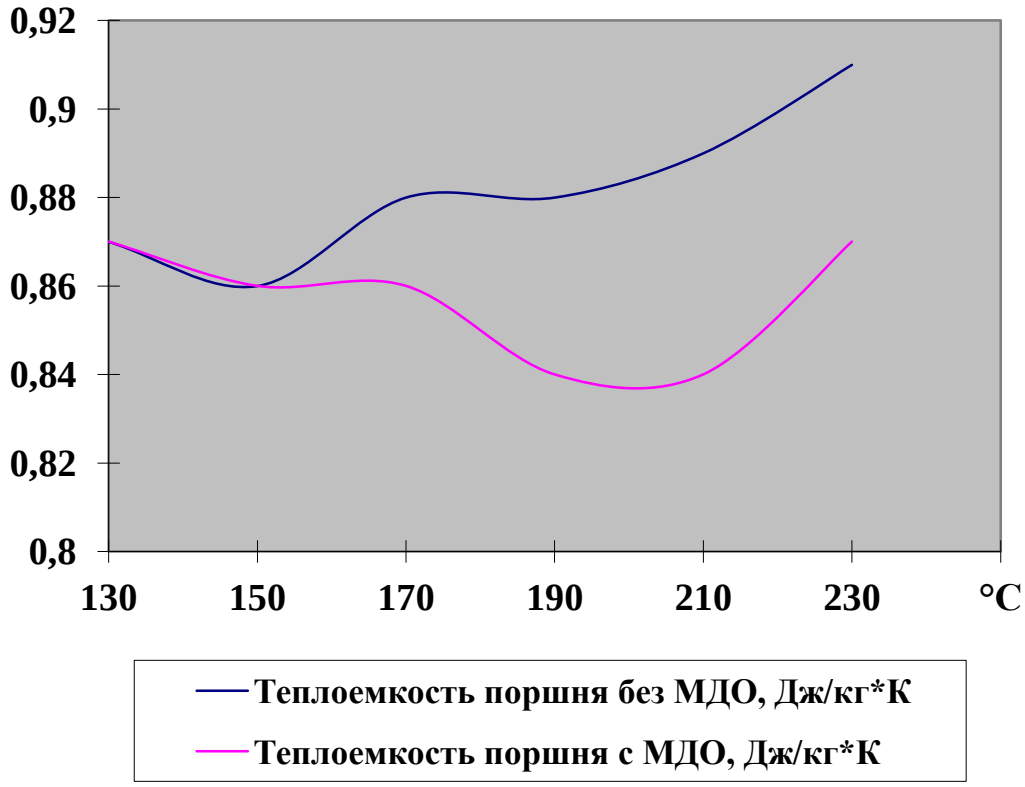


Рисунок.6.11 – Изменения теплоемкости поршня ДВС с покрытием полученным МДО и штатного поршня

Анализ представленных на рисунке 6.11 позволяет сделать вывод что поршни оснащенные теплозащитными оксидными покрытиями имеет меньшую теплоемкость и теплопроводность.

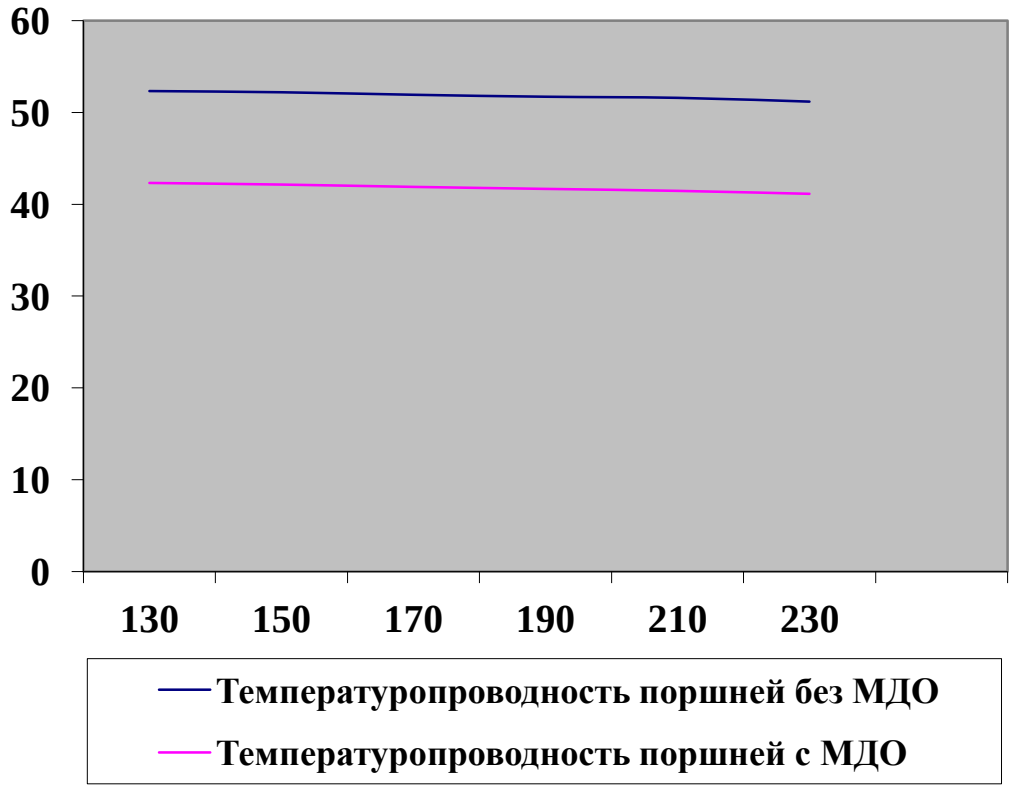


Рисунок 6.12 – Изменения температуропроводности поршня ДВС

По рисунку 6.12 можно сделать вывод о том что порог температуропроводности снизился у поршня с покрытием, но изменение при нагреве не изменяется.

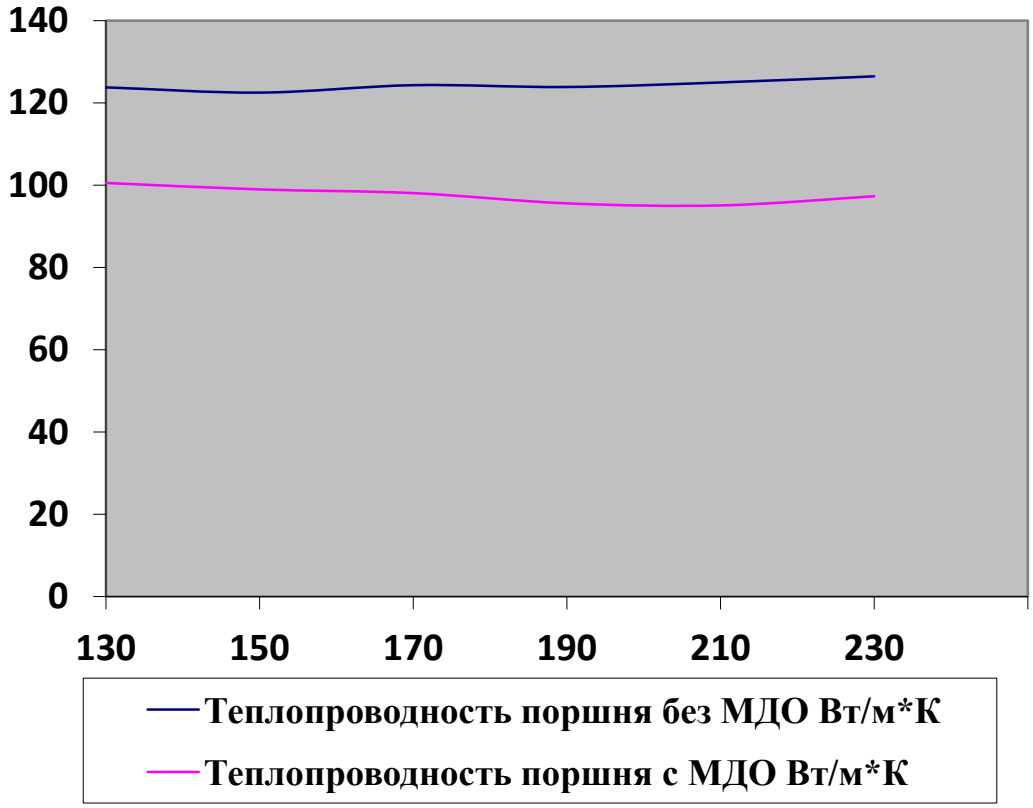


Рисунок 6.13 – Изменения теплопроводность поршня ДВС

По рисунку 6.13 можно сделать вывод о том, что теплопроводность поршня с МДО ниже и с изменением температуры меняется незначительно, в отличие от поршня у которого теплоемкость выше и с ростом температуры увеличивается.

В результате исследования теплозащитных оксидных слоев установлено, что структура и пористость неоднородны по толщине. На рисунке 6.14 показана пористость по толщине также неоднородна сквозные каналы пор отсутствуют, что позволяет обеспечивать высокие теплоизоляционные свойства днища поршня. Выделенные области на микрофотографиях подтверждают неоднородность оксидных слоев. Поры и отслоения на границе покрытия материала поршня отсутствуют.

