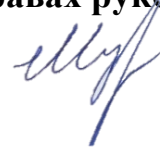


На правах рукописи



МУСИН Нияз Хамитович

ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ И СНИЖЕНИЕ
МЕХАНИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
ПОСРЕДСТВОМ ИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И МИКРОДУГОВОГО
ОКСИДИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРА

Специальность 05.04.02 – Тепловые двигатели

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Челябинск 2019

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» на кафедре «Двигателей внутреннего сгорания».

Научный руководитель Дударева Н. Ю. – кандидат технических наук, доцент ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Официальный оппонент: Неговора А. В. – доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО Башкирский государственный аграрный университет

Дойкин А. А. – кандидат технических наук, доцент ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Ведущая организация ФГБОУ ВО «Вятская государственная сельскохозяйственная академия»

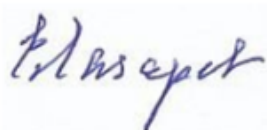
Защита состоится «15» мая 2019 г., в 13:00 на заседании диссертационного совета Д 212.298.09 при ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)» по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 76. Тел/факс: (351) 267-91-23, E-mail: D212.98.09@mail.ru.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета и на его официальном сайте <http://susu.ru/>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор



Лазарев Е.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Совершенствование двигателей внутреннего сгорания (ДВС) ведется в направлении повышения их мощности, надёжности и долговечности, уменьшения массы и габаритов. Растут давление в камере сгорания, число оборотов коленчатого вала, удельная мощность на единицу массы двигателя. В результате растут механические и тепловые нагрузки на детали ДВС. Применение альтернативных видов топлив сопровождается изменением химической активности среды в камере сгорания и, как следствие, увеличением коррозии поверхностей деталей. Все это предъявляет высокие требования к компонентам камеры сгорания двигателя.

Несмотря на то, что алюминиевые блоки цилиндров используются в двигателестроении с середины 1950-х годов и, на сегодняшний день, более половины производимых в мире ДВС имеют алюминиевый блок цилиндров, 90% из них выпускается с износостойкими вставками из других материалов для увеличения ресурса рабочей поверхности цилиндра. При этом ведущие производители проводят исследования с целью исключения таких вставок из конструкции ДВС. В современном двигателестроении для повышения ресурса поверхности зеркала алюминиевого цилиндра широко используются различные упрочняющие покрытия, способы поверхностного и объемного легирования. Но эти способы имеют определенные недостатки: покрытия отслаиваются при высоких температурах и больших механических нагрузках, поверхности разрушаются в результате агрессивного воздействия топлив, дороги в применении, имеют большой объем брака при изготовлении и т.д. Все это делает актуальной задачу обеспечения работоспособности цилиндров из алюминиевых сплавов.

Степень разработанности темы. Большой вклад в развитие и совершенствование технологии МДО внесли J. Curran, A. В. Эпельфельд, Г. А. Марков, В. А. Фёдоров, В. И. Черненко, A. Matthews, В. Н. Малышев, А. Н. Батищев, А. Н. Новиков, И. В. Суминов, П. С. Гордиенко, Л. А. Снежко, A. Leyland, P. Wasekar, U. Malayoglu и др. Исследования применения технологии МДО в области двигателестроения, в том числе для повышения надежности деталей ЦПГ, описаны в работах Хохлова А.Л., Белозерова В.В., Криштала М.М., Ивашина П.В., Павлова Д.А., Коломейченко А.В., Дударевой Н.Ю., Шпаковского В.В., Марченко А.П., Уханова Д.А., Лиханова В.А., Скрябина М.Л., A. McGilvray, P. Wang, M.

Priest, K. Mistry, S. Shrestha и ряда других ученых. Применение технологии искрового упрочнения рассмотрено в работах Н. Ю. Дударевой.

Цель и задачи исследования. Целью исследования является повышение износостойкости рабочей поверхности цилиндра из алюминиевого сплава и снижение механических потерь двигателя методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования.

В соответствии с целью формулировались задачи исследования:

1. Обоснование режимов искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава для обеспечения его износостойкости.

2. Исследование влияния искрового упрочнения на коэффициент трения, микротвердость и предел прочности покрытия, определяющие надежность конструкции двигателя.

3. Разработка методики и проведение сравнительных моторных испытаний для оценки влияния упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования на износостойкость цилиндра и механические потери ДВС.

4. Оценка влияния упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра из алюминиевого сплава методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования на тепловой режим деталей цилиндропоршневой группы и головки цилиндра ДВС.

Научная новизна.

Перечисленные ниже результаты обладают научной новизной:

1. Экспериментально определено влияние искрового упрочнения на износостойкость рабочей поверхности гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания, установлены коэффициент трения и износостойкость покрытия, полученного методом искрового упрочнения.

2. Определено влияние свойств покрытий на рабочей поверхности гильзы цилиндра ДВС, формируемых методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования на тепловой режим деталей цилиндропоршневой группы и головки цилиндра ДВС при различных условиях охлаждения.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты исследования внедрены в ООО «Двигатели для авиации», Сколково, (рекомендации по повышению износостойкости деталей авиационного поршневого двигателя ДДА-120); в учебный процесс ФГБОУ ВО «УГАТУ»,

г. Уфа, в рамках дисциплин «Исследование в энергетическом машиностроении» и «Конструирование двигателей» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Энергетическое машиностроение».

Результаты исследований имеют практическую ценность, а именно позволяют:

1. Повысить ресурс ДВС путем использования гильз цилиндров из алюминиевого сплава, обработанных методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования.

2. Проектировать узлы трения ДВС и других энергетических машин с заданными переменными свойствами поверхности как функции координаты поверхности.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы следующие методы исследования:

- теоретические исследования с использованием основных положений теории двигателей внутреннего сгорания, теплопередачи и триботехники;
- экспериментальные исследования на лабораторных образцах;
- экспериментальные исследования на малоразмерных поршневых ДВС.

Исследование носило расчетно-экспериментальный характер.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Износостойкость поверхности, формируемой искровым упрочнением, характеризуемая скоростью изнашивания и линейным износом, увеличивается в несколько раз и превышает износостойкость стальной гильзы цилиндра ДВС.

2. Искровое упрочнение и микродуговое оксидирование рабочей поверхности цилиндра ДВС меняет характеристики тепловых потоков через детали камеры сгорания, снижая среднюю температуру гильзы цилиндра.

3. Гильзы цилиндров из алюминиевых сплавов с покрытием рабочей поверхности, сформированным методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования, позволяют увеличить ресурс ДВС.

Достоверность научных положений, результатов и выводов, содержащихся в диссертационной работе, обоснована:

- применением признанных научных положений теории поршневых двигателей;
- применением современных апробированных средств и методов

экспериментального исследования и моделирования поршневых двигателей;

- соответствием результатов экспериментальных исследований по определению коэффициентов трения и износов рабочих поверхностей цилиндров данным, полученным зарубежными и российскими исследователями;

- соответствием результатов теоретического исследования теплового состояния деталей двигателя с упрочненной рабочей поверхностью цилиндра, экспериментальным данным зарубежных и российских исследователей.

Апробация работы. Результаты работы докладывались и обсуждались на V, VI и VII-й всероссийской зимней школе-семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы науки и техники» (г. Уфа, 2010, 2011, 2012), на всероссийских молодежных научных конференциях «Мавлютовские чтения» (г. Уфа, 2007, 2009, 2010, 2011, 2013, 2014), на международной молодежной научной конференции «XXXVI Гагаринские чтения» (г. Москва, 2010) и «XIII Королевские чтения» (г. Самара, 2015), на международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (г. Челябинск, 2017), на международной научно-технической конференции «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2018), на международной научно-технической конференции «Двигатель-2018» (г. Москва, 2018).

