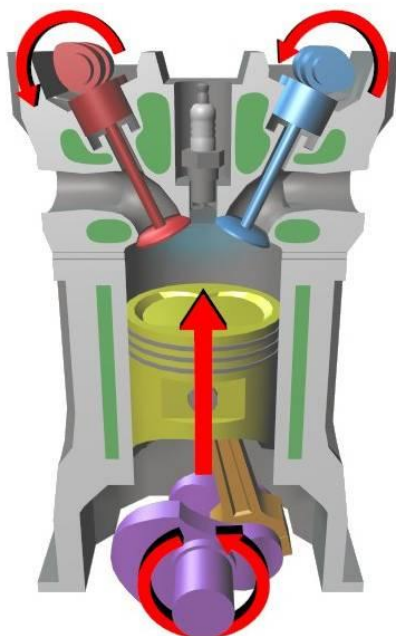


ГЛУЩЕНКО А. А., ХОХЛОВ А.Л.

**ПОВЫШЕНИЕ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ  
ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВС МЕТОДОМ МИКРОДУГОВО-  
ГО ОКСИДИРОВАНИЯ ДНИЩ ПОРШНЕЙ**



Ульяновск – 2015

УДК 631.3: 662.75/.76 + 502

ББК 35.514 + 28.081

Г-55

*Печатается по решению Ученого совета  
инженерно-физического факультета высоких технологий  
Ульяновского государственного университета*

**Рецензенты:**

доктор технических наук, заведующий кафедрой «Проектирование и сервис автомобилей» ФГБОУ ВПО «УлГУ» ХУСАИНОВ А.Ш.

доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетические установки» ФГБОУ ВПО «СПбГАУ» САЛОВА Т.Б.

**Глущенко, А.А.**

**Г55 Повышение технико-эксплуатационных показателей ДВС методом микродугового оксидирования днищ поршней:** монография /А.А. Глущенко, А.Л. Хохлов. – Ульяновск: УлГУ, 2015. – 112 с.

В монографии рассмотрен способ повышения технико-эксплуатационных свойств двигателей внутреннего сгорания созданием на днище поршней оксидированного слоя методом микродугового оксидирования.

Теоретически обоснованы режимы микродугового оксидирования, снижение теплонапряженности оксидированных поршней, повышение технико-эксплуатационных показателей ДВС, оснащенных цилиндро-поршневой группой с поршнями с оксидированным днищем.

Представлены сравнительные стендовые исследования двигателей и эксплуатационные исследования автомобилей, оснащенных двигателями с типовыми и оксидированными поршнями. Табл. 5. Ил. 65. Библиограф. 169.

Предназначена для инженерно-технических работников научных организаций, а также аспирантов и студентов инженерных специальностей.

УДК 631.3: 662.75/.76 + 502

ББК 35.514 + 28.081

© Глущенко А.А., Хохлов А.Л., 2015

© Ульяновский государственный университет, 2015

## ВВЕДЕНИЕ

Современные тенденции в двигателестроении характеризуются увеличением мощности двигателей внутреннего сгорания. Что в свою очередь сопровождается увеличением механической и тепловой нагрузки, как на детали цилиндропоршневой группы, так и на двигатель в целом.

Одним из наиболее нагруженных элементов двигателя является ЦПГ и в особенности поршень, на который воздействуют значительные силы. Последовательность возвратно-поступательных движений поршня в цилиндре характеризуется не только изменением скорости от 100 км/ч до нуля, неблагоприятно влияющей на образование несущей масляной пленки, но и чередованию температур по циклам в диапазоне 1800..2600 °С. Это приводит к снижению предела прочности материала, возникновению термонапряжений и снижению ресурса работы и надежности ДВС.

Поэтому исследования, направленные на разработку конструктивных и технологических мероприятий, позволяющих повысить термостойкость, адгезионную прочность и снижение теплонапряженности деталей ЦПГ, что приведет к повышению технико-эксплуатационных показателей ДВС, являются актуальной научной и практически значимой задачей.

Одним из направлений снижения теплонапряженности поршня и повышения его работоспособности является образование теплозащитного поверхностного слоя на рабочей поверхности поршня методом микродугового оксидирования [4], об этом свидетельствуют работы Батищева А.Н., Новикова А.Н., Черненко В.И., Малышева В.Н., Федорова В.А., Маркова Г.А., Снежко Л.А., Суминова И.В., Гордиенко П.С., Великосельской Н.Д., Эпельфельда А.В., Кузнецова Ю.А., Казанцева И.А. и др.. Применение данных покрытий позволит увеличить ресурс машин и является перспективным направлением развития ремонтного производства.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Анализ способов изменения поршней для повышения технико-эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания

Для улучшения работы поршней в двигателе их поверхность часто подвергается различным видам обработки, в частности, на нее наносятся покрытия. Эти покрытия выполняют две главные функции:

- улучшение приработки поршня. Обычно их наносят на юбку, и они изнашиваются через определенное время на этапе обкатки двигателя;

- улучшение механических свойств поверхности поршня (твердость, износостойкость). Некоторые покрытия остаются на поршне на все время эксплуатации, предотвращая эрозию, растрескивание и улучшая антифрикционные свойства (таб. 1.1).

Таблица 1.1 Материал и тип покрытия поршня

Материал и тип покрытия	Применение	Эффект
1	2	3
Олово (лужение)	В двигателях легковых автомобилей поршни часто покрывают оловом по всей поверхности	На этапе обкатки двигателя олово служит приработочным слоем. Снижает образования царапин при работе двигателя
Фосфат (фосфатирование)	Наносится на юбку	Облегчает приработку, предотвращает заедание колец в канавке. Используется также как грунтовка для графит-MoS <sub>2</sub> покрытия

Продолжение таблицы 1.1

1	2	3
Графит- $\text{MoS}_2$ (графитизация)	Наносится на юбку методом растровой печати после фосфатирования, может также быть напылено или наплавлено	Снижает износ и трение, облегчает приработку
Никель (никелирование)	Наносится на головку поршня, верхнюю перемычку и канавки компрессионных колец	Предотвращает эрозию этих участков под действием детонации
Анодирование	Обычно наносится на камеру сгорания, может быть использовано в кольцевых канавках	Защищает зону головки от растрескивания, а канавки – от износа. Повышает термическую прочность.
Микрорельеф (обработка резцом со специальным профилем)	Наносится на юбку	Гидродинамический профиль в виде микроскопических канавок лучше удерживает на поверхности поршня масло и снижает трение

Головка алюминиевых поршней может быть анодирована (покрывается окисью алюминия) для уменьшения температуры основного материала и опасности растрескивания головки, вызываемого высокими термическими нагрузками при работе.

Микрорельеф не является покрытием, но выполняет как приработочную, так и противоизносную функцию.

К канавкам верхних компрессионных колец предъявляются особо жесткие требования, в особенности в дизельных двигателях с высокой степенью сжатия. Для упрочнения эти канавки часто армируются специальными вставками, изготовленными из нирезиста (легиро-

ванный никелем чугуна), или зона канавки упрочняется путем плазменного переплава с присадкой легирующих компонентов. Нередко стойкость огневого пояса повышается анодированием. Эти мероприятия повышают износостойкость и снижают шум в двигателе.

Наиболее распространенные типы вставок с параллельными сторонами и вставки с конусообразными сторонами. Используют нирезистовые вставки с одной канавкой или, в некоторых высокофорсированных дизельных двигателях, с двумя канавками под компрессионные кольца. Иногда к нижней торцевой поверхности канавки первого компрессионного кольца прикрепляется полоска из нержавеющей стали, выполняющая ту же функцию, что и нирезистовая вставка.

Один из распространенных способов - покрытие поршня оловом (лужение). Реже применяется покрытие свинцом. Слой мягкого металла, толщина которого составляет 5...10 мкм, уменьшает трение и вероятность «прихвата» поршня с образованием задиров в период обкатки двигателя.

Некоторые производители для уменьшения трения наносят на юбку поршней антифрикционные покрытия, композиции на основе графита, реже - дисульфида молибдена. Толщина слоя покрытия может достигать 15...20 мкм. Обычно поршни с таким покрытием устанавливаются в цилиндр с минимальным зазором. В результате первоначальной приработки покрытие частично стирается, и поверхность поршня приобретает форму, максимально соответствующую цилиндру.

Таким образом, поршень современного автомобильного двигателя - сложное техническое изделие, аккумулирующее в себе большое количество знаний из различных областей науки и техники. Конструкция поршня жестко связана с особенностями двигателя, так как поршневая группа работает в сложных температурных условиях с циклическими резко изменяющимися нагрузками при ограниченной смазке и недостаточном теплоотводе вследствие трудностей охлаждения. Поэтому детали поршневой группы имеют наиболее высокую тепловую напряженность, что обязательно учитывается при выборе их конструкции и материала

Развитие науки техники привело к созданию новых технологических способов поверхностного упрочнения деталей, основная задача которых заключается в получении поверхностных слоев с высокими физико-механическими свойствами, износо- и коррозионной стойкостью прочно сцепленными с основой [55 - 61]. К ним относятся способы упрочнения поверхностных слоев лазерной обработкой, вакуумные, ионно-плазменные способы нанесения покрытий и т.д [62 - 64]. Упрочненные поверхностные слои создают барьер, защищающий основной металл от воздействия механических нагрузок и рабочей среды.

Однако нанесение покрытий вышеперечисленными способами не всегда удовлетворяет тем требованиям, которые предъявляются в настоящее время к материалам деталей машин. Довольно часто оказывается невысокой их адгезия с основой или само покрытие обладает недостаточной прочностью. Дефицитность материалов, применяемых для нанесения покрытий, а также дороговизна и сложность оборудования часто ограничивают применение рассмотренных способов в ремонтном производстве.

В настоящее время перспективным направлением повышения долговечности деталей машин и механизмов является нанесение композиционных покрытий, содержащих и сочетающих в себе свойства нескольких различных компонентов [65, 66, 67, 68, 69]. Композиционные материалы содержат различные по форме и свойствам два или большее число компонентов и сочетают индивидуальности каждого из них.

При упрочнении деталей из алюминиевых сплавов в ремонтном производстве наиболее эффективна техническая керамика [61, 66]. Керамические материалы характеризуются высокими точками плавления, прочностью на сжатие, сохраняющихся при высоких температурах, и стойкостью к окислению. Наряду с перечисленными свойствами керамические покрытия стойки к вибрациям, термоударам, обладают высокой адгезионной прочностью. Наиболее широкое распространение для нанесения таких материалов получили способы газопламенного напыления и электрохимические.

Основными недостатками газопламенного напыления покрытий являются: часто недостаточная прочность сцепления покрытий с основой (до 35 МПа); наличие пористости (до 25 %), которая не позволяет применять покрытия в коррозионных средах без дополнительной обработки; низкий коэффициент использования энергии на нагрев порошка газопламенной струи (до 12 %); невозможность нанесения покрытий из материалов с температурой плавления более 2800 °С, а также обработки посадочных отверстий малых диаметров [48].

Сверхзвуковое газопламенное напыление - это новый способ, основывающийся на непрерывном сжигании горючего газа с кислородом с целью получения высокоскоростной (сверхзвуковой) струи на выходе из горелки [147]. Порошок вводится в газовый поток, которым он нагревается, ускоряется и направляется на обрабатываемую деталь.

Основными недостатками сверхзвукового газопламенного напыления покрытий являются: наличие пористости (до 15 %); необходимость проточной системы охлаждения; низкий коэффициент использования энергии газопламенной струи на нагрев порошка (до 15 %); высокий уровень шума.

Газодинамическое напыление так же является новым способом нанесения покрытий, основанном на создании высокоскоростного потока частиц в нагретом до 200...600 °С воздухе и их закреплении на поверхности в результате пластической деформации, возникающей при высокоскоростном ударе напыляемого материала о поверхность [160].

Основными недостатками газодинамического напыления являются: наличие остаточной пористости, низкий коэффициент использования порошка, недостаточная износостойкость получаемых покрытий.

Плазменно-дуговое напыление - (плазменное напыление), при котором с помощью электрической дуги создается плазменная струя. Применяется для нанесения покрытий из порошков металлов, из композиционных порошков, карбидов, оксидов, боридов и других тугоплавких соединений, а так же механических смесей различных порошков, проволок [148,149].



К недостаткам можно отнести: наличие пористости (до 10%); низкий коэффициент полезного использования энергии плазменной струи при нагреве порошка (до 8%); необходимость проточной системы охлаждения.

Детонационное напыление - газотермическое напыление, при котором используется струя продуктов детонации. Применяется для напыления покрытий из порошков металлов, их сплавов, тугоплавких соединений, оксидов, различных композиций и т.п.

Основные недостатки способа [150]: высокий уровень шума; присутствие продуктов сгорания смеси с образованием вредных компонентов (оксиды азота, СО); наличие повышенной концентрации взвешенных в воздухе частиц напыляемого материала; необходимость размещать детонационное оборудование в специальных помещениях.

Одним из распространенных способов упрочнения поверхностей деталей является технология электроосаждения композиционных электрохимических покрытий [151, 152]. Его суть заключается в том, что вместе с металлом из гальванической ванны на упрочняемую поверхность детали осаждаются различные неметаллические частицы: карбиды, оксиды, сульфиды, бориды, порошки полимеров и т.д. Присутствие этих материалов в покрытии изменяют его свойства, в том числе увеличивают их износостойкость. К существенным недостаткам покрытий можно отнести низкую производительность и высокую энергоёмкость процесса их получения, а также токсичность.

В процессе разработок поршневых систем фирма Kolbenschmidt предлагает новую оптимальную конструкцию поршня, которые отличаются по следующим признакам:



Литые упрочняющие вставки для кольца из чугуна обеспечивают многократное увеличение срока службы первой кольцевой канавки в поршнях для дизельных двигателей фирмы Kolbenschmidt.



Твердо-анодированные кольцевые канавки предотвращают износ и микро сваривание при использовании поршней для бензиновых двигателей.



В стальных поршнях отверждённые лазером канавки обеспечивают оптимальную износостойкость и длительный срок службы.



Юбки поршней фирмы KS имеют специальное покрытие LofriKS®, NanofriKS® или графитовое покрытие. Благодаря этому сокращается трение внутри двигателя и обеспечиваются отличные свойства при аварийном ходе. Снижается уровень шумов при перекосе поршня. Покрытие NanofriKS® является усовершенствованным видом проверенного временем покрытия LofriKS® и отличается содержанием наночастиц, за счет которых повышаются износостойкость и срок службы покрытия



Юбки поршней с покрытием из железа (Ferrocote®) обеспечивают надежную работу в случае его использования на алюминиево-кремниевых поверхностях цилиндров (Alusil®).



Отверстия для поршневых пальцев специальной формы (Hi-SpeKS®) увеличивают устойчивость пальцев к динамическим нагрузкам и тем самым продлевают срок службы поршней.

## **1.2 Микродуговое оксидирование днищ поршней как способ повышения технико-эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания**

Микродуговое оксидирование (МДО) - сравнительно новый вид поверхностной обработки и упрочнения главным образом металлических материалов, берущий свое начало от традиционного анодирования, и соответственно относится к электрохимическим процессам [70, 71, 72, 73, 74, 75]. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионностойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия [1].

Отличительной особенностью микродугового оксидирования является участие в процессе формирования покрытия поверхностных микроразрядов, оказывающих весьма существенное и специфическое воздействие на формирующееся покрытие, в результате которого состав и структура получаемых оксидных слоев существенно отличаются, а свойства значительно повышаются по сравнению с обычными анодными пленками [2]. Другими положительными отличительными чертами процесса МДО являются его экологичность, а также отсутствие необходимости тщательной предварительной подготовки поверхности в начале технологической цепочки и применения холодильного оборудования для получения относительно толстых покрытий. На рисунке 1.1 приведена принципиальная схема микродугового оксидирования.

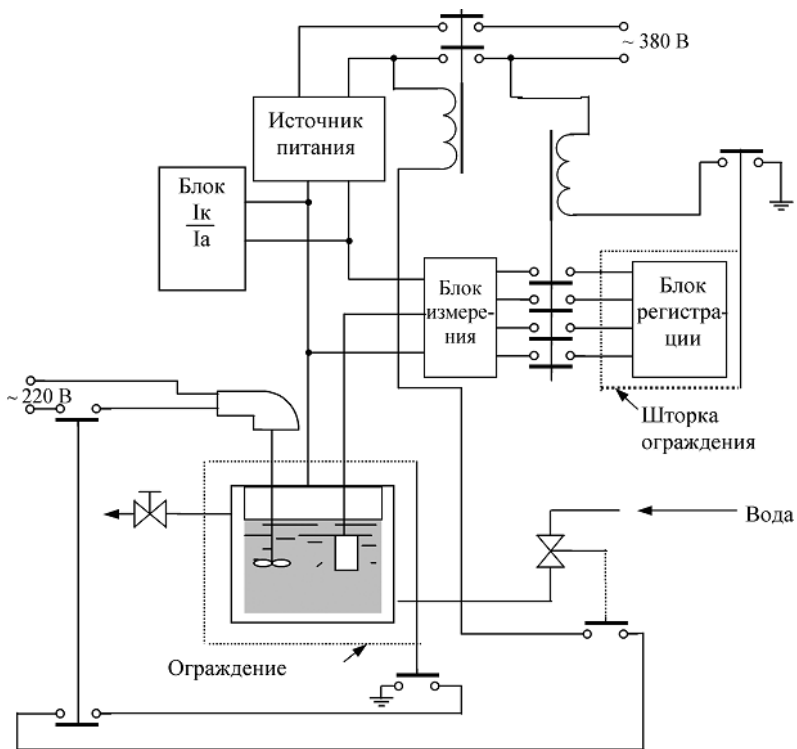


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема процесса МДО

В общем виде, производственная линия для МДО состоит из:

- силового оборудования - специализированных источников питания;
- ванн, в которых проводится подготовка поверхности, обработка и промывка;
- манипулятора для перемещения подвески с деталями (в случае серийного производства);
- металлоконструкций для размещения ванн и манипулятора;
- вспомогательного оборудования - дистиллятора, насоса-фильтра для очистки и перекачки растворов, резервных емкостей, приборов контроля качества покрытия и состояния электролита.

От источников питания на клеммы ванн подаются импульсы тока определенной формы, при этом деталь выполняет роль анода, в качестве катода служит ванна или дополнительные электроды, как правило, из нержавеющей стали.

МДО-покрытия представляют собой керамику сложного состава (рис. 1.2).

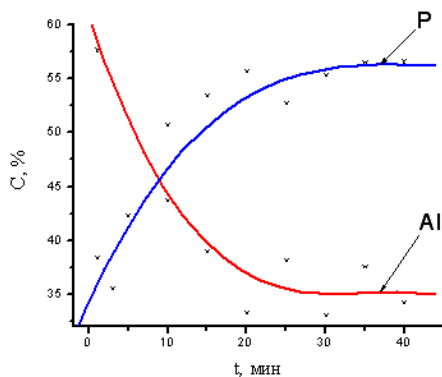


Рисунок 1.2 - График изменения содержания алюминия и фосфора на поверхности МДО-покрытия от времени обработки в фосфатном электролите

Покрытие при микродуговом оксидировании образуется за счет окисления поверхности металла, при этом формируются оксидные и гидроксидные формы этого металла. При необходимости технология МДО позволяет ввести в покрытие любой необходимый химический элемент.

*Толщина покрытий* зависит от состава электролита, материала сплава металла, режимов обработки и времени процесса. МДО позволяет получать покрытий толщиной от долей до сотен микрометров.

*Пористость покрытий* варьируется в интервале 5...50 %, размеры от 0,01 до 10 мкм. Строение пор при толщине покрытия более 5...10 мкм сложное, разветвленное с множеством ответвлений и замкнутых пространств (рис. 1.3).

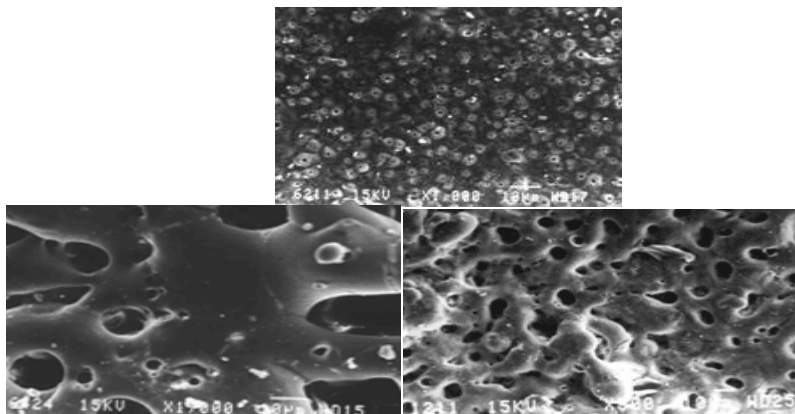


Рисунок 1.3 - Микрофотографии поверхности МДО-покрытий

Покрытия, не содержащие пор получить невозможно, что обусловлено природой процесса. При необходимости пористость может быть понижена с помощью пропитки различными материалами либо с помощью нанесения слоя полимера (красителя).

Наиболее часто применяется пропитка фторопластами и нанесение полимерных порошковых красок.

*Покрытия используются как износостойкие* в различных узлах и агрегатах машин и механизмов. За счет этого во многих случаях удается применять изделия из алюминия - металла достаточно мягкого и сложного для традиционных методов поверхностной обработки (к примеру, гальваники). Проводились сравнительные испытания образцов с МДО-покрытием на алюминии и стального образца с нанесенным износостойким слоем хрома. Удельная нагрузка при испытаниях составляла  $0,64 \text{ Н/мм}^2$ . МДО-покрытия показали меньший износ, особенно при повышенных температурах (рис. 1.4).

МДО-покрытия имеют *повышенную стойкость* к термическим и термоциклическим нагрузкам и работоспособны при температурах от  $-40$  до  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

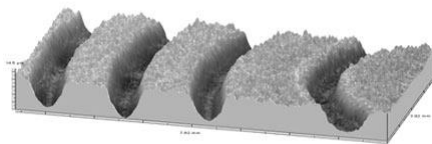


Рисунок 1.4 - Исследование износостойкости методом шар-диск

Испытания показали, что покрытия могут выдерживать до 280 термоциклов 310...1500 °С и до 25 термоциклов 500...1500 °С.

В процессе обработки *шероховатость* поверхности повышается с течением времени. Можно получить покрытия с шероховатостью до 8 класса. Шероховатость зависит от материала сплава, состояния его поверхности и режима обработки (рис. 1.5).

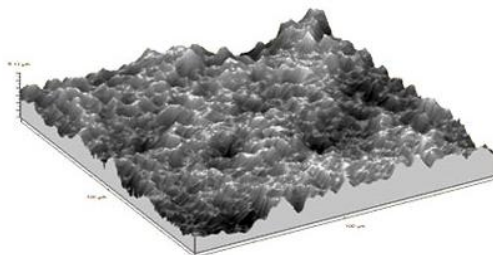


Рисунок 1.5 - 3D-профилометрия МДО-покрытия

Метод МДО позволяет получать покрытия, стойкие в атмосферных условиях и в различных коррозионных средах - химически агрессивных растворах, парах, морской воде и пр. Так как МДО покрытие представляет собой керамику сложного состава, то коррозионная стойкость материала покрытия достаточно велика. Защиту от коррозии металла-основы можно обеспечить толщиной покрытия и регулированием количества и строения пор.

Дополнительную защиту придает пропитка пор инертным материалом (чаще всего фторопластом). НПЦ Полюс (г.Томск) в 2003 году проведены ускоренные испытания по стандартным методикам алюминиевых образцов с полимерно-керамическим МДО-покрытием. Испытания (ГОСТ В 20.57.304-76, ГОСТ РВ 20.57.304-88) показали,

что полученные покрытия могут эксплуатироваться как коррозионно-стойкие в течение 15 лет.

МДО-покрытия имеют превосходное сцепление с металлом-основой (рис. 1.6), которое обеспечивается наличием переходного слоя на границе металл-покрытие. Переходный слой формируется как внутри металла, так и наружу, и имеет профиль с множеством изгибов.

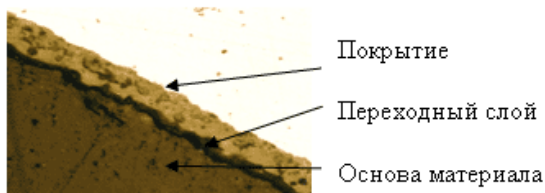


Рисунок 1.6 - Микрофотография шлифа МДО-покрытия

В результате при нагружении не происходит отрыва покрытия по границе раздела металл-покрытие. Рассчитанные по результатам Scrach-тестирования значения адгезии достигают 350 МПа.

