

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук, доцент
Н. Ю. Дударева

УФА – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Глава 1. Анализ современного состояния проблемы	15
1.1 Введение.....	15
1.2 Конструкции алюминиевых блоков цилиндров.....	17
1.3 Факторы, влияющие на ресурс рабочей поверхности цилиндра	23
1.4 Анализ современных способов повышения износостойкости рабочей поверхности цилиндра из сплавов алюминия	30
1.4.1 Объемное упрочнение материала.....	31
1.4.2 Упрочнение рабочей поверхности цилиндра	32
1.4.3 Нанесение износостойких покрытий и установка вставок	34
1.5 Микродуговое оксидирование и искровое упрочнение	41
1.6 Выводы по главе. Формулировка гипотезы, постановка цели и задач.....	49
Глава 2. Исследование влияния искрового упрочнения на свойства алюминиевых сплавов.....	51
2.1 Введение.....	51
2.2 Влияние режимов искрового упрочнения на износостойкость алюминиевых сплавов.....	52
2.2.1 Методика исследования.....	52
2.2.2 Результаты эксперимента	56
2.3 Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования на коэффициент трения	59
2.3.1 Методика исследования.....	59
2.2.2 Результаты эксперимента	61
2.4 Влияние режимов искрового упрочнения на микротвердость и предел прочности алюминиевых сплавов	63
2.4.1 Методика исследования.....	63
2.4.2 Результаты эксперимента	66
2.5 Выводы по главе.....	67
Глава 3. Моторные испытания.....	69
3.1 Описание экспериментального двигателя	69
3.2 Испытательный стенд	71
3.3 Методика исследований	73

3.3.1	Методика формирования покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра из сплава алюминия методом микродугового оксидирования	73
3.3.2	Методика формирования покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра из сплава алюминия методом искрового упрочнения	75
3.3.3	Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы	77
3.3.4	Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя	80
3.3.5	Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя	81
3.4	Результаты исследований	84
3.4.1	Исследование износостойкости деталей цилиндропоршневой группы базового двигателя	84
3.4.2	Исследование влияния микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы	87
3.4.3	Исследование влияния искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы	89
3.4.4	Исследование влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя	91
3.4.5	Определение характеристик воздушных винтов	92
3.4.6	Исследование эффективных показателей базового двигателя	94
3.4.6	Исследование влияния микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя	96
3.4.7	Исследование влияния искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя	98
3.5	Анализ результатов исследований	100
3.5.1	Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы	100
3.5.2	Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя	104

3.5.3 Прогнозирование ресурса двигателя, оснащенного гильзами цилиндров с искровым упрочнением и микродуговым оксидированием рабочей поверхности	110
3.6 Выводы по главе.....	114
Глава 4. Теоретическое исследование влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на температурный режим деталей цилиндропоршневой группы и крышки цилиндра	116
4.1 Анализ влияния покрытия, сформированного посредством микродугового оксидирования и искрового упрочнения, на процесс теплопередачи через стенку гильзы цилиндра.....	116
4.2 Анализ влияния покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра на температурный режим деталей цилиндропоршневой группы и крышки цилиндра	124
4.2.1 Постановка задачи.....	124
4.2.2 Расчетная область и сетка	127
4.2.3 Физически модели, начальные и граничные условия	129
4.2.4 Результаты эксперимента	133
4.3 Выводы по главе.....	140
Заключение	142
Список литературы	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Рост конкуренции на рынке двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и непрерывно возрастающие экологические требования вызывают необходимость постоянного повышения качества и сокращения сроков создания (исследования, проектирования и производства) новых конструкций двигателей, а также снижения затрат на всех стадиях жизненного цикла изделия за счет использования инновационных технологий, обеспечивающих минимизацию потребляемых трудовых и материальных ресурсов. Это в свою очередь приводит к разработке и внедрению более сложных технологий и технических решений.

В работе [1] указывается, что в среднесрочной перспективе основными целями разработок в области ДВС являются увеличение мощности, экономии топлива, надёжности и долговечности, уменьшение массы и габаритов, обеспечение совместимости с альтернативными топливами. Как результат, вследствие увеличения давления и температуры в камере сгорания, частоты вращения коленчатого вала и т.д., происходит увеличение механических и тепловых нагрузок на детали ДВС. Применение альтернативных видов топлив сопровождается изменением химической активности среды в камере сгорания и, как следствие, увеличением коррозии поверхностей деталей. Способы обеспечения надёжности деталей ДВС, применяемые в настоящий момент, не удовлетворяют в полной мере возрастающим требованиям, что обуславливает необходимость разработки новых конструкторских и технологических решений в этой области.

С другой стороны, тенденция к снижению массы двигателя привела к тому, что происходит постепенный переход к легким, в частности, к алюминиевым сплавам. Снижение массы двигателя влечет за собой снижение требований к креплениям, сочленениям, подвеске и т.д. Особую важность масса ДВС имеет при их применении в ручном инструменте, авиации, мобильных энергоустановках.