Личный вклад соискателя. Все основные идеи работы сформулированы лично автором. Материалы диссертации основаны на исследованиях автора в период с 2009 по 2018 годы.

Некоторые положения, методики и результаты работы получены и апробированы в ходе выполнения проектов, реализуемых в рамках: гранта по проекту федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» по теме «Конструкционные наноструктурные покрытия для повышения надежности деталей в объектах машиностроения» (соглашение №14.В37.21.1659, 2012–2013 гг.); гранта РФФИ 17-48-090083 «Разработка наноконпозиционных ионноплазменных покрытий для повышения износостойкости и коррозионной стойкости элементов конструкций при проектировании и производстве в авиапромышленном комплексе региона газотурбинных и поршневых

двигателей авиационного и наземного применения» (2017–2019 гг); ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», тема проекта: «Исследование теплофизических свойств наноструктурных композиционных покрытий и разработка технологии и образцов оборудования для создания теплостойких поршней двигателей транспортных средств» (соглашение №14.574.21.0161 от 26.09.2017, 2017–2019 гг).

Публикации. Основное содержание диссертации опубликовано в 11 печатных работах, в том числе в 3 публикациях в центральных рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, и в 1 публикации в журналах, входящих в базу данных Scopus.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, приложения и списка литературы. Содержит 158 страниц машинописного текста, включающего 77 рисунков, 43 таблицы и библиографический список из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность работы, связанной с исследованием влияния искрового упрочнения и микродугового окисления на износостойкость рабочей поверхности цилиндра из алюминиевого сплава и механические потери ДВС. Формулируются цель работы, основные задачи исследования, методы их решения, приводятся выносимые на защиту положения и краткое содержание работы.

В первой главе проведен анализ работ, связанных с темой научного исследования. Рассмотрены и проанализированы научные труды, посвященные изучению факторов, оказывающих влияние на износ рабочей поверхности цилиндров. Проведен обзор и анализ конструктивных решений алюминиевых блоков цилиндров, а также современных способов повышения ресурса рабочей поверхности блока цилиндров (гильз) из сплавов алюминия.

В современном машиностроении известно и применяется большое количество способов повышения ресурса трущихся поверхностей. В общем случае они делятся на три группы: конструкционные, трибологические и технологические. В свою очередь технологические способы повышения износостойкости рабочей поверхности алюминиевых цилиндров подразделяются на три направления: изменение свойств материала в объеме

или на поверхности детали и применение износостойких покрытий или специальных вставок. Перспективным направлением являются методы повышения износостойкости, изменяющие свойства рабочей поверхности детали, когда обработке подвергаются участки непосредственно участвующие в процессе трения. К ним, в частности, относятся рассматриваемые в работе методы микродугового оксидирования и искрового упрочнения.

Микродуговое оксидирование (МДО) и искровое упрочнение (ИУ) – электрохимические процессы модификации (окисления) поверхности вентильных металлов и их сплавов для получения оксидных слоев (покрытий). Основное отличие этих методов друг от друга заключается в том, что процесс МДО осуществляется в электролитной плазме, а ИУ – под действием искрового разряда в газовой среде.

При МДО алюминиевых сплавов формируется многослойное покрытие, состоящее из верхнего рыхлого слоя, преимущественно состоящего из муллита, рабочего слоя толщиной 10...300 мкм и микротвердостью до 25...30 ГПа, а также переходного слоя между основным металлом и оксидом толщиной 0,01...0,1 мкм. В связи с тем, что верхний слой обладает низкой адгезией и микротвердостью, после МДО он должен быть удален с поверхности детали. Эксплуатационные параметры покрытия определяются свойствами рабочего слоя.

Метод искрового упрочнения разработан на кафедре Двигателей внутреннего сгорания УГАТУ как развитие метода МДО. В отличие от МДО процесс обработки происходит в газовой среде. При импульсном воздействии искрового разряда поверхность заготовки подвергается воздействию высоких температур, ионизированных частиц и ударных волн. В результате этого формируется покрытие толщиной до 300 мкм и микротвердостью более 24 ГПа, состоящее, в зависимости от состава газовой среды, из оксидов или нитридов материала подложки.

В сравнении с МДО искровое упрочнение имеет ряд преимуществ. Во-первых, покрытие растет вглубь материала основы, при этом не формируется верхний рыхлый слой, что исключает технологические операции по его удалению. Во-вторых, по аналогии с современными подходами обеспечения износостойкости алюминиевых гильз цилиндров (ГЦ) ДВС, ИУ позволяет формировать дискретное покрытие, когда на поверхности детали из сплава алюминия создаются вкрапления из твердого

оксида алюминия, при этом, варьируя параметрами дискретности, можно гибко влиять на процессы трения в сопряжениях ГЦ – компрессионное кольцо и ГЦ – юбка поршня. В-третьих, при ИУ обработка происходит не по всей поверхности детали, которая контактирует с электролитом, что позволяет обрабатывать локальные участки поверхности (например, канавки в поршне) без специальных защитных мероприятий. В-четвертых, отсутствие электролита не требует операций по его подготовке и утилизации. В-пятых, в процессе МДО некоторая часть энергии расходуется на нагрев электролита, что приводит к необходимости организации охлаждения и, как результат, к увеличению энергопотребления.

В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе недостаточно полно отражены исследования, направленные на изучение возможности применения метода ИУ для повышения надежности деталей цилиндропоршневой группы ДВС. Ряд работ посвящены исследованиям повышения износостойкости поршней и поршневых колец, в то время как повышение износостойкости рабочей поверхности цилиндра или гильзы цилиндра ДВС нуждается в дополнительных исследованиях. Исходя из свойств покрытий, формируемых при МДО и ИУ, а также принимая во внимание схожесть этих двух технологий, сформулирована гипотеза исследования: модификация рабочей поверхности гильзы цилиндра из сплава алюминия методом искрового упрочнения и микродугового оксидирования позволяет повысить ее износостойкость без негативного изменения теплового режима деталей ЦПГ, при этом возможно снижение механических потерь двигателя.

Во второй главе дается описание методик исследования влияния искрового упрочнения на свойства алюминиевых сплавов. Приведены результаты экспериментов по исследованию влияния искрового упрочнения на микротвердость и предел прочности алюминиевого сплава, по поиску оптимальных с точки зрения повышения износостойкости параметров искрового упрочнения, а также сравнительные исследования коэффициента трения покрытия, формируемого при МДО и ИУ.

Если в случае с МДО накоплен большой объем данных о влиянии технологических режимов на износостойкость, то для ИУ такие данные отсутствовали. Спланирован и проведен дробно-факторный эксперимент для поиска и обоснования оптимального с точки зрения износостойкости режима ИУ. В качестве факторов эксперимента использовались емкость

блока конденсаторов, индуктивность катушки и величина зазора между электродом и обрабатываемой поверхностью. Значения факторов выбраны исходя из имеющихся в распоряжении автора результатов проведенных ранее однофакторных экспериментов.

Испытания на износостойкость проводились на машине трения, разработанной в НПО «ХТЦ УАИ», реализующей трение по схеме «пересекающиеся цилиндры». Использовалось полусинтетическое моторное масло 10W-40. Экспериментально установлено, что износ и скорость изнашивания образцов с ИУ значительно снизились. Наименьшее значение скорости изнашивания составило $52,79 \cdot 10^{-6}$ мм³/с, в то время как у неупрочненного образца скорость изнашивания равна $1369,71 \cdot 10^{-6}$ мм³/с. Искровое упрочнение поверхности образцов привело к увеличению износостойкости в 10...26 раз. Наименьшее значение скорости изнашивания получено при минимальных значениях емкости блока конденсаторов, индуктивности и межэлектродного зазора.