Отражательная способность МДО-покрытий достигает 80 %

Для черных МДО-покрытия коэффициент поглощения достигает 90 %.

Для получения наиболее высоких оптических характеристик применяются сплавы с минимальным содержанием примесей.

Твердость МДО-покрытий достигает 21 ГПа.

Измерения производились при помощи прибора Nano Hardness Tester, при нагрузке на индентор - 200 мН.

Получение оксидного слоя обеспечит защиту днища поршня от воздействия высокотемпературных тепловых потоков, выходящих из камер внутреннего сгорания, что позволит снизить толщину и вес поршня, удельный расход топлива, увеличить эффективную мощность и эффективный коэффициент полезного действия двигателя.



## **2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКОЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВС МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ДНИЩ ПОРШНЕЙ**

### **2.1 Теория формирования оксидной пленки на днище поршня**

Микродуговое оксидирование представляет собой процесс анодного окисления (анодирования) металлов с образованием анодной пленки. В результате многочисленных исследований было установлено, что анодные оксидные пленки на алюминии состоят из двух слоев: на поверхности металла - тонкого плотного слоя, получившего название барьерного и наружного пористого слоя.

В настоящее время единой теории и механизма формирования структуры алюминиевой оксидной пленки нет. Проведенный анализ научной литературы и результатов исследований, что из всей совокупности моделей наиболее широко используются коллоидно-электрохимическая, физико-геометрическая и плазменная [8, 9, 50, 108, 118].

Физико-геометрическая модель предложена Келлером [8,9]. Согласно данной модели формирование барьерного оксидированного слоя начинается в единичных активных точках на поверхности алюминия или его сплавов в виде микроячеек. С течением времени происходит разрастание микроячеек с образованием гексагональных призм по всей поверхности металла. Дальнейшее воздействие ионов электролита на сформировавшийся барьерный слой приводит к образованию пор. Образование пор приводит к уменьшению толщины барьерного слоя. При этом наблюдается увеличение напряженности электрического поля, что влечёт за собой увеличение плотности ионного тока электролита и, как следствие – увеличение температуры и скорости оксидирования поверхности металла. (в центре ячеек), число которых обратно пропорционально напряжению. Повышение температуры приводит к увеличению пор. Таким образом, сохраняется динамическое равновесие процессов анодирования и сохранение неизменной толщи-

ны барьерного слоя, успевшей сформироваться в первые моменты процесса анодирования (рис. 2.1) [9, 11, 14, 16].

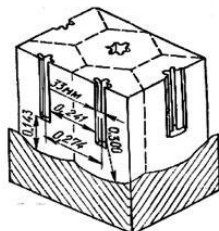


Рисунок 2.1 - Схема формирования оксидированной пленки в соответствии с физико-геометрической моделью Келлера

Основные положения физико-геометрической модели:

- пористая алюминиевая оксидированная пленка - это плотноупакованные оксидные ячейки в форме гексагональных призм.

- ячейки ориентированы нормально к поверхности металла.

- в центре каждой ячейки находится одна пора - канал, диаметр которого определяется природой электролита и составом сплава (на рис. 1 – 33 нм).

- основанием ячеек служит беспористый барьерный слой сплава (на рис. 1 – 0,143 мкм), также имеющий ячеистую структуру, причем размеры ячеек совпадают.

- формирование ячеек начинается с образования барьерного слоя, который затем переходит в пористый слой. В процессе анодирования поры удлиняются, так как дно пор - наружная поверхность барьерного слоя - подтравливается электролитом.

Коллоидно-электрохимическая (или полимерная) теория Бого-явленского рассматривает алюминиевую оксидированную пленку как коллоидные образования. В соответствии с этой теорией формирование оксидной пленки на поверхности металла при его анодировании происходит следующим образом. Под воздействие электрического тока в растворе электролита на поверхности металла начинается рост мононов – мельчайших частиц оксида. С увеличением мононов происходит их объединение в полионы. Представляющие собой многослойные палочкообразные коллоидные мицеллы. Мицеллы являются каркасом

образующегося на поверхности металла оксида алюминия. благодаря волокнистообразной структуре мицелл, в них легко проникают анионы электролита. В результате этого мицеллы приобретают отрицательный заряд, что с одной стороны препятствует сращиванию их волокон и обеспечивает создание пористого слоя. С другой стороны – притягивает их к аноду и обеспечивает надежное сращивание их с поверхностью металла. Таким образом, образующийся на поверхности металла анодный оксид представляет собой оксида металла коллоидно-полимерной природы на базе бемитно-гидраргиллитных цепей ( $AlOOH - Al(OH)_3$ ). Размеры ячеек Келлера близки к размерам мицелл геля  $Al(OH)_3$ . Структура анодного оксида, формирующегося в соответствии с данной моделью, представлена на рисунке 2 [79].

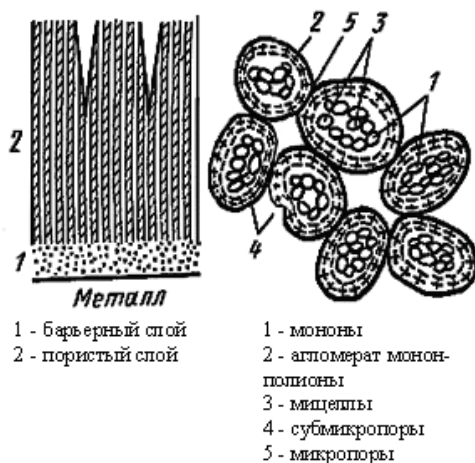


Рисунок 2.2 - Коллоидно-электрохимической теории формирования структуры анодного оксида на поверхности металла

Субмикropоры и микropоры образуют межмономерные и межмицеллярные пространства. Мицеллы могут скручиваться так, что пористый слой напоминает сноповидные образования, субволокон которых диаметром 20...50 нм построены из цепеобразно расположенных моно- и тригидратов оксида алюминия аморфной структуры, в которую внедрены электролитные группы (структурные анионы), участ-

вующие в процессе образования алюминиевой оксидированной пленки и определяющие некоторые свойства анодных оксидов. В целом, с точки зрения коллоидно-мицеллярной теории, анодная оксидная пленка на алюминии состоит в основном из частиц гидроксидов алюминия коллоидной степени дисперсности, образующих неорганический полимер.

Плазменная теория окисления отвечает на ряд вопросов, связанных со свечением алюминия при анодной поляризации. Согласно плазменной теории, формирование барьерный слой происходит в результате полимеризации тонкого слоя поверхности металла под воздействием двумерной холодной плазмы в момент отключения тока. Схема процесса плазменной модели анодирования представлена на рисунке 2.3 [9, 11, 13].

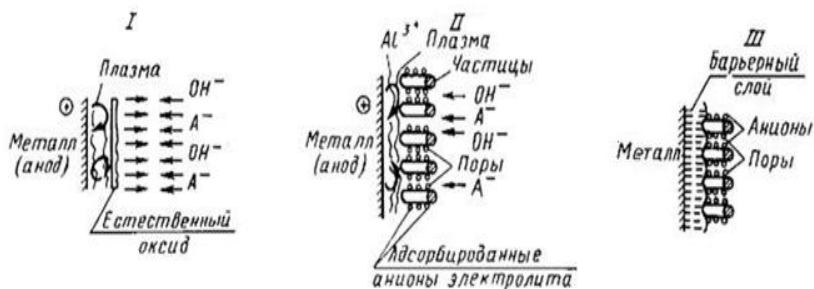
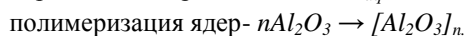
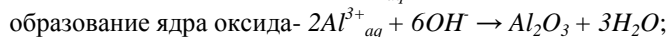


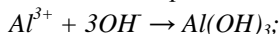
Рисунок 2.3 - Схема плазменной модели анодирования

1 этап:



2 этап:

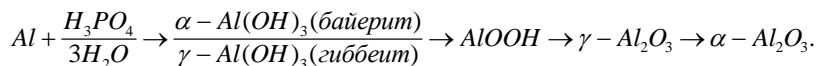
частичная гидратация оксида-



3 этап:

после включения тока - адсорбированные на частицах оксида анионы электролита препятствуют их сращиванию, что обеспечивает формирование пористого барьерного слоя.

При микродуговом оксидировании днищ поршней, в результате воздействия на оксидный слой дугового, искрового или тлеющего микроарзряда, его температура может достигать нескольких тысяч градусов. Под воздействием таких высоких температур происходит оплавление стенок каналов пор оксида, за счет полиморфных превращений и дегидратации оксигидроксидов в покрытии появляются кристаллические модификации оксидов. Воздействие водного раствора электролита приводит к образованию байерита или гиббеита, переходящего под воздействием высоких температур в бемит. Дальнейшее повышение температуры в зоне разряда приводит к переходу байерита и гиббеита в гамма-корунд и при достижении 1200 °С – в альфа-корунд. Поэтому в упрощенном виде процесс оксидирования может быть представлен в следующем виде



Поскольку альфа-корунд  $\alpha-Al_2O_3$  имеет высокую твердость, не гигроскопичен, химически инертен до 1000 °С, основной целью микродугового оксидирования является создание оксидированного слоя с преобладанием  $\alpha-Al_2O_3$ . Создание оксидированного слоя с альфа-корундом позволит получить высокую твердость и теплоотражающую способность и тем самым снизить теплопроводность поршня [27, 29, 61].

Таким образом, микродуговое оксидирование является сложным процессом, на течение которого оказывают влияние внешние (состав электролита, его концентрация и температура, полярность, частота, напряжение, плотность и сила тока, время процесса и т.д.), и внутренние факторы (состав оксидируемого сплава, его термообработка, шероховатость, пористость материала и т.д.). Анализ литературных источников показал, что внешние и внутренние факторы оказывают влияние на физико-химические свойства оксидированного слоя (толщину, состав, структуру, плотность и пористость) и конструктивно-эксплуатационные свойства (микротвердость слоя, прочность сцепле-

ния с металлом, износостойкость, коррозионную устойчивость и теплопроводность) [2, 6, 7, 10, 18, 20, 23, 33-42, 52-58, 83-85, 133].

## **2.2 Влияние толщины оксидированного слоя на теплонапряженность поршня**

Температурные напряжения в стенках нагреваемых деталей, пропорциональные разнице температур на поверхности нагрева и со стороны поверхности отвода тепла, определяют тепловую напряженность двигателя. Поэтому температурное напряжение любой детали определяется разницей температур или температурным перепадом. От температур в детали зависит предел прочности её материала, а от перепадов температур между внешними стенками детали запас её прочности и, соответственно, надежность и срок службы. Уровни температур на поверхности деталей и температурные перепады в них зависят от их конструктивно-геометрических параметров, материала детали, способа охлаждения поверхностей. Исходя из этого можно сказать, что температурные напряжения в детали характеризуют величину её тепловой напряженности, получившей название "тепловая напряженность" (или "теплонапряженность"). В соответствии с вышесказанным можно заключить, что поскольку источником образования высоких температур в двигателе является цилиндро-поршневая группа, то теплонапряженность двигателя будет характеризоваться температурным состоянием её деталей [30, 36, 38, 41, 46, 104, 133, 168].

Теплонапряженность днища поршня будет определяться температурой его поверхности со стороны камеры сгорания и со стороны картера двигателя. Поэтому для определения изменения теплонапряженности поршня можно использовать методику определения снижения удельного теплопотока при прохождении через днище поршня.

Поскольку температура охлаждающей жидкости, после прогрева двигателя, остается практически неизменной, а конструктивно-геометрические параметры поршня не меняются, то определение его тепловой напряженности может быть представлена как величина удельного теплового потока  $q$  прошедшего через плоскую стенку. Соответственно величина удельного теплового потока будет зависеть не

только от температуры газов в камере сгорания ( $t_2$ ), но коэффициента теплоотдачи от газов к стенке  $\alpha_2$ , температуры стенки теплопередающей поверхности ( $t_{2c2}$ ). Тогда температурный перепад в днище поршня ( $\Delta t$ ) будет определяться как разность температур между газами  $t_{2c2}$  и температурой днища поршня ( $t_{2cк}$ ) со стороны картера ( $\Delta t = t_{2c2} - t_{2cк}$ ), с учетом коэффициента теплопроводности материала  $\lambda$  и толщины стенки днища поршня  $\delta$ . Сопоставление в связи с этим двух выражений для теплового потока позволяет определить некоторое усреднённое значение температуры стенки на горячей стороне, если условиться относительно выбора величин  $\alpha_2$ ,  $t_2$ ,  $t_{2cк}$  [41, 46]:

$$q = \alpha_2 \cdot (t_2 - t_{2c2}) = \frac{\lambda}{\delta} \cdot (t_{2c2} - t_{2cк}), \quad (2.1)$$

где  $q$  – средний удельный тепловой поток через днище поршня двигателя, Вт/м<sup>2</sup>;  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи от газов к днищу поршня;  $t_2$  – средняя температура газов за такт, К;  $t_{2c2}$  – температура стенки днища поршня со стороны газов, К;  $t_{2cк}$  – температура днища поршня со стороны картера, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности материала днища поршня, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\delta$  – толщина стенки днища поршня, мм.

Выразив через  $q_1$  количество тепла, переданного единицей площади кольцевого сечения днища поршня, получим

$$q_n \cdot \pi \cdot R^2 = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot q_1 \cdot \delta, \quad (2.2)$$

где  $q_n$  – количество тепла, подводимое к днищу поршня, Вт;  $R$  – радиус кольцевого сечения, мм.

Поскольку температурные напряжения по периферии днища поршня больше, чем в центре, для расчета принимаем  $R$  равный радиусу поршня.

Тогда, толщина днища поршня будет

$$\delta = \frac{q_n}{2q_1} R. \quad (2.3)$$

Таким образом, толщина днища поршня зависит от величины теплового потока.

Для определения теплонапряженности поршня с микродуговым окислением днища процесс теплопередачи необходимо рас-

смазывать как перенос теплоты через трехслойную стенку. При этом первый слой составляет оксидированная пленка, второй – днище поршня, третий – слой масла, попадающий на внутреннюю часть поршня для его охлаждения (рис. 2.4).

При этом условии

$$t_{cmz} > t_o > t_{ov} > t_{zck}, \quad (2.4)$$

где  $t_{cmz}$  - температура оксидированного слоя со стороны газов, град.;  $t_o$  - температура стенки днища поршня под оксидированным слоем;  $t_{ov}$  - температура днища поршня со стороны картера под слоем смазочного масла, град.;  $t_{zck}$  - температура внешнего слоя смазочного масла, град.

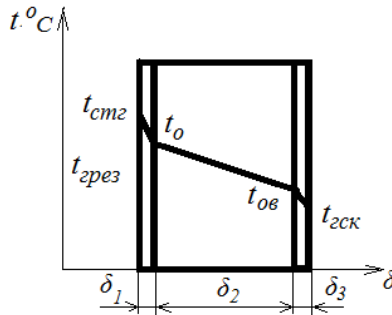


Рисунок 2.4 - Передача теплоты через оксидированный поршень

Тогда удельный тепловой поток, проходящий через каждый слой, может быть выражен:

для оксидированного слоя

$$q_o = \frac{\lambda_o}{\delta_1} \cdot (t_{cmz} - t_o), \quad (2.5)$$

где  $\lambda_o$  – теплопроводность оксидированного слоя, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\delta_1$  – толщина оксидированного слоя, м.

для днища поршня

$$q_o = \frac{\lambda_o}{\delta_2} \cdot (t_o - t_{ov}), \quad (2.6)$$



где  $\lambda_o$  – теплопроводность днища поршня, Вт/м·К;  $\delta_2$  – толщина днища поршня, м.

для слоя масла

$$q_M = \frac{\lambda_M}{\delta_3} \cdot (t_{ov} - t_{zck}), \quad (2.7)$$

где  $\lambda_M$  – теплопроводность слоя масла, Вт/м·К;  $\delta_3$  – толщина слоя масла, м.

Решая эти уравнения относительно теплового напора, получаем

$$t_{cmz} - t_o = \frac{\lambda_o}{\delta_1} \cdot q_o, \quad (2.8)$$

$$t_o - t_{ov} = \frac{\lambda_o}{\delta_2} \cdot q_o, \quad (2.9)$$

$$t_{ov} - t_{zck} = \frac{\lambda_M}{\delta_3} \cdot q_M. \quad (2.10)$$

Складывая полученные выражения для тепловых напоров, получим

$$t_{cmz} - t_{zck} = q \cdot \left( \frac{\lambda_o}{\delta_1} + \frac{\lambda_o}{\delta_2} + \frac{\lambda_M}{\delta_3} \right). \quad (2.11)$$

Отсюда

$$q = \frac{t_{cmz} - t_{zck}}{\frac{\lambda_o}{\delta_1} + \frac{\lambda_o}{\delta_2} + \frac{\lambda_M}{\delta_3}}. \quad (2.12)$$

Поскольку теплопередача в камере сгорания осуществляется излучением, то тепловой поток, на основании существующих формул [168, 169], для поршня может быть представлен как сумму отраженного, поглощенного и пропущенного через днище поршня потоков

$$Q = (q_\alpha + q_\beta + q_\gamma) \cdot S_n, \quad (2.13)$$

где  $q_\alpha$  – удельный тепловой поток отраженный от днища поршня, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_\beta$  – удельный тепловой поток поглощенный днищем поршня, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_\gamma$  – удельный тепловой поток пропущенный сквозь днище поршня, Вт/м<sup>2</sup>;  $S_n$  – площадь поршня, м<sup>2</sup>.

С учетом распределения и поглощения теплового потока (рис. 2.1), формула (2.13) может быть записана следующим образом

$$Q = (q_{\alpha} + q_o + q_{\beta} + q_m + q_{\gamma}) \cdot S_n, \quad (2.14)$$

где  $q_o$  – удельный тепловой поток поглощенный оксидированным днищем поршня, Вт/м<sup>2</sup>;  $q_m$  – удельный тепловой поток поглощенный слоем охлаждающего масла, Вт/м<sup>2</sup>.

С учетом выражений (2.8) и (2.12) отраженный удельный тепловой поток может быть определен как

$$q_{\alpha} = \frac{t_o - t_{oe}}{\frac{\lambda_o}{\delta_1}}. \quad (2.15)$$

Поскольку теплообмен в камере сгорания осуществляется излучением, поток излучения можно записать [168]

$$Q_u = C_s \cdot S_e \cdot \left( \frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.16)$$

где  $C_s$  - коэффициент излучения черного тела (показывает отношение энергии теплового излучения «серого тела» согласно Закону Стефана Больцмана, к излучению «абсолютно черного тела» при той же температуре  $C_s = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) [169]);  $S_e$  - площадь поверхности излучения горящих газов, м<sup>2</sup>;  $T$  - термодинамическая температура излучающего тела, К.

Для расчета потока излучения через днище поршня, покрытого оксидированным слоем, процесс теплообмена необходимо рассматривать как теплообмен излучением между телами при наличии экрана между ними. В виде экрана будет выступать оксидированный слой днища поршня.

В этом случае поток излучения из камеры сгорания к оксидированному слою можно записать [169]

$$Q_{zo} = \varepsilon_{np} \cdot C_s \cdot S_e \cdot \left[ \left( \frac{t_z}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_{cmz}}{100} \right)^4 \right], \quad (2.17)$$

где  $Q_{zo}$  - поток излучения от газов к оксидированному слою днища поршня, Вт;  $\varepsilon_{np}$  - приведенный коэффициент черноты излучае-

мого и облучаемого тел;  $t_e$  - температура газов, К;  $t_{cmz}$  - температура оксидированного слоя, К.

Поток излучения от оксидированного слоя к днищу поршня

$$Q_{одн} = \varepsilon'_{np} \cdot C_s \cdot S_n \cdot \left[ \left( \frac{t_{cmz}}{100} \right)^4 - \left( \frac{t_o}{100} \right)^4 \right], \quad (2.18)$$

где  $\varepsilon'_{np}$  - приведенный коэффициент черноты оксидированного слоя и днища поршня;  $t_o$  - температура днища поршня под оксидированным слоем, К.

Как видно поток излучения зависит от разности температур поверхностей излучаемого и облучаемого тел. В свою очередь температура поверхности зависит от термического сопротивления материала, из которого изготовлено тело. Исходя из этого, определение изменения температуры  $\Delta t$  оксидированного днища поршня может быть определено через термическое сопротивление типового и оксидированного слоя [168, 169].

$$\Delta t = \left( \frac{\Delta t_e}{1 + \frac{R_{en}}{R_{e2}}} - \frac{\Delta t_{cpz}}{1 + \frac{R_{em}}{R_{en}}} \right) - \left( \frac{\Delta t_{cpz}}{1 + \frac{R_{en}}{R_{eon}}} - \frac{\Delta t_{cpzo}}{1 + \frac{R_{eoc}}{R_{em}}} \right), \quad (2.19)$$

где  $\Delta t_{cpz}$  - средняя температура газов в камере сгорания, К;  $\Delta t_{mn}$  - температура поверхности типового поршня, К;  $\Delta t_{on}$  - температура поверхности оксидированного поршня, К;  $R_{en}$  - термическое сопротивление материала поршня, м<sup>2</sup>К/Вт;  $R_{e2}$  - термическое сопротивление газов, м<sup>2</sup>К/Вт;  $R_{em}$  - термическое сопротивление внутренней поверхности поршня, поскольку внутренняя поверхность покрыта слоем масла принимается равным термическому сопротивлению масла, м<sup>2</sup>К/Вт;  $R_{eon}$  - термическое сопротивление оксидированной поверхности поршня, м<sup>2</sup>К/Вт;  $R_{eoc}$  - термическое сопротивление оксидированного слоя поршня, м<sup>2</sup>К/Вт.

Средняя температура газов рассчитывается исходя из величины температуры газов  $t_e = 2955$  К, известно, что интенсивность излучения газов снижается и при соотношении длины излучения равной диаметру облучаемой поверхности (поскольку в процессе работы происходит постоянное изменение соотношения, целесообразно принимать

среднее значение соответствующее  $h=d$ , где  $d$  – диаметр поршня, а  $h$  – ход поршня) температура нагрева облучаемой поверхности для такта расширения составит  $0,6 t_z=1773 \text{ K}$  [169].

Тогда средняя результирующая температура газов в камере сгорания составит

$$\Delta t_z = t_z - t_n = 1773 - 623 = 1150 \text{ K}.$$

Разница нагрева поверхности днища типового поршня относительно средней результирующей температуры газов при сгорании

$$\Delta t_{cpz} = \frac{\Delta t_z}{1 + \frac{R_{en}}{R_{ez}}} = \frac{1150}{1 + \frac{0,0032}{0,012}} = 912,7 \text{ K}.$$

Разница нагрева тела типового поршня

$$\Delta t_{mn} = \frac{\Delta t_{cpz}}{1 + \frac{R_{em}}{R_{en}}} = \frac{912,7}{1 + \frac{0,0088}{0,0032}} = 243,6 \text{ K}.$$

Разница нагрева поверхности оксидированного днища поршня относительно средней результирующей температуры газов при сгорании

$$\Delta t_{cpzo} = \frac{\Delta t_z}{1 + \frac{R_{en}}{R_{eon}}} = \frac{1150}{1 + \frac{0,0032}{0,007}} = 793,1 \text{ K}.$$

Разница нагрева тела поршня под оксидированным днищем поршня

$$\Delta t_{mno} = \frac{\Delta t_{cpzo}}{1 + \frac{R_{eoc}}{R_{em}}} = \frac{793,1}{1 + \frac{0,0088}{0,0032}} = 211,5 \text{ K}.$$

Тогда

$$\Delta t = (912,7 - 243,6) - (793,1 - 211,5) = 87,5 \text{ K}.$$

Таким образом, разность нагрева типового поршня и поршня с оксидированным днищем составляет 88 К.

Поскольку процесс теплопередачи зависит от термического сопротивления формула 2.12 может быть записана

$$q = \frac{t_{cmz} - t_{зск}}{R_1 + R_2 + R_3}, \quad (2.20)$$

где  $R_1, R_2, R_3$  - соответственно термическое сопротивление оксидированного слоя, тела поршня и масляного слоя,  $m^2 \cdot K/Вт$ .

Термическое сопротивление оксидированного слоя определяется [133,168]

$$R_1 = \frac{\delta}{\lambda_1}, \quad (2.21)$$

Отсюда

$$\delta = R_1 \cdot \lambda_1. \quad (2.22)$$

Поскольку термическое сопротивление материала зависит от его пористости, то термическое сопротивление оксидированного слоя может быть определено как

$$R_1 = \frac{R_a}{\Delta P}, \quad (2.23)$$

где  $R_a$  - термическое сопротивление алюминия ( $R_a=0,0032 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K/Вт$ );  $\Delta P$  - разность пористости алюминия и оксидированного слоя ( $\Delta P = 64$ ) [124].