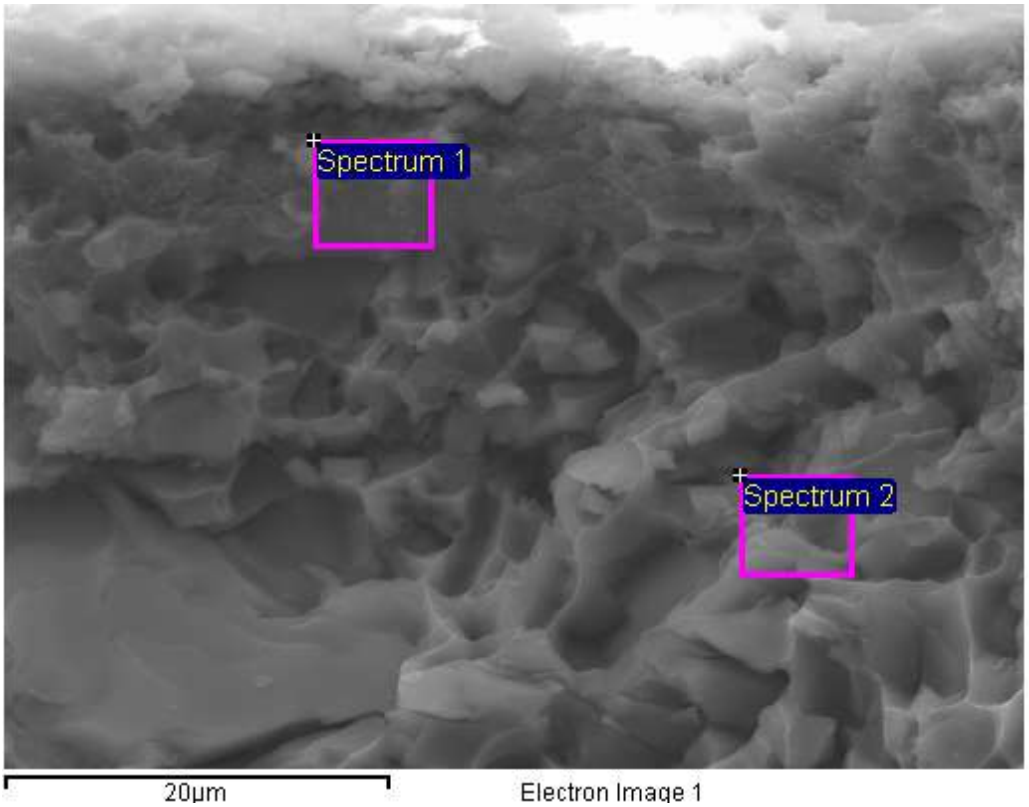


Рисунок 6.14 – Поверхность излома образца с теплозащитными оксидными слоями на днище поршня

Анализ микрофотографий изображенных на рисунке 6.14 и рисунке 6.15 позволяет сделать вывод, что поверхностный оксидный слой, показанный на рисунок 6.14, имеет большую пористость и неоднородность, чем рабочий слой показанный на рисунке 6.16.

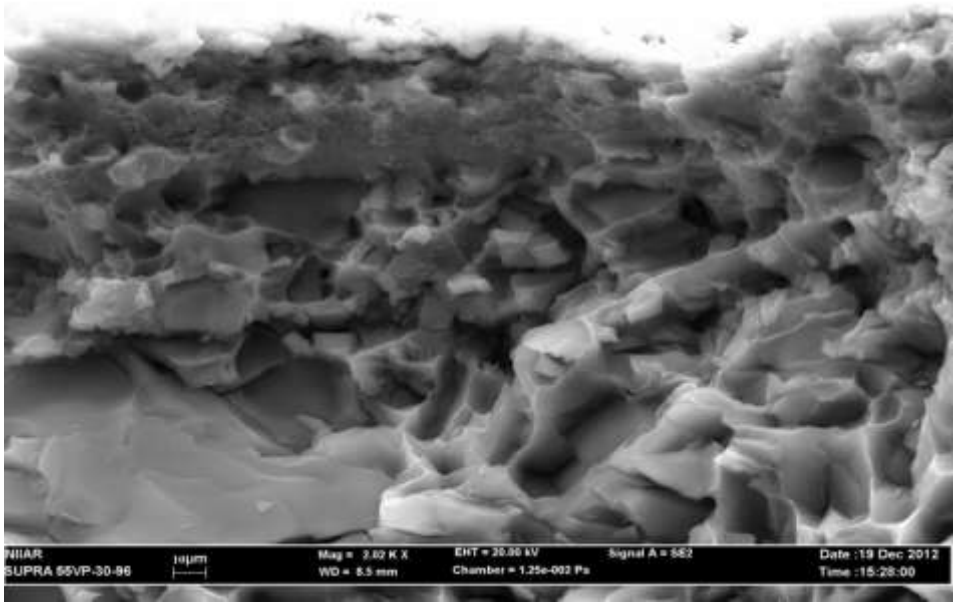


Рисунок 6.15 – Поверхность излома поверхностного оксидного слоя

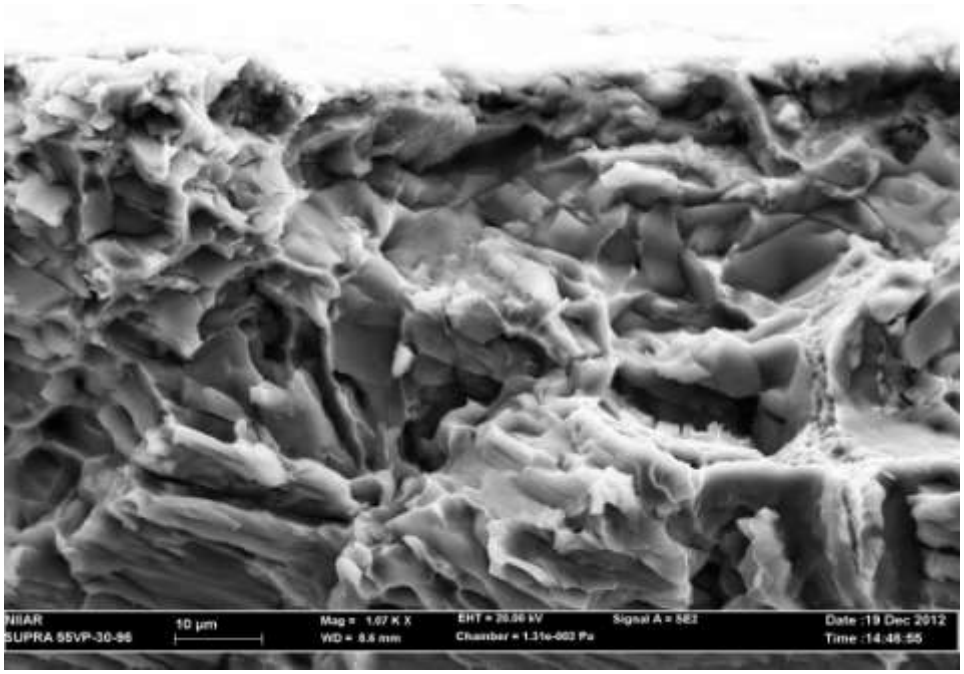


Рисунок 6.16 – Поверхности излома рабочего оксидного слоя

6.2 Результаты стендовых испытаний

Для определения расхода топлива и максимальных оборотов при разных положениях заслонки был разработан метод испытания двигателя, режимы которого отображены в таблице 6.2

Таблица 6.2 – Режимы испытаний двигателя

Положение дроссельной заслонки, %	Время фактическое, мин	Время перехода, мин
25	0,5	0:30
50	1,0	1:30
100	1,0	2:30
25	2,0	3:00
75	1,0	5:00
50	1,0	6:00
25	1,5	6:30
100	0,5	8:30
50	1,0	9:30
25	1,0	10:30

Параметры двигателя, измеренные в ходе испытаний, представлены в таблице 6.3.

Таблица 6.3 – Параметры двигателя при испытании

Положение дроссельной заслонки, %	Средний расход топлива с поршнем без МДО-покрытия, г/ч	Средний расход топлива с поршнем с МДО-покрытием, г/ч	Средние обороты двигателя с поршнем без МДО-покрытия, об/мин	Средние обороты двигателя с поршнем с МДО-покрытием, об/мин
25,00	4081,00	3790,0	1730	1721
50,00			2585	2589
75,00			3801	3768
100,00			4127	4082

Усредненные результаты измерения размеров поршня без МДО-слоя в процессе испытаний приведены в таблице 6. Размеры поршня с МДО-слоем снятые также в процессе испытаний приведены в таблице 7. Последующие замеры проводились через каждые 3200 км что соответствует первому ТО.