Микротвердость H_{μ} поверхности при ИУ возросла на всех режимах обработки. Максимальная микротвердость получена на режиме с минимальными значениями ёмкости блока конденсаторов и индуктивности и составляет 4,45 ГПа, что в 4,8 раза выше, чем у исходного материала (0,92 ГПа). Минимальная микротвердость получена на режиме с максимальными значениями выбранных факторов и составляет 1,89 ГПа, что в 2 раза выше, чем у образца без ИУ. Также экспериментально установлено, что ИУ не оказывает негативного влияния на прочность образцов из алюминиевого сплава.

Существенным фактором, оказывающим влияние на работу ДВС, в частности, на механические потери, является коэффициент трения. Было спланировано и проведено исследование для определения влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования алюминиевых сплавов на коэффициент трения. Использовались три образца из сплава АК4-1 ГОСТ 12592-67, один из которых обрабатывался методом ИУ, второй – МДО, а третий – не подвергался упрочнению. Также испытывался четвертый образец из стали 40Х. Испытания проводились на трибометре фирмы Nanovea в режиме сухого трения. Результаты эксперимента показали, что коэффициенты трения поверхностей, формируемых при ИУ и МДО, практически идентичны и равны $0,85 \pm 0,17$ и $0,79 \pm 0,14$ соответственно. Коэффициент трения по стали 40Х составил $0,72 \pm 0,1$.

В третьей главе описывается методика проведения моторных испытаний исследуемых гильз цилиндров. Приведены результаты экспериментов, показывающие влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности алюминиевой гильзы цилиндра на его износостойкость и механические потери двигателя.

В качестве объекта исследования выступал авиамодельный двигатель ASPFS80 AR. Двигатель четырехтактный одноцилиндровый, карбюраторный, рабочим объемом $12,8 \text{ см}^3$, с верхним расположением клапанов, принудительным воспламенением от калильной свечи.

Моторные исследования включали в себя следующие этапы:

1. Испытание на износ алюминиевой ГЦ с ИУ и МДО-покрытием, а также штатной стальной ГЦ в условиях винтового стенда.
2. Определение характеристик воздушных винтов на стенде СТМ-3000 и определение эффективной мощности двигателя.
3. Определение механических потерь ДВС с исследуемыми ГЦ методом прокрутки на стенде СТМ-3000.

На Рисунке 1 показан двигатель на винтовом стенде, на Рисунке 2 – двигатель на стенде СТМ-3000 (а) и воздушный винт на том же стенде (б).

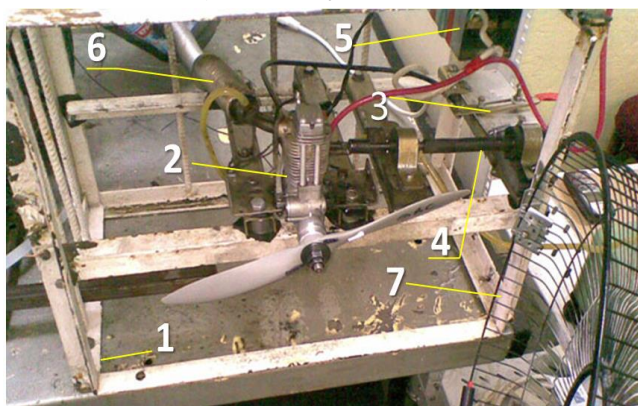


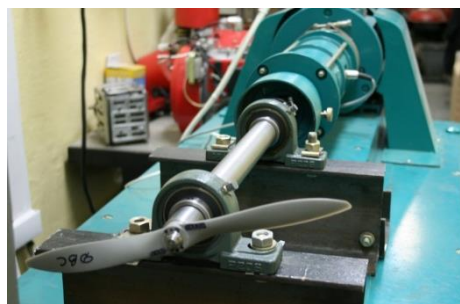
Рисунок 1 – Винтовой испытательный стенд: 1 – рама, 2 – двигатель, 3 – управление дросселем, 4 – управление топливным жиклером, 5 – система зажигания, 6 – система отвода выхлопных газов, 7 – решетка винта

На Рисунке 3 показаны исследуемые ГЦ. Штатная ГЦ изготовлена из стали марки 40Х ГОСТ 4543-71. Экспериментальные ГЦ изготовлены из алюминиевого сплава АК4-1 ГОСТ 4784-97.

Искровое упрочнение рабочей поверхности цилиндра производилось горизонтальными полосами высотой $\sim 2 \text{ мм}$ и с зазором в 2 мм между ними. Время обработки каждой полосы – 40 часов . Емкость конденсаторов составляла $0,22 \text{ нФ}$, индуктивность вторичной цепи катушки зажигания – $0,28 \text{ Гн}$, межэлектродный зазор – 1 мм .



а



б

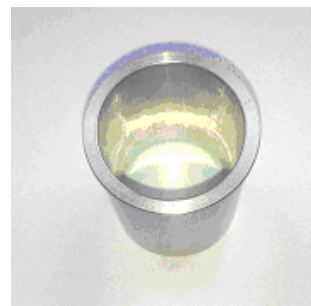
Рисунок 2 – Стенд СТМ-3000: а) двигатель на стенде, б) воздушный винт на стенде



а



б



в

Рисунок 3 – Исследуемые ГЦ: а) ГЦ с МДО-покрытием, б) ГЦ с ИУ-покрытием, в) штатная ГЦ

Испытание базовой ГЦ, ГЦ с МДО и ИУ-покрытием состояло из пяти этапов продолжительностью 10 часов каждый (таблица 1). После каждого этапа производился разбор двигателя, контроль массы и геометрических размеров поршня и ГЦ в соответствии с Рисунком 4. Измерение геометрических размеров гильзы цилиндра и поршня проводилось по 6 и 5 сечениям соответственно в двух перпендикулярных плоскостях. Сечения 1, 2 и 3 лежат на плоскости, перпендикулярной оси коленчатого вала двигателя. Перед началом испытаний проводилась обкатка двигателя при частоте вращения 5000 мин^{-1} .

На Рисунке 5 показаны графики массового износа ГЦ (а) и поршней (б) в процессе испытаний. Масса штатной ГЦ после 50,5 часов работы уменьшилась на 0,039 г. ГЦ с МДО-покрытием потеряла 0,019 г, что в 2 раза меньше, чем у стальной ГЦ. Массовый износ ГЦ, обработанной искровым упрочнением, составил 0,024 г, что в 1,6 раза меньше, чем у стальной ГЦ. Важно отметить, что искровым упрочнением обрабатывалась не вся рабочая поверхность ГЦ, а покрытие имело дискретный характер. Итоговый массовый износ поршней отличается незначительно.

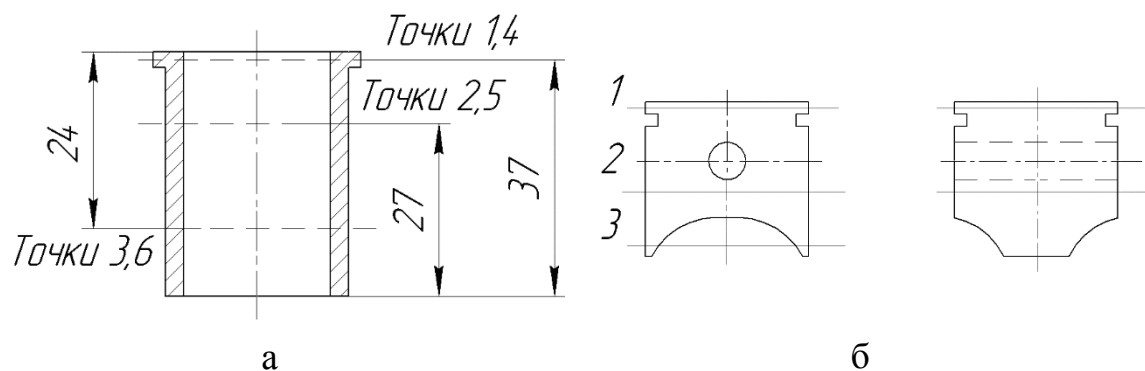


Рисунок 4 – Расположение контрольных сечений ГЦ (а) и поршня (б)