Сегодня из алюминиевых сплавов изготавливают поршни, а также корпусные детали двигателя и агрегатов. Дальнейшее расширение применения сплавов алюминия ограничиваются рядом присущих им недостатков, в частности низкой износостойкостью. По этой причине, несмотря на то, что в настоящее время в мире примерно половина всех блоков цилиндров изготавливается из алюминиевых сплавов, только 10 % из них используются без чугунной или стальной гильзы [2]. В связи с этим одним из направлений научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, проводимых в области двигателестроения, является исключение таких вставок из конструкции ДВС и полный переход на сплавы алюминия при изготовлении блоков цилиндров.

Детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) являются наиболее нагруженными в ДВС. Они функционируют в условиях воздействия высоких температур, динамических нагрузок, сил трения и агрессивных химических соединений. Износ поршней, колец и рабочих поверхностей цилиндров является одним из основных лимитирующих факторов, определяющих межремонтные периоды двигателя. И если поршень и кольцо относятся к быстросъемным деталям, то ремонт поверхности цилиндра или замена гильзы связаны с существенными затратами. В поршневых ДВС до 11% энергии топлива теряется на преодоление сил трения [3]. Из них до 40% потерь приходится на долю деталей цилиндропоршневой группы [4]. Экономический эффект от снижения потерь на трение и износ во всех используемых двигателях оценивается в 120 миллиардов долларов США.

Сегодня в области поршневого двигателестроения для повышения ресурса рабочей поверхности алюминиевого цилиндра находят применение различные упрочняющие покрытия, способы объемного и поверхностного легирования. Однако эти способы обладают различными недостатками [5–8]: 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. Так же

необходимо учитывать, что большая часть существующих решений является собственностью иностранных компаний, что ограничивает их применение в ДВС для военно-промышленного комплекса Российской Федерации.

Одним из перспективных способов повышения ресурса деталей ЦПГ из алюминиевых сплавов является микродуговое оксидирование (МДО) [10–12]. МДО позволяет сформировать на поверхности прочное оксидное покрытие с твердостью, близкой к корунду, хорошей адгезией, низкой пористостью и высокими антикоррозионными свойствами. Несмотря на существенные достоинства МДО, остается ряд нерешенных проблем, которые не позволяют применять его в полной мере на деталях ЦПГ ДВС. Низкая теплопроводность покрытия может негативно сказываться на тепловой напряженности других деталей, ограничивающих объем рабочей камеры. Высокая твердость и низкая маслоудерживающая способность обработанной поверхности могут приводить к увеличению износа колец и юбки поршня. Возможны сколы покрытия на кромках, что является серьезным недостатком, особенно для двухтактных ДВС. Кроме того, до настоящего времени не решена проблема получения равномерного по свойствам покрытия на всей поверхности детали.

В ходе исследований МДО на кафедре двигателей внутреннего сгорания Уфимского государственного авиационного технического университета разработан метод искрового упрочнения (ИУ). Суть метода ИУ заключается в том, что при импульсном воздействии искрового разряда с определенными параметрами на поверхность изделия из алюминиевого сплава, происходит проникновение атомов и ионов газовой среды, в которой происходит процесс, вглубь материала изделия [13]. В результате чего происходит формирование покрытия, состоящего из оксидов или нитридов материала подложки. Толщина покрытия достигает 300 мкм, а микротвердость – 24 ГПа и более. В сравнении с МДО ИУ имеет ряд преимуществ, в частности, отсутствие изменения геометрических размеров детали, возможность формирования покрытия с

заданными свойствами на локальном участке поверхности, более низкое энергопотребление.

В настоящем исследовании рассматривается возможность замены гильзы цилиндра (ГЦ) из сплава железа на алюминиевые с рабочей поверхностью, упрочненной методами ИУ и МДО, с целью увеличения износостойкости зеркала цилиндра и ресурса двигателя. Изучается влияние таких ГЦ на механические потери двигателя.

Актуальность работы определяется следующими обстоятельствами:

- Несмотря на то, что алюминиевые блоки цилиндров внедряются в двигателестроении с середины 1950-х годов, подавляющее большинство 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.

- Существующие на рынке технологии, во-первых, не удовлетворяют всему спектру запросов производителей ДВС: в частности, оказываются дорогими для применения в малоразмерных ДВС, имеют проблемы совместимости с различными топливами и т.д. Во-вторых, эти технологии разработаны и являются собственностью нескольких компаний-монополистов. Российская Федерация сегодня не владеет подобными технологиями, внедренными в производство.

- Доступные в открытом доступе исследования посвящены преимущественно триботехническим и технологическим аспектам применения МДО в двигателестроении.

- Применение метода искрового упрочнения для повышения ресурса цилиндра не исследовалось. При этом метод ИУ - новая технология, имеющая ряд преимуществ относительно аналогичных решений.

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.

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.

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.

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 р_а «Разработка нанокomпозиционных 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.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, связанной с изучением влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра и механические потери ДВС. Приводятся выносимые на защиту положения и краткое содержание работы.

В первой главе проведен анализ работ, связанных с темой научного исследования. Проведен обзор существующих конструкций блока цилиндров и проанализированы преимущества применения сплавов алюминия для их изготовления. Рассмотрены условия функционирования и современные методы повышения ресурса рабочей поверхности цилиндра из алюминиевого сплава. Сформулирована гипотеза о том, что 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. Сформулирована цель работы, основные задачи исследования.