Таблица 6.3 – Средний диаметральный размер поршня 4 цилиндра без МДО-покрытия в процессе испытаний

Пояс	1	До проведения испытаний	92,015 мм
		После испытаний в 3200 км	92,012 мм
		После испытаний в 6500 км	92,009 мм
	2	До проведения испытаний	92,013 мм
		После испытаний в 3200 км	92,013 мм
		После испытаний в 6500 км	92,012 мм
	3	До проведения испытаний	92,014 мм
		После испытаний в 3200 км	92,012 мм
		После испытаний в 6500 км	92,010 мм

Таблица 6.4 – Средний диаметральный размер поршня 4 цилиндра с МДО-покрытием в процессе испытаний

Пояс	1	До проведения МДО	92,016 мм
		После проведения МДО	92,024 мм
		После испытаний в 3200 км	92,022 мм
		После испытаний в 6500 км	92,020 мм
	2	До испытаний	92,014 мм
		После испытаний в 3200 км	92,014 мм
		После испытаний в 6500 км	92,013 мм
	3	До испытаний	92,016 мм
		После испытаний в 3200 км	92,014 мм
		После испытаний в 6500 км	92,013 мм

На основе полученных данных был построены графики. На рисунках 6.17 и 6.18 изображен график изменения диаметра поршня.

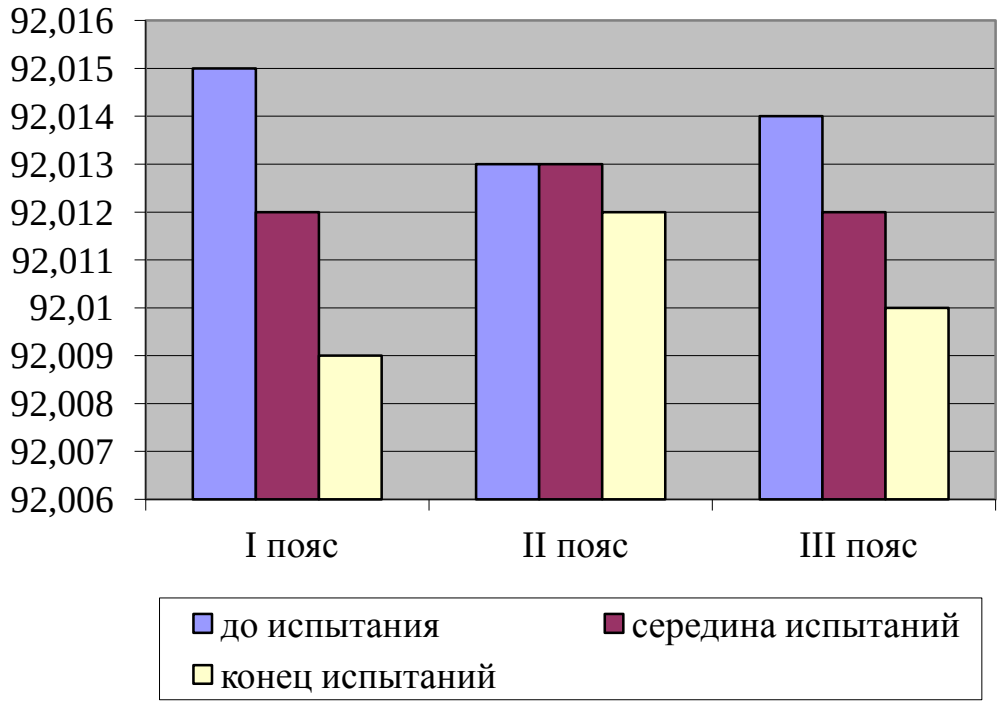


Рисунок 6.17 - Изменение геометрии поршня без МДО-покрытия.

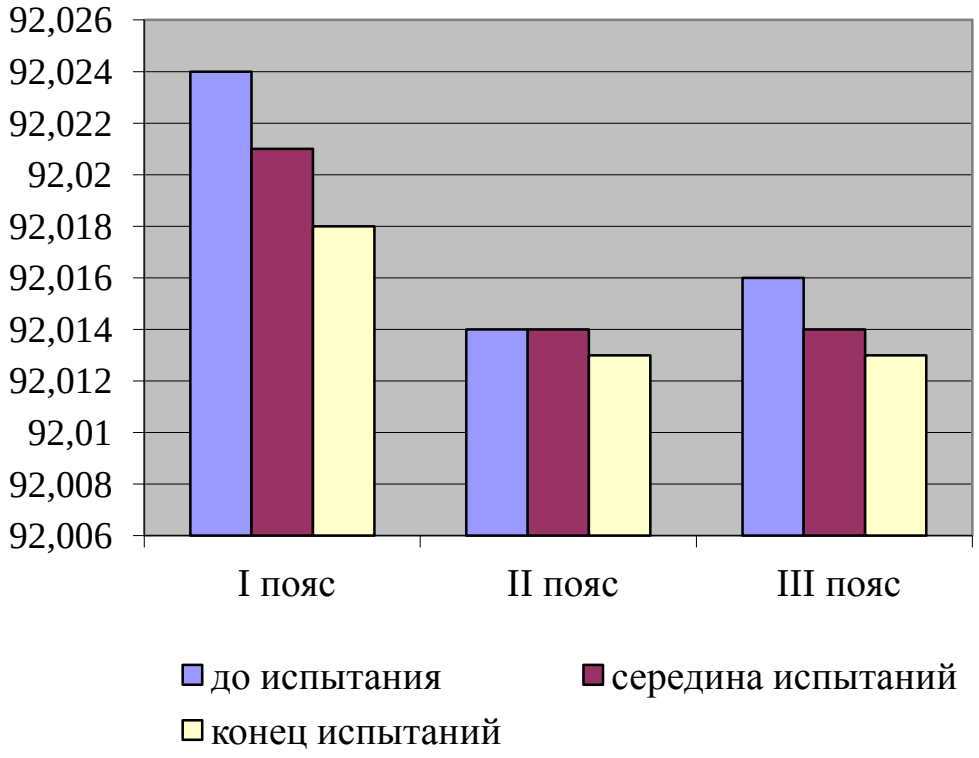


Рисунок 6.18 - Изменение геометрии поршня с МДО - покрытием.

Из рисунков видно изменение геометрии поршней, на основание этого можно сделать следующий вывод: поршень без МДО-покрытия, изнашивается более интенсивно, в отличие от поршня с МДО-покрытием, который показывает медленный износ у днища, минимальное изменение геометрии в середине, одинаковый износ на юбке поршня.

Изменение размера гильз цилиндров по пояскам за время испытаний составило не более 0,001 мм.

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов скоростных характеристик показывает, что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, эффективная мощность растет с увеличением скорости. Так, при частоте вращения коленчатого вала 4100 об/мин эффективная мощность у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 3 кВт больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет N_e = 62,6 кВт.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала от 2400 до 2500 мин$^{-1}$ максимальный крутящий момент у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 10 Н·м больше, чем у двигателя со штатными поршнями, и составляет от 175 до 180 Н·м.

При оборотах от 2400 до 2500 мин$^{-1}$ удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней, снизился, в среднем, на 7,7 % и составил от 258,7 до 259, 9 г/кВт·ч.

При номинальной частоте вращения коленчатого вала 4100 мин$^{-1}$ часовой расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней, снизился на 4,6 % и составил 19 кг/ч.

При частоте вращения от 2400 до 2500 мин$^{-1}$ фиксировали нагрузочные характеристики двигателя. Указанная частота вращения коленчатого вала является номинальной и соответствует максимальному крутящему моменту двигателя.

Анализ результатов стендовых испытаний и расчетов нагрузочных характеристик показывает, что у двигателя, оснащенного поршнями с теплозащитными оксидными слоями, часовой расход топлива на 1,1% меньше и составил 3,79 кг/ч.

Удельный эффективный расход топлива у двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней на 16% меньше, чем у двигателей со штатными поршнями, и составляет 619,77 г/кВт·ч.

У двигателя с теплозащитными оксидными слоями на днищах поршней снизилось содержание оксида углерода (CO) и углеводорода (CH) в отработанных газах, в среднем, на 7 %, и 10 % соответственно, по сравнению с двигателем со штатными поршнями.

Результаты стендовых испытаний согласуется с данными работы [47].

6.3 Результаты натурных испытаний

Для определения расхода топлива применялась методика описанная в пункте 6.1. Данные полученные при исследовании расхода топлива отображены в таблицах 6.5 и 6.6.

Таблица 6.5– Расход топлива при различных циклах без пременения поршней с окидированым покрытием.

Цикл	Пройденный путь, км	Количество израсходованного топлива (АИ-92), л	Средний расход топлива на 100 км, л
1	2	3	4
Городской	247,5	23,76	9,53
	153,3	15,17	
	342,8	32,22	
	201,1	19,30	
	264,3	25,10	
По трассе	302,7	24,21	8,00
	289,2	22,84	
	314,4	25,30	
	270,5	21,91	
	284,6	22,62	

Продолжение таблицы 6.5

1	2	3	4
Смешанный	231,2	20,34	8,76
	189,6	16,30	
	178,8	15,91	
	259,3	22,81	
	221,9	19,30	

Таблица 6.6 – Расход топлива при различных циклах с применением поршней после МДО-обработки.