Таблица 1 Этапы испытаний

Время, ч	Состав топлива			Размер винта
	Этиловый спирт, %	Касторовое масло, %	Ацетон, г/л топлива	
0...10	80	20	30	13x7
10...20	80	20	30	15x10
20...30	86	14	30	14x10
30...40	92	8	30	12x7
40...50	92	8	30	12x7

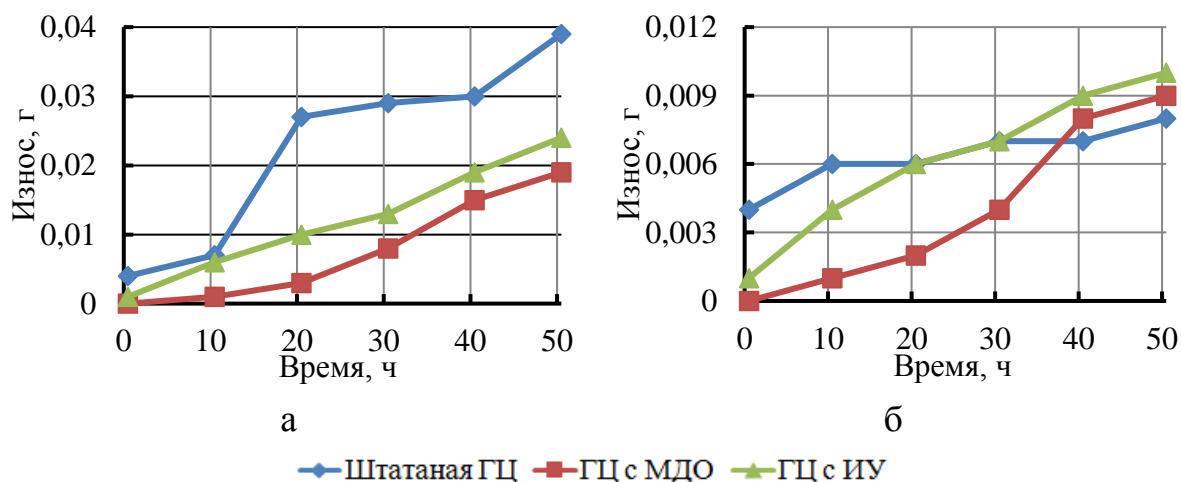


Рисунок 5 – Массовый износ исследуемых ГЦ (а) и поршней (б)

На Рисунке 6 показано изменение износа ГЦ в каждом контролируемом сечении по времени. Сечения 1 и 4 находятся в зоне ВМТ, где действуют максимальные температура и давление. Износ в сечении 1 составил: для штатной ГЦ 0,089 мм, для ГЦ с МДО 0,023 мм, для ГЦ с ИУ 0,038 мм. Таким образом, износ алюминиевой ГЦ с МДО-покрытием в 3,87 раза меньше, чем износ штатной ГЦ из стали марки 40Х. Износ ГЦ с ИУ-покрытием в 2,34 раза ниже, чем у штатной ГЦ.

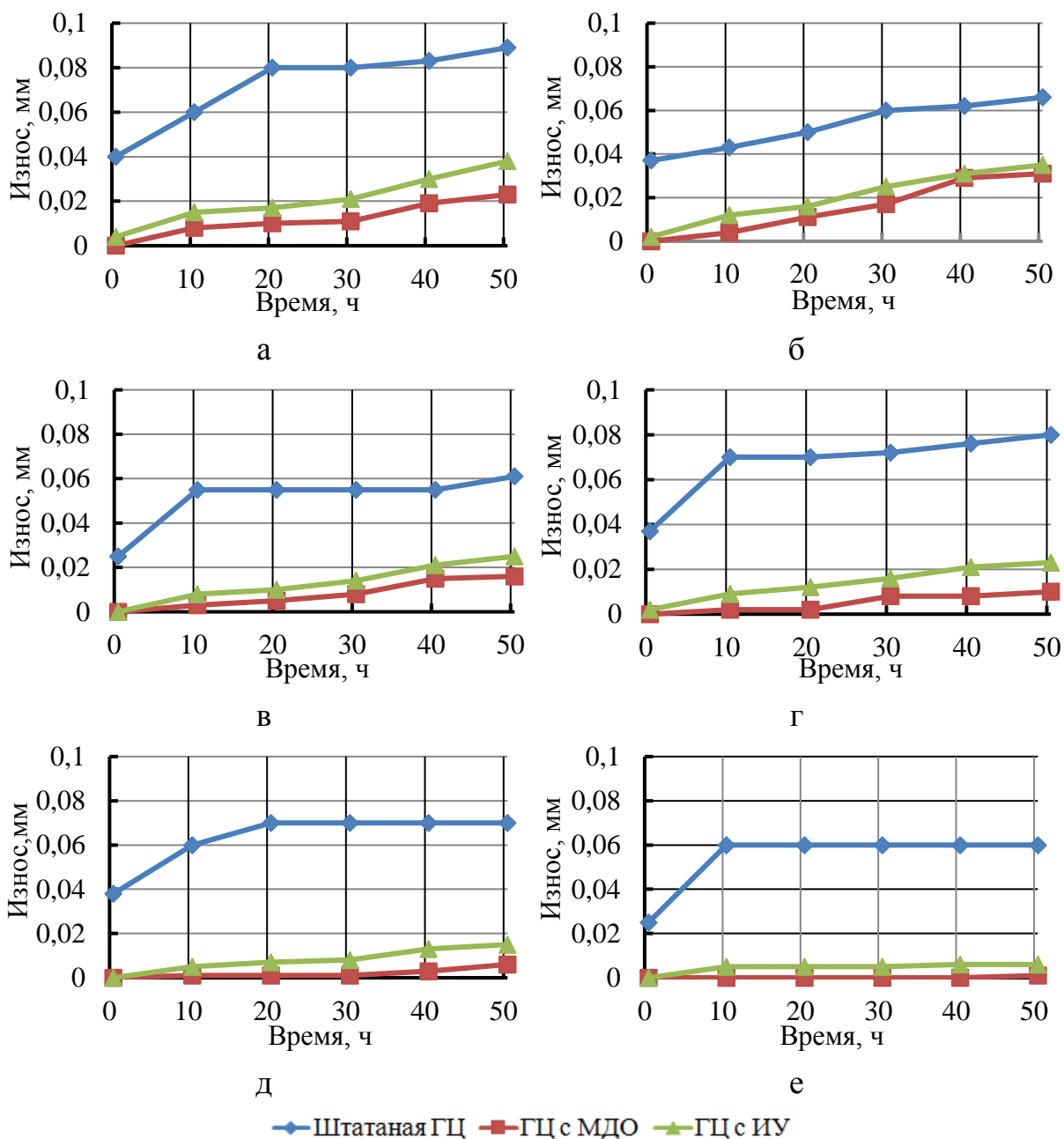


Рисунок 6 – Линейный износ исследуемых ГЦ, где: а) в точке 1, б) в точке 2, в) в точке 3, г) в точке 4, д) в точке 5, е) в точке 6

Влияние модификации рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели ДВС обусловлено двумя факторами: механическими потерями и теплофизическими свойствами упрочненного слоя. Механические потери, зависящие от поверхности ГЦ, определяются антифрикционными свойствами поверхности, которые зависят не только от свойств материала, но и от конструктивных особенностей, качества поверхности и точности изготовления деталей, условий смазывания и т.д.

На Рисунке 7 показана зависимость мощности механических потерь

$N_{мех}$ в диапазоне частот вращения 3000...6000 мин⁻¹. Повышенные механические потери двигателя с ИУ-покрытием объясняются характером нанесения покрытия горизонтальными полосами, когда поверхности с покрытием чередуются с поверхностью исходного сплава алюминия.