Во второй главе дается описание методик исследования влияния искрового упрочнения на свойства алюминиевых сплавов, описывается измерительная аппаратура. 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.

В третьей главе описывается методика проведения моторных испытаний гильз цилиндров, упрочненных методом искрового упрочнения и микродугового

оксидирования. Приведены результаты экспериментов, показывающие влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности алюминиевой гильзы цилиндра на его износостойкость и механические потери двигателя.

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.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ

1.1 Введение

Конкуренция на рынке машин и механизмов усиливается каждый день. В связи с этим изменяются требования к источникам энергии, в том числе и механической. Поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС), общая мощность которых в настоящее время составляет 80 – 85% мощности всех энергоустановок мировой энергетики, также отзываются на требования рынка [14]. В течение последних 40 лет значительное влияние на развитие двигателестроения оказывает ужесточение норм токсичности продуктов, возникающих в течение жизненного цикла двигателя. Можно выделить следующие тенденции развития двигателестроения:

1. Повышение энергоэффективности, выражающееся в снижении расхода топлива, рециркуляции и вторичном использовании продуктов жизнедеятельности двигателя и т.д
2. Повышение экологических показателей ДВС, т.е. снижение токсичности отработавших газов, количества и токсичности смазочных материалов; уменьшение затрат на утилизацию и вторичное использование применяемых материалов и т.д.
3. Повышение потребительских свойств, т.е. повышение мощности, надежности, безопасности, снижение стоимости его производства и обслуживания и т.д.

Как результат, происходит увеличение механических и тепловых нагрузок на детали двигателя. По этой причине особую актуальность приобретают проблемы повышения надежности деталей ДВС. Как известно, наиболее нагруженными в ДВС являются детали цилиндропоршневой группы. Эти детали испытывают воздействие высоких динамических нагрузок и температур в процессе эксплуатации. При этом находящиеся в сопряжении детали, подвержены

нескольким видам износа: механическому, абразивному, окислительному, коррозионному, изнашиванию при заедании, а также комбинированному воздействию перечисленных видов износа [14–17]. Кроме того, в процессе работы детали ЦПГ испытывают вибрации, которые возрастают по мере износа трущихся поверхностей поршня, поршневых колец и стенок цилиндра. Вибрации существенно ухудшают работу двигателя и приводят к усталостному разрушению деталей.

Дополнительно условия работы деталей ЦПГ осложняются еще и тем, что при высоких температурах и скоростях скольжения происходит частичное разрушение масляной пленки, что приводит к возникновению режима сухого трения, увеличению коэффициента трения и интенсивности изнашивания. Большое влияние на износ оказывают продукты сгорания и пыль, попадающая в рабочую камеру из окружающей среды. Частицы продуктов сгорания и пыли являются причиной абразивного изнашивания поршневых колец и поверхности цилиндров.

Несмотря на постоянное совершенствование конструкции двигателей и технологии их производства, износ деталей цилиндропоршневой группы продолжает лимитировать межремонтные пробеги. Если поршень и кольцо относятся к быстросъемным деталям, то восстановление и замена гильзы связаны с гораздо большими затратами. Износ деталей ЦПГ ДВС в значительной степени оказывает негативное влияние на индикаторные и эффективные показатели двигателя, расход картерных газов и расход масла на угар.

Тенденция к снижению массы деталей двигателя привела к тому, что многие детали ДВС, в том числе и детали ЦПГ, изготавливают из алюминиевых сплавов [18–20]. Однако низкая износостойкость сплавов алюминия ограничивает область применения алюминия в ответственных деталях ДВС. Так, например, в блок цилиндров из алюминиевого сплава вставляется втулка из более износостойкого материала, что приводит к увеличению массы двигателя и усложняет его конструкцию. В связи с этим применение алюминиевых гильз цилиндров и

безгильзовых блоков цилиндра остается одной из целей ведущих моторостроительных фирм мира.

1.2 Конструкции алюминиевых блоков цилиндров

В современном двигателестроении выделяются несколько концепций в конструкции блоков цилиндров (БЦ). Наибольшее распространение получили монолитные блоки (Рисунок 1.1). При такой конструкции цилиндры и блок цилиндров изготавливаются как единое целое. В малоразмерных одно- и двухцилиндровых двигателях возможны варианты конструктивного исполнения, когда в единую деталь объединяется еще и крышка БЦ или картер.



Рисунок 1.1 - Монолитный БЦ [21]

В конструкциях типа «Open-Deck» цилиндры стоят свободно в блоке, а рубашка охлаждения открыта в плоскости разъема крышки БЦ. Цилиндры могут быть изготовлены как отдельно друг от друга (Рисунок 1.2 а), так и единой деталью (Рисунок 1.2 б). Благодаря тому, что охлаждающая среда омывает цилиндр со всех сторон, тепловые потоки от нагретой среды рабочей камеры равномерно распределяются по диаметру.

В конструкциях типа «Closed-Deck» в отличие от предыдущего варианта верх цилиндров до отверстий для протекания охлаждающего вещества закрыт (Рисунок 1.3). При этом цилиндры изготавливаются как отдельная монолитная деталь. Такая конструкция обеспечивает хорошее уплотнение крышки БЦ и высокую жесткость верхней части цилиндров.