А коэффициент теплопроводности оксидированного слоя

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_a}{1 + \beta}, \quad (2.24)$$

где  $\lambda_a$  - теплопроводность алюминия,  $106...160 Вт/м \cdot K$ ;  $\beta$  - температурный коэффициент  $\beta= 0,0025$  [124].

Исходя из известных из справочной литературы данных проведем расчет толщины оксидированного слоя.

Коэффициент теплопроводности оксидированного слоя составит

$$\lambda_1 = \frac{160}{1 + 0,0025} = 159,6 Вт/м \cdot K.$$

Термическое сопротивление оксидированного слоя

$$R_1 = \frac{0,0032 \cdot 10^{-3}}{64} = 0,00005 \cdot 10^{-3} m^2 \cdot K / Вт.$$

Тогда толщина оксидированного слоя днища поршня

$$\delta = 0,00005 \cdot 10^{-3} \cdot 159,6 = 0,00798 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Таким образом, для обеспечения снижения теплонапряженности поршня, оксидированный слой, образуемый на днище поршня, должен иметь толщину не менее 8 мкм.

### **2.3 Теоретическое обоснование влияния режимов микродугового оксидирования на толщину и пористость оксидированного слоя днища поршня**

Рост пленки при оксидировании алюминия отражает два одновременно протекающих процесса: электрохимическое образование пленки и химическое растворение ее. При этом рост пленки возможен только в таких электролитах, где скорость растворения пленки ниже, чем скорость ее образования. К таким электролитам относятся растворы хромовой, серной и щавелевой кислот. Плотность ионного тока ( $i_u$ ) находится в экспоненциальной зависимости от напряженности электрического поля образующегося в оксидированной пленке ( $E$ ):  $i_u = \alpha e^{\beta E}$ . При этом толщина барьерного оксидированного слоя ( $h$ ) будет пропорциональна формирующему напряжению ( $U$ ) [8, 10, 12, 23]:

$$h = m_{oc} \cdot U, \tag{2.25}$$

где  $U$  - падение напряжения на оксидированной плёнке,  $B$ ;  $m_{oc}$  - эффективность роста барьерного слоя при постоянной плотности ионного тока  $i_u$  (гальваностатический режим) [23].

Оценка степени влияния режимов МДО на характеристики получаемого оксидированного покрытия может быть проведена с использованием уравнения первого порядка, учитывающие линейные эффекты и эффекты взаимодействия режимов процесса микродугового оксидирования:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j, \tag{2.26}$$

где  $y$  – функция отклика определяемого показателя;  $x_i, x_j$  – влияющие режимы МДО;  $b_0$  – свободный член;  $b_i, b_{ij}$  – коэффициенты регрессии;  $n$  – число проводимых опытов.

Исходя из этого показателями, которые будут наиболее полно характеризовать свойства создаваемого покрытий, будут:  $y_1$  – теплопроводность (Дж/м<sup>2</sup>) и  $y_2$  – толщина оксидированного слоя ( $\delta$ , мкм). Анализ литературных источников показал, что теплопроводность и толщина оксидированного покрытия являются случайными характеристиками и могут быть описаны с использованием закона нормального распределения.

В качестве основных факторов, оказывающих наибольшее влияние на толщину оксидированного слоя, были определены следующие показатели:  $X_1$  – соотношение катодной и анодной токовых составляющих ( $I_k/I_a$ ),  $X_2$  – плотность тока ( $i$ , А/дм<sup>2</sup>),  $X_3$  – концентрация электролита (г/л),  $X_4$  – продолжительность оксидирования ( $T$ , ч),  $X_5$  – напряжение формирования слоя ( $U$ , В).

На основании ранее проведенных исследований [3] было установлено, что толщина алюминиевой оксидированной пленки может быть определена путем расчета, исходя из фиксированных режимов анодирования в электролитах представляющих собой порообразующий раствор [1], в котором формируется сплошная (непористая) пленка, так называемый "оксид барьерного типа" - барьерного слоя. При этом в барьерном слое оксид алюминия растет пропорционально напряжению, приложенному к оксиду (напряжение формирования  $U_\phi$ ) по закону [48]:

$$\delta = a \cdot U_\phi, \quad (2.27)$$

где  $\delta$  - толщина оксидированного слоя на поршне, мкм;  $U_\phi$  — напряжение формирования оксидированного слоя, В;  $a$  - константа роста оксида (для алюминия  $a = 1,4$  мкм/В).

Поскольку электрохимические процессы при оксидировании протекают в соответствии с законами Фарадея, то вполне обоснованно, что толщина оксидированного слоя ( $\delta$ ) будет пропорциональна количеству протекающего заряда ( $Q$ ):

$$Q = \int_0^t I dt, \quad (2.28)$$

где  $I = \int_0^t i_i dS$ , - сила тока, проходящего через ячейку в процессе оксидирования ( $i_i$  - плотность тока), А.

Но поскольку толщина оксидированного слоя связана с напряжением соотношением (2.27), то скорость его формирования на поверхности днища поршня  $\left(\frac{dh}{dt}\right)$  и скорость роста напряжения

$\left(\frac{dU_\phi}{dt}\right)$  будут пропорциональны силе тока, проходящего через ячейку.

Исходя из этого, скорость образования оксидированного слоя может быть представлена как

$$f(i_i) = \frac{dU_\phi}{dt}. \quad (2.29)$$

Данное выражение показывает, что линейность зависимости скорости от напряжения выполняется в широком интервале значений плотностей тока.

Тогда, поскольку первоначально оксидный барьерный слой формировался только в порах пористого слоя, то плотность тока оксидирования при этом будет определяться только площадью пор, что, соответственно, будет влиять на скорость роста напряжения  $\left(\frac{dU_\phi}{dt}\right)$ .

Таким образом, зная скорость роста напряжения можно определить величину плотности тока ( $i_n$ ), и, таким образом, площадь поверхности, занимаемую порами. При этом пористость, как отношение объема пор к объему всего оксида, будет определяться соотношением [23, 48, 50, 52]:

$$P = \frac{i}{i_n} \cdot 100\%, \quad (2.30)$$

где  $i$  - плотность тока, подводимого к образцу, (А\дм<sup>2</sup>);  $i_n$  - плотность тока, рассчитанная из всей поверхности образца (А\дм<sup>2</sup>).

Поскольку формирование наноячеек пористого оксида алюминия происходит за счет роста оксидированного барьерного слоя, то диаметр каждой ячейки будет равен удвоенному значению его толщ-



ны, определяемому из соотношения (2.27). Следовательно, изменяя ток через ячейку и напряжение формирования можно регулировать параметры оксидированного слоя не только в конечной стадии, но и в процессе оксидирования.

Рассматривая МДО как эквивалентную систему изменение толщины и пористости оксидированного покрытия можно характеризовать электрическими параметрами ее элементов, а именно эквивалентным сопротивлением образуемого оксидированного слоя ( $R_r$ ) и емкостью границы металл-раствор ( $C_r$ ).

Протекающий в микродуговой системе ток будет определяться формулой [50, 52]:

$$I(t) = \frac{U}{R_p + R_r} \left( \frac{R_r}{R_p} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_m}} + 1 \right), \quad (2.31)$$

$$\tau_m = \frac{R_p \cdot R_r}{R_p + R_r} \cdot C_r, \quad (2.32)$$

где  $U$  - напряжение тока, В;  $R_p$  - сопротивление раствора, Ом;  $R_r$  - сопротивление оксидированного слоя, Ом;  $C_r$  - емкость границы металл-раствор, Ф;  $\tau_m$  - коэффициент пропорциональности сопротивлений эквивалентной системы.

В этом случае параметры эквивалентной микродуговой схемы имеют следующий вид:

$$R_p = \frac{U}{I(t)}, \quad (2.33)$$

$$R_r = \frac{U}{I(t_2)} - \frac{U}{I(t_1)}, \quad (2.34)$$

где  $I(t_1)$  - изменение силы тока в растворе электролита, А;  $I(t_2)$  - изменение силы тока в формирующемся оксидированном слое, А.

Соответственно

$$I(t_1) = \frac{U}{R_p}, \quad (2.35)$$

$$I(t_2) = \frac{U}{R_r}, \quad (2.36)$$

Ёмкость границы металл-раствор [94,98]

$$C_r = \frac{T}{\ln 2 \left( \frac{R_r \cdot R_p}{R_r + R_p} \right)}, \quad (2.37)$$

где  $T$  – время процесса формирования оксидированного слоя, ч.

Общий ток получения покрытия будет состоять из активного тока ( $I_a$ ) и емкостного ( $I_c$ ), часть которого расходуется на образование слоя металл-раствор (барьерного слоя и оксидированного слоя рис. 2.5).

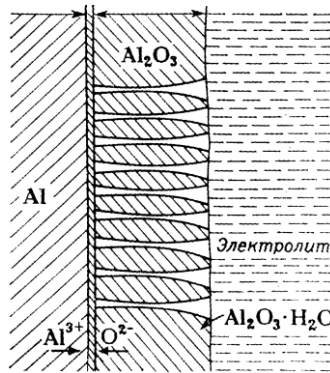


Рисунок 2.5 - Схема оксидного покрытия на алюминии: 1 – плотный беспористый слой покрытия (барьерный слой); 2 – пористая часть покрытия (оксидированный слой)

Тогда сила тока

$$I = I_a + I_c = S \left( \frac{U_\phi}{R_a} + C_r \frac{dU_\phi}{dT} \right), \quad (2.38)$$

где  $S$  – площадь поверхности электрода, м<sup>2</sup>;  $R_a$  – активное сопротивление границы металл-раствор ( $R_r + R_p$ ), Ом;  $T$  – время процесса, ч.

На основании этого можно определить параметры, характеризующие свойства оксидированного покрытия:

$$C_r = \frac{I_c}{\frac{dU_\phi}{dT}}, \quad (2.39)$$

$$R_r = \frac{U}{I_a}, \quad (2.40)$$

где  $U$  – поляризационное напряжение, измеряемое между днищем поршня и электродом, В.

Таким образом, скорость оксидирования, и, соответственно толщина и пористость оксидированного слоя, будут определяться электрическими параметрами. Поэтому сопротивление и емкость микродуговой системы будут являться отображением толщины и пористости получаемого покрытия. Тогда, в соответствии с теорией электрических цепей, можно записать

$$R_r = \frac{\rho \cdot \delta}{S}, \quad (2.41)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление оксидированного слоя, Ом·м.

$$C_r = \frac{k \cdot P}{h}, \quad (2.42)$$

где  $k$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от состава электролита, численно равный массе вещества, выделившейся при прохождении через электролит единицы электрического заряда;  $P$  – пористость покрытия;  $\delta$  – толщина покрытия, мкм.

Исходя из этого, толщина покрытия днища поршня оксидированным слоем будет определяться:

$$\delta = \frac{R_r \cdot S \cdot k}{\rho}, \quad (2.43)$$

$$\delta = \frac{R_r \cdot P}{k}, \quad (2.44)$$

или

$$\delta = \frac{U_r \cdot S \cdot k}{I \cdot \rho}, \quad (2.45)$$

а пористость покрытия

$$P = \frac{C_r \cdot \delta}{k}, \quad (2.46)$$

или

$$P = \frac{I \cdot \delta \cdot k}{U \cdot \rho}. \quad (2.47)$$

Таким образом, толщина оксидированной пленки будет прямо пропорциональна напряжению и составу электролита. Пористость будет обратно пропорциональна напряжению и прямо пропорциональна силе тока. Поэтому изменяя силу тока, напряжение и время процесса можно получать оксидированные слои необходимой толщины и пористости.

## **2.4 Теоретическое обоснование влияния оксидирования днищ поршней на технико-эксплуатационные показатели двигателя**

Определяющее влияние на эффективные, удельные и экономические показатели ДВС оказывает количество воздуха, проходящее через рабочую камеру сгорания.

Количество воздуха поступающего в камеру сгорания оценивается коэффициентом наполнения

$$\eta_v = \frac{T_0 \cdot (\varepsilon \cdot p_a - p_r)}{(T_0 + \Delta T) \cdot (\varepsilon - 1) \cdot p_0}, \quad (2.48)$$

где  $T_0$ -температура окружающей среды, К;  $p_0$  – давление окружающей среды, МПа;  $p_r$  – давление остаточных газов в конце выпуска, МПа;  $\Delta T$ - температура подогрева свежего заряда, К.

Из формулы 2.48 видно, что на повышение коэффициента наполнения оказывают влияние давления в конце впуска и остаточных газов.

Давление в конце впуска

$$p_a = p_0 - \Delta p_a, \quad (2.49)$$

где  $p_0$  - давление окружающей среды, МПа;  $\Delta p_a$  – потери давления, МПа.

$$\Delta p_a = (\beta^2 + \xi_{en}) \cdot \left(\frac{\omega_{en}^2}{2}\right) \rho_0 \cdot 10^{-6}, \quad (2.50)$$

где  $\beta^2$  - коэффициент затухания скорости движения заряда в рассматриваемом сечении цилиндра;  $\xi_{en}$  - коэффициент сопротивления трубопроводов впускной системы, отнесенный к наиболее узкому ее сечению;  $\omega_{en}$  - средняя скорость движения заряда в наименее узком сечении впускной системы, м/с.

Из выражений 2.49 и 2.50 видно, что давление в конце впуска и потери давления, будут зависеть от плотности свежего заряда. В свою очередь плотность заряда зависит от давления и температуры окружающей среды [169].

$$\rho_0 = \frac{p_0 \cdot 10^6}{R_g \cdot T_0}, \quad (2.51)$$

$R_g=287$  – удельная газовая постоянная воздуха, Дж/кг·град.

В процессе наполнения камеры сгорания цилиндра температура свежего заряда будет увеличиваться из за её подогрева от нагретых деталей камеры сгорания. Это приведет к снижению плотности свежего заряда. Тогда

$$\rho_0 = \frac{p_0 \cdot 10^6}{R_g \cdot (T_0 + \Delta T)}, \quad (2.52)$$

где  $\Delta T$ - температура подогрева заряда, К.

Из выражения (2.47) видно, что на изменение плотности заряда будет оказывать влияние температура деталей камеры сгорания и остаточных газов

Установлено, что при применении теплоизолирующего покрытия на днище поршня достигается эффект снижения температуры поверхности днища поршня, на участке наполнения, и повышение температуры – на участке сжатия-сгорания.

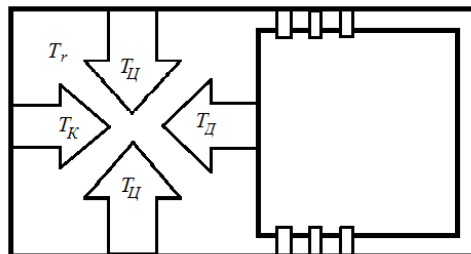


Рисунок 2.6 – Схема подогрева заряда с типовым поршнем

На основании проведенных расчетов теплопроводности днищ поршней с оксидированным слоем установлено, что температура поршня с оксидированным днищем на 25 % ниже температуры типового. Снижение температуры днища поршня в момент впуска (на участке наполнения) позволит увеличить массу свежего заряда.

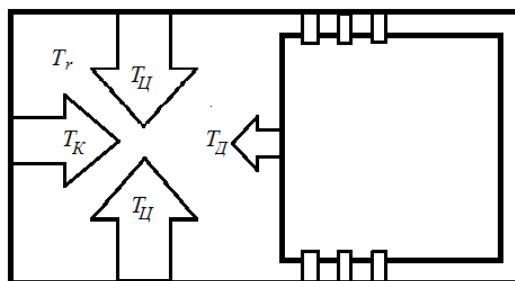


Рисунок 2.7 – Схема подогрева заряда с поршнем с оксидированным днищем

Известно, что индикаторный коэффициент полезного действия, удельный индикаторный расход топлива, эффективный коэффициент полезного действия, удельный эффективный расход топлива, зависят от коэффициента наполнения. Поэтому, проведя расчет плотности заряда с учетом разницы температур днищ типового и оксидированного поршней можно определить влияние оксидирования днища поршня на технико-эксплуатационные показатели ДВС.

Индикаторный коэффициент полезного действия вычисляется по формуле [169]

$$\eta_i = \frac{\alpha \cdot l_o \cdot p_i}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_o}, \quad (2.53)$$

где  $p_i$  - среднее индикаторное давление действительного цикла, МПа;  $l_o$  - теоретически необходимое количество воздуха для сгорания 1 кг топлива, кг возд./кг;  $H_u$  - теплотворная способность (низшая теплота сгорания) топлива, кДж/кг;  $\alpha$  - коэффициент избытка воздуха.

Удельный индикаторный расход топлива

$$g_i = \frac{3600 \cdot \rho_o \cdot \eta_v}{p_i \cdot l_o \cdot \alpha}. \quad (2.54)$$

Эффективная мощность (кВт)

$$N_e = \frac{V_h \cdot n \cdot i \cdot H_u}{30 \cdot \tau \cdot \alpha \cdot l_o} \cdot \rho_o \cdot \eta_v \cdot \eta_i \cdot \eta_m, \quad (2.55)$$

где  $V_h$  – рабочий объем одного цилиндра, л;  $i$  – число цилиндров;  $n$  – частота вращения коленчатого вала, мин<sup>-1</sup>;  $\tau$  – тактность двигателя;  $\eta_m$  – механический КПД двигателя.

Эффективный удельный расход топлива

$$g_e = \frac{3600 \cdot \rho_o \cdot \eta_v}{p_e \cdot l_o \cdot \alpha}, \quad (2.56)$$

где  $p_e$  – среднее эффективное давление, МПа.

Эффективный часовой расход топлива

$$G_T = \frac{g_e \cdot N_e}{1000}. \quad (2.57)$$

Эффективный коэффициент полезного действия

$$\eta_e = \frac{\alpha \cdot L_o \cdot p_e}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_o}, \quad (2.58)$$

где  $L_o$  - теоретически необходимое количество воздуха в кмоль, для сгорания 1 кг топлива, кмоль возд./кг.

Эффективный крутящий момент (Н м)

$$M_e = 9550 \cdot \left( \frac{N_e}{n} \right). \quad (2.59)$$

Анализ формул (2.53...2.59) показывает, что повышение коэффициента наполнения приведет к повышению давления в конце впуска, давления сжатия и индикаторного коэффициента полезного действия. Соответственно, увеличение коэффициента наполнения с повышением плотности заряда, приведет к снижению удельного расхода топлива при повышении эффективной мощности и крутящего момента, согласно формулам (2.56...2.59).

Таким образом, образование оксидированного слоя на днище поршня ДВС приведет к снижению температуры подогрева заряда, по сравнению с типовым поршнем, и, соответственно, к повышению коэффициента наполнения, что позволит повысить технико-эксплуатационные показатели двигателя.

Для подтверждения изложенных предпосылок необходимо провести сравнительный тепловой расчет двигателя с типовыми поршнями и поршнями с оксидированным днищем.

Тепловой расчет бензинового двигателя

### **ВПУСК**

Давление в конце впуска (МПа)

$$P_a = \frac{\eta_v \cdot (\varepsilon - 1) \cdot P_o \cdot T_o' + P_r \cdot T_o}{\varepsilon \cdot T_o}, \quad (2.60)$$

где  $\eta_v$  – коэффициент наполнения,  $\varepsilon$  – степень сжатия,  $T_o$  – температура окружающей среды, К;  $P_o$  – давление окружающей среды, МПа;  $T_r$  – температура остаточных газов в конце выпуска, К;  $P_r$  – давление остаточных газов в конце выпуска, МПа;  $T_o' = T_o + \Delta T$ ;  $\Delta T$  – температура подогрева свежего заряда, К.

Коэффициент остаточных газов

$$\gamma_r = \frac{T_o + \Delta T}{T_r} \cdot \frac{P_r}{\varepsilon \cdot P_a - P_r}. \quad (2.61)$$

Температура в конце впуска

$$T_a = \frac{T_o + \Delta T + \gamma_r T_r}{1 + \gamma_r}. \quad (2.62)$$

### **СЖАТИЕ**

Давление в конце сжатия (МПа)



$$P_c = P_a \cdot \varepsilon^n \quad (2.63)$$

Температура в конце сжатия (К)

$$T_c = T_a \cdot \varepsilon^{n-1} \quad (2.64)$$

### СГОРАНИЕ

Теоретически необходимое количество воздуха в кг, для сгорания 1 кг топлива ( кг возд./кг)

$$l_o = \frac{1}{0,23} \left( \frac{8}{3} C + 8H - O \right), \quad (2.65)$$

где С; Н; О – элементарный состав топлива (углерод, водород, кислород), 0,23 – массовое содержание кислорода в 1 кг воздуха.

Теоретически необходимое количество воздуха в кмоль, для сгорания 1 кг топлива (кмоль возд./кг)

$$L_o = \frac{l_o}{\mu_6}, \quad (2.66)$$

где  $\mu_6$  – мольная масса воздуха (28,9 кмоль).

Действительное количество свежего заряда в молях, поступившее в двигатель для сгорания 1 кг топлива (кмоль гор.см/кг топл.):

$$M_1 = \alpha \cdot L_o + \frac{1}{m_T} \quad (2.67)$$

где  $m_T$  – молекулярная масса паров топлива, кг/кмоль (110...120),  $\alpha$  – коэффициент избытка воздуха

Число молей остаточных газов (кмоль)

$$M_r = \gamma_r \cdot M_1. \quad (2.68)$$

Число молей газа, находящегося в цилиндре двигателя в конце сжатия (кмоль)

$$M_c = M_1 + M_r. \quad (2.69)$$

Число молей продуктов сгорания 1 кг топлива (кмоль)

$$M_2 = M_1 + \frac{H_2}{4} + \frac{O_2}{32} + 0,21 \cdot L_o \cdot (1 - \alpha). \quad (2.70)$$

Число молей продуктов сгорания и остаточных газов (кмоль)

$$M_z = M_2 + M_r. \quad (2.71)$$

Действительный коэффициент молекулярного изменения (кмоль)

$$\mu = \frac{M_z}{M_c}. \quad (2.72)$$

Теплоемкость свежепоступившего заряда (кДж/кмоль·град)

$$C_{vc} = 20,76 + 1,74 \cdot 10^{-3} \cdot T_c. \quad (2.73)$$

Теплоемкость продуктов сгорания:

$$C_{vz} = (18,43 + 2,6 \cdot \alpha) + (1,5 + 13,8 \cdot \alpha) \cdot 10^{-3} \cdot T_z. \quad (2.74)$$

Полученные значения  $C_{vc}$  и  $C_{vz}$  подставляем в нижеследующие уравнение с последующим определением температуры в конце процесса сгорания (К):

$$C_{vc} \cdot T_c + \frac{\xi \cdot (H_u - \Delta H_u)}{M_1 \cdot (1 + \gamma_r)} = \mu \cdot C_{vz} \cdot T_z, \quad (2.75)$$

где  $H_u$  - теплотворная способность (низшая теплота сгорания) топлива (кДж/кг),  $\Delta H_u$  – потери тепла в связи с неполнотой сгорания (кДж),  $\xi$  – коэффициент выделения тепла при сгорании

$$\Delta H_u = 119600L_0(1 - \alpha)$$

(2.76)

Давление в конце сгорания (МПа)

$$P_z = \mu \cdot P_c \cdot \frac{T_z}{T_c} \quad (2.77)$$

Степень повышения давления предварительного расширения

$$\lambda = \frac{P_z}{P_c}. \quad (2.78)$$

### **РАСШИРЕНИЕ**

Давление в конце расширения (МПа)

$$P_g = \frac{P_z}{\varepsilon^{n_2}}. \quad (2.79)$$

Температура в конце расширения (К)

$$T_g = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2 - 1}}. \quad (2.80)$$

### **ВЫПУСК**

Температура остаточных газов (К)

$$T_r = \frac{T_a}{\sqrt[3]{\frac{P_a}{P_r}}}. \quad (2.81)$$

### **ИНДИКАТОРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ**

Среднее индикаторное давление (МПа)

$$p_i' = \frac{P_c}{\varepsilon - 1} \cdot \left[ \frac{\lambda}{n_2 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_2 - 1}} \right) - \frac{1}{n_1 - 1} \cdot \left( 1 - \frac{1}{\varepsilon^{n_1 - 1}} \right) \right]. \quad (2.82)$$

Среднее индикаторное давление действительного цикла (МПа)

$$p_i = v \cdot p_i' - (P_r - P_a), \quad (2.83)$$

где  $v$  – коэффициент скругления индикаторной диаграммы  
 $v=0,94\dots0,97$ .