Цикл	Пройденный путь, км	Количество израсходованного топлива (АИ-92), л	Средний расход топлива на 100 км, л
Городской	236,5	22,00	9,40
	198,2	18,82	
	204,1	18,96	
	279,6	26,56	
	178,7	16,79	
Смешанный	199,2	16,93	8,28
	90,3	7,58	
	184,6	15,87	
	132,2	10,97	
	144,9	12,17	
По трассе	288,3	23,06	8,02
	291,9	23,64	
	289,4	23,73	
	275,4	21,75	
	301,1	23,78	

Проанализировав таблицы 6.5 и 6.6 следует вывод, что у двигателя с поршнями имеющими покрытие средний расход топлива снизился на 2,3 %, а при смешанном цикле езды экономия составляет 5,5 %.

Усредненные результаты измерения размеров поршня без МДО-слоя в процессе испытаний приведены в таблице 6.7. Размеры поршня с МДО-слоем

полученные в процессе испытаний приведены в таблице 6.8. Последующие замеры проводились через каждые 3200 км, что соответствует ТО.

Таблица 6.7 – Средний диаметральный размер поршня 4 цилиндра без МДО-покрытием в процессе испытаний

Пояс	1	До проведения испытаний	76,124 мм
		После испытаний в 3200 км	76,123 мм
		После испытаний в 6500 км	76,123 мм
	2	До проведения испытаний	76,123 мм
		После испытаний в 3200 км	76,123 мм
		После испытаний в 6500 км	76,123 мм
	3	До проведения испытаний	76,123 мм
		После испытаний в 3200 км	76,123 мм
		После испытаний в 6500 км	76,123 мм

Таблица 6.8–- Средний диаметральный размер поршня 4 цилиндра без МДО-покрытием в процессе испытаний

Пояс	1	До проведения МДО	76,124 мм
		После проведения МДО	76,128 мм
		После испытаний в 3200 км	76,126 мм
		После испытаний в 6500 км	76,125 мм
	2	До испытаний	76,123 мм
		После испытаний в 3200 км	76,123 мм
		После испытаний в 6500 км	76,123 мм
	3	До испытаний	76,123 мм
		После испытаний в 3200 км	76,123 мм
		После испытаний в 6500 км	76,123 мм

На основе полученных данных был построены диаграммы. На рисунке 6.19 и 6.20 показаны изменение диаметра поршня после испытаний.

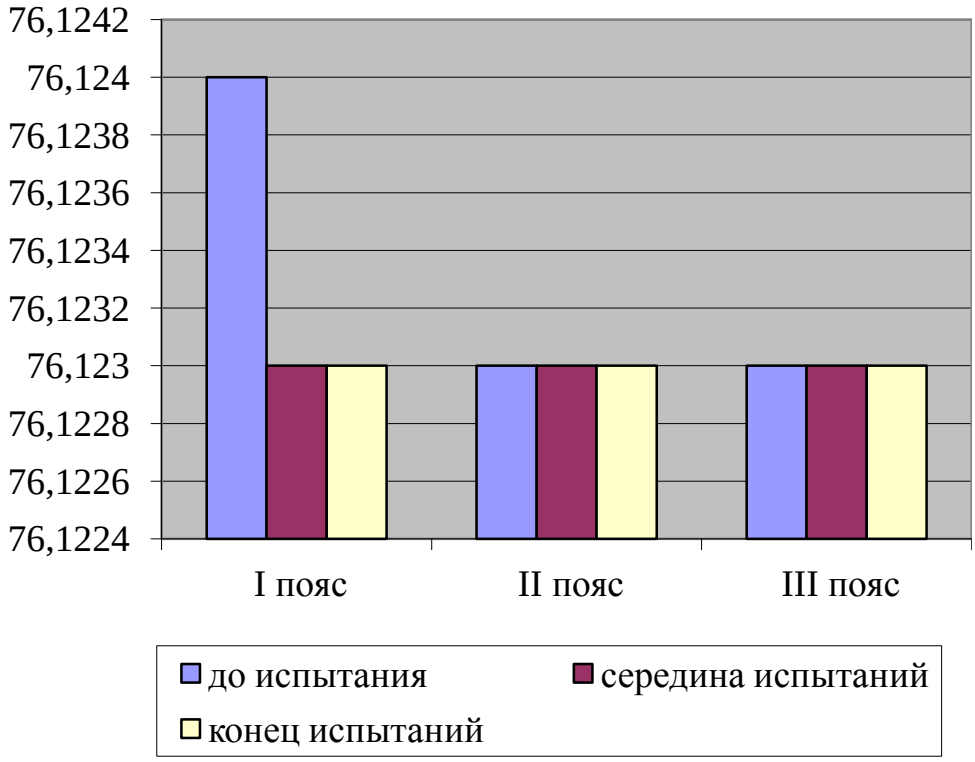


Рисунок 6.19 – Изменение геометрии поршня без МДО-покрытия

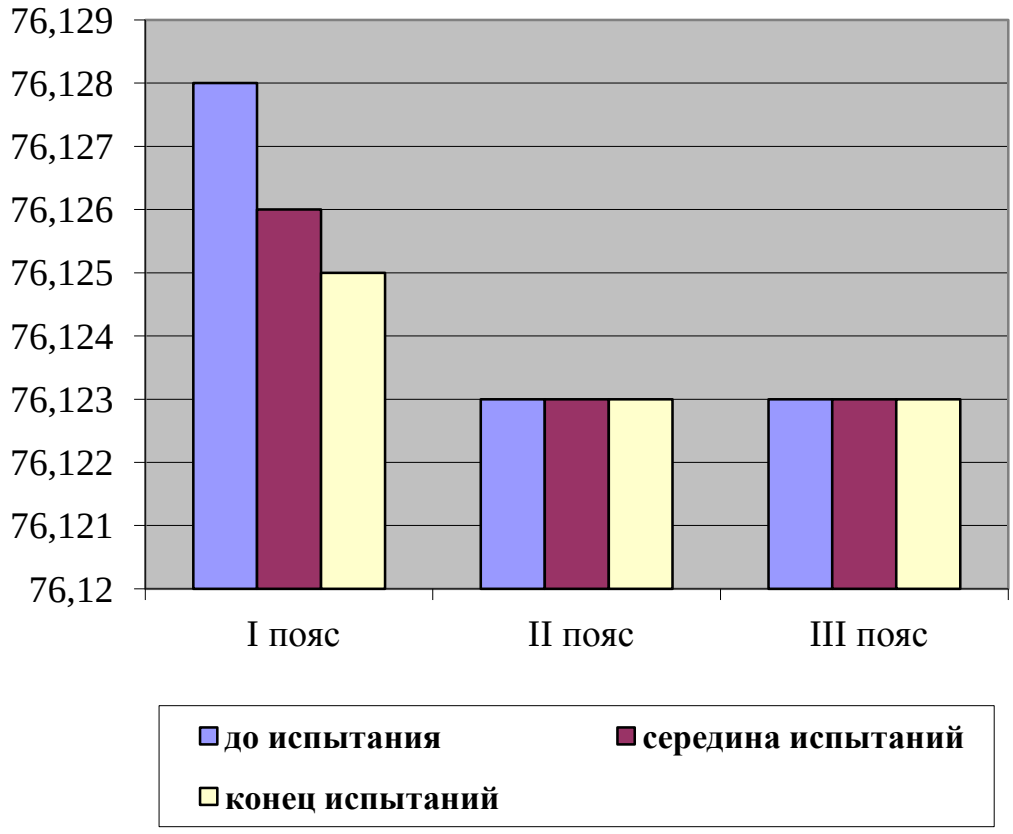


Рисунок 6.20 – Изменение геометрии поршня с МДО – покрытием

Из рисунков 6.19 и 6.20 видно изменение геометрии поршней, на основание этого можно сделать следующий вывод: поршень без МДО - покрытия, за время испытаний не износился, это можно обосновать тем, что за ранее пройденный путь произошла полная приработка ЦПГ, и дальнейший износ при нормальных условиях работы не возможен. Поршень имевший МДО-покрытие значительно износился в верхней части (у днища), это связано с тем, что после нанесения покрытия увеличился диаметр поршня, и вследствие работы двигателя во время проведения испытаний произошла его выработка.

Изменение размера гильз цилиндров по измеряемым пояскам за время испытаний не произошло, на внешний вид зеркало гильзы изменило оттенок, это можно связать с тем, что происходила приработка нанесенного покрытия.

Заключение

Одной из наиболее нагруженных деталей двигателя является поршень, перегрев которого приводит к преждевременному износу и прогару. Покрытия, сформированные на его поверхности, могут обеспечить защиту от воздействия высокотемпературных тепловых потоков, выходящих из камер внутреннего сгорания. Анализ конструкторских решений показал, что одним из наиболее перспективных видом упрочнения поршней является микродуговое оксидирование.