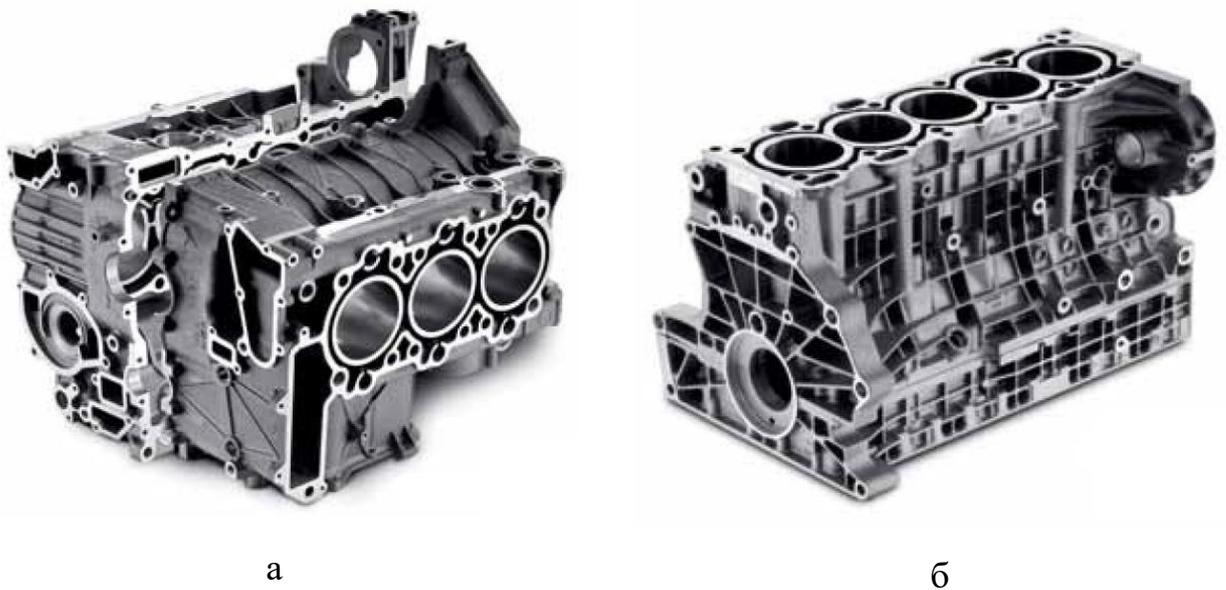


Рисунок 1.2 - Блоки цилиндров конструкции типа «Open-Deck» [21]



Рисунок 1.3 - Блоки цилиндров конструкции типа «Closed-Deck» [21]

Еще одним вариантом исполнения являются блоки цилиндров с «мокрыми» гильзами (Рисунок 1.4). Гильзу цилиндра называют мокрой, если она омывается жидкостью системы охлаждения.

В настоящее время в мире примерно половина всех блоков изготавливается из алюминиевых сплавов. Однако в 90% из них используют гильзы из сплавов железа или других износостойких материалов [2]. Поэтому ведущие моторостроительные фирмы мира ведут разработки в направлении внедрения алюминиевых гильз и безгильзовых алюминиевых блоков цилиндров.

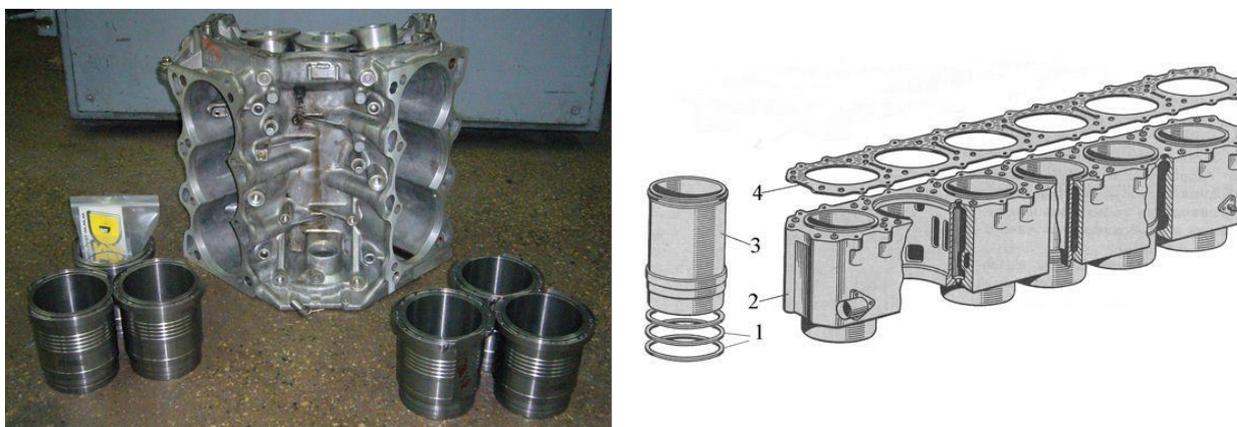


Рисунок 1.4 - Блок цилиндров с «мокрыми» гильзами: 1 – уплотнительные кольца, 2 – блок цилиндров, 3 – гильза, 4 – прокладка головки блока.