Индикаторная мощность (кВт)

$$N_i = P_i \cdot V_h \cdot z \cdot \frac{n}{120}, \quad (2.84)$$

где  $V_h$  – рабочий объем одного цилиндра (л);  $z$  – число цилиндров;  $n$  – частота вращения коленчатого вала (мин<sup>-1</sup>)

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = \frac{\alpha \cdot l_o \cdot p_i}{H_u \cdot \eta_v \cdot \rho_o}, \quad (2.85)$$

где  $\rho_o$  – плотность заряда на впуске (кг/м<sup>3</sup>)

$$\rho_o = \frac{p_o \cdot 10^6}{R_g \cdot T_o}, \quad (2.86)$$

$R_g = 287$  – удельная газовая постоянная воздуха (Дж/кг град)

Удельный индикаторный расход топлива (г/кВт ч)

$$g_i = \frac{3600}{\eta_i \cdot H_u}, \quad (2.87)$$

### **ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

Среднее давление механических потерь (МПа) для бензиновых двигателей с числом цилиндров до шести и отношением  $S/D \leq 1$

$$P_m = 0,05 + 0,013 \mathcal{G}_{n.c.p.}, \quad (2.88)$$

где  $\mathcal{G}_{n.c.p.}$  – средняя скорость поршня (м/с)

$$\mathcal{G}_{n.c.p.} = S n / 30 \quad (2.89)$$

где  $S$  - ход поршня (92 мм)

Среднее эффективное давление (МПа)

$$P_e = P_i - P_m \quad (2.90)$$

Механический КПД

$$\eta_m = P_e / P_i \quad (2.91)$$

Эффективная мощность (кВт)

$$N_e = N_i \eta_m = P_e \cdot V_h \cdot z \cdot \frac{n}{120}, \quad (2.92)$$

Эффективный КПД

$$\eta_e = \eta_i \eta_m \quad (2.93)$$

Эффективный удельный расход топлива (г/кВт ч)

$$g_e = \frac{3600}{\eta_e \cdot H_u}, \quad (2.94)$$

Эффективный часовой расход топлива (кг/ч)

$$G_T = \frac{g_e \cdot N_e}{1000}, \quad (2.95)$$

Для проведения расчета использовались данные по типовому двигателю УМЗ-417 взятые из нормативно-технической документации «Ульяновского моторного завода». На основании проведенных расчетов (формула 2.19) изменение температуры днища окисленного поршня составила 62 °С, что на 25 % ниже температуры днища типового поршня 250 °С. Соответственно температура подогрева свежего заряда составит 30 °С против 40 °С у типового поршня.

Поскольку количество теплоты сгорания, которая идет на повышение внутренней энергии рабочей смеси и совершение полезной работы, определяется коэффициентом выделения теплоты [168]

$$\xi = \frac{[Q_H - (Q_{HC} + Q_{дис} + Q_{CO} + Q_{ог})]}{Q_H}, \quad (2.96)$$

где  $Q_H$  – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг;  $Q_{HC}$  – потери теплоты на неполноту сгорания, кДж/кг;  $Q_{дис}$  – потери теплоты на диссоциацию продуктов сгорания, кДж/кг;  $Q_{CO}$  – суммарные потери тепла на нагрев головки блока, гильзы цилиндров и через стенки в сис-

тему охлаждения двигателя, кДж/кг;  $Q_{OG}$  – потери теплоты с отработавшими газами, кДж/кг.

То с учетом отраженной теплоты от оксидированного слоя днища поршня, и пренебрежением потерь на диссоциацию, в силу их незначительности (не более 0,1...0,4 % [168]) и с учетом того, что теплота, пошедшая на разрушение молекул, возвращается при их сжигании, коэффициент выделения теплоты может быть записан

$$\xi = \frac{Q_H - (Q_{HC} + Q_{CO} + Q_{OG}) + Q'_{omp}}{Q_H}, \quad (2.97)$$

где  $Q'_{omp}$  - количество отраженной теплоты от оксидированного днища поршня, кДж/кг.

Поскольку отраженная теплота является разницей между подведенной и поглощенной теплотой, то в соответствии с формулами 2.16, 2.17  $Q'_{omp}$  будет

$$Q'_{omp} = Q_{co} - Q_{одн} = 0,06 \cdot 0,6 \cdot 0,66 \cdot \left[ \left( \frac{1500}{100} \right)^4 - \left( \frac{350}{100} \right)^4 \right] - \\ - 0,2 \cdot 5,67 \cdot 0,66 \cdot \left[ \left( \frac{350}{100} \right)^4 - \left( \frac{88}{100} \right)^4 \right] = 1199,26 - 111,75 = 1087,53 \text{ КДж / кг.}$$

Значения приведенных коэффициентов черноты и коэффициентов излучения газов в камере сгорания и оксидированной поверхности днища поршня принимается из справочной литературы (приведенный коэффициент черноты излучаемого газа в камере сгорания  $\epsilon_{np} = 0,6$ , приведенный коэффициент черноты облучаемого тела (днища оксидированного поршня  $\epsilon_{np} = 5,67$ ) [169].

Коэффициент выделения теплоты при сгорании топлива с оксидированным днищем составит

$$\xi = \frac{43500 - (470 + 1980 + 6250) + 1088}{43500} = 0,825.$$

На основании результатов исследований по определению теплового баланса бензинового двигателя, проведенных различными авторами [168, 169], исходя из условий распределения теплового потока в камере сгорания, при излучении только 40 % отраженной теплоты отводится с отработавшими газами [169, 170]. Тогда температура оста-

точных газов в камере сгорания с оксидированным днищем поршня повысится на 100 К, и составит 1100 К. Повышение температуры остаточных газов приведет к изменению давления остаточных газов.

Давление остаточных газов в камере сгорания

$$P_r = P_e \cdot \frac{V_\kappa}{V_\kappa + V_p}, \quad (2.98)$$

где  $V_\kappa$  – объем камеры сгорания, л;  $V_p$  – объем расширения остаточных газов при такте выпуска, л.

Для расчета объема расширения остаточных газов при такте выпуска воспользуемся уравнением Клапейрона-Менделеева [168]. Тогда объем остаточных газов

$$V_p = \frac{M_z \cdot R \cdot T_o}{P_e}, \quad (2.99)$$

где  $M_z$  – количество молей продуктов сгорания в остаточных газах, моль/л;  $R$  – газовая постоянная, МПа/моль·К;  $T_o$  – температура окружающей среды, К;  $P_e$  – давление в конце расширения, МПа.

$$V_p = \frac{0,4779 \cdot 0,0821 \cdot 293}{5,57} = 2,06 \text{ л.}$$

$$P_r = 0,4779 \cdot \frac{0,682}{0,682 + 2,06} = 0,12 \text{ МПа.}$$

Количество воздуха поступающего в камеру сгорания оценивается коэффициентом наполнения

Типовой

$$\eta_v = \frac{293 \cdot (7 \cdot 0,099861 - 0,11)}{(293 + 40) \cdot (7 - 1) \cdot 0,1} = 0,8638$$

Оксидированный

$$\eta_v = \frac{293 \cdot (7 \cdot 0,099857 - 0,12)}{(293 + 30) \cdot (7 - 1) \cdot 0,1} = 0,8754$$

В свою очередь плотность заряда зависит от давления и температуры окружающей среды и температуры подогрева от нагретых деталей камеры сгорания. Тогда

Типовая

$$\rho_0 = \frac{0,1 \cdot 10^6}{287 \cdot (293 + 40)} = 1,0463$$

Оксидированный

$$\rho_0 = \frac{0,1 \cdot 10^6}{287 \cdot (293 + 30)} = 1,0787 .$$

Установлено, что применение поршней с теплоизолирующим покрытием на днище поршня, на участке наполнения давление газа ниже, чем при работе с типовыми поршнями, а на такте сжатия, к моменту впрыскивания топлива, выше. Этот результат показывает, что температура оксидированного днища поршня ниже, чем температура у типового поршня. Менее низкая температура поршня с оксидированным днищем приводит к снижению температуры воздуха, поступающего в камеру сгорания в конце процесса наполнения. Изменение температуры повлечет изменение плотности поступающего воздушного заряда, и, следовательно, к изменению коэффициента наполнения. При этом, коэффициент наполнения будет изменяться обратно пропорционально температуре поступающего воздушного заряда в конце наполнения цилиндра.

Результаты теплового расчета показывают, что оснащение двигателя УМЗ – 417 поршнями с оксидированным днищем позволит снизить эффективный удельный расход топлива на 4,3 %, эффективный часовой расход на 8,7 %, увеличить эффективную мощность на 4,6 % и эффективный коэффициент полезного действия на 8,8 %.

Для представления об изменении эксплуатационных характеристик автомобиля с двигателем оснащенным поршнями с оксидированным днищем, необходимо определить его динамические характеристики.

Величина касательной силы тяги на каждой передаче

$$P_{K_i} = \frac{M_{ei} \cdot \eta_{mp} \cdot i_{mp}}{r_k}, \quad (2.100)$$

где  $M_{ei}$  - крутящий момент, Н·м;  $\eta_{mp}$  - к.п.д. трансмиссии;  $i_{mp}$  - передаточное отношение трансмиссии;  $r_k$  - радиус колеса, м.

Динамический фактор на каждой передаче

$$D_i = \frac{P_{K_i} - P_{W_i}}{G}, \quad (2.101)$$

где  $P_{W_i}$  - сопротивление воздуха на каждой передаче, Н.

$$P_{W_i} = \frac{K \cdot F \cdot \mathcal{G}_i^2}{13}, \quad (2.102)$$

где  $K$  – коэффициент сопротивления;  $F$  – площадь лобового сопротивления, м<sup>2</sup>;  $\mathcal{G}$  - скорость автомобиля, км/ч.

## Выводы

1 На основании теоретических исследований описана теория формирования оксидированной пленки на днище поршня.

2 Теоретически установлено, что микродуговое оксидирование днища поршня приведет к увеличению отраженного теплового потока и снижению количества тепла, передаваемого единицей днища поршня. Таким образом, снижение теплонапряженности поршня будет зависеть от толщины оксидированного слоя и его физико-химических характеристик.

3 Рассмотрено влияние режимов микродугового оксидирования (сила и плотность тока, напряжение, концентрация электролита и время оксидирования) на толщину и пористость оксидированного слоя днища поршня. Теоретически установлено, что толщина оксидированной пленки будет прямо пропорциональна напряжению и составу электролита. Пористость будет прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна силе тока. Поэтому изменяя силу тока, напряжение и время процесса можно получать оксидированные слои необходимой толщины и пористости.

4 В результате проведенных расчетов установлено, что оснащение двигателя УМЗ – 417 поршнями с оксидированным днищем позволит снизить эффективный удельный расход топлива на 4,3 %, эффективный часовой расход на 8,7 %, увеличить эффективную мощность на 4,6 % и эффективный коэффициент полезного действия на 8,8 %.



## 3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 3.1 Программа экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований включала следующие этапы:

- **лабораторные исследования** опытных образцов поршней с оксидированным днищем по оптимизации толщины оксидированного слоя, при различных значениях концентрации и температуре электролита, силы и напряжения тока, времени оксидирования, теплонпряженности;

- **сравнительные стендовые исследования** двигателя УМЗ-417 в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с оксидированным днищем) комплектах на различных нагрузочно-скоростных режимах по мощностным, топливно-экономическим и температурным показателям;

- **сравнительные эксплуатационные исследования** автомобилей УАЗ-3303, с двигателями в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с оксидированным днищем) комплектах по технико-эксплуатационным показателям.

### 3.2 Методика микродугового оксидирования поршней

Микродуговое оксидирование поршней проводилось в лаборатории Пензенского государственного университета, на установке, состоящей из:

- силового оборудования - специализированных источников питания;

- ванн, в которых проводится подготовка поверхности, обработка и промывка;

- манипулятора для перемещения подвески с деталями (в случае серийного производства);

- металлоконструкций для размещения ванн и манипулятора;

- вспомогательного оборудования - дистиллятора, насоса-фильтра для очистки и перекачки растворов, резервных емкостей, приборов контроля качества покрытия и состояния электролита.

Импульсы тока подаются на клеммы ванн от источников питания. Деталь при этом выполняет роль анода, катодом служит ванна, изготовленная из нержавеющей стали (рис. 3.1).

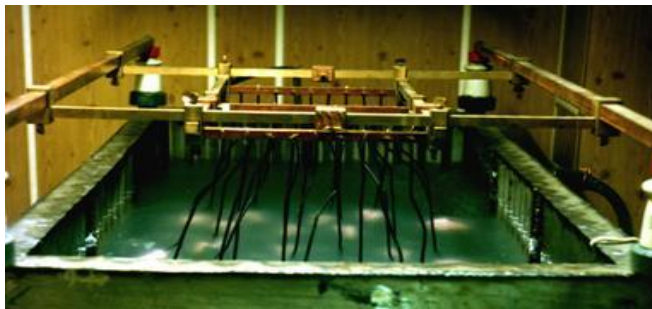


Рисунок 3.1 – Установка для микродугового оксидирования

Операции по микродуговому оксидированию поршней проводилась в следующей последовательности (рис. 3.2).

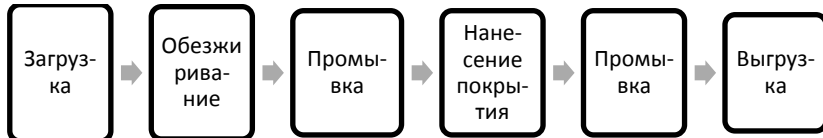


Рисунок 3.2 - Технологические операции МДО

### **3.3 Методика лабораторных исследований покрытия днища поршня**

#### **3.3.1 Методика определения микротвердости покрытия днища поршня**

Определение микротвердости оксидированных покрытий, образующихся при МДО, проводили методом восстановленного отпечатка с использованием прибора ПМТ-ЗМ (рис. 3.4), на поперечных микро-

шлифах (рис. 3.3) по толщине оксидированного слоя, учитывая требования ГОСТ 9450-76.

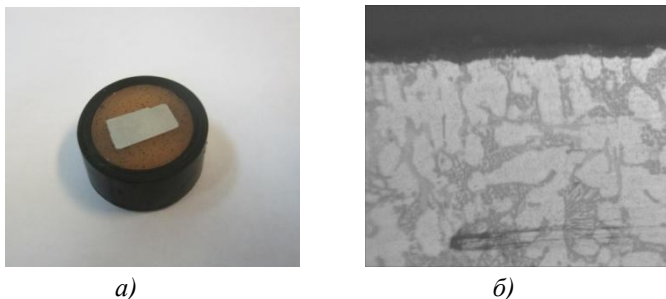


Рисунок 3.3 – Микрошлиф поршня с оксидированным дном:  
*а) общий вид, б) фотография микрошлифа*



Рисунок 3.4 – Прибор ПМТ-3М

Обработка шлифов, при их изготовлении для исследования, проводилась на режимах обеспечивающих максимальную сохранность структуры металлической основы [1,2,3,4]. Перед началом измерений образцы шлифовались до удаления рыхлого слоя покрытия, с последующей полировкой. Наконечник, в виде четырехгранной пирамиды с углом при вершине  $136^{\circ}20'$  нагружался до 1,96 Н. Число твердости Нц определяли по таблицам [3]. При измерении отпечатка погрешность замеров составляла не более 0,3 мкм.

### 3.3.2 Методика определения пористости, защитных и функциональных свойств покрытия днища поршня

Для исследования пористости использовали метод оценки степени окраски соединений основного металла или металла подслоя при взаимодействии с реагентом [4].

Определение пористости днища поршня проводили по ГОСТ 9.302-88.

Перед определением пористости, защитных и функциональных свойств покрытий, поршни выдерживали до температуры помещения, в котором проводили контроль, и обезжировали этиловым спиртом.

После обезжиривания поршни промывали дистиллированной водой и высушивали на воздухе, затем протравливали раствором 32 состоящий из:

калий железосинеродистый - 3 г/дм<sup>3</sup>;

натрий хлористый - 10 г/дм<sup>3</sup>.

При проведении контроля, днище поршня погружали в раствор 32 и выдерживали в течение 5 мин при температуре 22 °С (рис. 3.5). Образцы с участками розовых пятен промывали, высушивали и затем исследовали под микроскопом с 20-ти кратным увеличением.



Рисунок 3.5 – Обработка оксидированного поршня раствором 32

Пористость покрытия исследуемых образцов определяли как отношение площади пор к площади рассматриваемого участка в процентах.

Среднее число пор ( $N_{cp}$ ) вычисляли по формуле

$$N_{cp} = N_{общ} / S,$$

где  $N_{общ}$  - общее количество пор на исследуемой поверхности;  
 $S$  - площадь исследуемой поверхности,  $m^2$ .

### 3.3.3 Методика определения теплонапряженности дна поршня

Для определения теплопроводности дна поршня проводились сравнительные лабораторные исследования типового поршня и поршня с оксидированным дном. Определение изменения температуры внутренней поверхности поршня в зависимости от температуры нагрева дна поршня проводили с использованием термопары, которая вворачивалась на глубину 2...3 мм в тело поршня и мультиметра М 890G, с предварительной тарировкой (рис. 3.6).

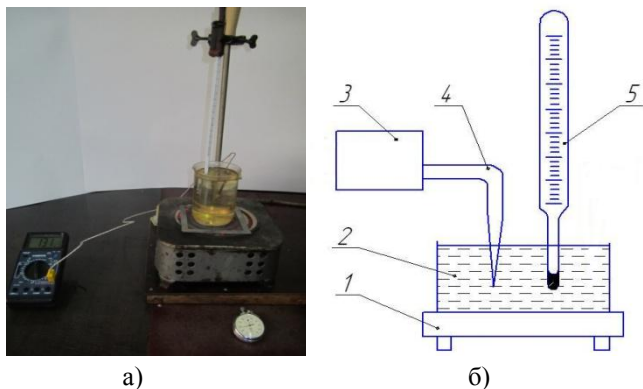
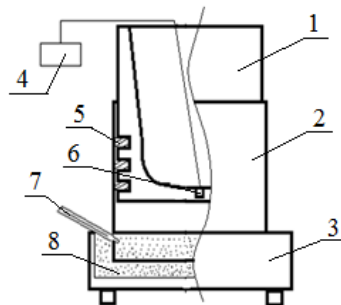


Рисунок 3.6 – Прибор для тарировки термопары «хромель-копель»: а) общий вид; б) схема прибора: 1 – нагревательный элемент; 2 – сосуд с глицерином; 3 – мультиметр цифровой марки М 890G; 4 – тарлируемая термопара; 5 – ртутный термометр

Теплопроводность дна поршня определяли с использованием нагревательного прибора LPO-400. Изменение температуры дна поршня при нагреве проводили с использованием встроенной термопары и цифрового мультиметра М 890G с погрешностью измерения 0,75%.

Термопара крепилась на внутренней части дна поршня по оси симметрии в предварительно высверленном отверстии диаметром 3 мм и глубиной 1 мм от поверхности поршня. Цилиндр с отверстием для установки термометра, с пределами измерения от 273 до 573 К, которым фиксировали температуру песка, устанавливался в песчаную ванну. Исследуемый поршень устанавливался в цилиндр 2 (рис. 3.7) с предварительной теплоизоляцией канавок под поршневые кольца.



а)

б)

Рисунок 3.7 – Определение теплопроводности поршня:

а) общий вид б) схема: 1 – поршень, 2 - цилиндр, 3-прибор LPO-400, 4 – цифровой мультиметр М 890G, 5- теплоизоляция, 6 – термопара, 7 – термометр, 8 – песок

Температуру песка и внутренней поверхности дна поршня фиксировали через каждые 60 секунд. Исследования проводились до температуры 230 °С, соответствующей средней температуре поршня в условиях эксплуатации двигателей УМЗ-417.

### 3.3.4 Методика определения структуры и элементного состава оксидированного образца

Анализ структуры и элементного состава фрагмента оксидированного образца осуществлялся методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с рентгеновским микроанализом [7,8].

Для проведения исследований использовался измерительный комплекс, в составе: растрового автоэмиссионного микроскопа Zeiss SUPRA 55VP (рис. 3.8) (сертификат соответствия Zeiss SUPRA WDS 55VP Serial No. 3096 по DIN EN ISO 9001 номер 278002 QM), спектрометров Inca энергодисперсионного Energy 350, волнового Wave 500 и регистрационно-дифракционного анализатора отраженных электронов HKL EBSD Premium System (сертификат соответствия Oxford Instruments по BS EN ISO 9001:2000 номер FM 29142), специальная мера перехода и ширины марки МШПС-2.0К (рег.номер 33598-06 в Госреестре средств измерений).



Рисунок 3.8 – Автоэмиссионный растровый микроскоп SUPRA 55VP

Объект исследований представлял собой излом образца размером примерно 5x5x10 мм. Для получения картины топографического контраста окисленный образец тщательно промывали растворителем и обезжиривали при ультразвуковой очистке во избежание загрязнения углеводородами. Исследуемый образец был помещён в вакуумную камеру микроскопа изломом вверх.

### **3.4 Методика стендовых исследований двигателя Оснащённого окисленными поршнями**

#### **3.4.1 Оборудование и приборное обеспечение**

Для проведения исследований работы двигателя использовался тормозной стенд КИ-5543 ГОСНИТИ с весовым устройством тормоза,

тахометром, датчиком давления масла, с установленным бензиновым двигателем УМЗ-417 (рис. 3.9), с системой отвода отработавших газов.



Рисунок 3.9 – Экспериментальный стенд:

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

Снятие показаний проводилось с использованием скомплектованного измерительно-регистрирующего комплекса (ИРК) (рис. 3.10).

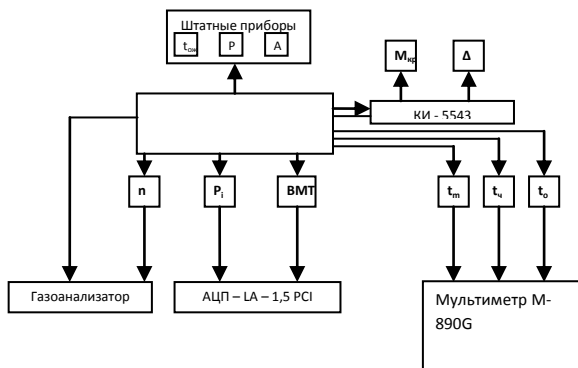


Рисунок 3.10 – Структура измерительно-регистрирующего комплекса: стенд КИ-5543; аналого – цифровой преобразователь; газоанализатор Инфраклар М1-01;  $P_i$  – датчик УДПС-001;  $n$  – датчик измеренная частоты вращения коленчатого вала; ВМТ – датчик определения положения поршня в цилиндре;  $t_m$ ,  $t_ч$ ,  $t_{ож}$  – термомпары;  $\Delta_o$  – весовой расходомер топлива; штатные приборы



Измерения показателей в комплексе проводились с использованием: тестер - мультиметра М 890 G (для измерения температуры окружающего воздуха, охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя, температуры моторного масла в главной масляной магистрали системы смазки двигателя, температуры отработавших газов), весового расходомера топлива, датчиков (положения поршня, ризок зубьев маховика, давления и температуры масла и охлаждающей жидкости). Принятие и обработка сигналов проводилась с использованием аналого-цифрового преобразователя (АЦП) LA-1,5PCI, персонального компьютера на базе Pentium-III. Определение частоты вращения коленчатого вала проводилось с использованием Инфракар М1-01.

При индицировании четвёртого цилиндра исследуемого двигателя (как наиболее теплонапряжённого) измерение давления газов осуществлялось пьезоэлектрическим датчиком давления газов УДПС - 001 (рис. 3.11 а) с принудительным охлаждением.

Подвод воды к охладителю датчика осуществлялся от водопроводной сети (рис. 3.11 б). Преобразование сигнала осуществлялась через АЦП LA-1,5PCI, установленного между датчиками и компьютером.



а)



б)

Рисунок 3.11 – Пьезоэлектрический датчик УДПС-001 для определения давления газов: а) общий вид; б) охладитель датчика давления газов

По термодатчикам (термопар типа ТХК), установленных в места замера температуры проводили измерение температуры охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя, моторного масла в

главной масляной магистрали двигателя, и выхлопных газов в выпускном коллекторе.

Для снятия индикаторной диаграммы использовался фотоэлектрический датчик ВМТ (рис. 3.12). Измерение проводилось по перекрытию флажком 2, закрепленным на шкиве 1 привода вентилятора, светового потока лампы накаливания 4, падающего на фотозащитный элемент 3, в момент нахождения четвертого цилиндра в ВМТ. Преобразование входных аналоговых сигналов в цифровую форму, для последующей обработки на компьютере, проводилось устройством LA-1,5PCI.