Для выбора рационального режимы были проведены лабораторные исследования по влиянию параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршней: микротвердость, пористость, теплопроводность и теплоемкость. Результаты исследований показали что при росте плотности тока и длительности оксидирования увеличивается твердость, и уменьшается пористость, теплоемкость, температуропроводность.

Выбрав рациональный режим оксидирования, проведена работа по нанесению покрытий на днища поршней. Поршни с покрытием использовались в сравнительных стендовых испытаниях бензинового двигателя УМЗ-417 . По полученным результатам выполнен расчет параметров двигателя на мощность, крутящий момент и расход топлива. Которые показали прирост мощности и крутящего момента при уменьшении расхода топлива

Для оценки качества работы двигателя и технико-экономических показателей были проведены сравнительные натурные испытания поршней с покрытием в бензиновом двигателе ВАЗ 2107. По результатам испытаний проведен расчет экономии топлива, который указывает на снижение расхода топлива.

Список используемой литературы

1. **Абрамов, О.Н. Практика микроразрядного оксидирования деталей нефтепромыслового оборудования** / О.Н. Абрамов, В.Н. Кусков // Нефть и газ Западной Сибири: Матер.междунар. н.-т. конф. Т. 1.-Тюмень: Феликс, 2005. С. 243.

2. **Абу Ниджим Рамзи Хассан Юсеф. Улучшение экологических показателей дизеля подачей на впуск продуктов конверсии метанола**: дис. ... канд. техн. наук: 05.04.02 / Абу Ниджим Рамзи Хассан Юсеф. - Москва, 2002.- 135 с.

3. **Автомобили УАЗ: Техническое обслуживание и ремонт**. – М.: Транспорт, 2002. – 336 с.

4. **Акаро, И.Л. Концепция применения алюминиевых сплавов в автомобилестроении**. – Технология легких сплавов, 1999, №1-2.

5. **Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия** [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов, 1990. – Т. 6, № 3. – С. 467-470.

6. **Кузнецов, Ю.А. Комбинированная технология получения керамических покрытий** [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Сварочное производство. – 2005. – № 6. – С. 37-39.

7. **Малышев, В. Н. Особенности формирования покрытий методом анодно-катодного микродугового оксидирования** / В. Н. Малышев // Защита металлов. – 1996. – Т. 32, № 6.– С. 662 – 667.

8. **Малышев, В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования.** А/р д.т.н. – Москва 1999, с.53.

9. **Марков, Г.А.Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий** / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Сб. науч. тр., 1999, вып. 185. с. 47-49.

10. **Патент на изобретение 2439211 Россия, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия,**

титана, и их сплавов/ И.А. Казанцев, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, А.Л. Хохлов, В.А. Степанов, К.У. Сафаров. – № 2010140537/02; Заяв.04.10.2010; Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

11. **Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование** / [И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др.] // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13 – 23.

12. **Суминов, И. В. Микродуговое оксидирование / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др.** // Обзор. Приборы, 2001, №9, с.13-23; Ibid., №10, С.26-36.

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

14. **Федоров, В.А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов** / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 1. – С. 87 – 93.

15. **Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом** / В.И. Черненко, Л А. Снежко, И. И. Потапова. – Л.: Химия, 1991. – 128 с.

16. **Эпельфельд, А.В. Микродуговое оксидирование** // Ресурсо-, энергосберегающие и наукоемкие технологии в машино- и приборостроении. Нальчик, 1991.- С.47-48.

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

18. **Гордиенко, П.С. О кинетике образования МДО-покрытий на сплавах алюминия** [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов, 1990. – Т. 6, № 3. – С. 467-470

19. **Руднев, В. С. Зависимость толщины покрытия от потенциала МДО** [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита метал- лов. 1993. – Т. 29, № 2. – С. 304-307

20. **Ерохин, А.Л. Модель формирования оксидных покрытий при плазменно-электролитическом оксидировании алюминия в растворах силикатов** [Текст] / А.Л. Ерохин, В.В. Любимов, Р.В. Ашитков // Физика и химия обработки материалов. – 1996. – №5. – С. 39-44

21. **Микроплазменные электрохимические процессы. Обзор.** [Текст] / В.И. Белеванцев, О.П. Терлеева, Г.А. Марков и др. // За- щита металлов. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 469-484.

22. **Магурова, Ю.В. Влияние катодной составляющей на процесс микроплазменного оксидирования сплавов алюминия пере- менным током** [Текст] / Ю.В. Магурова, А.В. Тимошенко // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, № 4. – С. 414 -418.

23. **Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом** [Текст] / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папано- ва– Л.: Химия, 1991.– 128с.

24. **Саакиян, Л. С. Развитие представлений Г.В. Акимова о поверхностной оксидной пленке и ее влиянии на коррозионно-ме- ханическое поведение алюминиевых сплавов** [Текст] / Л.С. Саакиян, А. П. Ефремов, А.В. Эпельфельд // Защита металлов. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 186-191

25. **Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим про- цессом** [Текст] / А.Г. Ракоч, В.В. Хохлов, В.А. Баутин и др. // Зашита металлов.– 2006.– Т. 42, № 2. – С. 173-184

26. **Ракоч, А.Г. Микродуговое оксидирование легких сплавов** [Текст] / А.Г. Ракоч, И.В. Бардин // Металлург. – 2010. – № 6. – С. 58-61

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

28. **Тимошенко, А. В. Влияние силикатных добавок в растворе гидроксида натрия на строение оксидных покрытий, сформи- рованных на сплаве Д16Т в режиме микродугового оксидирования** [Текст] / А.В. Тимошенко, С. Гут, Б.К. Опара и др. // Защита металлов.– 1994.– Т. 30, № 2.– С. 175-180.

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

30. **Федоров, В. А. Формирование упрочненных поверхностных слоев методом микродугового оксидирования в различных электролитах и при изменении токовых режимов** [Текст] / В.А. Федоров, В.В. Белозеров, Н.Д. Великосельская // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 1. – С. 87-93.

31. **Алехин, В.П. Особенности микроструктуры упрочненных слоев, получаемых микродуговым оксидированием** [Текст] / В.П. Алехин, В.А. Федоров, С.И. Булычев // Физика и химия обработки материалов. – 1991. – № 5. – С. 121-126.

32. **Тихоненко, В.В. Диагностика наружного слоя покрытия, полученного микродуговым оксидированием на сплавах алюминия** [Текст] / В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Вісник Національного технічного університету „ХПІ”: збірник наукових праць. Тематичний випуск „Хімія, хімічна технологія та екологія”. - 2010. - № 47. – С. 119-125.

33. **Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы** [Текст] / А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, А.Г. Бойко и др. // Успехи физики металлов. – 2005. – Т. 6. – С. 273-344.

34. **Белозеров, В.В. Метод микродугового оксидирования и его перспективы** [Текст] / В.В. Белозеров, А.И. Махатилова, Е.М. Реброва // Штрипс. – 2008. – № 3. – С. 30-32.

35. **Плазменно-электролитическое модифицированное поверхности металлов и сплавов** [Текст]: в 2 т. / И.В. Суминов, П. Н. Белкин, А.В. Эпельфельд и др. – М.: Техносфера, 2011. – Т.2. – 512 с.

36. **ГОСТ 9450 – 76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников.**

37. **ГОСТ 9.302 – 88 Покрытия металлические и неметаллические неорганические .**

38. **Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ**: В 2-х книгах. Книга 2. Пер. с анг./ Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 384с.

39. **ГОСТ 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний.**

40. **Шкилько, А.М. Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования** / Шкилько А.М. – К.: ИСИО, 1994. – 170 с.

41. **Шкилько, А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография** [Текст] / А.М. Шкилько. – Харьков: Ноулидж, 2009. – 240 с.

42. **Юбка поршня**. Режим доступа: http://zil130.info/yubka-porshnya.html

43. **ГОСТ 868-82 Нутромеры индикаторные с ценой деления 0,01 мм. Технические условия**

44. **ГОСТ 6507-90 Микрометры. Технические условия**

45. **Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Крит Б.Л., Борисов А.М. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование**. М.: Экомет, 2005. 368 с.

46. **Гальванические покрытия в машиностроении.** Справочник. В 2 т. Т.1 / Под ред. М.А. Шлугера. М.: Машиностроение, 1985. 60 с.

47. **Патент на изобретение 2439211 Россия, МПК F02F 3/12. Способ обработки поршней двигателей внутреннего сгорания из алюминия,**

титана, и их сплавов / И.А. Казанцев, А.О. Кривенков, С.Н. Чугунов, А.Л. Хохлов, В.А. Степанов, К.У. Сафаров. – № 2010140537/02; Заяв.04.10.2010; Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.

48. **Патент РФ № 48998 на полезную модель. Устройство для крепления оксидируемых деталей** / К.В. Кусков, В.Н. Кусков, О.Н. Абрамов (РФ) // БИПМ. 2005. № 31 от 10.11.05.

49. **Вячеславов, П.М. Методы испытаний электролитических покрытий.** –Л.: Машиностроение, 1977 – 64 с.