Контртело, в роли которого выступает поршень, также изготовлено из сплава алюминия. Коэффициенты трения при отсутствии смазки между поверхностями «алюминий – алюминий» и «сталь – алюминий» равны 0,94 и 0,64 соответственно. В дополнении к увеличению коэффициента трения в процессе наработки алюминиевые поверхности изнашиваются быстрее, чем поверхности с ИУ-покрытием, что приводит к возникновению волнистости на рабочей поверхности гильзы и, как результат, к увеличению механических потерь. Результаты безмоторных исследований, приведенные во второй главе, показывают, что покрытия, формируемые при МДО и ИУ, имеют одинаковые коэффициенты трения. Таким образом, при оптимизации процесса искрового упрочнения могут быть получены результаты, аналогичные результатам для МДО-покрытия.

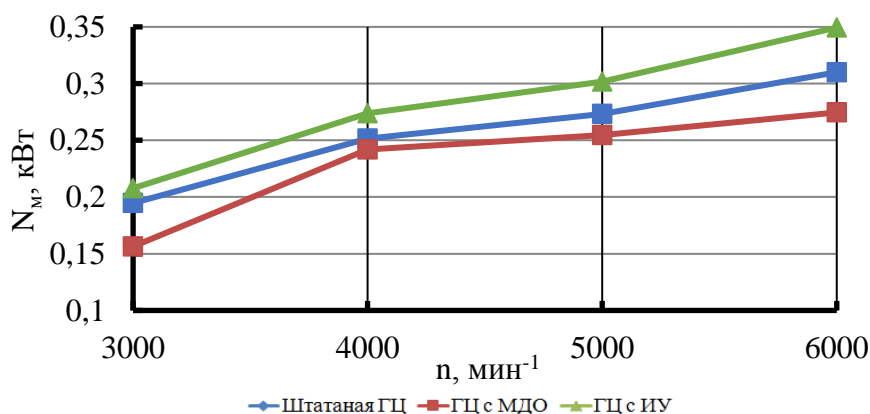


Рисунок 7 – Мощность механических потерь $N_{мех}$

На Рисунке 8 показаны внешние скоростные характеристики (ВСХ) двигателя после обкатки 30 мин (а) и после 50,5 часов наработки на ресурс (б). Характеристики двигателя строились следующим образом. На стенде СТМ-3000 снимались характеристики воздушных винтов. Далее, измеряя частоту вращения коленчатого вала двигателя, по полученным характеристикам винтов определялась эффективная мощность N_e .

Наилучшие характеристики на всем диапазоне частот показывает двигатель, оснащенный ГЦ с рабочей поверхностью, обработанной МДО. После 50 часов испытаний на износостойкость максимальное значение эффективной мощности N_e достигает 0,8 кВт при 9550 мин⁻¹. Максимальное

значение N_e при работе со штатной и ГЦ с ИУ-покрытием составляет 0,63 кВт при 8790 мин⁻¹ и 0,6 кВт при 8600 мин⁻¹ соответственно.

В процессе наработки эффективная мощность двигателя в комплектации штатной гильзой снизилась на 10-23% в диапазоне частот вращения 6500...9000 мин⁻¹ (Рисунок 9). Износ ГЦ привел к тому, что, при максимальной нагрузке (воздушный винт 15x10), двигатель, оснащенный штатной гильзой, не смог выйти на установившийся режим ВСХ. Эффективная мощность двигателя, оснащенного гильзой с ИУ-покрытием, в процессе наработки возросла на 11-26% в диапазоне частот вращения 6000...8500 мин⁻¹, что подтверждает высокую износостойкость покрытия.

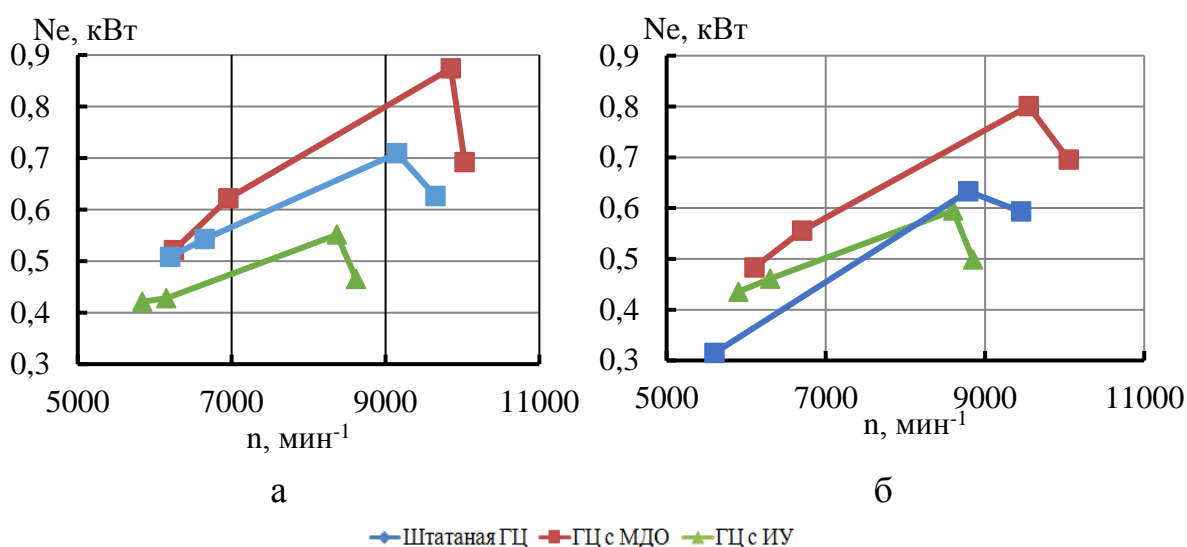


Рисунок 8 – ВСХ после обкатки (а) и после наработки на ресурс (б)

С целью прогнозирования ресурса двигателя при работе с гильзами цилиндров с ИУ и МДО покрытием на основании результатов испытаний получены уравнения регрессии, описывающие зависимость скорости линейного изнашивания v_L рабочей поверхности гильз цилиндров в зоне ВМТ от частоты вращения n и среднего эффективного давления p_e . В результате для гильзы цилиндра с ИУ рабочей поверхности и с МДО-покрытием получены следующие уравнения регрессии:

$$v_{L \text{ ИУ}} = 6,201 \cdot 10^{-6} \cdot 1,001^n \cdot p_e^{7,799}, \quad (1)$$

$$v_{L \text{ МДО}} = 2,614 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0007^n \cdot p_e^{3,107}. \quad (2)$$

Приняв величину предельного линейного износа гильзы цилиндра, равной 0,09 мм, что соответствует максимальному линейному износу штатной гильзы цилиндра после 50 часов испытаний, произведена оценка прогнозируемого ресурса двигателя при различных условиях. Так, при

комплектации двигателя рекомендуемым воздушным винтом размером 13x7 при частоте вращения 9000 мин^{-1} прогнозируемый ресурс двигателя составляет 90 ч и 140 ч для гильз с ИУ и МДО покрытием соответственно, что превышает ресурс штатного двигателя в 1,8 и 2,8 раза.