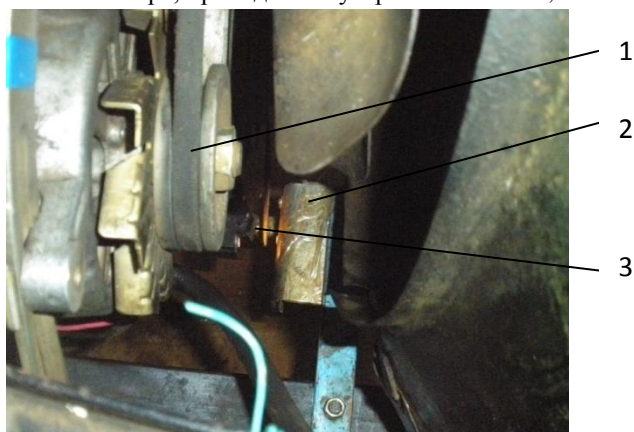


Рисунок 3.12 –Фотоэлектрический датчик ВМТ (место расположения): 1 – шкив; 2 – флажок; 3 – фотодиод датчика; 4 – лампа

Запись индикаторных диаграмм двигателя проводилась при помощи программы ADC Lab с установкой длины кадров обеспечивающей запись по оси ординат более 4-х индикаторных диаграмм.

Канал регистрации давления газов в цилиндре двигателя тарировался в динамическом режиме прокруткой двигателя на динамометрической машине КИ-5543, и фиксированием величины давления газов в цилиндре и отметок ВМТ, при частоте вращения коленчатого вала двигателя максимально и минимально устойчивой на холостом ходу. Ошибка измерений определялась сравнением полученных при статической и динамической тарировках при постоянной частоте вращения, величин давления сжатия,.

### **3.4.2 Методика подготовки двигателя УМЗ-417 к сравнительным стендовым исследованиям**

Сравнительные стендовые исследования проводились с бензиновыми двигателями в штатной ( типовые поршни) и экспериментальной ( поршни с оксидированным днищем) комплектациях. Подготовка двигателей проводилась в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобилей УАЗ [154,155].

Подготовка двигателя осуществлялась в следующем порядке. Перед началом исследований было приобретено два комплекта поршней. Комплекты были подобраны с учетом обеспечения зазора между юбкой поршня и зеркалом цилиндра 0,02...0,04 мм. Разница в весе между поршнями одного комплекта и между поршнями двух комплектов не превышала 4 г. Отверстия в бобышках под поршневой палец с допуском  $-0,005$   $-0,015$  мм. Конусность и овальность отверстия – не более 0,0025 мм. Перпендикулярность оси отверстий к оси поршней обоих комплектов составляло не более 0,04 мм на длине 100 мм. Также были подобраны поршневые кольца. Один комплект подвергался оксидированию днищ.

Сборку двигателя и установку типовых поршней осуществляли в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобилей УАЗ.

Поршни в цилиндры устанавливайте с помощью приспособления модели 59–85. При установке поршней в цилиндры метка «перед», отлитая на поршне, была обращена к передней части двигателя. При запрессовке втулок в шатун обеспечивалось совпадение отверстия во втулке с отверстием в верхней головке шатуна. Расстояние между осями отверстий нижней и верхней головок шатуна составляло для обоих комплектов 168...175±0,05 мм. 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 проточками вверх, в сторону днища поршня. Нижнее компрессионное кольцо устанавливали на поршень острой кромкой «скребком» вниз. Маслосъемные кольца

подбирали с обеспечением зазора в замке 0,3...0,5 мм в обоих комплектах.

После установки колец по цилиндрам проверялся боковой зазор между кольцами и канавками в поршне, который составил: для верхнего компрессионного кольца 0,050...0,082 мм, для нижнего компрессионного – 0,035...0,067 мм.

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

Поршневой палец к верхней головке шатуна подбирался с зазором 0,0045...0,0095 мм. Палец устанавливали в поршень с натягом 0,0025...0,0075 мм. Для обеспечения правильной балансировки двигателя проводилось взвешивание поршней в сборе с шатунами, разница в весе не превышала 8 г.

Стендовые исследования бензинового двигателя по мощностным и экономическим показателям проводились по ГОСТу 14846-81 [165], в условиях скоростной и нагрузочной характеристик.

### **3.5 Методика эксплуатационных исследований автомобилей, оснащённых двигателями с типовыми и окислированными поршнями**

Эксплуатационные исследования проводились в хозяйстве Ульяновской области в условиях производственной эксплуатации на двух автомобилях УАЗ-3303 выпуска 2007 г. Пробег автомобилей на начало исследований составлял 130...150 тыс. км. Перед началом исследований на автомобили устанавливались двигатели УМЗ-417 в штатной ( типовые поршни ) и экспериментальной ( поршни с окислированным днищем ) комплектации. Контрольные измерения проводили с интервалом пробега. Интервал замеров выбран через каждые 3200 км, соответствующий ТО-1.

Для проверки компрессии в цилиндрах использовали компрессиметр G-324. Проверку компрессии в цилиндрах проводили на предварительно прогревом до температуры 70...85° С двигателе, при этом дроссельная заслонка карбюратора – полностью открыта, отсутствие топлива в карбюраторе, свечи зажигания - вывернуты. Резиновый на-

конечник компрессометра устанавливался в отверстие свечи зажигания первого цилиндра. Стартером прокручивали коленчатый вал двигателя в течение не более 10...15 с. до прекращения увеличения давления в цилиндре.

Определение расхода топлива при исследованиях проводили с использованием датчика расхода топлива (ДРТ) 13.3853 производства ОАО "Счѐтмаш" г. Курск (рис. 3.13).



Рисунок 3.13 - Датчик расхода топлива 13.3853

Способ подключения датчика для замера топлива марки ДРТ 13.3853 представлен на рисунке 3.14.



Рисунок 3.14 - Схема подключения датчик расхода топлива 13.3853 на автомобиле УАЗ-3303

Контрольный расход топлива автомобиля определяли с интервалом в 100 км.

Контрольный расход топлива определяли по выражению:

$$g_k = 100 \cdot \frac{Q}{S} = \frac{100 \cdot m_T \cdot p_T}{S}, \text{ л/100км,}$$

где  $Q$  – абсолютный расход топлива, полученный при испытаниях,  $\text{см}^3$ ;  $S$  – длина мерного участка, м ( $l=1000\text{м}$ );  $m_T$  – масса топлива, г;  $\rho_T$  – плотность топлива при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Температура двигателя определялась по температуре охлаждающей жидкости с использованием мультиметра MGT-300 фирмы Brain Bee (рис. 3.15).



Рисунок 3.15 – Мультиметр MGT-300 фирмы Brain Bee

Подключение датчика мультиметра проводилось в блок термостата системы охлаждения двигателя УМЗ-417 (рис. 3.16).



Рисунок 3.16 – Подключение датчика температуры мультиметра MGT-300 в корпус термостата двигателя УМЗ-417

## **Выводы**

1. Разработана поэтапная программа исследований, включающая лабораторные исследования опытных образцов поршней с оксидированными днищами, стендовые исследования бензинового двигателя УМЗ-417 и сравнительные эксплуатационные исследования автомобилей для оценки работы бензинового двигателя с штатной (типовые поршни) и экспериментальной комплектациях (поршни с оксидированным днищем).

2. Лабораторные исследования проводились для определения толщины и состава оксидированного слоя в зависимости от режимов оксидирования.

3. Для исследования теплопроводности поршня была разработана лабораторная установка с использованием прибора LPO-400 и цифрового мультиметра M890G.

4. Сравнительные стендовые исследования бензинового двигателя в штатной комплектации с типовыми поршнями и оснащённого поршнями с оксидированным днищем проводились на тормозном стенде КИ-5543 ГОСНИТИ укомплектованного штатными контрольно-измерительными приборами, и скомплектованным измерительно-регистрирующим комплексом, в составе: тестер - мультиметра М 890 G (для измерения температуры окружающего воздуха, охлаждающей жидкости в системе охлаждения двигателя, температуры моторного масла в главной масляной магистрали системы смазки двигателя, температуры отработавших газов), весового расходомера топлива, датчиков (положения поршня, риск зубьев маховика, давления и температуры масла и охлаждающей жидкости), аналого-цифрового преобразователя (АЦП) ЛА-1,5РСІ (для принятия и обработки сигналов), персонального компьютера на базе Pentium-III. Определение частоты вращения коленчатого вала проводилось с использованием Инфракар М1-01.

5. Эксплуатационные исследования в условиях производственной эксплуатации проводились для сравнительной оценки технико-эксплуатационных показателей двигателей в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с оксидированным днищем) комплектации, установленных на автомобилях УАЗ-3303.

## 4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

### 4.1 Результаты исследований влияния режимов микродугового оксидирования на формирование оксидированного слоя на днище поршня

В результате проведенных исследований были получены следующие результаты.

Исследования влияния концентрации электролита и плотности тока на толщину оксидирования проводились с электролитами концентрации ортофосфорной кислоты в водном растворе от 100 до 220 г/л, и изменением плотности тока от 1 до 10 А/см<sup>2</sup> (рис. 4.1, Приложение 1).

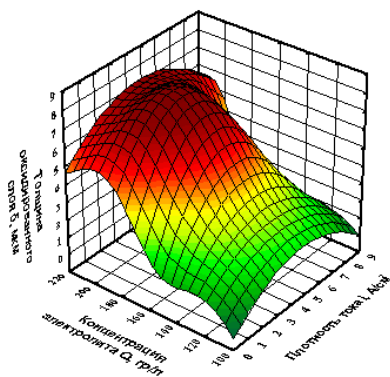


Рисунок 4.1 -Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от концентрации электролита ( $Q$ ) и плотности тока ( $i$ )

В результате исследований было установлено, что при концентрации ортофосфорной кислоты 180...190 г/л и плотности тока 3...4 А/см<sup>2</sup>, образуется максимальная толщина оксидированного слоя 8 мкм (рис. 4.1, Приложение 1).

Исследования влияния температуры электролита на толщину оксидированного слоя показали, что максимальная толщина слоя 8



мкм достигается при температуре электролита 20...25 °С и плотности тока 3...4 А/см<sup>2</sup> (рис. 4.2, Приложение 2).

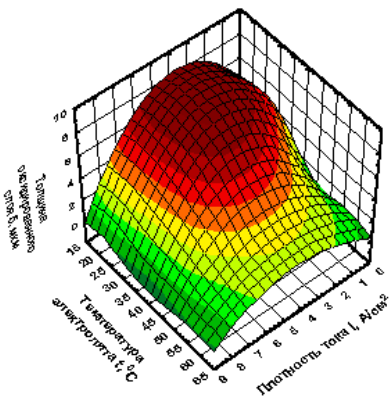


Рисунок 4.2 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от плотности тока ( $i$ ) и температуры электролита ( $T$ )

Зависимость толщины оксидированного слоя от концентрации и температуры электролита проводились с шагом изменения температуры электролита 5 °С.

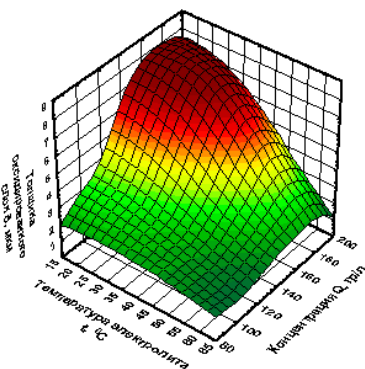


Рисунок 4.3 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от концентрации электролита ( $Q$ ) и температуры электролита ( $T$ )

В результате исследований установлено, что максимальная толщина оксидированного слоя образуется при концентрации орто-фосфорной кислоты 180 гр/л и температуре электролита 20...25 °С (рис. 4.3, Приложение 3).

Поскольку в барьерном слое оксид алюминия растет пропорционально напряжению, подводимому к поверхности оксидирования, то напряжение является одним из параметров, влияющим на рост оксидированного слоя. Поэтому проводились исследования по влиянию режимов МДО на толщину оксидированного слоя.

В результате проведенных исследований было установлено, что наибольшая толщина оксидированного слоя образуется при напряжении, подаваемого на электроды, 250 В и температуре электролита 20...30 °С (рис. 4.4, Приложение 3).

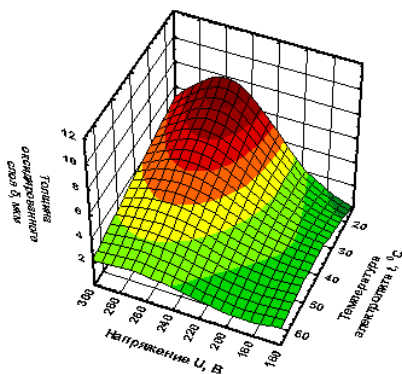


Рисунок 4.4 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от напряжения ( $U$ ), подаваемого на электроды, и температуры электролита ( $T$ )

Исследования зависимости толщины оксидированного слоя от напряжения, подаваемого на электроды, и плотности тока, показали, что при напряжении 250 В наилучший рост пленки проходит при плотности тока 3... 4 А/см<sup>2</sup> (рис. 4.5, Приложение 4)

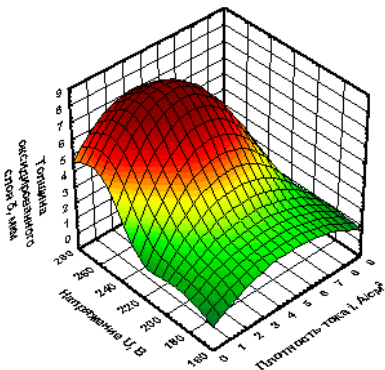


Рисунок 4.5 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от напряжения ( $U$ ), подаваемого на электроды, и плотности тока ( $i$ )

Проведенные исследования по установлению зависимости толщины оксидированного слоя от напряжения, подаваемого на электроды и времени оксидирования (рис. 4.6, Приложение 4), показали, что толщина оксидированного слоя в 8 мкм обеспечивается при времени оксидирования 30 мин при напряжении 250 В. Дальнейшее увеличение времени оксидирования приводит к уменьшению толщины оксидированного слоя днища поршня.

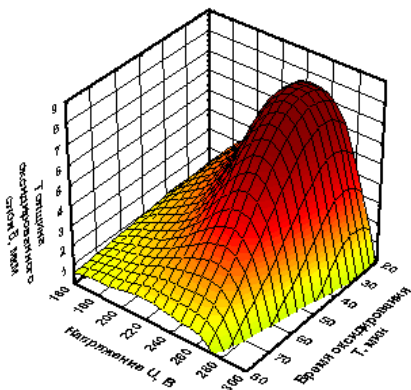


Рисунок 4.6 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от напряжения, подаваемого на электроды, ( $i$ ) и времени оксидирования ( $t$ )

Поскольку плотность тока влияет на формирование пористости оксидированного слоя, проводились исследования по определению оптимального времени оксидирования при установленной плотности (рис. 4.7, Приложение 5).

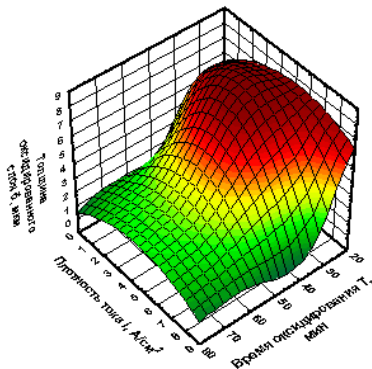


Рисунок 4.7 - Зависимость толщины оксидированного слоя ( $\delta$ ) от плотности тока ( $i$ ) и времени оксидирования ( $t$ )

В результате исследований установлено, что при плотности тока  $3...4 \text{ A/cm}^2$  максимальная толщина оксидированного слоя днища поршня достигается в течение 30 минут (рис. 4.7). Увеличение времени оксидирования приводит к уменьшению оксидного слоя.

Процесс оксидирования сопровождается выделением теплоты. Повышение температуры проходит в поровых каналах и сопровождается вытравливанием пор в оксидированном слое. Это приводит к повышению температуры поверхности и электролита, быстрому возникновению поверхностного пористого слоя и остановке дальнейшего роста оксидной пленки. Поэтому необходимо установить влияние температуры электролита и времени оксидирования на толщину оксидированного слоя днища поршня для создания оптимального режима прохождения процесса оксидирования и получения оксидированного слоя с необходимой пористостью.

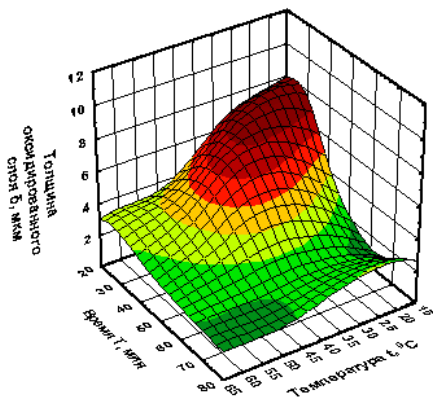


Рисунок 4.8 - Зависимость толщины окисленного слоя ( $\delta$ ) от температуры электролита ( $T$ ) и времени окислирования ( $t$ )

В результате проведенных исследований влияния температуры электролита и времени окислирования на толщину окисленного слоя, установлено, что максимальная толщина окисленного слоя достигается при обеспечении температуры электролита  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  и времени режима окислирования 30 мин (рис. 4.8, Приложение 6).

Дальнейшее увеличение времени окислирования приводит к повышению температуры электролита, и, как следствие, к прекращению роста оксидного слоя на днище поршня.



Рисунок 4.9 – Общий вид поршня: а) штатный, б) с окисленным днищем

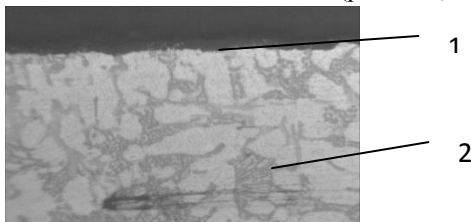
На основании проведенных исследований режимов оксидирования можно сделать следующие выводы.

Максимальная толщина оксидированного слоя 8 мкм достигается при следующих значениях основных параметров: концентрация ортофосфорной кислоты в водном растворе – 180 г/л; плотность тока – 3...4 А/см<sup>2</sup>; напряжение, подаваемое к днищу поршня, - 250 В; температура электролита – 20...25 °С; время оксидирования – 30 минут.

## **4.2 Результаты лабораторных исследований оксидированного слоя днища поршня**

### **4.2.1 Результаты исследования толщины оксидированного слоя**

В результате анализа микрошлифа определено, что толщина покрытия оксидированного слоя составила 7...8 мкм (рис.4.10)

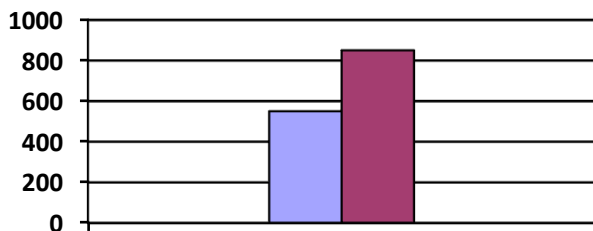


*1-оксидированный слой; 2 – днище поршня*

Рисунок 4.10 - Структура оксидированного днища поршня

### **4.2.2 Результаты исследования микротвердости оксидированного слоя днища поршня**

В результате определения микротвердости днища типового и оксидированного днища поршня установлено, что микротвердость типового поршня составила 550 МПа (рис. 4.11).



■ Типовой поршень

Рисунок 4.11- Изменение микротвердости днища поршня

Твердость оксидированного днища поршня составила – 800...850 МПа. Таким образом, микродуговое оксидирование позволило увеличить твердость поверхностного слоя на 34,4 %.

#### 4.2.3 Результаты исследования теплонапряженности поршня с оксидированным днищем

Исследования теплонапряженности поршня проводились на разработанной установке. В результате проведенных исследований было установлено следующее (рис. 4.12). В течение 0,4 ч нагрева наблюдается интенсивное повышение теплопроводности днища поршня. При нагреве днища поршня до температуры 130 °С наблюдается частичная стабилизация с уменьшением интенсивности теплопроводности и достижением предельного значения при температуре 220 °С.

Стабилизация теплонапряженности оксидированного поршня наблюдается также при 0,4 ч и температуре 90 °С, затем происходит увеличение до температуры 220 °С. Таким образом, разница в теплопроводности типового и оксидированного поршня составила 25 %.

Для полноты исследований вторым этапом проводилось определение теплонапряженности при наличии масляной пленки на внутренней поверхности днища поршня.

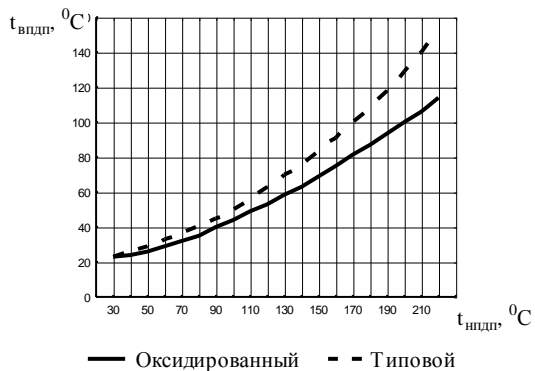


Рисунок 4.12 -Изменение теплонапряженности поршня от температуры и времени нагрева

В результате проведенных исследований установлено, что температура внутренней поверхности днища типового поршня с масляной пленкой при нагреве днища до температуры 100 °С изменяется незначительно. С повышением температуры разница увеличивается и при нагреве днища поршня до температуры 220 °С составляет 8 % (рис. 4.13).

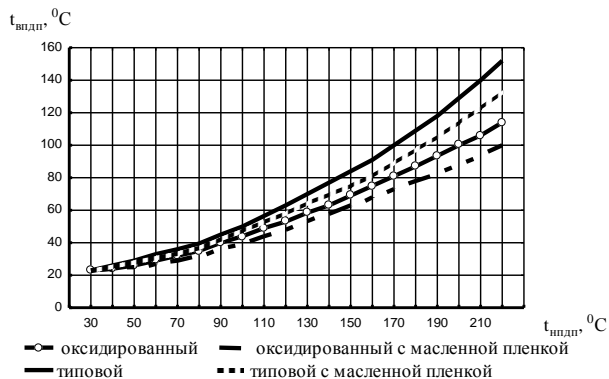


Рисунок 4.13 -Изменение теплонапряженности поршня от температуры и времени нагрева при наличии масляной пленки на внутренней поверхности днища поршня



Температура внутренней поверхности поршня с оксидированным днищем с масляной пленкой при нагреве днища до температуры 70 °С не изменяется. С повышением температуры разница увеличивается и при нагреве днища поршня до температуры 220 °С составляет 15 % (рис. 4.13).

На основании проведенных исследований установлено, что наличие масляной пленки на внутренней поверхности днища поршня позволяет дополнительно снизить теплонапряженность поршня с оксидированным днищем на 15 %.

#### 4.2.4 Результаты исследования пористости оксидированного слоя днища поршня

В результате исследований было установлено, что плотность тока, состав и температура электролита оказывают наибольшее влияние на пористость оксидированного слоя. Увеличение плотности тока от 1 до 4 А/мм<sup>2</sup> приводит к росту кристаллов в покрытии и повышает пористость (рис. 4.14). Искровые разряды возникают на больших расстояниях друг от друга, в результате чего границы образующихся кристаллов не успевают срастаться.

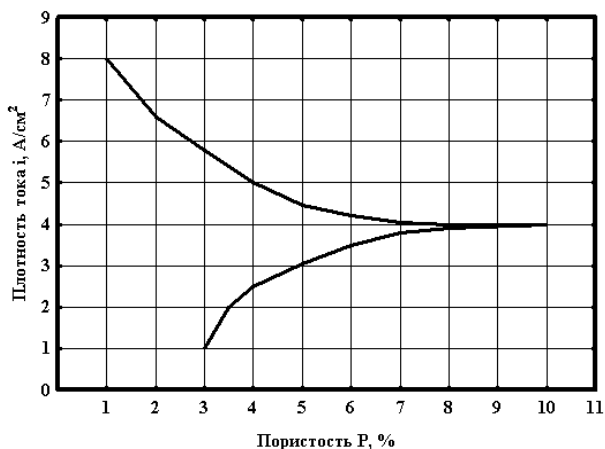


Рисунок 4.14 – Влияние плотности тока ( $i$ ) на пористость оксидированного слоя ( $P$ )

Дальнейшее повышение плотности тока приводит к увеличению числа и росту мощности микродуговых разрядов, при этом содержащиеся в электролите оксиды кремния, имея незначительную температуру плавления, заплывают свободные участки на поверхности днища поршня и заполняют поры в покрытии. Поэтому увеличение плотности тока с 4 до 8 А/мм<sup>2</sup> сопровождается снижением пористости оксидированного слоя до 1...2 % (рис. 4.14).