50. **Дженкинс, Г.Спектральный анализ и его приложения** / пер. с англ. В.Ф. Писаренко. М.: Мир, 1971. 316 с.

51. **Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ**: В 2-х книгах. Книга 2. Пер. с анг./ Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 384с.

52. **ГОСТу 14846-81 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний.**

ФГБОУ ВО
«Пензенский государственный университет»
Кафедра «Сварочное, литейное производство и материаловедение»

«Влияние параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршней двигателя внутреннего сгорания»

Автор: магистрант **Бычков Валерий Игоревич**

Научный руководитель: к.т.н., проф. каф. «СЛП и М» **Казанцев И. А.**

Пенза, 2018

Актуальность

- Одной из наиболее нагруженных деталей двигателя является поршень, перегрев которого приводит к преждевременному износу трущихся поверхностей, залеганию поршневых колец и их поломкам, заклиниванию поршня и его прогару.
- Технология МДО позволяет сформировать покрытие, обеспечивающее защиту деталей двигателя, подверженных термическим нагрузкам, особенно поршня.
- Основная идея такого покрытия состоит в повышении термостойкости и адгезионой прочности на поверхности поршня, что обеспечит его эффективную защиту от воздействия высокотемпературных тепловых потоков, выходящих из камер внутреннего сгорания.

Цель исследований: Повышение технических характеристик двигателя с помощью микродугового оксидирования днища поршня.

Задачи исследований:

- Изучить влияние параметров микродугового оксидирования на свойства материала поршня
- Обосновать влияние микродугового оксидирования днища поршня на технические характеристики двигателя внутреннего сгорания.
- Изготовить опытные образцы поршней двигателя.
- Провести стендовые исследования двигателя.
- Провести натурные испытания.
- Выполнить расчет параметров ДВС.
- Оценить экономическую эффективность.

Объект исследований. Рабочий процесс двигателя.

Предмет исследований. Технико-эксплуатационные показатели двигателей УМЗ-417 и ВАЗ 2107, оснащенных поршнями с оксидированным днищем.

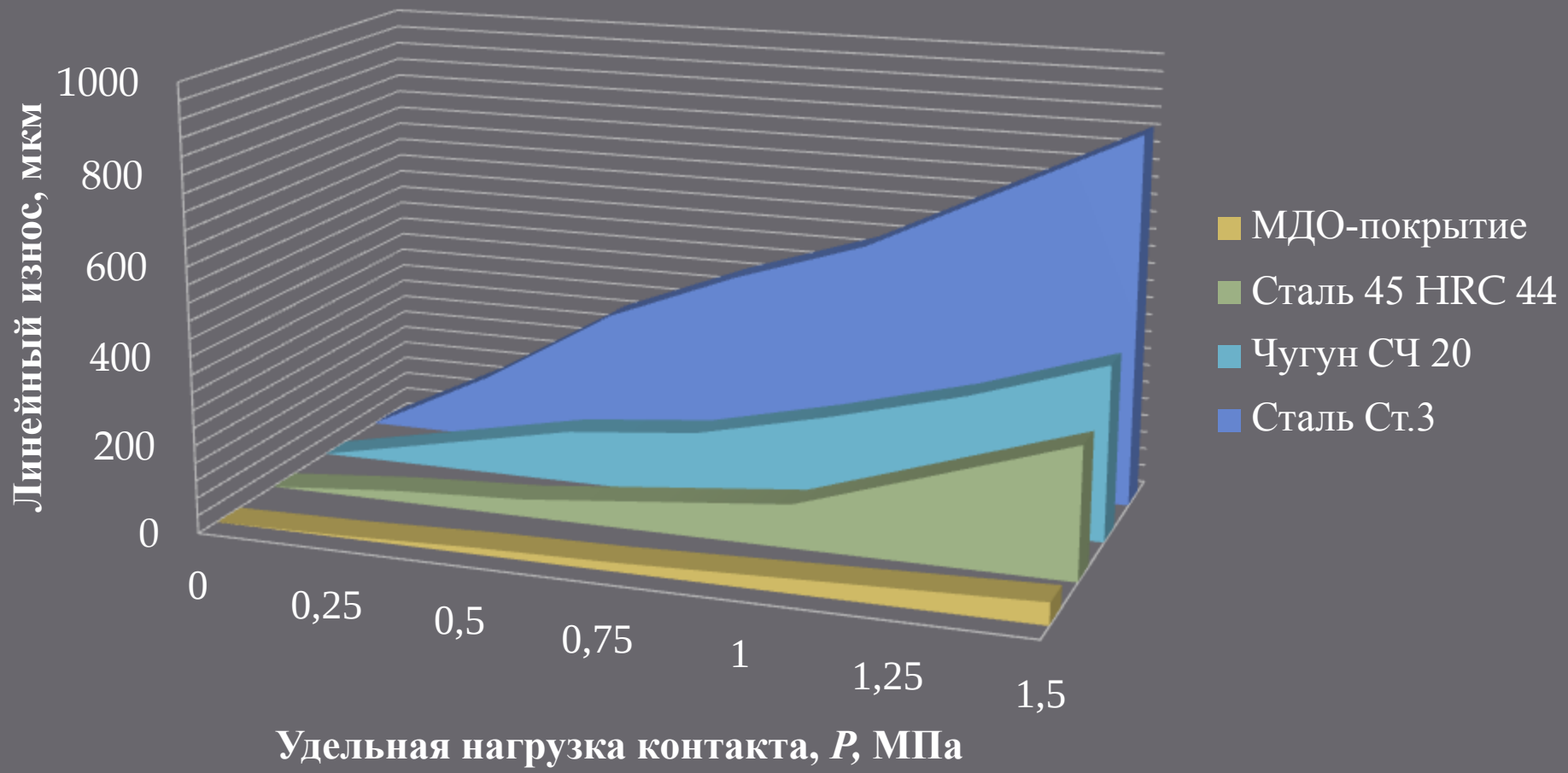
Анализ конструкторских решений повышения физико-механических свойств днищ поршня

- Микродуговое оксидирование (МДО) на данном этапе развития является одним из перспективных методов по упрочнению деталей машин, с помощью которого можно получать многофункциональные покрытия с различным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, имеющие высокие эксплуатационные показатели.

Свойства МДО-покрытий получаемых на алюминиевых сплавах

- толщина — до 400 мкм
- микротвердость — до 2500 кгс/мм²
- теплостойкость — выдерживает тепловой удар до 2500 °С
- пористость — от 2 до 50% (регулируемая)
- износостойкость — на уровне твердых сплавов