Основные преимущества применения алюминиевых блоков цилиндров без чугунных гильз связаны с массогабаритными и технологическими показателями. Плотность алюминиевых сплавов в 2,5...3 раза меньше плотности сплавов железа. Замена чугуна на алюминий при изготовлении блока цилиндров приводит к снижению его массы примерно на 50%. Дальнейшее исключение из конструкции двигателя гильз цилиндров из сплавов железа позволяет дополнительно уменьшить массу блока цилиндров до 30% [2]. Это в свою очередь обеспечивает увеличение удельной массы двигателя и уменьшение расхода энергии на перемещение самого ДВС в пространстве применительно к мобильным машинам. Кроме того, снижение массы двигателя позволяет уменьшить массу других деталей: креплений, рамы и

т.д. Благодаря этому, например, снижение общей массы автомобиля на 10% позволяет уменьшить расход топлива до 1,5% [22].

С точки зрения конструкции и технологии производства, безгильзовый алюминиевый блок цилиндров обеспечивает минимальный конструктивный перекос цилиндров, обусловленный некруглостью или неточным позиционированием гильз. Благодаря лучшей теплопроводности алюминия уменьшается термическая некруглость и термический перекос цилиндров [2]. Если говорить об алюминиевых ГЦ, то использование материалов с близкими значениями коэффициента теплового расширения позволяет отказаться от специальных конструкционных мер для компенсации теплового изменения размеров втулки и блока цилиндров. Кроме того, алюминиевые сплавы отличаются высокой обрабатываемостью резанием, хорошими литейными свойствами и др.

Алюминиевые цилиндры менее подвержены проблемам, связанным с коррозионной стойкостью рабочей поверхности. Особую актуальность это приобретает в связи с переходом на альтернативные виды топлива, такие как этанол, метанол, водород и др. Поршневые кольца и втулки, изготовленные из чугунов, при наличии электролита образуют друг с другом гальванические пары, в то время как оксидная пленка на поверхности алюминия обладает высоким электрическим сопротивлением и предотвращает возникновение электрического тока между трущимися деталями. Коррозионная стойкость алюминиевых сплавов приблизительно в 20 раз выше, чем у стали. Причем при условиях, свойственных среде в цилиндре двигателя, алюминий является устойчивым к воздействию таких элементов и соединений как вода, водород, кислород, азот, сера, мочевины, сернистая, серная, азотная, угольная кислоты и др.

Важным свойством, имеющим значение при использовании алюминия в ДВС, является его высокая теплопроводность. Благодаря этому происходит снижение термических нагрузок и тепловой инерции деталей. Термическая напряженность напрямую влияет на надежность и долговечность деталей. Тепловая инерция может оказывать существенное влияние на рабочий процесс

двигателя, особенно на неустановившихся режимах. В частности, тепловая инерция оказывает влияние на коэффициент наполнения цилиндра и индикаторный КПД двигателя. Причем это влияние характерно как для дизельных, так и для карбюраторных двигателей. К примеру, при разгоне холодного двигателя наблюдается снижение индикаторного КПД на 5-7% за счет тепловой инерции [28].

Высокая теплопроводность алюминиевых сплавов позволяет уменьшить объем водяной рубашки цилиндра до 35...65%, что обеспечивает дополнительное уменьшение массы, положительно влияет на тепловой баланс и тепловую инерцию двигателя [21]. На Рисунке 1.5 показано сравнение высоты рубашки охлаждения цилиндра при применении чугуна (*а*) и сплава алюминия (*б*). В производственно-техническом плане уменьшение глубины рубашки охлаждения также имеет определенные преимущества, выражающиеся в снижении стоимости изготовления.