В результате измерения пористости образцов установлено, что оксидированный слой покрытия характеризуется наибольшей пористостью при плотности тока 4 А/мм<sup>2</sup>, которая составила 8...10 %.

#### 4.2.5 Результаты исследований структуры и элементного состава оксидированного слоя днища поршня

Анализ структуры и элементного состава фрагмента образца осуществлялся методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с рентгеновским микроанализом.

Для определения изменения состава днища поршня проводились исследования образцов микрошлифов днища поршня до микродугового оксидирования (рис. 4.15) и после микродугового оксидирования днища. Исследования проводились на микрошлифах поршня взятых по высоте. Для исследования микрошлифы отбирались в шахматном порядке с чередованием по окружности поршня через один сегмент. Размер микрошлифа составлял 10х20 мм.

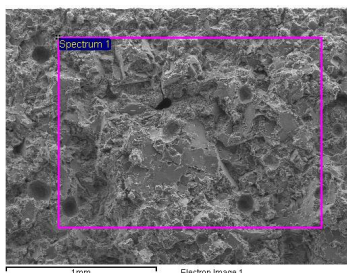


Рисунок 4.15 -Микрография поверхности излома типowego поршня

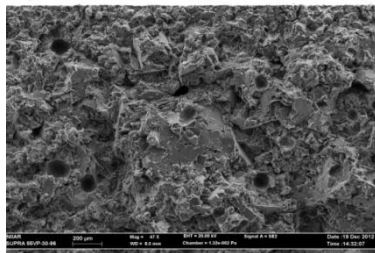


Рисунок 4.16 - Микрография центральной части поверхности излома матрицы типового поршня

В результате проведенных исследований установлено, что поверхность оксидированного покрытия имеет четкий рельеф, шероховатость и неоднородна по своему составу. На ней имеются поры различной конфигурации (рис. 4.17). В результате исследования микрошлифов установлено, что в оксидированном покрытии сквозные каналы пор отсутствуют, что обеспечит высокие защитные свойства оксидированного слоя (рис. 4.18), и позволит обеспечить высокие теплоизоляционные свойства для защиты днища поршня.

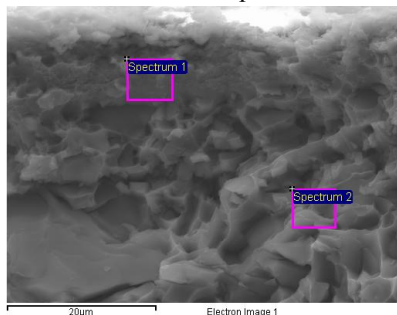


Рисунок 4.17 - Микрография поверхности излома образца с выделенными участками оксидированного слоя и тела днища поршня

Исследование выделенных областей образцов микрошлифов указывает на неоднородность полученного оксидированного слоя. Отсутствие пор и отслоений на границе оксидированного слоя с поверхностью поршня говорит о хорошей адгезии с поверхностью металла, что подтверждается хорошо просматриваемым взаимным проникнове-

нием оксидного слоя в матрицу. Толщина оксидированного слоя составляет 8 мкм (рис. 4.18). Оксидированный слой (рис. 4.18) имеет большую пористость, чем матричный слой поршня (рис. 4.19).

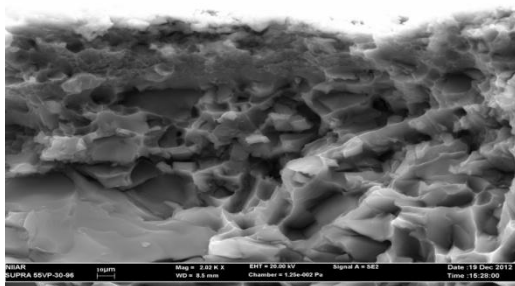


Рисунок 4.18 - Микрофотография поверхности излома оксидированного слоя

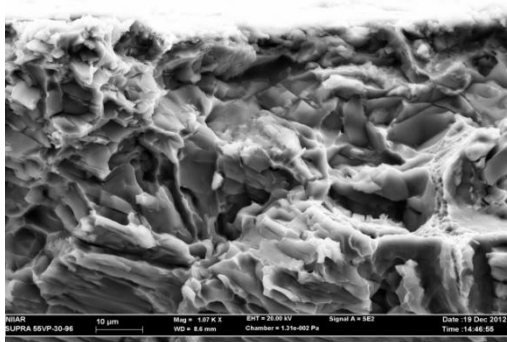


Рисунок 4.19 - Микрофотография поверхности излома матрицы оксидированного поршня

Результаты элементного состава в атомных концентрациях, нормализованных к 100 % с учётом всех зарегистрированных элементов, показали следующее. Основным элементом исследованного материала является кремний и алюминий (Приложение 7, рис. 4.20).

В качестве примесей встречаются магний, железо, медь. Покрытие присутствует на всей протяженности излома. Его толщина находится в пределах 7...9 мкм. Материал покрытия обогащен по кислороду, по сравнению с материалом матрицы.

Содержание кислорода в оксидированном слое днища поршня увеличилось до 13,82 единиц, а в матрице - с 1,04 у типового поршня, до 2,6 у оксидированного.

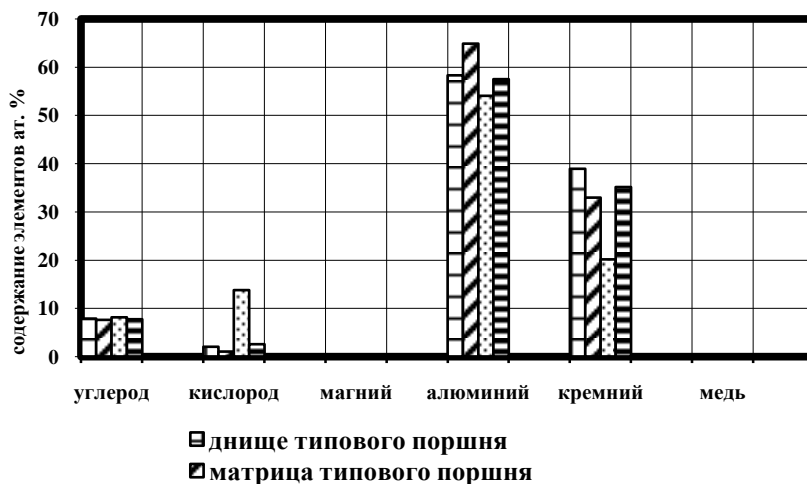


Рисунок 4.20 – Элементный состав оксидированного слоя днища поршня

### 4.3 Результаты сравнительных моторных исследований двигателей оснащенных типовыми поршнями и с оксидированными днищами

По результатам проведенных стендовых исследований были получены индикаторные диаграммы двигателя, оснащённого типовыми и поршнями с оксидированным днищем при частоте вращения коленчатого вала  $n=800 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 4.21).

Индикаторные диаграммы снимались при частоте вращения коленчатого вала двигателя с интервалом  $200 \text{ мин}^{-1}$  от  $800$  до  $4200 \text{ мин}^{-1}$ .

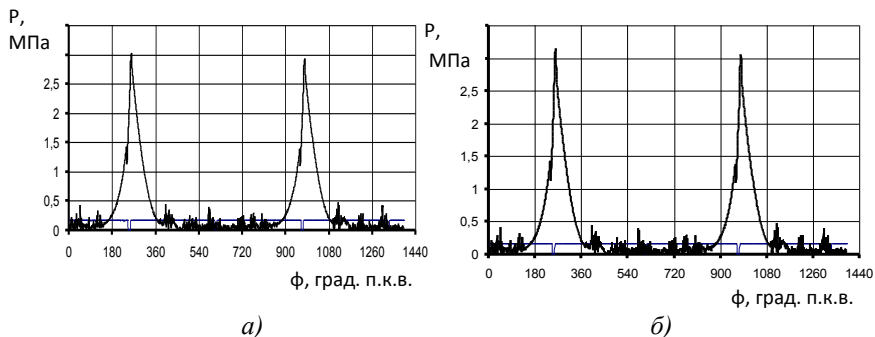


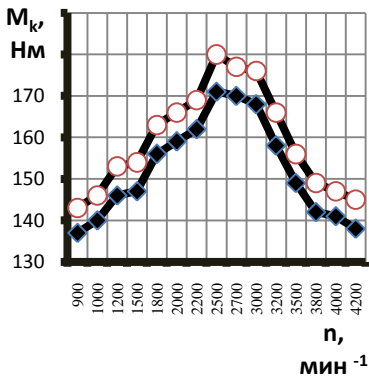
Рисунок 4.21 - Индикаторные диаграммы двигателя, оснащенного типовыми поршнями (а) и поршнями с оксидированным днищем (б)

Скоростные и нагрузочные характеристики исследуемых двигателей (рис. 4.22, 4.23), оснащённых типовыми и поршнями с оксидированным днищем, строились на основании полученных данных.

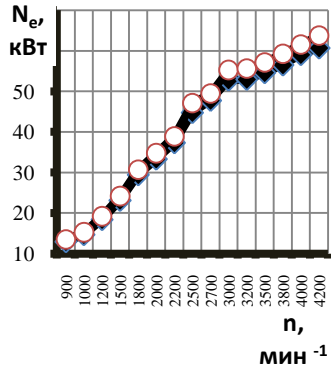
Проведенный анализ скоростных характеристик показывает, что эффективная мощность двигателя ( $N_e$ ), оснащенного поршнями с оксидированным днищем во всем диапазоне скоростного режима увеличивается. И при максимальной частоте вращения коленчатого вала  $4200 \text{ мин}^{-1}$  составила  $N_e = 63,7 \text{ кВт}$ , у двигателя, оснащенного типовыми поршнями эффективная мощность составила  $N_e = 60,7 \text{ кВт}$ .

Определяемый при номинальной частоте вращения коленчатого вала равной  $2500 \text{ мин}^{-1}$  максимальный крутящий момент ( $M_k$ ) у двигателя с оксидированным днищем поршнями составил  $180 \text{ Н}\cdot\text{м}$ , а у двигателя с типовыми поршнями -  $171 \text{ Н}\cdot\text{м}$ .

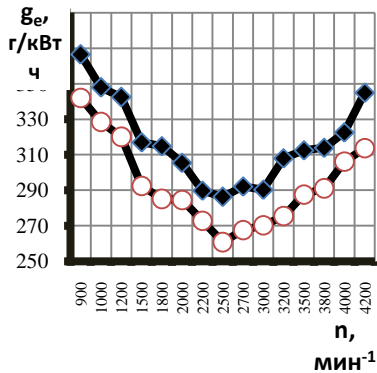
При частоте вращения коленчатого вала  $2500 \text{ мин}^{-1}$  у двигателя с поршнями с оксидированным днищем удельный эффективный расход топлива ( $g_e$ ) составил  $260,8 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ , что на  $8,8 \%$  и, чем у двигателя оснащенного типовыми поршнями, удельный эффективный расход топлива которого составил  $286,2 \text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ .



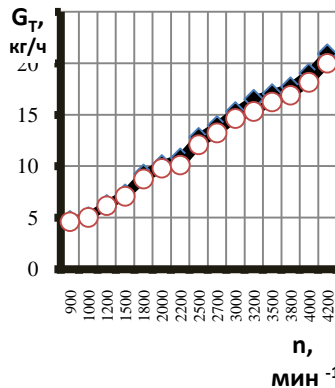
а) крутящий момент ( $M_k$ )



б) эффективная мощность ( $N_e$ )



в) удельный эффективный расход топлива ( $g_e$ )



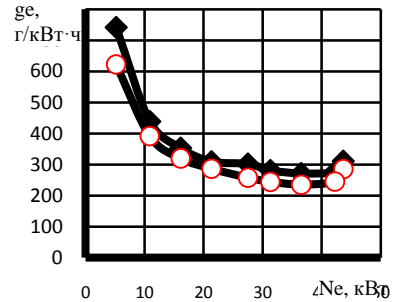
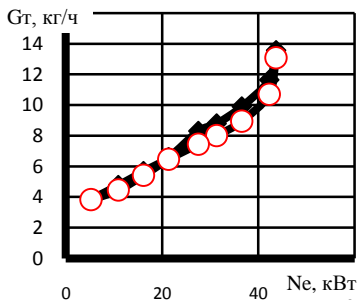
з) часовой расход топлива ( $G_T$ )

◆ – типовые поршни;      ○ – поршни с оксидированным днищем

Рисунок 4.22 - Скоростная характеристика двигателя, оснащенного типовыми и поршнями с оксидированным днищем

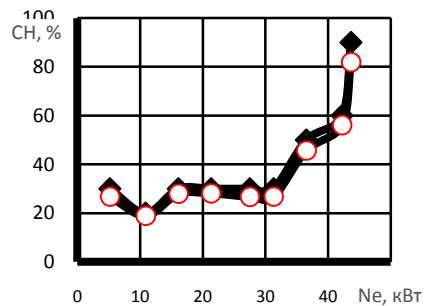
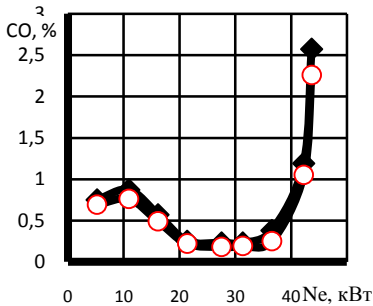
Соответственно, при номинальной частоте вращения 4200  $\text{мин}^{-1}$ , часовой расход топлива ( $G_T$ ) составил 20  $\text{кг/ч}$  и 20,93  $\text{кг/ч}$ .

Снятие показателей нагрузочной характеристики двигателя проводили при частоте вращения  $2500 \text{ мин}^{-1}$  (рис. 4.29), являющейся номинальной и соответствующей, по внешней скоростной характеристике, максимальному крутящему моменту двигателя.



а) часовой расход топлива ( $G_t$ )

б) удельный эффективный расход топлива ( $g_e$ )



в) оксид углерода (CO)

г) углеводород (CH)

◆ – типовые поршни ;    ○ – поршни с оксидированным днищем

Рисунок 4.23 - Нагрузочная характеристика двигателя, оснащенного типовыми и поршнями с оксидированным днищем

В соответствии с проведенным анализом данных нагрузочных характеристик было установлено, что на режиме малых нагрузок часовой расход топлива у двигателя с поршнями с оксидированным днищем при минимальной мощности 6,17 кВт составил 3,83 кг/ч и оборотах  $2500 \text{ мин}^{-1}$ . У двигателя с типовыми поршнями при мощно-



сти 5,22 кВт часовой расход составил 3,87 кг/ч. На том же режиме удельный эффективный расход у исследуемых двигателей соответственно составил 621,88 и 741,28 г/кВт·ч. В процессе исследования было установлено также изменение содержания в отработавших газах оксида углерода (СО) и углеводородов (СН). Содержание СО у двигателя, оснащенного поршнями с оксидированным днищем составило в среднем 8 %, против 11 % у двигателя оснащенного типовыми поршнями.

По результатам проведенных исследований установлено следующее. Оснащение двигателей поршнями с оксидированными днищами позволит, при номинальной частоте вращения коленчатого вала, повысить эффективную мощность на 4,8 %, максимальный крутящий момент на 5 %. Снизить, по сравнению с двигателем, оснащенным типовыми поршнями, в среднем часовой и удельный эффективные расходы топлива соответственно на 4,4 % и 8,8 %, содержание в отработавших газах оксида углерода и углеводородов соответственно на 8 % и 11 %.

#### **4.4 Результаты сравнительных эксплуатационных исследований автомобилей оснащенных двигателями с типовыми и с оксидированными днищами поршнями**

Эксплуатационные исследования проводили в условиях рядовой эксплуатации в хозяйстве Ульяновской области на двух автомобилях УАЗ-3303 выпуска 2007 г, в соответствии с разработанной методикой (подразделе 3.4). Пробег автомобилей на начало исследований составлял 130...150 тыс. км. Перед началом исследований на автомобили устанавливались двигатели УМЗ-417 в штатной (типовые поршни) и экспериментальной (поршни с оксидированным днищем) комплектации. Сбор информации о наработке и техническом состоянии автомобилей проводили непосредственно в хозяйстве, где они эксплуатировались. Данные о наработке автомобилей, техническом состоянии – брали в бухгалтерии и у водителей и механика хозяйства. В результате исследований средний пробег автомобилей составил 23100 км, отказов двигателя по причине технического состояния цилиндропоршневой группы не наблюдалось.

Данные по среднему путевому расходу топлива исследуемых автомобилей представлены в Приложении 8 и на рисунке 4.24.

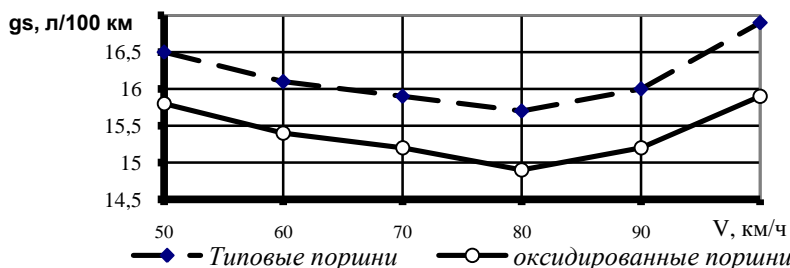


Рисунок 4.24 - Средний путевой расход топлива ( $g_s$ ) от скорости (V) автомобилей

Путевой расход топлива автомобиля УАЗ-3303 с двигателем УМЗ-417, с двигателем оснащённым поршнями с оксидированными днищами, при скорости 80 км/ч, составил 14,9 л на 100 км, что на 4,2 % ниже, чем у автомобиля с двигателем оснащённым типовыми поршнями, расход которого при той же скорости составил 15,7 л на 100 км.

Результаты определения температуры двигателя показаны на рисунке 4.25.

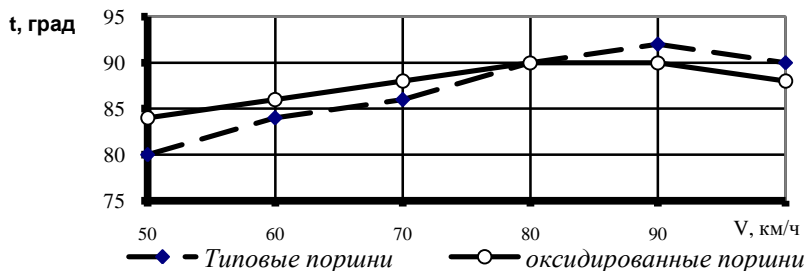


Рисунок 4.25 - Средняя температура двигателя (t) от скорости (V) автомобилей

При скорости движения автомобилей от 50 до 80 км/ч температура охлаждающей жидкости двигателей оснащенных поршнями с оксидированными поршнями выше, чем у двигателей с типовыми поршнями. При движении автомобилей со скоростью более 80 км/ч температура охлаждающей жидкости в двигателе с оксидированными

поршнями ниже, чем у двигателей с типовыми поршнями. Таким образом, окислирование днищ поршней не приводит к повышению температуры двигателя.

Проведенные исследования, по изменению динамической характеристики автомобилей при полной загрузке показали следующие результаты (Приложение ).

Динамическая характеристика автомобиля оснащенного поршнями с окислированными днищами выше, чем у автомобиля с типовыми поршнями. На первой передаче превышение составило 5 %. На второй – на 4,9 %. На третьей и четвертой передачах соответственно – 5,3 и 5,9 %.

Исследования ускорения испытываемых автомобилей установили следующее. Ускорение автомобиля с двигателем, оснащенного поршнями с окислированным днищем, при номинальной частоте вращения 2500 мин<sup>-1</sup> на первой передаче составило 2,02 м/с<sup>2</sup>, а у автомобиля с двигателем оснащенного типовыми поршнями - 1,9 м/с<sup>2</sup>. На второй передаче ускорение составило 1,74 м/с<sup>2</sup> – у автомобиля с окислированными днищами поршней против 1,65 м/с<sup>2</sup> у автомобиля с типовыми поршнями. На третьей и четвертой передачах ускорение соответственно составило 1,13 и 0,62 м/с<sup>2</sup> у автомобиля с окислированными днищами поршней и 1,06 и 0,57 м/с<sup>2</sup> у автомобиля с типовыми поршнями.

При этом время разгона у автомобиля с двигателем оснащенного поршнями с окислированными днищами на первой передаче составило 3,2 с, а у автомобиля с типовыми поршнями – 3,4 с. На второй передаче соответственно время разгона составило - 3,94 с и 4,15 с. На третьей и четвертой передачах время разгона, соответственно, составило 6,21 и 9,34 с у автомобиля с окислированными днищами поршней и 6,55 и 9,94 с у автомобиля с типовыми поршнями.

## **Выводы**

1. В результате проведенного окислирования поршней при режимах МДО: концентрация ортофосфорной кислоты в водном растворе – 180 г/л; плотность тока – 4 А/см<sup>2</sup>; напряжение, подаваемое к днищу поршня, - 250 В; температура электролита – 25 °С; время окисли-

рования – 30 минут, получен оксидированный слой на днище поршня толщиной 8 мкм, пористостью 10 % и микротвердостью 840 МПа.

2. Результаты лабораторных исследований полученного оксидированного слоя показывают, что покрытие неоднородно по своему сечению, имеет большую пористость, чем матричный слой поршня, хорошую адгезию с поверхностью алюминиевого сплава, трещин на границе контакта матрица – оксидный слой не наблюдается, четко просматривается взаимное проникновение оксидного слоя в матрицу.

По результатам элементного состава в атомных концентрациях, нормализованных к 100 %, установлено, что основным элементом исследованного материала является кремний и алюминий (соответственно 20,19 и 54,06). Содержание кислорода в оксидированном слое днища поршня увеличилось до 13,82 единиц, а в матрице - с 1,04 у типового поршня, до 2,6 - у оксидированного.

Теплопроводность оксидированного поршня на 25 % ниже теплопроводности типового поршня.

3. Экспериментальная оценка влияния оксидирования днищ поршней на технико-эксплуатационные показатели ДВС по результатам сравнительных моторных исследований показала, что при номинальной частоте вращения коленчатого вала 2500 мин<sup>-1</sup>, эффективная мощность двигателя, оснащенного поршнями с оксидированным днищем, увеличилась на 4,8 %, максимальный крутящий момент на 5 %, часовой и удельный эффективный расходы топлива у двигателя с оксидированными днищами поршней уменьшился на 4,4 % и 8,8 %, содержание углерода и углеводородов в отработавших газах оксида снизилось соответственно на 8 % и 11 % по сравнению с работой двигателя, оснащенного типовыми поршнями.

4. Сравнительные эксплуатационные исследования автомобилей УАЗ-3303 с двигателем УМЗ-417 укомплектованных с поршнями с оксидированным днищем и штатными поршнями показывают, что средний путевой расход топлива уменьшается на 4,2 %, при этом время разгона сократилось на 3 %, а путь разгона на 7,4 %.

## 5 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЯ УАЗ 3303 С ДВИГАТЕЛЕМ, ОСНАЩЁННЫМ ПОРШНЯМИ С ОКСИДИРОВАННЫМИ ДНИЩАМИ

Экономическую эффективность работы автомобиля при работе двигателя с оксидированными поршнями определяли путём сравнения затрат на эксплуатацию автомобиля по двум вариантам: базовому (при работе двигателя с типовыми поршнями) и внедряемому (при работе двигателя с оксидированными поршнями).

В качестве исходных данных для экономического расчёта приняты действующие значения различных коэффициентов, тарифных ставок исполнителей, годовой пробег автомобиля, стоимость топлива и опытного образца (оксидированного поршня).

Величину годового расхода топлива по базовому и внедряемому вариантам принимаем по фактическому расходу, полученному в результате эксплуатационных исследований автомобилей УАЗ.

В общем виде эффективность внедрения новых технических средств определяется зависимостью [174,175]:

$$\Theta = \left[ \Pi_1 \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(I_1 - I_2) - E_H \cdot (K_2 - K_1)}{P_2 + E_H} - \Pi_2 \right] \cdot A, \quad (5.1)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2$  – приведённые затраты в базовом (индекс 1) и внедряемом (индекс 2) вариантах, руб;  $B_1, B_2$  – годовые пробеги автомобилей, км;  $P_1, P_2$  – доли отчисления от балансовой стоимости двигателя на восстановление, км;  $I_1, I_2$  – расходы (издержки) на эксплуатацию двигателя у потребителей, руб;  $K_1, K_2$  – сопутствующие капитальные вложения, руб;  $A$  – количество обслуживаемых изделий;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

При внедрении технических средств сопутствующие капитальные вложения  $K_1, K_2$  отсутствуют, а величина  $\Pi_1$  в большинстве случаев не является определяющей, тогда формула (5.1) приобретает вид

$$\Theta = (I_1 - I_2) / (P_2 + E_H). \quad (5.2)$$

Расчёт годовой экономии при работе двигателя с оксидированными поршнями осуществляется по формуле:

$$\mathcal{E}_r = I_1 - I_2, \quad (5.3)$$

где  $I_1$  – годовые эксплуатационные издержки при работе двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации, руб.;  $I_2$  – годовые эксплуатационные издержки при работе двигателя, оснащенного оксидированными поршнями, руб.