Износостойкость покрытия



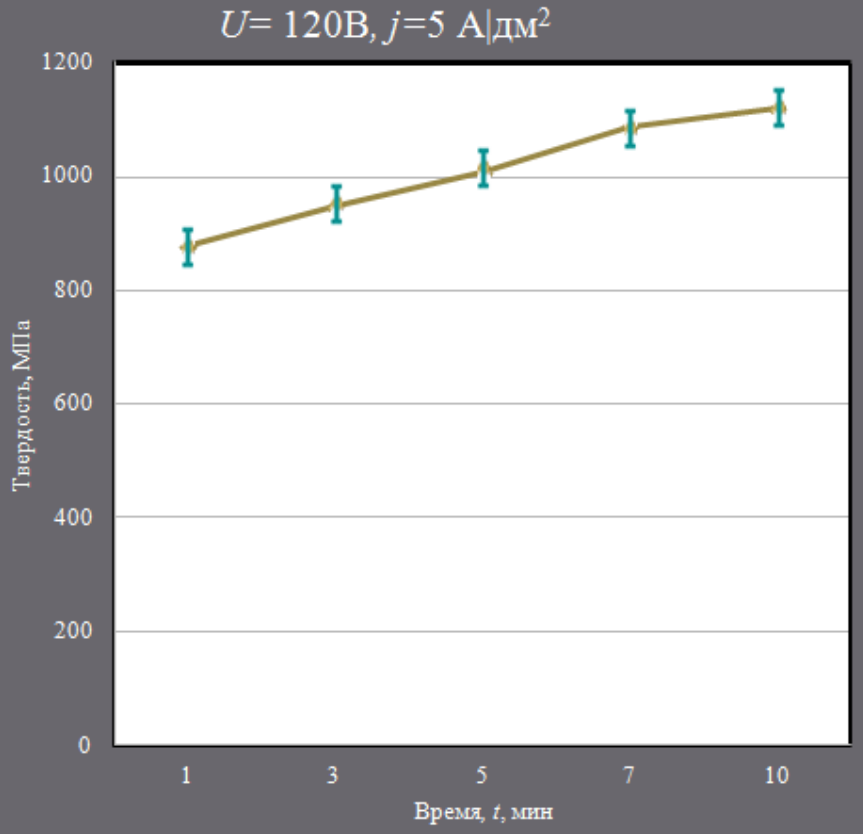
Преимущества и недостатки

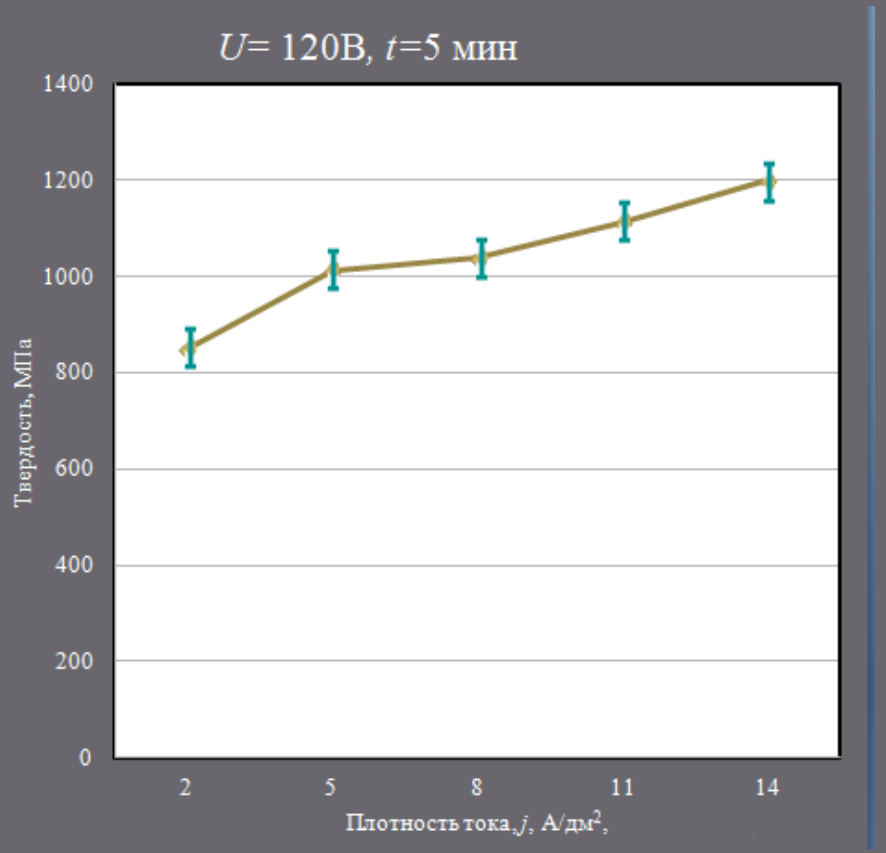
- Использование слабощелочных растворов
- Отсутствие в необходимости установки очистных сооружений
- Небольшая продолжительность технологического цикла
- Возможность получения толстых покрытий
- Высокая энергоемкость
- Сложность получения равномерного покрытия на сложнопрофильных деталях

Программа и методика экспериментальных исследований

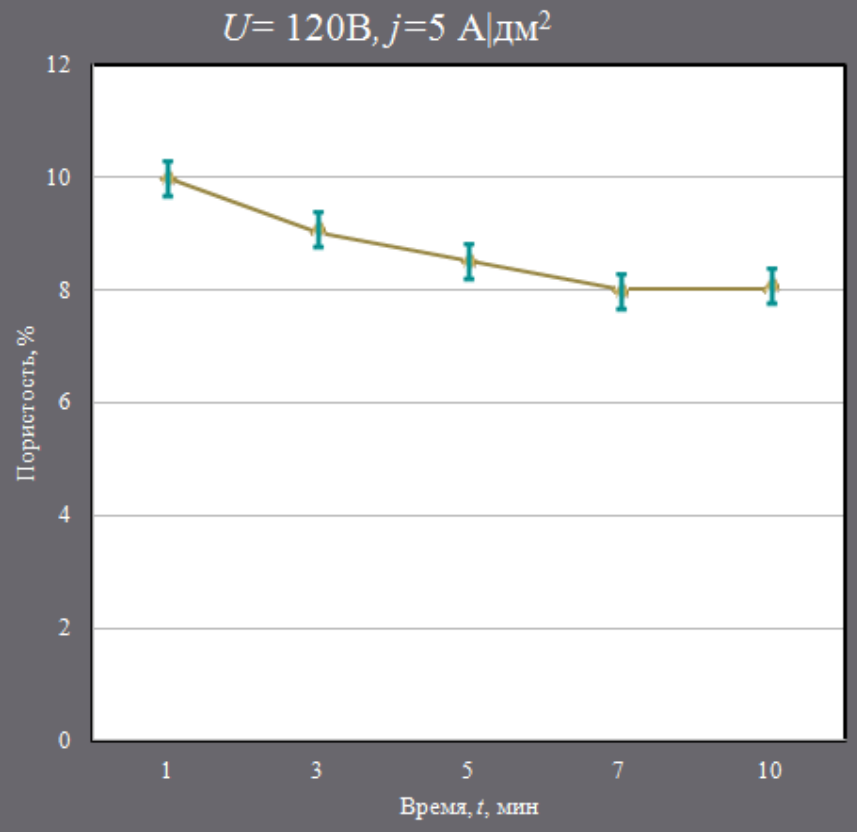
- Лабораторные исследования
- Сравнительные стендовые испытания
- Сравнительные натурные испытания

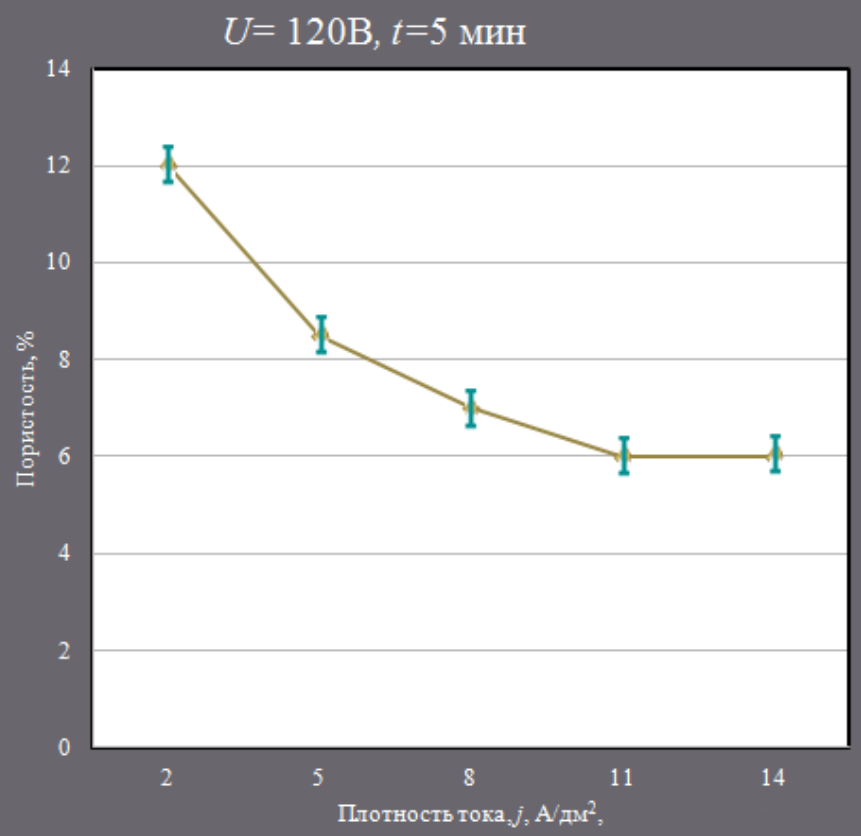
Зависимость твердости от плотности тока и длительности оксидирования