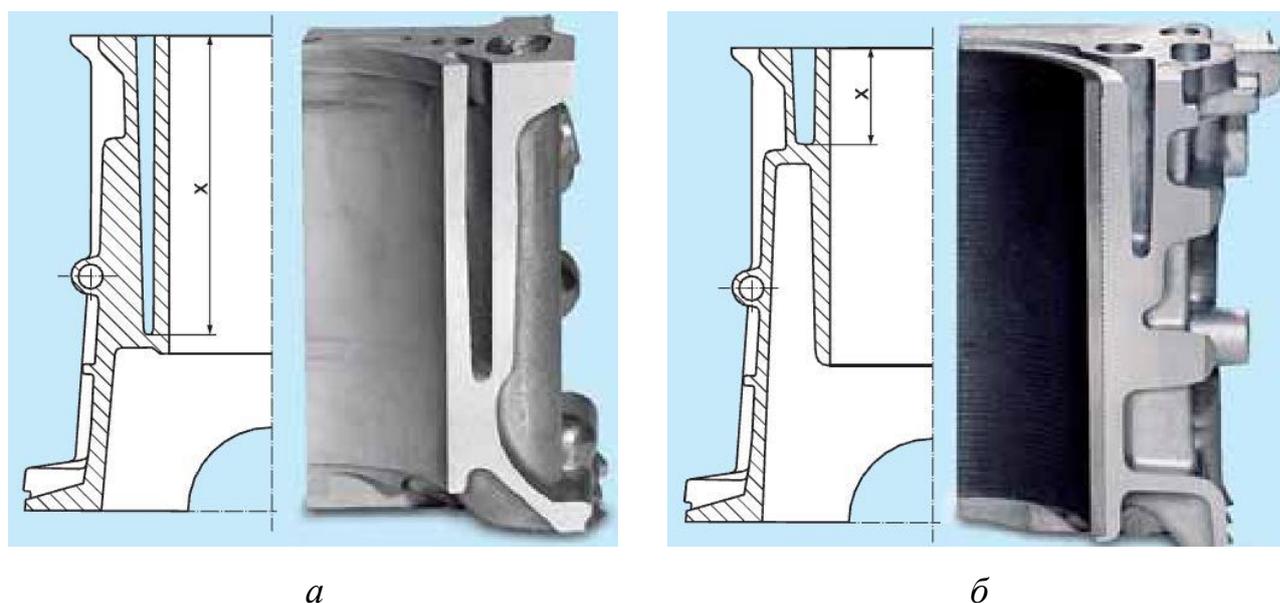


Рисунок 1.5 - Сравнение высоты x рубашки охлаждения цилиндра при применении чугуна (*а*) и алюминия (*б*) [21].

Применение алюминиевых блоков цилиндров положительно сказывается на показателях токсичности отработавших газов. Сокращение времени прогрева двигателя позволяет снизить выбросы несгоревших углеводородов. Так, по данным

исследований, повышение средней температуры стенок цилиндра с 72 до 147 °С привело к снижению концентрации несгоревших углеводородов в отработавших газах двигателя в 2 раза [2]. В результате уменьшения времени прогрева ДВС легкового автомобиля с 90 до 40 секунд выбросы несгоревших углеводородов по ездовому циклу сократились с 0,1 до 0,05 г/км, то есть практически вошли в требования норм Евро-4 [27].

Исключение гильз цилиндров из сплавов железа в пользу алюминиевых позволяет уменьшить монтажный зазор поршня благодаря применению материалов с близкими значениями коэффициентов теплового расширения для поршня и цилиндра. В частности, переход от чугунного цилиндра к алюминиевому позволяет уменьшить монтажный зазор с 0,05–0,06 мм до 0,01–0,02 мм. Зазоры в камере сгорания, которые слишком малы для распространения пламени, служат источником эмиссии несгоревших углеводородов. Наиболее важным является зазор между поршнем и стенкой цилиндра над первым поршневым кольцом. Исследования показывают, что масса несгоревших углеводородов, образующихся в подобных зазорах, находится в прямой зависимости от объема зазора. Причем масса несгоревших углеводородов, образующихся в зазоре, составляет от 40 до 60% от общей массы несгоревших углеводородов, образующихся в цилиндре. По предварительным оценочным расчетам уменьшение монтажного зазора поршня с 0,05 мм до 0,02 мм для бензинового двигателя объемом 1,5...2 л позволит снизить выбросы несгоревших углеводородов на 15–20 %, а в период пуска и прогрева до 40 % от имеющегося до уменьшения зазора уровня эмиссии [2].

Таким образом, усовершенствование рабочего процесса, снижение массы блока цилиндров, тепловой инерции и напряженности, монтажных зазоров поршня при замене чугунного блока цилиндров или алюминиевого блока с чугунными гильзами на полностью алюминиевый блок цилиндров оказывают положительное влияние на экологические, удельные и эффективные показатели двигателя. Существенным недостатком алюминиевых сплавов является низкая поверхностная твердость и, как следствие, низкая износостойкость. В связи с этим возникает

необходимость применения специальных мероприятий для обеспечения требуемых показателей надежности при изнашивании, что особенно актуально для деталей ЦПГ, и рабочей поверхности цилиндра, в частности. Необходимо отметить, что при изготовлении двигателей рабочим объемом 1 л стоимость алюминиевого блока оказывается на 20-25% больше, чем чугунового, а для двигателей рабочим объемом 2,0...2,5 л – равна или меньше [28].

1.3 Факторы, влияющие на ресурс рабочей поверхности цилиндра

На процесс износа рабочей поверхности цилиндров оказывает влияние большое количество факторов, зависящих от типа двигателя, конструктивных особенностей, степени форсированности, применяемого топлива и масла, условий окружающей среды, свойств применяемых материалов и т.д. При этом однозначного определения природы изнашивания не существует. Исследования показывают, что рабочая поверхность цилиндра одновременно подвергается абразивному, коррозионно-механическому и молекулярно-механическому изнашиванию. Процесс молекулярно-механического изнашивания наиболее вероятен в верхней части цилиндра [29]. В условиях недостаточной смазки, малой скорости поршня в этой области, высоких температурах и давлении происходит нарушение непрерывности масляной пленки, что становится причиной возникновения схватывания поверхностей трущихся пар в отдельных точках. С другой стороны, образующиеся на поверхности цилиндра окисные и лаковые покрытия, снижают вероятность схватывания [30].

Коррозионно-механический износ поверхности цилиндров состоит во взаимодействии металла поверхностей трения с газообразными и жидкими продуктами сгорания топлива, окисления масла и воды [30]. Коррозионно-механический износ состоит обычно из двух фаз. В первой фазе под воздействием агрессивного вещества на металл происходит образование окисной пленки. Вторая фаза сопровождается удалением этой пленки с поверхности трения. Считается, что для цилиндров двигателей основное значение имеет электрохимическая коррозия,

являющаяся результатом взаимодействия с металлом слабых кислот, растворенных в воде и сконденсировавшихся на стенках цилиндров.