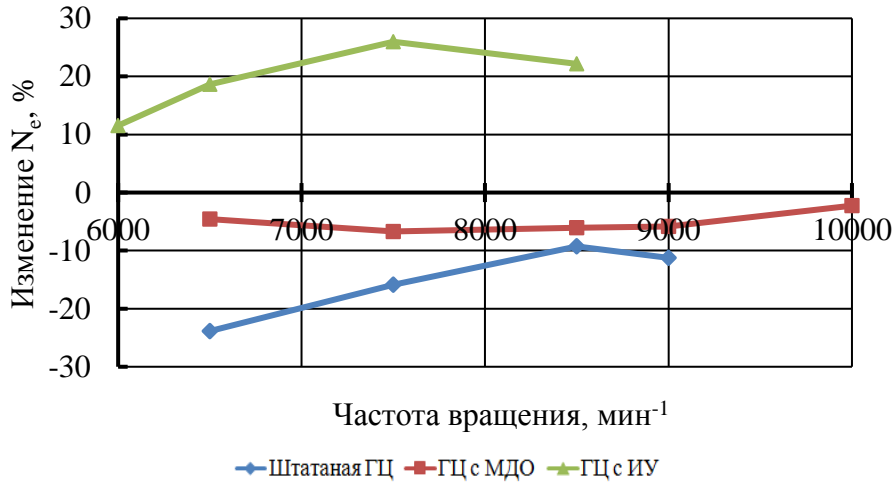


Рисунок 9 – Изменение эффективной мощности N_e при работе по ВСХ после 50 часов испытаний относительно мощности после обкатки

В четвертой главе приведено теоретическое исследование влияния покрытия, формируемого при МДО и ИУ на рабочей поверхности алюминиевой гильзы цилиндра, на температурный режим деталей ЦПГ двигателя. Коэффициент теплопроводности сплавов алюминия находится в диапазоне $130 \dots 220 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, сталей – $20 \dots 70 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В то же время коэффициент теплопроводности МДО-слоя по разным данным составляет от 0,08 до $30 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. В результате этого тепловые потоки через стенку ГЦ будут отличаться для различных материалов, что в свою очередь может сказаться на температуре деталей ЦПГ.

Оценка влияния покрытия на теплоперенос через стенку цилиндра сделана на основе расчета отношения тепловых потоков через стальную и алюминиевую ГЦ к ГЦ с покрытием. Плотности тепловых потоков были рассчитаны как для одно- и двуслойной цилиндрической стенки. Рассмотрены три цилиндра: из стали 40X и из алюминиевого сплава АК4-1 с покрытием и без него.

На Рисунке 10 показаны зависимости отношения плотности теплового потока через стенку стального цилиндра к потоку через стенку алюминиевого цилиндра с покрытием q_{cm}/q_{yn} в зависимости от толщины покрытия при значениях коэффициентов теплоотдачи $\alpha_1=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ и $\alpha_2=114 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Тепловые потоки через цилиндр из стали 40X в

зависимости от толщины стенки выше до 4% при выбранных условиях сравнения. Покрытие увеличивает термическое сопротивление стенок алюминиевого цилиндра, что приводит к снижению теплового потока. Кроме того, увеличение диаметра цилиндра при сохранении его толщины снижает теплозащитные свойства покрытия.

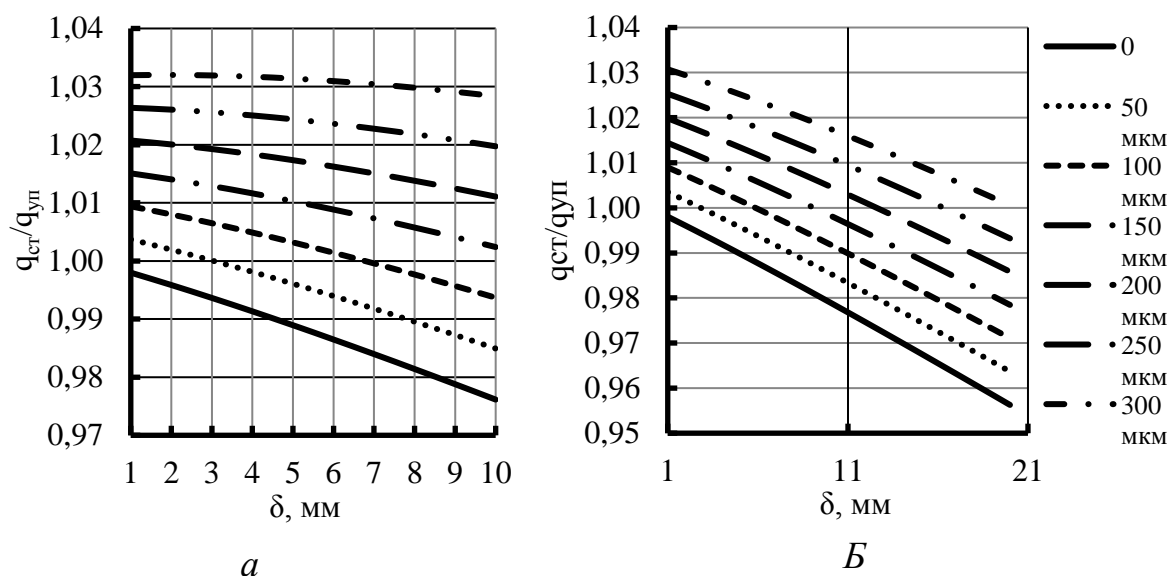


Рисунок 10 – Отношение плотностей тепловых потоков через стальной цилиндр к потоку через алюминиевый цилиндр с покрытием $q_{ст}/q_{ал}$ при внутреннем диаметре 26 мм (а) и 78 мм (б)

На Рисунке 11 показана зависимость отношения плотности теплового потока через стенку стального цилиндра к потоку через стенку с упрочненным слоем $q_{ст}/q_{уп}$ для покрытия толщиной 300 мкм при толщине стенки 5 мм в зависимости от коэффициента теплоотдачи α_1 и α_2 . Значения коэффициента теплоотдачи от горячих газов α_1 и от стенки цилиндра в окружающую среду α_2 оказывают существенное влияние на итоговый поток, и чем выше интенсивность теплообмена, тем значительнее проявляется влияние теплозащитных свойств упрочненного слоя.

Основываясь на полученных результатах, можно сделать вывод, что в зависимости от толщины упрочненного слоя, диаметра и толщины стенки цилиндра, а также от условий подвода теплоты и охлаждения, тепловой поток через алюминиевую ГЦ с УС может быть как выше, так и ниже, чем через аналогичную ГЦ из стали. При толщине модифицированного слоя 300 мкм термосопротивление алюминиевой ГЦ с УС может быть выше на 10% и более по сравнению со стальной ГЦ.

Изменение условий теплоотвода через стенку ГЦ должно оказывать

влияние на тепловое состояние других деталей ЦПГ. Для оценки влияния ГЦ с УС на температуры деталей ЦПГ было проведено численное моделирование в пакете Star CCM+. Целью численного расчета являлось сравнение теплового состояния деталей ЦПГ при использовании трех ГЦ: штатной, алюминиевой и алюминиевой с УС.

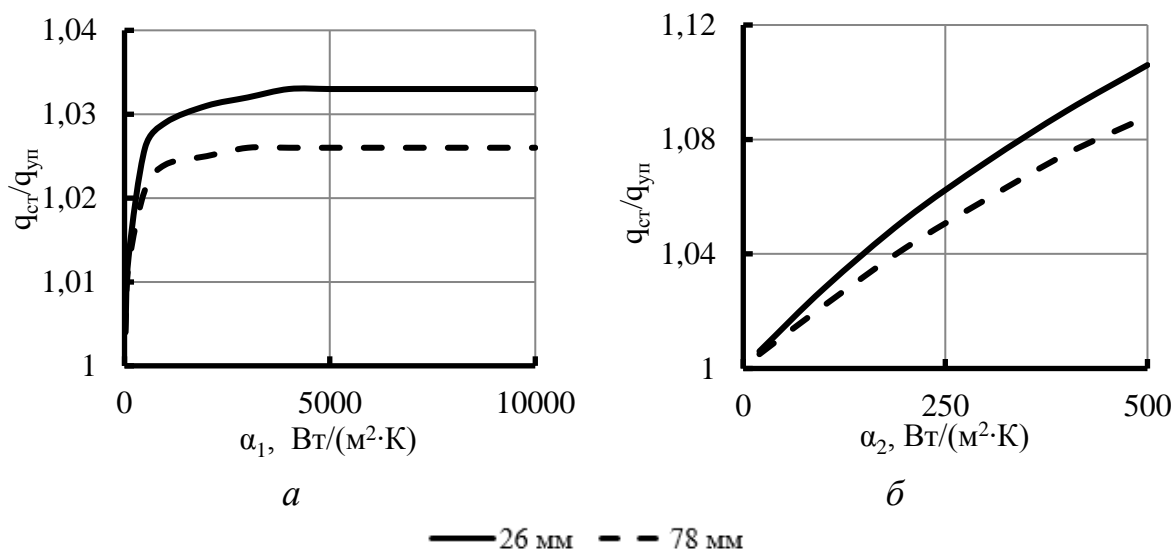


Рисунок 11 – Зависимость отношения тепловых потоков через стальной цилиндр к потоку через алюминиевый цилиндр с покрытием $q_{ст}/q_{уп}$ от коэффициентов теплоотдачи α_1 (а) и α_2 (б)