Годовые эксплуатационные издержки рассчитываем по формуле:

$$I = 3 + T + A + P + \Pi, \quad (5.4)$$

где  $3$  – оплата труда водителя, руб.;  $T$  – затраты на топливо, руб.;  $A$  – амортизационные отчисления на полное восстановление основных средств, руб.;  $P$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.;  $\Pi$  – прочие прямые затраты (стоимость вспомогательных материалов, затраты на хранение и пр.), руб.

Оплата труда исполнителей

$$3 = \sum L \cdot C_q \cdot K_o \cdot T_r, \quad (5.5)$$

где  $L$  – количество водителей, чел.;  $C_q$  – часовая тарифная ставка, руб. (часовая тарифная ставка водителя 3-го класса 44,27 руб./ч);  $K_o$  – коэффициент увеличения оплаты труда по тарифу;  $T_r$  – годовой объем работ, чел.·ч; (2300 чел.·ч).

Коэффициент  $K_o = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$  рассчитываем при использовании автомобиля УАЗ на производстве:  $K_1$  – коэффициент, доплат за перевезённую продукцию ( $K_1 = 1,25 \dots 1,50$ );  $K_2$  – коэффициент, учитывающий надбавку за классность ( $K_2 = 1,1 \dots 1,2$ );  $K_3$  – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату ( $K_3 = 1,15$ );  $K_4$  – коэффициент, учитывающий начисления на выплату страховых взносов ( $K_4 = 1,278$ );  $K_5$  – коэффициент, учитывающий оплату отпусков ( $K_5 = 1,06 \dots 1,1$ ).

Тогда коэффициент увеличения оплаты труда и заработная плата водителей будут равны

$$K_o = 1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,278 \cdot 1,06 = 2,14$$

$$3 = 1 \cdot 44,27 \cdot 2,14 \cdot 2300 = 217896 \text{ руб.}$$

Затраты на моторное топливо для проведения транспортных работ определяются по формуле:

$$T = W_{\Gamma} \cdot C_{\text{Б}}, \quad (5.6)$$

где  $W_{\Gamma}$  – годовой расход моторного топлива, л;  $C_{\text{Б}}$  – цена 1 литра моторного топлива, руб.

Цена 1 литра бензина А-80 – 25,1 руб. (по среднегодовым рыночным ценам 2014 года).

Годовой расход моторного топлива

$$W_{\Gamma} = q_{\text{Е.Р.}} \cdot K_{\text{Р.Д.}}, \quad (5.7)$$

где  $q_{\text{Е.Р.}}$  – ежедневный расход топлива, л;  $K_{\text{Р.Д.}}$  – количество рабочих дней (300 дней).

$$q_{\text{Е.Р.}} = \frac{L_{\text{Е}} \cdot p_{\text{Р.Т.}}}{100}, \quad (5.8)$$

где  $L_{\text{Е}}$  – ежедневный пробег автомобиля, км;  $p_{\text{Р.Т.}}$  – путевой расход топлива 15,7 л./ 100 км.

По результатам эксплуатационных исследований (гл. 4 п. 4.4) автомобиля УАЗ 3303 оснащенного двигателем УМЗ-417 с окисидированными поршнями получены результаты снижения расхода топлива на 4,2 % и составляющие  $p_{\text{Р.Т.}} - 15,0$  л./ 100 км.

$$L_{\text{Е}} = \frac{L_{\Gamma}}{K_{\text{Р.Д.}}}, \quad (5.9)$$

где  $L_{\Gamma}$  – годовой пробег автомобиля, км, ( $L_{\Gamma} = 45000$  км)

Тогда годовые затраты на моторное топливо при проведении транспортных работ будут равны:

а) при работе двигателя с типовыми поршнями

$$L_{\text{Е}} = \frac{45000}{300} = 150 \text{ км},$$

$$q_{\text{Е.Р.}} = \frac{150 \cdot 15,7}{100} = 23,55 \text{ л.},$$

$$W_{\Gamma} = 23,55 \cdot 300 = 7065 \text{ л.},$$

$$T = 7065 \cdot 25,1 = 177331,5 \approx 177332 \text{ руб.}$$

б) при работе двигателя с поршнями с окисидированным днищем

$$L_E = \frac{45000}{300} = 150 \text{ км},$$

$$q_{E.P.} = \frac{150 \cdot 15,0}{100} = 22,5 \text{ л.},$$

$$W_T = 22,5 \cdot 300 = 6750 \text{ л.},$$

$$T = 6750 \cdot 25,1 = 169425 \text{ руб.}$$

Стоимость нового двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации равна -  $B_I = 48000$  руб. Стоимость двигателя с оксидированными поршнями складывается из дополнительных затрат на изготовление оксидированных поршней и установку на двигатель.

Затраты на изготовление (на одну гильзу) будут равны:

$$C_{\text{доп}} = K_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{зар}} + C_{\text{мат}}), \quad (5.10)$$

где  $K_{\text{НАКЛ}}$  – коэффициент накладных расходов ( $K_{\text{НАКЛ}} = 1,10$ );  $C_{\text{ЗАР}}$  – затраты на зарплату рабочим, руб.;  $C_{\text{МАТ}}$  – затраты на расходные материалы, руб.

Заработная плата рабочих при оксидировании поршней:

$$C_{\text{ЗАР}} = C_{\text{ч}} \cdot (t_{\text{ПОД}} + t_{\text{КРП}} + t_{\text{ТП}} + t_{\text{ЗТП}}) + C_{\text{д}} + C_{\text{СТР.П}}, \quad (5.11)$$

где  $C_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка рабочих 4 разряда ( $C_{\text{ч}} = 40,95$ ), руб;  $t_{\text{ПОД}}$  – норма времени на подготовительные работы, ч (приготовление раствора электролита) ( $t_{\text{ПОД}} = 0,15$ );  $t_{\text{КРП}}$  – норма времени на крепёжные работы, ч (крепление поршней в державке) ( $t_{\text{КРП}} = 0,08$ );  $t_{\text{ТП}}$  – норма времени на технологический процесс МДО, ч (оксидирование мотор - комплекта поршней) ( $t_{\text{ТП}} = 0,50$ );  $t_{\text{ЗТП}}$  – норма времени на заключительные работы технологического процесса МДО, ч (промывка в проточной воде и сушка поршней) ( $t_{\text{ЗТП}} = 0,3$ );  $C_{\text{д}}$  – дополнительная заработная плата, руб;  $C_{\text{СТР.П}}$  – начисления на выплату страховых платежей, руб.

Тогда заработная плата рабочих составит:

$$C_{\text{ЗАР}} = 40,95 \cdot (0,15 + 0,08 + 0,50 + 0,30) = 42,1 \text{ руб.},$$

Дополнительная заработная плата составляет 3% от основной:

$$C_{\text{д}} = 0,03 \cdot 42,1 = 1,26 \text{ руб.},$$

Начисления на выплату страховых платежей принимаем в размере 30 % от основной заработной платы:



$$C_{СТР.П} = 0,30 \cdot 42,1 = 12,63 \text{руб.},$$

Общая заработная плата будет равняться:

$$C_{ЗАР} = 42,1 + 1,26 + 12,63 = 55,99 \approx 56 \text{руб.}$$

Затраты на расходные материалы составляют = 180 руб.

Затраты на внедрение мотор – комплекта окислированных поршней будут равны:

$$C_{ДОП} = 1,10(56 + 180) = 259,6 \approx 260 \text{руб.}$$

Следовательно, стоимость двигателя с окислированными поршнями составит:

$$B_2 = B_1 + C_{доп},$$

$$B_2 = 48000 + 260 = 48260 \text{руб.}$$

Затраты на ремонт двигателя УМЗ-417 с окислированными поршнями составят:

$$C_2 = C_1 + 4 \cdot C_{доп}, \quad (5.12)$$

где  $C_1$  – затраты на замену цилиндропоршневой группы, руб. ( $C_1 = 4000$ ).

$$C_2 = 4000 + 260 = 4260 \text{руб.}$$

Амортизационные отчисления, приходящие на работу двигателя:

$$A = B \cdot a / 100, \quad (5.13)$$

где  $B$  – балансовая стоимость двигателя УМЗ-417, руб.;  $a$  – норма амортизационных отчислений,  $a = 14,7\%$ .

$$A_1 = 48000 \cdot 0,147 = 7056,0 \text{руб.}$$

$$A_2 = 48260 \cdot 0,147 = 7094,2 \text{руб.}$$

Затраты на ремонт и ТО, приходящиеся на работу автомобиля:

$$P = B \cdot p / 100, \quad (5.14)$$

где  $p = 10\%$  - норматив затрат денежных средств на ремонт, ТО и хранение автомобиля.

$$P_1 = 48000 \cdot 0,1 = 4800 \text{руб.}$$

$$P_2 = 48260 \cdot 0,1 = 4826 \text{руб.}$$

Прочие прямые затраты:

$$П = (З + Т + А + Р) \cdot n / 100, \quad (5.15)$$

где  $n = 10\%$  - процент прочих прямых затрат.

$$П_1 = (217896 + 177332 + 7056 + 4800) \cdot 0,1 = 40708 \text{руб.};$$

$$П_2 = (217896 + 169425 + 7094 + 4826) \cdot 0,1 = 39924 \text{руб.}$$

Годовые эксплуатационные издержки составят

$$И_1 = 217896 + 177332 + 7056 + 4800 + 40708 = 447792 \text{руб.};$$

$$И_2 = 217896 + 169425 + 7094 + 4826 + 39924 = 439165 \text{руб.}$$

Приведённые затраты:

$$П = C + E_H \cdot K, \quad (5.16)$$

где  $C$  – себестоимость одного двигателя, руб.;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ( $E_H = 0,15$ );  $K$  – удельные капитальные вложения, руб.

Себестоимость двигателя:

$$C = B / P_H, \quad (5.17)$$

где  $P_H$  – коэффициент, учитывающий нормативный процент рентабельности ( $P_H = 1,14$ ).

$$C_1 = 48000 / 1,14 = 42105 \text{руб.}$$

$$C_2 = 48260 / 1,14 = 42333 \text{руб.}$$

Удельные капитальные вложения

$$K = B \cdot \eta_K, \quad (5.18)$$

где  $\eta_K$  – коэффициент основных производственных фондов и нормируемых оборотных средств в расчёте на 1 рубль цены двигателя ( $\eta_K = 0,68$ ).

$$K_1 = 48000 \cdot 0,68 = 32640 \text{руб.}$$

$$K_2 = 48260 \cdot 0,68 = 32816 \text{руб.}$$

Приведённые затраты равны

$$П_1 = 42105 + 0,15 \cdot 32640 = 47001 \text{руб.}$$

$$П_2 = 42333 + 0,15 \cdot 32816 = 47255 \text{руб.}$$

Годовая экономия

$$\mathcal{E}_r = 447792 - 439165 = 8627 \text{руб.}$$

Срок окупаемости дополнительных затрат,

$$T_d = C_2 / \mathcal{E}_r,$$

$$T_d = 4260 / 8627 = 0,4 \text{ года.}$$

Таблица 5.1 – Экономическая эффективность от применения поршней с оксидированными днищами

Показатели	Вид поршня		Разница, +/-
	типовой	оксидированный	
Среднегодовой пробег, км	45000	45000	-
Затраты на изготовление мотор-комплекта с поршнями с оксидированными днищами, руб.	-	260	
Затраты на замену поршней, руб.	4000	4260	+ 260
Расход топлива, л/100 км	15,7	15,0	- 0,6
Затраты на топливо, руб.	177332	169425	- 7907
Годовые эксплуатационные издержки, руб.	447792	439165	- 8627
Приведённые затраты, руб.	47001	47255	+ 254
Годовая экономия, руб.	-	8627	+ 8627
Срок окупаемости дополнительных затрат, лет	-	0,4	-

### Выводы

Расчетная годовая экономия от использования на автомобиле УАЗ-3303 двигателя УМЗ-417, оснащенного оксидированными поршнями, составит 8627 руб., получаемая за счёт снижения затрат на топливо на 4,2 % (без учёта повышения эксплуатационной мощности).

Срок окупаемости дополнительных затрат 0,4 года.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Рассмотрено влияние режимов микродугового оксидирования (сила и плотность тока, напряжение, концентрация электролита и время оксидирования) на толщину и пористость оксидированного слоя днища поршня. Теоретически установлено, что толщина оксидированной пленки будет прямо пропорциональна напряжению и составу электролита. Пористость будет прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна силе тока. Изменяя силу тока, напряжение и время процесса можно получать оксидированные слои необходимой толщины и пористости.

2. Теоретически обоснованы режимы МДО: концентрация ортофосфорной кислоты в водном растворе – 180 г/л; плотность тока – 3...4 А/см<sup>2</sup>; напряжение, подаваемое к днищу поршня, - 250 В; температура электролита – 20...25 °С, время оксидирования – 30 минут.

По результатам теплового расчета установлено, что оснащение двигателя УМЗ – 417 поршнями с оксидированным днищем позволит снизить эффективный удельный расход топлива на 4,3 %, эффективный часовой расход на 8,7 %, увеличить эффективную мощность на 4,7 % и эффективный коэффициент полезного действия на 9,6 %.

3. В результате проведенного оксидирования поршней при режимах МДО: концентрация ортофосфорной кислоты в водном растворе – 180 г/л; плотность тока – 4 А/см<sup>2</sup>; напряжение, подаваемое к днищу поршня, - 250 В; температура электролита – 25 °С; время оксидирования – 30 минут, получен оксидированный слой на днище поршня толщиной 8 мкм, пористостью 10 % и микротвердостью 840 МПа.

Результаты лабораторных исследований полученного оксидированного слоя показывают, что покрытие неоднородно по своему сечению, имеет большую пористость, чем матричный слой поршня, хорошую адгезию с поверхностью алюминиевого сплава, трещин на границе контакта матрица – оксидный слой не наблюдается, четко просматривается взаимное проникновение оксидного слоя в матрицу.

По результатам элементного состава в атомных концентрациях, нормализованных к 100 %, установлено, что основным элементом исследованного материала является кремний и алюминий (соответст-

венно 20,19 и 54,06). Содержание кислорода в оксидированном слое днища поршня увеличилось до 13,82 единиц, а в матрице - с 1,04 у типового поршня, до 2,6 - у оксидированного.

Теплонапряженность оксидированного поршня на 25 % ниже теплонапряженности типового поршня.

4. Экспериментальная оценка влияния оксидирования днищ поршней на технико-эксплуатационные показатели ДВС по результатам сравнительных моторных исследований показала, что эффективная мощность двигателя, оснащенного поршнями с оксидированным днищем, при номинальной частоте вращения коленчатого вала 2500 мин<sup>-1</sup>, увеличилась на 4,8 %, максимальный крутящий момент на 5 %, часовой и удельный эффективный расходы топлива соответственно уменьшился на 4,4 % и 8,8 %, содержание в отработавших газах оксида углерода и углеводородов соответственно снизилось на 8 % и 11 % по сравнению с работой двигателя, оснащенного типовыми поршнями.

Сравнительные эксплуатационные исследования автомобилей УАЗ-3303 с двигателем УМЗ-417 укомплектованных с поршнями с оксидированным днищем и штатными поршнями показывают, что средний путевой расход топлива уменьшается на 4,2 %, при этом время разгона сократилось на 3 %, а путь разгона на 7,4 %.

5. Использование на автомобиле УАЗ-3303 двигателя УМЗ-417, оснащенного поршнями с оксидированным днищем, позволяет получить годовую экономию 8627 руб. за счёт снижения затрат на топливо на 4,2 %. Срок окупаемости дополнительных затрат 0,4 года

## Список использованной литературы

1. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
2. Малышев В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования. А/р д.т.н. – Москва 1999, с.53.
3. 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; Оpubл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
4. Николаев, А.В. Новое явление в электролизе [Текст] / А.В. Николаев, Г.А. Марков, Б.И. Пещевицкий // Известия СО АН СССР. Серия химических наук. – 1977. – Вып. 5.– № 12. – С. 32-33.
5. 2. А.с. 526961 СССР, МКИ Н 01 G 9/24. Способ формовки анодов электрических конденсаторов [Текст] / Марков Г.А., Маркова Г.В. (СССР). – № 1751524/26-21; заявл. 24.02.72; опубл. 30.08.76, Бюл. № 32.
6. Тихоненко, В.В. Упрочняющие технологии формирования износостойких поверхностных слоев [Текст] / В.В. Тихоненко, А.М. Шкилько // Фізичнаінженеріяповерхні.– 2011.– Т. 9, № 3. – С. 237-243.
7. Шкилько, А.М. Анализ способа упрочнения деталей микродуговым оксидированием [Текст] / А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко // ВісникНаціональноготехнічногоуніверситету „ХПІ”: зб. наук. праць. Тематичнийвісник: Новірішення в сучаснихтехнологіях.– 2010. – № 46. – С. 252-257.
8. Тимошенко, А. В. Влияние наложенного переменного тока на состав и свойства оксидных покрытий, формируемых в микроплазменном режиме на сплаве Д16 [Текст] / А.В. Тимошенко, Б.К. Опара, Ю.В. Магурова // Защита металлов. – 1994. – Т. 30, № 1. – С. 32 – 38.

9. Микродуговое оксидирование (обзор) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. // Приборы. – 2001. – № 9. – С. 13-23.187. 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.
10. Руднев, В. С. Зависимость толщины покрытия от потенциала МДО [Текст] / П.С. Гордиенко, В.С. Руднев // Защита металлов. 1993. – Т. 29, № 2. – С. 304-307.
11. 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.
12. Микроплазменные электрохимические процессы. Обзор. [Текст] / В.И. Белеванцев, О.П. Терлева, Г.А. Марков и др. // Защита металлов. – 1998. – Т. 34, № 5. – С. 469-484.
13. Магурова, Ю.В. Влияние катодной составляющей на процесс микроплазменного оксидирования сплавов алюминия переменным током [Текст] / Ю.В. Магурова, А.В. Тимошенко // Защита металлов. – 1995. – Т. 31, № 4. – С. 414 -418.
14. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом [Текст] / А.Г. Ракоч, В.В. Хохлов, В.А. Баутин и др. // Защита металлов.– 2006.– Т. 42, № 2. – С. 173-184.
15. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом [Текст] / В.И. Черненко, Л.А. Снежко, И.И. Папанова– Л.: Химия, 1991.– 128с.
16. Саакиян, Л. С. Развитие представлений Г.В. Акимова о поверхностной оксидной пленке и ее влиянии на коррозионно-механическое поведение алюминиевых сплавов [Текст] / Л.С. Саакиян, А. П. Ефремов, А.В. Эпельфельд // Защита металлов. – 2002. – Т. 38, № 2. – С. 186-191.
17. Ракоч, А.Г. Микродуговое оксидирование легких сплавов [Текст] / А.Г. Ракоч, И.В. Бардин // Металлург. – 2010. – № 6. – С. 58-61.

18. Федоров, В. А. Модифицирование микродуговым оксидированием поверхностного слоя деталей [Текст] / В. А. Федоров // Сварочное производство.– 1992.– № 8.– С. 29-30.
19. Богрякова, Е.В. Сравнительный анализ оксидных покрытий на сплавах Д16 при микродуговом и электрохимическом оксидировании [Текст] / Е.В. Богрякова, Е.А. Федорова // Известия вузов. Сер. Химия и химическая технология. – 2007.– Т.50, № 11.– С. 120-121.
20. 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.
21. Тимошенко, А. В. Влияние силикатных добавок в растворе гидроксида натрия на строение оксидных покрытий, сформированных 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.
22. Микродуговое оксидирование (окончание) [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В. Б. Людин и др.// Приборы. – 2001. – № 10. – С. 26-36.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. Патент на корисну модель 51613 Україна, МПК G01N 15/08. Спосіб визначення пористості поверхневих шарів твердих тіл [Текст] / Тихоненко В. В., Шкілько А. М., Компанієць І. В.;



- власник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u201000284; заявл. 14.01.2010; опублік. 26.07.2010, Бюл. №14.
27. 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.
28. Шкилько, А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография [Текст] / А.М. Шкилько. – Харьков: Ноулидж, 2009. – 240 с.
29. 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.
30. Чиргинова, Н.М. Оксидные керамические покрытия – эффективная тепловая защита рабочих поверхностей ЦПГ [Текст] / Н.М. Чиргинова, В.В. Чиргинов, В.Е. Чиргинов // Автомобильная промышленность. – 2004. – № 6. – С. 30-33.
31. Оксидокерамика на зеркале безгильзового алюминиевого цилиндра ДВС [Текст] / А.И. Комаров, А.М. Гоман, В.И. Комарова и др. // Автомобильная промышленность. – 2005. – № 2. – С. 36 - 40.
32. Кузнецов, Ю.А. Комбинированная технология получения керамических покрытий [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Сварочное производство. – 2005. – № 6. – С. 37-39.
33. Коломейченко, А.В. Технология восстановления аргонодуговой наплавкой и упрочнения микродуговым оксидированием деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.В. Коломейченко // Сварочное производство. – 2004. – № 1. – С 44-48.
34. Восточно-Европейский журнал передовых технологий 2/13 ( 56 ) 2012
35. Mason N., Peterson R.D., Richards N.E., др. Aluminum: Approaching the new millenium//JOM : J. Miner., Metals and Mater. Soc., 1999, 51, №2, p. 29-42.
36. Акаро И.Л. Концепция применения алюминиевых сплавов в автомобилестроении. – Технология легких сплавов, 1999, №1-2.
37. Wrigley A. Aluminum's moves in engines, Autom. Manuf. and Prod. [Automot. Prod.], 1997, 109, № 4, p. 22.

38. М.М. Криштал, П.В. Ивашин, П.В. Коломиец. Использование технологии микродугового оксидирования при разработке ДВС с блоком цилиндров из алюминиевого сплава, Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т. 12, №4, 2010.
39. М.М. Криштал, М.О. Рюмки. Влияние исходной структуры Al-Si сплавов на свойства получаемых методом микродугового оксидирования оксидных слоев и торможение частицами кремния роста оксидного слоя., Материаловедение. 2008. № 12. С. 50-61.
40. Krishtal M.M. Oxide Layer Formation by Micro-Arc Oxidation on Structurally Modified Al-Si Alloys and Applications for Large-Sized Articles Manufacturing Advanced Materials Research, 2009, Vol. 59, 204-208.
41. Krishtal M.M., Chudinov V.A., Pavlikhin S.E., Polunin V.I. A Wear-Resistant Coating for Aluminium-Silicon Alloys using Microarc Oxidation and an Application to an Aluminium Cylinder Block SAE2002-01-0626 "Light Metals for the Automotive Industry" USA, 2002, pp. 153 – 162.
42. Тихоненко В. В. Метод микродугового оксидирования / В. В. Тихоненко, А. М. Шкилько // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – № 2/13 (56). – С. 13–18.
43. Демидович Б.П. Численные методы анализа. Приближение функций, дифференциальные и интегральные уравнения / Б. П. Демидович, И. А. Марон, Э. З. Шувалова. – М.: Наука, 1967. – 368 с.
44. Бондарь А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – К.: Вища школа, 1976. – 184 с.
45. Методы исследований и организация экспериментов / под ред. проф. К. П. Власова – Х.: Гуманитарный Центр, 2002. – 256 с.
46. Никитин М. Д. Теплозащитные и износостойкие покрытия деталей дизеля / М. Д. Никитин, А. Я. Кулик, Н. И. Захаров. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. – 168 с.
47. Коломейченко А. В. Микродуговое оксидирование как способ восстановления и упрочнения деталей машин / А. В. Коломейченко, В. Н. Логачёв, Н. С. Чернышов // Инженерные поверхности и реновация

изделий: матер: 2-й Междунар. науч.-техн. конф. – Киев: АТМ України.– 2002. – С. 73 – 76.

48. Мамаев А.И. Сильноточковые процессы в растворах электролитов / А.И. Мамаев, В.А. Мамаева. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 254 с.

49. Микродуговое оксидирование(теория, технология, оборудование) / [Суминов И. В., Эпельфельд А.В., В.Б. Людини др.]. – М: ЭКО-МЕТ,2005. – 368 с.

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

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

52. Федоров В.А. Формированиеупрочненных 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.