Абразивное изнашивание деталей ЦПГ вызывается, в основном, частицами минерального происхождения, проникающими в цилиндр вместе с воздухом либо образующимися в процессе эксплуатации ДВС. Как правило, максимальный абразивный износ цилиндра наблюдается в области верхней мертвой точки, при этом происходит процесс царапания и микрорезания поверхности детали твердыми абразивными частицами, а также их интенсивное дробление между стенкой цилиндра и поршнем. Максимальный абразивный износ нижней и средней части цилиндра наблюдаются при попадании пыли в масло [15].

Необходимо отметить, что в явном виде рассмотренные виды изнашивания оказывают влияние на ресурс зеркала цилиндра только при патологических режимах эксплуатации ДВС, ошибках в конструкции, нарушении теплового режима и т.д., а также при работе на неустановившихся режимах. При нормальном функционировании двигателя сложно выделить причинно-следственную связь между ресурсом цилиндра и видами изнашивания.

В общем случае факторы, оказывающие влияние на износ зеркала цилиндра, могут быть сгруппированы следующим образом:

1. эксплуатационные факторы, определяемые режимом работы двигателя;
2. технологические и конструкционные факторы;
3. факторы влияния окружающей среды.

Эксплуатационные факторы определяются комплексом тепловых, нагрузочных и скоростных режимов двигателя. Как при установившихся, так и при неустановившихся режимах нагрузка на двигатель и частота вращения коленчатого вала оказывают решающее влияние на надежность рабочей поверхности цилиндра. Как показывают исследования, при неустановившихся режимах износ оказывается в 2,5...3,5 раза выше, чем при установившихся [31].

Увеличение нагрузки при стабильном установившемся тепловом режиме приводит к пропорциональному росту износа (Рисунок 1.6 а), так как

увеличивается удельное давление колец на стенки цилиндра. Следует отметить, что интенсивность изнашивания зависит не только от величины нагрузки, но и от интенсивности ее изменения. На Рисунке 1.7 показано влияние интенсивности изменения нагрузки на износ гильзы цилиндра двигателей ЗМЗ-21 (а) и ЗМЗ-53 (б). Интенсивность изменения нагрузки W_p находится в диапазоне 0,05...0,25 МН/м². Анализ данных, полученных в работе [32], показывает, что независимо от типов двигателей при неустановившихся нагрузочных режимах по сравнению с эквивалентными установившимися режимами износ ГЦ возрастает более чем в 3 раза. Немаловажную роль играет тепловое состояние двигателя. Так, например, при холодном пуске износ цилиндров двигателей, нагруженных на 10...15 % от максимальной мощности, имеет большие значения, чем при нагружении до 70...80 % и оптимальных температурах охлаждающей жидкости и масла [31].

На Рисунке 1.6 б показан характер влияния частоты вращения коленчатого вала (КВ) n на износ цилиндра [31]. С увеличением частоты вращения КВ при стабильном тепловом режиме износ увеличивается. При динамических режимах работы двигателя износ поверхности цилиндра в значительной степени зависит от величины ускорений КВ. Например, в работе [32] показано, что изменение ускорения в диапазоне 5...20 1/с² (за $1 \cdot 10^8$ ед. усл. работы) приводит к увеличению износа в среднем в 2,3...2,5 раза. Если интенсивность изнашивания при режимах с ускорениями 5...10 1/с² примерно одинаковая и зависимости, представляющие этот процесс, имеют минимум, то при ускорении вала 15-20 1/с² – минимум отсутствует и имеет место увеличение износа с возрастанием эквивалентной скорости КВ.

При неустановившихся режимах возможно нарушение процессов сгорания, например, возникновение детонации. Исследования показали, что средний износ в верхнем поясе цилиндра при детонации возрастает более чем в 2 раза, а средний максимальный износ в 3 раза больше по сравнению с износом при работе без детонации.

Температурная напряженность и уровень температур на поверхности цилиндра также оказывают значительное влияние на надежность. При нормальных

условиях работы двигателя стенки цилиндров в зоне перемещения поршневых колец имеют средние значения температуры $100...130^{\circ}\text{C}$ и их наибольшие предельные отклонения от них $170...180^{\circ}\text{C}$, а для двигателей с воздушным охлаждением они на $30...40^{\circ}\text{C}$ выше.

В условиях реальной эксплуатации ДВС имеют место значительные отклонения температур от указанных пределов. Исследования показывают, что понижение температуры стенок цилиндров интенсифицирует их коррозионное изнашивание. Повышение температуры способствует молекулярно-механическому изнашиванию, а резкие перепады температуры в свою очередь вызывают тепловую деформацию деталей.