При работе двигателя на установившемся режиме изменение температуры гильзы и поршня в течение рабочего цикла незначительно и составляет единицы градусов нагреваемой поверхности с уменьшением в глубину детали, в связи с чем допустимо делать расчет в стационарной постановке. При проведении расчета сделаны следующие допущения:

- 1) локальные значения температуры газов и коэффициенты теплоотдачи в рабочей камере заменяются результирующими температурой $T_{г.рез}$ и коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{г.рез}$;
- 2) условия теплообмена на рабочей поверхности гильзы в зоне от верхней кромки ГЦ до верхней кромки поршня, на днище и периферии днища поршня определяются граничными условиями третьего рода и задаются с помощью температуры $T_{г.рез}$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha_{г.рез}$;
- 3) условия теплообмена между твердыми телами «идеальные».

Методика моделирования выглядела следующим образом:

- 1) моделирование работы двигателя на выбранном режиме в системе имитационного моделирования «Альбея» для получения параметров рабочего процесса.

2) вычисление значений $T_{г.pez}$ и $\alpha_{г.pez}$ исходя из данных, полученных на предыдущем шаге и определение граничных условий.

3) стационарный расчет в системе StarCCM+ для трех вариантов ГЦ и анализ полученных результатов.

Значения результирующих параметров по температуре и коэффициенту теплоотдачи составили: коэффициент теплоотдачи $\alpha_{г.pez}=308$ Вт/м²·К, температура газов $T_{г.pez}=1390$ К. Расчеты проводились для случаев достаточного и недостаточного охлаждения деталей ЦПГ (сценарии 1 и 2). В результате проведенных расчетов получены скалярные поля температур в деталях ЦПГ, возникающие при применении алюминиевой ГЦ, ГЦ с покрытием и стальной ГЦ при двух расчетных сценариях. На Рисунке 12 приведены температуры в перемычке между клапанами, а на рисунке 13 – поля температур в ГЦ (а) и в поршне (б) при расчете по сценарию 1.

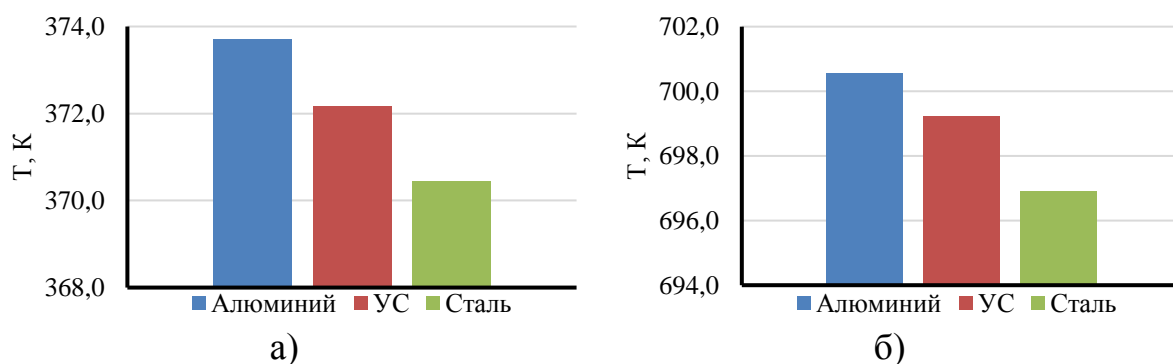


Рисунок 12 – Температура крышки цилиндра в перемычке между клапанами: а) расчет по сценарию 1, б) расчет по сценарию 2

Полученные результаты показывают, что средняя температура ГЦ с упрочненным слоем незначительно ниже, чем у алюминиевой ГЦ, в то время как стальная ГЦ имеет наибольшую среднюю температуру. Чем хуже охлаждение ГЦ, тем эта разница ниже. Средняя температура поршня при использовании ГЦ с УС в условиях достаточного охлаждения выше, чем при алюминиевой и стальной ГЦ. Однако с ухудшением охлаждения деталей ЦПГ, средняя температура поршня, работающего совместно с ГЦ с УС становится ниже, чем у других исследуемых ГЦ. Средняя температура крышки цилиндра в случае алюминиевой ГЦ всегда выше, чем у ГЦ с УС. Минимальная температура крышки цилиндра обеспечивается при использовании стальной ГЦ. Замена стальной ГЦ на алюминиевую с УС приводит к незначительному изменению температурных режимов деталей ЦПГ. Изменения средних температур деталей составляет 5...10 К.