53. Михеев А.Е. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов / [А.Е. Михеев, В.В. Стацур,Н.А. Терехин и др.] // Вестник машиностроения. – М.: – 2003. – № 2. – С. 56 – 63.

54. Патент на корисну модель 51613 Україна, МПК G01N 15/08. Спосіб визначення пористості поверхневих шарів твердих тіл/ Тихоненко В. В., Шкілько А. М., Компанієць І. В.; власник Українська інженерно-педагогічна академія. – № u201000284; заявл.14.01.2010; опублік. 26.07.2010, Бюл. № 14.

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

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

57. Каракозов Э.С. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин // Сварочное производство. – 1993. – № 6.– С. 4 – 7.
58. Шкилько А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверхности конструкционных материалов: монография / А.М. Шкилько. – Х.: Ноулидж, 2009. – 240 с.
59. Суминов И. В., Эпельфельд А. В., Людин В. Б. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование. М.: Экомет, 2005. 368 с.
60. Белкин П. Н. Электрохимико-термическая обработка металлов и сплавов. М.: Мир, 2005. 336 с.
61. Процесс электролитно-плазменной обработки деталей ГТД с предварительным формированием парогазовой оболочки / М. К. Смылова [и др.] // Проблемы машиноведения, процессов управления и критических технологий: сб. науч. тр. Уфа: Гилем, 2008.
62. Выбор способа удаления покрытия TiN с поверхности мартенситной стали для разработки технологических рекомендаций ремонта лопаток энергоустановок / Р. Р. Невьянцева, А. А. Быбин, Е. В. Парфенов, Н. Ф. Измайлова // Вестник УГАТУ. 2009. т. 12. №2 (31). С. 103–107.
63. Parfenov, E. V. Statistical Signal Processing for Plasma Electrolysis Process Control / E. V. Parfenov, R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbatkov // Proc. of IV Intl Conf. “System Identification and Control Problems”. Moscow, 2005. P. 998-1004.
64. Parfenov, E.V. Frequency response studies for the plasma electrolytic oxidation process / E.V. Parfenov, A. L. Yerokhin, A. Matthews // Surface and Coatings Technology, 2007. V. 201. P. 8661-8670.
65. Nevyantseva, R. R. The influence of vapor-gaseous envelope behavior on plasma electrolytic coating removal / R. R. Nevyantseva, S. A. Gorbatkov, E. V. Parfenov, A. A. Bybin // Surface and Coatings Technology. 2001. V. 148. P. 30-37.
66. Влияние физико-химического состояния поверхности образцов различной формы на колебания тока при электролитно-плазменной обработке / Р. Р. Невьянцева, Н. Ф. Измайлова, Е. В. Пар-

фенов, А. А. Быбин // Физика и химия обработки материалов. 2002. № 2. С. 33–39.

67. Амирханова Н. А., Белоногов В. А., Белоногова Г. У. Исследование закономерностей электролитно-плазменного полирования жаропрочного сплава ЭП-718 //Металлообработка. 2003. № 6. С. 16–20.

68. Yerokhin, A.L. Plasma electrolysis for surface engineering. Review / A.L. Yerokhin, X. Nie, A. Leyland, A. Matthews, S. J.Dowey // Surface and Coatings Technology. 1999. V. 122. P. 73-79.

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

70. Gardner, W.A. Statistical Spectral Analysis: A Nonprobabilistic Theory. NewYork: PrenticeHall, 1988. 591 p.

71. Вентцель Е. С.Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. М.: Наука, 1991. 383 с.

72. Oppenheim, A.V. Discrete-Time Signal Processing / A.V. Oppenheim, R.W. Schafer, J.R. Buck. NewYork: PrenticeHall, 1999. 855 p.

73. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. СПб.: Питер, 2003. 604 с.

74. Амирханова Н. А.Патент РФ № 2119975 МПК6 С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева, Т. М. Тимергазина, Е. В. Парфенов. Оpubл. 10.10.1998.

75. Невьянцева Р. Р.Патент РФ № 2227181 МПК7 С 25 F 5/00. Способ определения момента окончания процесса электролитно-плазменного удаления покрытия / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Оpubл. 20.04.2004.

76. Амирханова Н. А.Патент РФ № 2133943 МПК7 G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Н. А. Амирханова, Р. Р. Невьянцева,

77. Н. Ф. Измайлова, Т. М. Тимергазина, Е.В. Парфенов. Оpubл. 27.07.1999.

78. Невьянцева Р. Р.Патент РФ № 2240500 МПК7 G 01 В 7/34. Способ измерения шероховатости поверхности / Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Оpubл. 20.11.2004.

79. Parfenov E.V. Process Control for Plasma Electrolytic Removal of TiN Coatings. Part 1: Duration Control / E.V. Parfenov, R.R. Nevyantseva, S.A. Gorbakov // *Surface and Coatings Technology*. 2005. V.199. P. 189–197.
80. Горбатков С. А., Парфенов Е. В., Невьянцева Р. Р. Управление технологическим процессом электролитно-плазменного удаления покрытия // *Вестник УГАТУ*. 2003. Т. 4. № 1. С. 145–152.
81. Патент РФ № 2202451 МПК7 В 23 Н 7/20. Способ управления процессом удаления дефектного покрытия электролитно-плазменным методом / А. И. Михайловский, Р. Р. Невьянцева, Е. В. Парфенов, А. А. Быбин. Опубл. 21.12.2000.
82. Баковец В.В. Плазменно-электролитическая анодная обработка металлов / Баковец В.В., Поляков О.В., Долговесова И.П. – Новосибирск: Наука, 1991. – 168 с.
83. Коломейченко А.В. Микродуговое оксидирование как способ восстановления и упрочнения деталей машин / А.В. Коломейченко, В.Н. Логачёв, Н.С. Чернышов // *Инженерия поверхности и реновация изделий: матер. 2-й Междунар. науч.-техн. конф.* – Киев :АТМ Украины, 2002. – С. 73-76.
84. Микродуговое оксидирование (обзор) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин [и др.] // *Приборы*. – 2001. – № 9. – С. 13-23.
85. Электролитно-плазменная обработка и нанесение покрытий на металлы и сплавы / А.Д. Погребняк, Ю.Н. Тюрин, А.Г. Бойко [и др.] // *Успехи физики металлов*. – 2005. – Т. 6. – С. 273-344.
86. Войцения В.С. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы / В.С. Войцения, С.К. Гужова, В.И. Титов. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 224 с.
87. Мамаев А.И. Высоковольтная импульсная техника, технологии и контроль синтеза наноструктурированных неорганических покрытий на детали сложной формы / А.И. Мамаев, В.А. Мамаева // *Становление и развитие научных исследований в высшей школе: междунар. науч. конф.*, 14-16 сент. 2009. – Томск, 2009. – С. 252-258.
88. Шкилько А.М. Неразрушающие методы контроля металлов и узлов энергетического оборудования / Шкилько А.М. – К.: ИСИО, 1994. – 170 с. 8. Шкилько А.М. Экзоэмиссионная диагностика поверх-

ности конструкционных материалов: монография / Шкилько А.М. – Харьков: «Ноулидж», 2009. – 240 с.

89. Юнг Л. Анодные оксидные пленки.: Пер. с англ. / Л. Юнг. — Л.: Энергия, 1967. — 232 с.

90. Белов В. Т. О морфологии анодного оксида алюминия / В. Т. Белов // Электрохимия. — 1982.— Т. 18. — № 8. — С. 1144—1145.

91. Чернышев В. В. Исследование пористых покрытий методом синхронного осциллографирования / В. В. Чернышев, Г. И. Галкин // Физика и химия межвуз сб. научн. тр. — Воронеж, 1981. — С. 23—25.

92. Кусков В.Н. Повышение износостойкости узлов трения микро-разрядным оксидированием в электролите / В.Н. Кусков, К.В. Кусков, О.Н. Абрамов // Нефть и газ. Новые технологии в системах транспорта: Матер. регион. науч.-практ. конф. Ч. 1. - Тюмень: ТюмГНГУ, 2004. - С. 161-164.

93. Кусков В.Н. Применение микроразрядного оксидирования для увеличения срока эксплуатации шкива электрогенератора трактора Т-4 / В.Н. Кусков, О.Н. Абрамов, Кусков К.В., // Интерстроймех-2005: Тр. междунар. н.-т. конф. Ч. 1.- Тюмень: ТюмГНГУ, 2005. - С. 192-193.

94. Кусков В.Н. Формирование структуры оксидного покрытия на алюминиевом сплаве катодно-анодными микро-разрядами в электролите / В.Н. Кусков, О.Н. Абрамов, Н.И.Смолин // Инженерия поверхности и реновация изделий: Матер. 5-й междунар. н.-т. конф. – Киев: АТМ Украины, 2005. С. 125-127.

95. Кусков В.Н. Влияние редкоземельных соединений на микро-разрядное оксидирование сплава Д16 / В.Н. Кусков, О.Н. Абрамов // Нефть и газ Западной Сибири: Матер. междунар. н.-т. конф. Т. 1.- Тюмень: Феликс, 2005. С. 240 - 241.

96. Абрамов О.Н. Практика микро-разрядного 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.

97. 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.

98. Кусков В.Н. Определение параметров микро-разрядного оксиди-

рования алюминиевых сплавов / В.Н. Кусков, О.Н. Абрамов, К.В. Кусков // Мегапаскаль: Сб. научн. трудов. 2006. № 1. С. 36 – 38.

99. Voevodin A.A., Yerokhin A.L., Lyubimov V.V., Donley M.S., Zabinski J.S. Characterization of wear protective Al-Si-O coatings formed on Al-based alloys by micro-arc discharge treatment. Surf.Coat.Technol., 1996, v.86-87, p.516-521.

100. Мамаев А.И., Чеканова Ю.Ю., Рамазанова Ж.М. Получение анодно-оксидных декоративных покрытий на сплавах алюминия методом микродугового оксидирования. ФХОМ, 1999, №4, с.41-44.

101. Gnedekov S.V., Khrisanfova O.A., Zavidnaya A.G., Sinebrukhov S.L., Gordienko P.S., Iwatsubo S., Matsui A. Composition and adhesion of protective coatings on aluminum. Surf.Coat.Technol., 2001, v.145, p.146-151.

102. Kurze P., et al. Method for the preparation of decorative coating on metals. Patent US No.4869789. 26.09.1989.

103. Смелянский В.М., Герций О.Ю., Морозов Е.М. Упрочнение алюминиевых деталей микродуговым оксидированием. Автомобильная промышленность, 1999, №1, с.22-25.

104. Чигринова Н.М., Чигринов В.Е., Кухарев А.А. Тепловая защита поршней высокофорсированным анодным микродуговым оксидированием. Защита металлов, 2000, т.36, №3, с.303-309.

105. Калита В.И. Физика и химия формирования биоинертных и биоактивных поверхностей на имплантатах. ФХОМ, 2000, №5, с.28-45.

106. Мамаев А.И., Выборнова С.Н., Мамаева В.А. Получение биосовместимых керамических покрытий на титане методом микродугового оксидирования и исследование их свойств. Перспективные материалы, 1998, №6, с.31-37.

107. Белеванцев В.И., Терлеева О.П., Марков Г.А., Шулепко Е.К., Слонова А.И., Уткин В.В. Микроплазменные электрохимические процессы. Обзор. Защита металлов, 1998, т.34, №5, с.469-484.

108. Суминов И. В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б., Борисов А.М., Крит Б.Л. Микродуговое оксидирование. Обзор. Приборы, 2001, №9, с.13-23; Ibid., №10, с.26-36.

109. Мамаев А.И., Борилов В.Н., Мамаева В.А., Дорофеева Т.И. Компьютерная система измерения электрических параметров микро-



плазменных процессов в растворах. Защита металлов, 2005, т.41, №3, с.278-283.

110. Мамаев А.И., Дорофеева Т.И., Мамаева В.А. Влияние времени микроплазменной обработки на вольтамперные характеристики и свойства биокерамических покрытий на титане и его сплавах. Перспективные материалы, 2005, №2, с.44-52.

111. aluminate, tungstate and silicate solutions // Electrochem. Technol. – 1963. – Vol. 1, N 9/10. – P. 283–287.

112. McNeil, W., Gruss, L.L. Anodic film growth by anion deposition in aluminate, tungstate and phosphate solutions // J. Electrochem. Soc. – 1963. – Vol. 110, N 8. – P. 853–855.

113. Николаев А.В., Марков Г.А., Пищевецкий Б.Н. Новое явление в электролизе // Изв. СО АН СССР. Сер. хим. наук. – 1977. – Вып. 5. – С. 32–33.

114. Марков Г.А., Терлеева О.П., Шулепко Е.К. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий: Сб. науч. тр., вып. 185: Повышение износостойкости деталей газонефтяного оборудования за счет реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий. – М.: МИНХиГП им. И.М. Губкина, 1985. – С. 54–64.

115. Gunterschuzze, A., Betz, H. Electrolytic rectifying action // Z. Pphys. – 1932. – Vol. 78. – P. 196–210.

116. Гюнтершульце А., Бетц Г. Электролитические конденсаторы. – М.: Оборонгиз, 1938. – 200 с.

117. Суминов И.В., Эпельфельд А.В., Людин В.Б. и др. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование). – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.

118. Ракоч А.Г., Хохлов В.В., Баутин В.А. и др. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом // Защита металлов. – 2006. – Т. 42, № 2. – С. 173–184.

119. Хохлов В.В., Ракоч А.Г., Хла Мо и др. Влияние силиката натрия на механизм роста оксидно-керамических покрытий при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 1. – С. 28–33.

120. Хохлов В.В., Жаринов П.М., Ракоч А.Г. и др. Коррозионная стойкость сплава Д16 с оксидно-керамическими покрытиями, полученными методом микродугового оксидирования в силикатных электролитах // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 4. – С. 23–27.
121. Ракоч А.Г., Баутин В.А., Бардин И.В., Ковалев В.Л. Механизм и кинетические особенности микродугового оксидирования магниевого сплава МЛ5пч в электролитах, содержащих  $\text{NH}_4\text{F}$  // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 9. – С. 7–13.
122. Ракоч А.Г., Магурова Ю.В., Бардин И.В. и др. Экзотермическое окисление дна каналов разрядов при микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов // Коррозия: материалы, защита. – 2007. – № 12. – С. 36–40.
123. Ракоч А.Г., Дуб А.В., Бардин И.В. и др. Влияние катодной составляющей тока на кинетику роста микродуговых покрытий на поверхности алюминиевых сплавов // Коррозия: материалы, защита. – 2008. – № 11. – С. 30–34.
124. Ракоч А.Г., Дуб А.В., Бардин И.В. и др. К вопросу о влиянии комбинированных режимов на предельную толщину микродуговых покрытий // Коррозия: материалы, защита. – 2009. – № 11. – С. 32–36.
125. Пат. 2286406 РФ, МПК C25D11/02. Способ электролитического микроплазменного нанесения покрытий на электропроводящее изделие / Хохлов В.В., Ракоч А.Г., Баутин В.А. и др. Заявка № 2005134241/02; заявл. 07.11.2007; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 30.
126. Пат. 23244771 РФ, МПК C25D11/02. Способ электролитического микроплазменного нанесения покрытий на электропроводящее изделие / Хохлов В.В., Дуб А.В., Ракоч А.Г. и др. Заявка № 2006146375/02; заявл. 27.12.2006; опубл. 20.05.2008, Бюл. № 14.
127. Пат. 2286405 РФ, МПК C25D11/02. Способ электролитического микроплазменного нанесения покрытий на электропроводящее изделие / Хохлов В.В., Баутин В.А., Магурова Ю.В., Лебедева Н.А.; опубл. 27.10.2006, Бюл. № 30.
128. Заявка на патент № 2009137837 от 13.10.2009. Литейный сплав на основе алюминия и способ получения защитного покрытия на его поверхности.

129. Ноу-хау «Способ получения антикоррозионных микродуговых покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов» / Ракоч А.Г., Дуб А.В., Бардин И.В. и др. № 6-023–2009 ОИС МИСиС от 16.03.2009.
130. Ноу-хау «Состав электролита и способ получения защитных микродуговых покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов» / Дуб А.В., Ракоч А.Г., Ковалев В.Л., Бардин И.В. № 7-023–2009 ОИС МИСиС от 07.03.2009.
131. Ноу-хау «Способ получения защитных микродуговых покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов» / Ракоч А.Г., Дуб А.В., Бардин И.В. и др. № 26-023–2009 ОИС МИСиС от 27.10.2009.
132. Ноу-хау «Способ получения антикоррозионных микродуговых покрытий на изделиях из алюминиевых сплавов» / Ракоч А.Г., Дуб А.В., Gladkova A.A. и др. № 25-023–2009 ОИС МИСиС от 27.10.2009.
133. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
134. Миснар А. Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиции. М.: Мир, 1968. 463 с.
135. Гальванотехника. Справочник. Под ред. А.М. Гинсберга. – М.: Металлургия, 1987 – 356 с.
136. Оборудование цехов электрохимических покрытий. Справочник. Подред. М.М. Вячеслава. – Л.: Машиностроение, 1987 – 245 с.
137. Богенщютц А. Ф. Электролитическое покрытие сплавами. – М.: Металлургия, 1980 – 102 с.
138. Вячеслав П.М. Методы испытаний электролитических покрытий. – Л.: Машиностроение, 1977 – 64 с.
139. Вячеслав П.М. Электролитическое осаждение сплавов. – Л.: Машиностроение, 1977 – 124 с.
140. Грилихес С.Я. Обезжиривание, травление и полирование металлов. – Л.: Машиностроение, 1977 – 123 с.
141. Грилихес С.Я. Оксидные и фосфатные покрытия металлов. – Л.: Машиностроение, 1985 – 113 с.
142. Малахов А. И. Коррозия и основы гальваностегии. – М.: Химия, 1987 -86 с.
143. Садаков Г.А. Гальванопластика. – М.: Машиностроение, 1987 – 146 с.

144. Садаков Г.А. Технология гальванопластики. Справочное пособие. – М.:Машиностроение, 1979 – 156 с.
145. Ямпольский А М. Гальванические покрытия. – Л.: Машиностроение,1978 – 68 с.
146. Ямпольский А М. Электролитическое осаждение благородных и редкихметаллов. – Л.: Машиностроение, 1977 – 87 с.
147. Ямпольский А М. Меднение и никелирование. – Л.: Машиностроение,1977 – 98 с.
148. Прикладная электрохимия. Под ред. А. П. Томилова – М.: Химия, 1984– 465 с.
149. Практикум по прикладной электрохимии. Под ред. П.М. Вячеславова. –Л.: Химия , 1980 – 156 с.
150. Практикум по прикладной электрохимии. Под ред. В.Н. Кудрявцева. –Л.: Химия , 1990 – 163 с.
151. Варыпаев В. И., Максимова И.И. Электролиты в прикладной электрохимии. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1990 – 45 с.
152. Богомолова, Н. А. Металлография и общая технология металлов [Текст] / Н. А. Богомолова, Л. К. Гордиенко. - М.: Высш. шк., 1983. - 270 с.
153. Богомолова, Н. А. Практическая металлография [Текст] / Н. А. Богомолова. - М.: Высш. шк., 1983. - 78 с.
154. Харитонов Л.Г. Определение микротвердости. - М.: Металлургия, 1967. -45 с.
155. ГОСТ 9450 – 76 Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников (СТ СЭВ 1195 - 78).
156. Комбалов, В, С. Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ [Текст]. - М.: Наука, 1974. - 110 с.
157. ГОСТ 9.302 – 88 Покрyтия металлические и неметаллические неорганические (методы контроля).
158. Энгель Л. Растровая электронная микроскопия / Энгель Л. – М.: Металлургия. – 1986. – 232 с.
159. Растровая и электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ: В 2-х книгах. Книга 2. Пер. с англ./ Гоулдстейн Дж., Ньюбери Д., Эчлин П. и др. – М.: Мир, 1984. – 384с.

160. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
161. Эпельфельд А.В. Микродуговое оксидирование // Ресурсо-, энергосберегающие и наукоемкие технологии в машино- и приборостроении. Нальчик, 1991. - С.47-48.
162. Автомобили УАЗ: Техническое обслуживание и ремонт. – М.: Транспорт, 2002. – 336 с.
163. Карагодин, В.И. Ремонт автомобилей и двигателей.: учеб.пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин. – 6-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 496 с.
164. Надежность и ремонт машин / Под ред. В.В.Курчаткина. – М.: Колос, 2000. – 776с.
165. Попов, В.Н. Повышение долговечности сельскохозяйственной техники: Дис...д-ра.техн. наук. - М., 1997. - 401 с.
166. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: ГОСНИТИ, 1981. -4с.
167. Лоза, Г.М. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / Под.общ. рук. Г.М.Лозы. – М.: МСХ, 1980. 116с.
168. Иванов Л.А. Теплонапряжённость и эксплуатационная надёжность цилиндропоршневой группы судового дизеля. Мурманск, Мурманское книжное издательство, 270 с., 1974.
169. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М., «Энергия», 1977. - 344 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	2
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	3
1.1 Анализ способов изменения поршней для повышения технико-эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания.....	3
1.2 Микродуговое окислирование днищ поршней как способ повышения технико-эксплуатационных Показателей двигателей внутреннего сгорания.....	10
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНИКО-ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ДВС МИКРОДУГОВЫМ ОКСИДИРОВАНИЕМ ДНИЩ ПОРШНЕЙ.....	16
2.1 Теория формирования окисидной пленки на днище поршней.....	16
2.2 Влияние толщины окислированного слоя на теплонпряженность поршня.....	21
2.3 Теоретическое обоснование влияния режимов микродугового окислирования на толщину и пористость окислированного слоя днища поршня.....	29
2.4 Теоретическое обоснование влияния окислирования днищ поршней на технико-эксплуатационные показатели двигателя.....	35
Выводы.....	47
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	48
3.1 Программа экспериментальных исследований.....	48
3.2 Методика микродугового окислирования поршней....	48
3.3 Методика лабораторных исследований покрытия днища поршня.....	49
3.3.1 Методика определения микротвердости покрытия днища поршня.....	49

3.3.2	Методика определения пористости, защитных и функциональных свойств оксидированного покрытия днища поршня.....	51
3.3.3	Методика определения теплонапряженности оксидированного днища поршня.....	52
3.3.4	Методика определения структуры и элементного состава оксидированного образца.....	53
3.4	Методика стендовых исследований двигателя оснащённого оксидированными поршнями.....	54
3.4.1	Оборудование и приборное обеспечение.....	54
3.4.2	Методика стендовых исследований бензинового двигателя, оснащённого типовым и оксидированным поршнями.....	58
3.5	Методика эксплуатационных исследований автомобилей, оснащённых двигателями с типовыми и оксидированными поршнями.....	59
	Выводы.....	62
4	<b>РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ.....</b>	<b>63</b>
4.1	Результаты исследований влияния режимов микродугового оксидирования на формирование оксидированного слоя на днище поршня.....	63
4.2	Результаты лабораторных исследований оксидированного слоя днища поршня.....	69
4.2.1	Результаты исследования толщины оксидированного слоя.....	69
4.2.2	Результаты исследования микротвердости оксидированного слоя днища поршня.....	69
4.2.3	Результаты исследования теплонапряженности поршня с оксидированным днищем.....	70
4.2.4	Результаты исследования пористости оксидированного слоя днища поршня.....	72
4.2.5	Результаты исследований структуры и элементного состава оксидированного слоя днища поршня.....	73

4.3	Результаты сравнительных моторных исследований двигателей оснащенных типовыми поршнями и с оксидированными днищами.....	76
4.4	Результаты сравнительных эксплуатационных исследований автомобилей оснащенных двигателями с типовыми и с оксидированными днищами поршнями.....	80
	Выводы.....	82
5	ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЕЙ УАЗ-3303 С ДВИГАТЕЛЯМИ ОСНАЩЕННЫМИ ПОРШНЯМИ С ОКСИДИРОВАННЫМИ ДНИЩАМИ.....	84
	Выводы.....	90
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	91
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	93



**Глущенко Андрей Анатольевич**

**Хохлов Алексей Леонидович**

**Повышение технико-эксплуатационных показателей  
ДВС методом микродугового оксидирования днищ  
поршней**

Монография

Директор Издательского центра *Т.В. Филипова*  
Редактирование, подготовка оригинал-макета *Е.П. Мамаевой*  
Оформление обложки *Н.В. Пеньковой*

Подписано в печать    Формат 60х84/16  
Гарнитура Times New Roman. Усл. печ. л. 7,3  
Тираж 50 экз. Заказ №

Оригинал-макет подготовлен в Издательском центре  
Ульяновского государственного университета  
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42

Отпечатано с оригинал-макета в Издательском центре  
Ульяновского государственного университета  
432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, 42