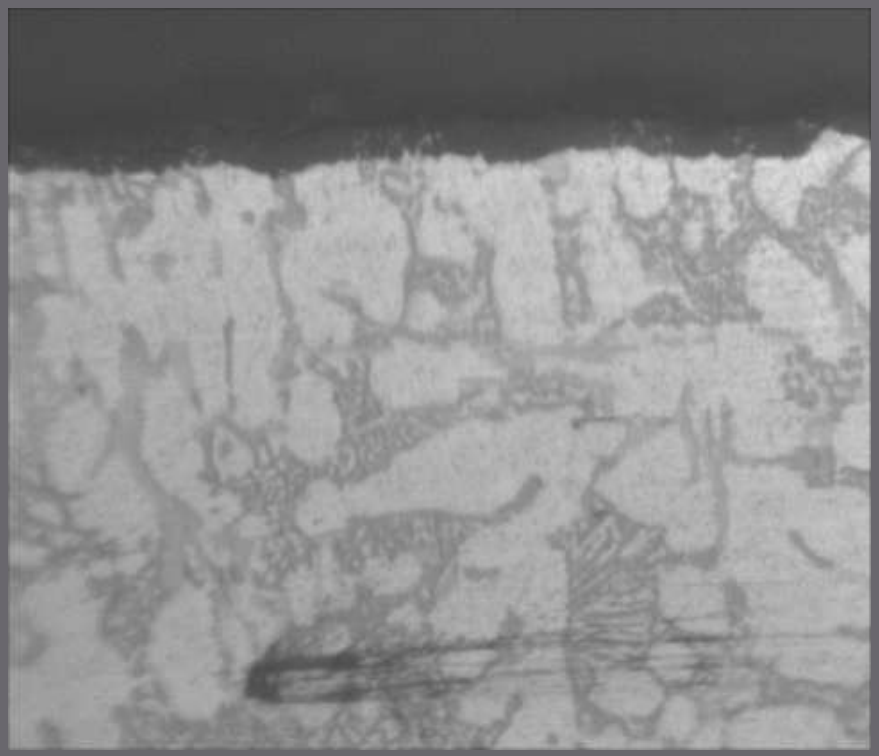


Зависимость пористости от плотности тока и длительности оксидирования





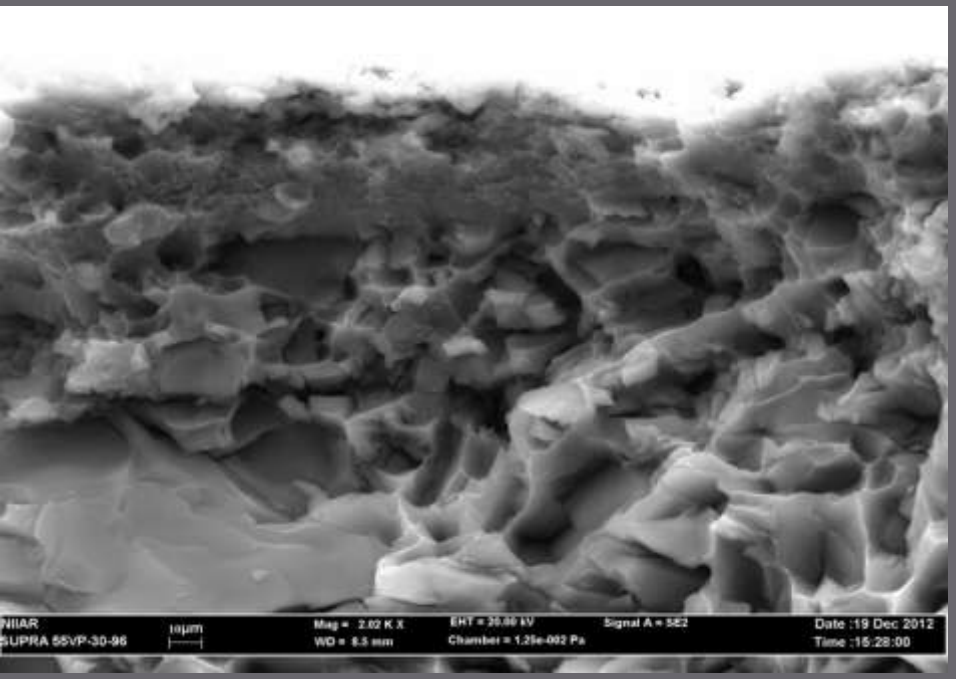
Определение микротвердости покрытия

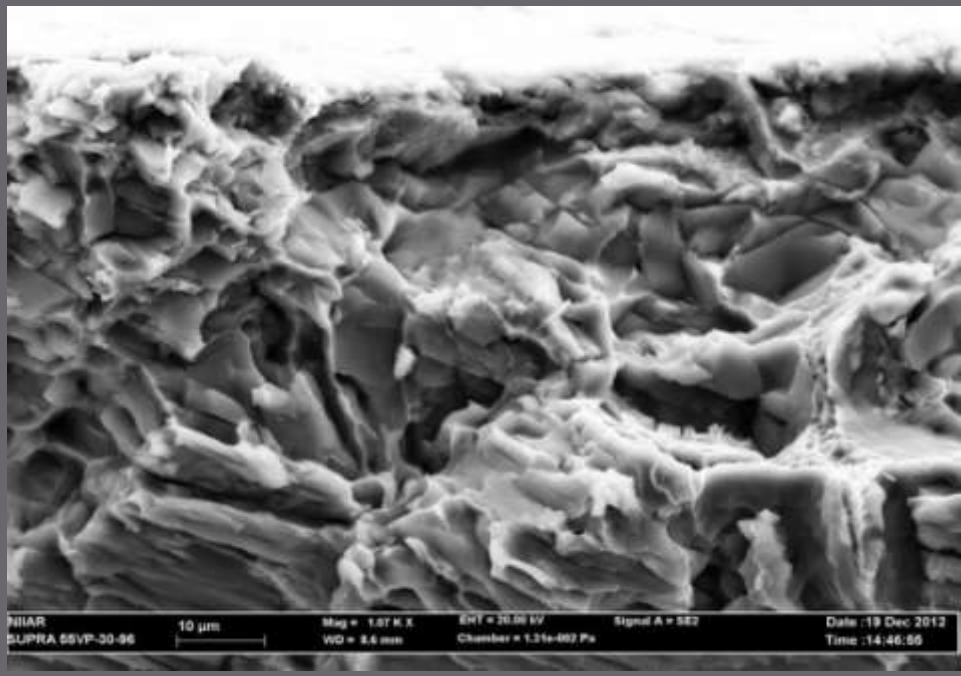


Микрошлиф

Твердость покрытия - 1010 МПа, что в 1,87 раза выше, чем у штатного поршня из сплава АК12

Микрофотографии поверхности излома





Излом поверхностного слоя

Излом рабочего слоя

Определение теплопроводности

Объект испытаний	Температура испытаний, °С	Наименование параметра		
		Теплоемкость, Дж/кг*К	Температуропроводность, Вт/м*К	Теплопроводность ,мм2/с
АК12 без покрытия	130	0,87	52,33	123,73
	150	0,86	52,20	122,46
	170	0,88	51,93	124, 26
	190	0,88	51,72	123,82
	210	0,89	51,60	124,92
	230	0,91	51,19	126, 40
АК12 с покрытием	130	0,87	42,33	100,54
	150	0,86	42,15	98,96
	170	0,86	41,89	98,06
	190	0,84	41,67	95,56
	210	0,84	41,45	95,05
	230	0,87	41,12	97,30

Оборудование для стендовых испытаний

Экспериментальный стенд

Расход топлива при стендовых испытаниях

Положение дроссельной заслонки, %	Средний расход топлива при работе с поршнем без МДО-покрытия, г/ч	Средний расход топлива при работе с поршнем с МДО-покрытием, г/ч	Средние обороты двигателя при работе с поршнем без МДО-покрытия, об/мин	Средние обороты двигателя при работе с поршнем с МДО-покрытием, об/мин
25	4081	3790	1730	1721
50			2585	2589
75			3761	3768
100			4127	4082

Износ поршня при стендовых испытаниях

Среднее изменение диаметра до первого компрессионного кольца, мм	Поршень без покрытия	До проведения испытаний	**92,015**
		После испытаний в 3200 км	92,012
		После испытаний в 6500 км	92,009
	Поршень с покрытием	До проведения испытаний	92,024
		После испытаний в 3200 км	92,023
		После испытаний в 6500 км	92,022

Расход топлива при натурных испытаниях

Цикл	Поршень	Пройденный путь, км	Количество израсходованного топлива (АИ-92), л	Средний расход топлива на 100 км, л
Смешанный	Без покрытия	231,2	20,34	8,76
		189,6	16,30	
		178,8	15,91	
		259,3	22,81	
		221,9	19,30	
	С покрытием	199,2	16,93	8,28
		90,3	7,58	
		184,6	15,87	
		132,2	10,97	
		144,9	12,17	

Износ поршней при натурных испытаниях

Среднее изменение диаметра до первого компрессионного кольца, мм	Поршень без покрытия	До проведения испытаний	76,124
		После испытаний в 3200 км	76,123
		После испытаний в 6500 км	76,123
	Поршень с покрытием	До проведения испытаний	76,128
		После испытаний в 3200 км	76,126
		После испытаний в 6500 км	76,125

Выводы

1. Изучено влияние параметров микродугового оксидирование на свойства материала поршней
2. Обосновано влияние микродугового оксидирования днища поршня на технические характеристики двигателя внутреннего сгорания.
3. Изготовлены опытные образцы поршней
4. Проведены стендовые испытания двигателяУМЗ-417
5. Проведены натурные испытания двигателя ВАЗ 2107
6. Выполнен расчет параметров двигателя УМЗ-417
7. Проведена оценка экономической эффективности

Публикации

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Казанцев И.А. Теплофизические характеристики поршней двигателей внутреннего сгорания с оксидным покрытием, их свойства и эксплуатационные возможности / Казанцев И. А. Бычков В. И. Казанцев А. И. // Электронное периодическое издание «Аллея науки». – 2018. - № 5. С 25-41.
2. Казанцев И.А. Влияние теплофизических свойств поршней на эксплуатационные характеристики двигателей внутреннего сгорания / Казанцев И. А. Бычков В. И. Казанцев А. И. // Известия ВУЗ. Поволжский регион. – 2018. - №2. С 37-57.
3. Казанцев И.А. Перспективы применения технологии микродугового оксидирования для поршней двигателей внутреннего сгорания / Казанцев И. А. Бычков В. И. Казанцев А. И. // V Международная научно-практическая конференция «Транспорт. Экономика. Социальная сфера». (Актуальные проблемы и их решения). – 2018. С 28-40.