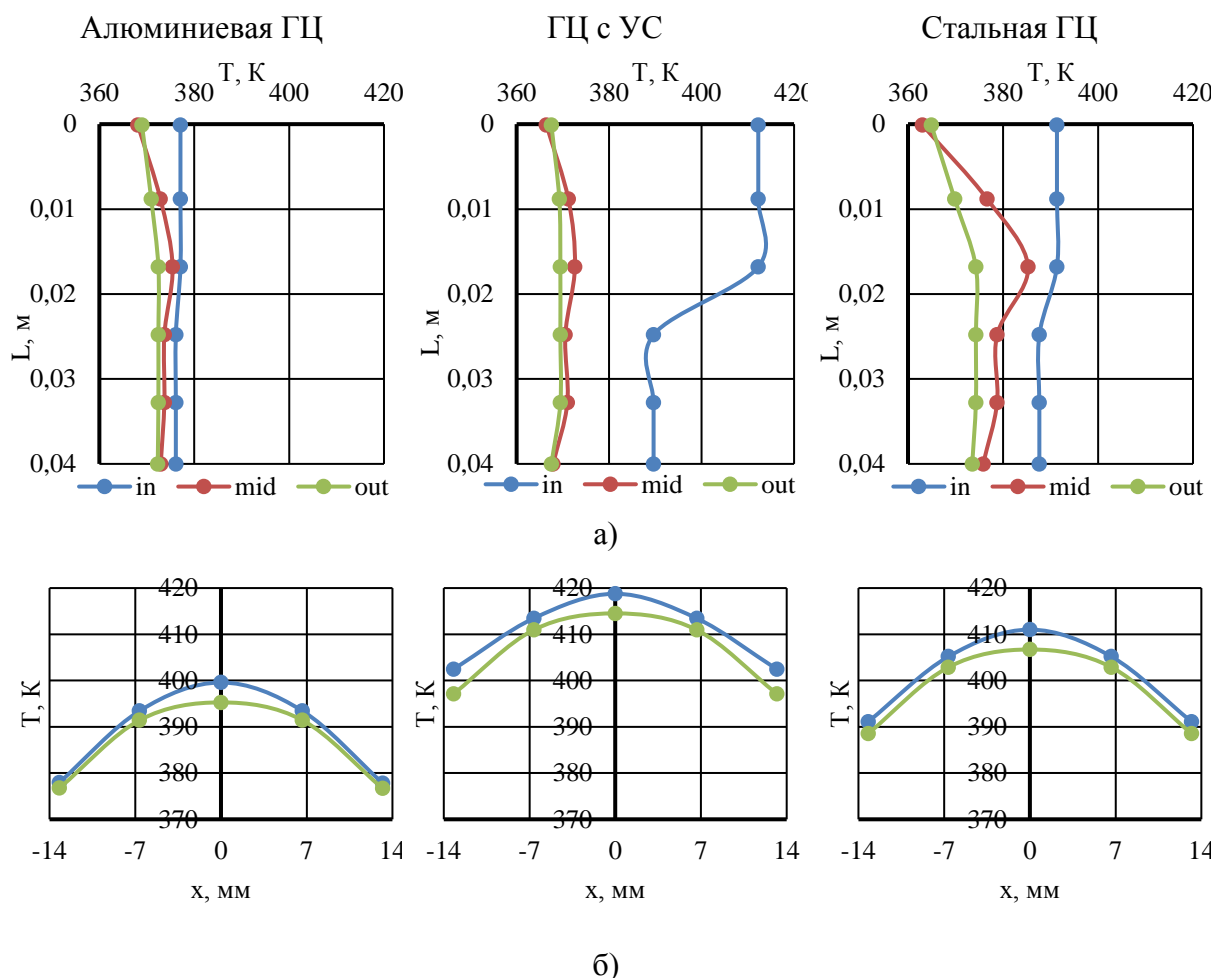


Рисунок 13 – Температура ГЦ вдоль образующей (а) и днища поршня (б), где in – на поверхности, соприкасающейся с горячими газами, mid – в средней части стенки ГЦ, out – на охлаждаемой поверхности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты выполненного исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Гильзы цилиндров из алюминиевого сплава, рабочие поверхности которых обработаны методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования, могут применяться в ДВС. Экспериментально установлено, что после 50,5 часов наработки максимальный линейный износ по сравнению со штатной гильзой (стальной) снизился в 2,87 раз для гильзы цилиндра с МДО-покрытием и в 2,34 раза для гильзы цилиндра ИУ-покрытием. Массовый износ снизился в 2,05 раз и 1,63 раза соответственно. Износ поршней при работе с цилиндрами с МДО-покрытием и ИУ-покрытием практически идентичен износу поршней при работе со стальной гильзой цилиндра.

2. Экспериментально определено влияние режима искрового упрочнения на износостойкость алюминиевых сплавов. Скорость

изнашивания ИУ-покрытия до 26 раз ниже, чем у исходного материала, микротвердость поверхности увеличивается до 5 раз. Снижения прочности не происходит. Коэффициенты трения поверхностей, формируемых искровым упрочнением и микродуговым оксидированием практически идентичны и находятся в диапазоне 0,79...0,85 в условиях сухого трения.

3. Экспериментально определены характеристики механических потерь и эффективной мощности двигателей с гильзами цилиндров, рабочие поверхности которых обработаны методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования. Наименьшее значение механических потерь и наибольшее значение эффективной мощности получены на гильзе цилиндра с МДО покрытием.

4. В процессе наработки эффективная мощность двигателя в комплектации штатной гильзой снизилась на 10...23% во всем диапазоне частот вращения, в то время как эффективная мощность двигателя, оснащенного гильзой с ИУ-покрытием, возросла на 11...26%, что подтверждает как высокую износостойкость покрытия, так и потенциал совершенствования процесса искрового упрочнения. Вследствие существенного износа, двигатель, оснащенный штатной гильзой, не смог выйти на установившийся режим работы при максимальной нагрузке.

5. Искровое упрочнение гильзы цилиндра не приводит к существенному изменению теплового состояния гильзы и смежных деталей. Замена стальной гильзы на алюминиевую с ИУ-покрытием приводит к изменению средних температур деталей цилиндропоршневой группы не более чем на 5...10 К. Так, при толщине покрытия 300 мкм и коэффициенте теплопроводности слоя 1 Вт/(м·К) наблюдается снижение средней температуры гильзы на 5...10 К и возрастание средней температуры поршня и крышки цилиндра в том же диапазоне. При этом на 20...25 К увеличивается температура рабочей поверхности гильзы. Тепловой поток через алюминиевую гильзу с упрочненным слоем в зависимости от толщины стенки и упрочненного слоя может быть как выше, чем у стальной гильзы, так и ниже. В зависимости от условий нагревания и охлаждения разница может достигать 10%.

Дальнейшие исследования направлены на:

1. Совершенствование метода искрового упрочнения с целью снижения продолжительности процесса обработки и механических потерь двигателя.

2. Использование метода искрового упрочнения для увеличения ресурса поршня, в частности, упрочнением поршневой канавки.

3. Разработку математических моделей, позволяющих прогнозировать влияние параметров покрытия, в том числе его дискретность, на износостойкость поверхности деталей ЦПГ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Dudareva N. Y. Feasibility Study on the MAO-and SH-coated Cylinder Liners Application in ICE / Dudareva N. Y., Musin N. Kh. // Procedia Engineering. – 2017. – Т. 206. – С. 692-697.

2. Дударева Н. Ю. Исследование износостойкости МДО-покрытий, сформированных в силикатно-щелочном электролите на алюминиевом сплаве АК4-1 / Дударева Н. Ю., Мусин, Н. Х., Кальщиков Р. В., Шехтман С. Р., Ахмедзянов Д. А., Кишалов А. Е. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2017. – Т. 21. – №. 3 (77) – С. 12-18.

3. Дударева Н.Ю., Мусин Н.Х. Исследование износостойкости алюминиевых гильз цилиндров с модифицированной рабочей поверхностью // XIII КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ Международная молодёжная научная конференция, сборник трудов. Том. 1 / Самарский гос. аэрокосмич. ун-т имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). – Самара, 2015. – с.224-225.

4. Дударева Н.Ю., Мусин Н.Х. Влияние искрового упрочнения на теплофизические свойства алюминиевого сплава // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. 21-23 октября 2014 г: Материалы конференции. Том 1 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т. – Уфа, 2014. – С.68-69.

5. Дударева Н. Ю. Исследование влияния микродугового окисления на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава / Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х., Кальщиков Р.В., Рябова Д.А. // Вестник Иркутского государственного технического ун-та. – 2013. – №. 9 (80) – С. 63-70.

6. Дударева Н. Ю. Исследование влияния искрового упрочнения на прочностные свойства алюминиевого сплава / Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – №. 8 (53) – С. 23-28.

7. Дударева Н.Ю., Еникеев Р.Д., Мусин Н.Х. Исследование влияния метода искрового упрочнения на физические и эксплуатационные свойства алюминиевых сплавов // Мавлютовские чтения: Всероссийская

молодежная научная конференция. 25-27 октября 2011 г: Материалы конференции. Том 1 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т.– Уфа, 2011. – С.55-56.

8. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. Исследование возможностей современных технологий упрочнения и модификации поверхностей для повышения износостойкости цилиндров ДВС сплава // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. 26-27 октября 2010 г: Материалы конференции. Том 1 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т.– Уфа, 2010. – С.84.

9. Дударева Н. Ю. Перспективы повышения износостойкости цилиндров двигателей внутреннего сгорания методом искрового упрочнения / Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. // Молодой ученый. – 2010. – Т.1. – №1-2 (13) – С. 90-94.

10. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. Исследование эксплуатационных свойств упрочненного слоя, получаемого методом искрового упрочнения, и их взаимосвязи с технологическими режимами обработки // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция. 27-28 октября 2009 г: Материалы конференции. Том 1 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т.– Уфа, 2009. – С.124-125.

11. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х., Соколов С.А. Разработка технологических основ упрочнения верхних поршневых канавок методом искрового упрочнения // Мавлютовские чтения: Всероссийская молодежная научная конференция, посвященная 75-летию УГАТУ.: Сборник трудов. Том 2 / Уфим. гос. авиац. технич. ун-т.– Уфа, 2007. – С.171-172.