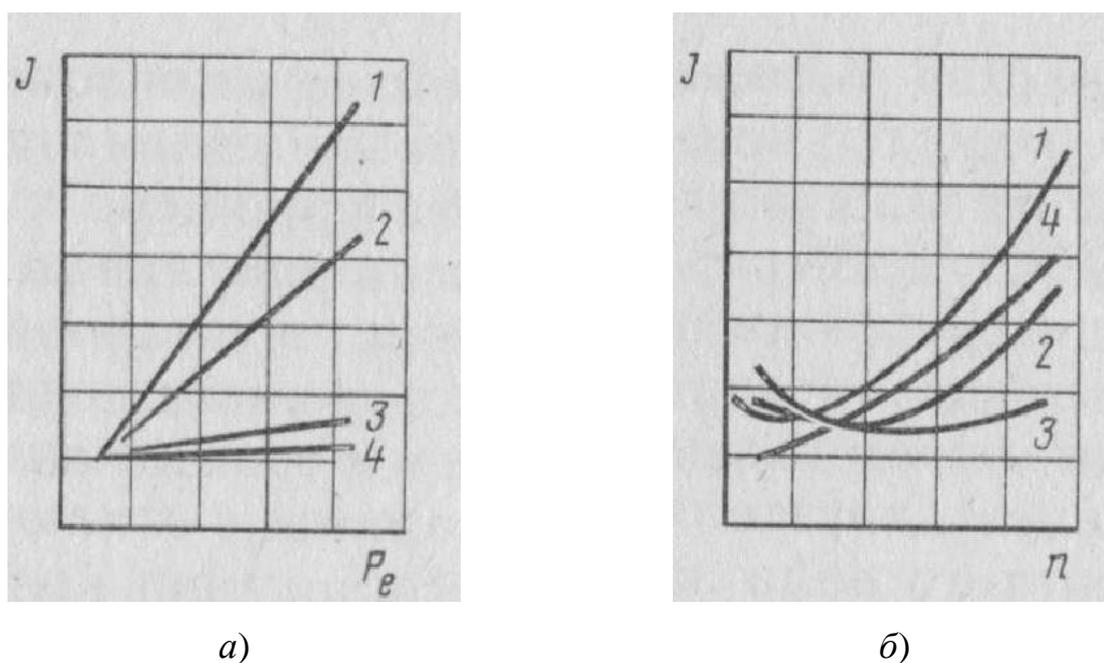


Рисунок 1.6 - Влияние среднего эффективного давления p_e (а) и частоты вращения n коленчатого вала (б) на износ J деталей двигателя ГАЗ и ЗМЗ: 1 – цилиндры; 2 – поршневые кольца; 3- шейки коленчатого вала; 4 – стержни клапанов и направляющие втулки [31]

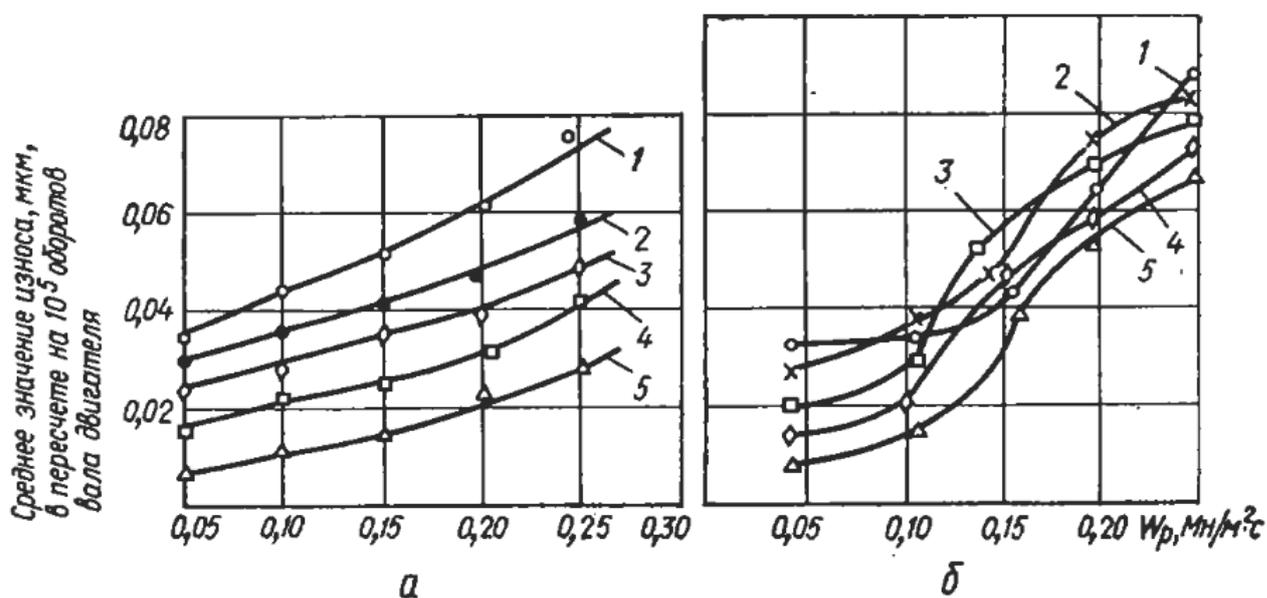


Рисунок 1.7 - Влияние интенсивности изменения нагрузки на износ гильзы цилиндра (среднее значение) двигателей ЗМЗ-21 (а) и ЗМЗ-53 (б): 1 – 0,7...0,8 МН/м²; 2 – 0,6...0,7 МН/м²; 3 – 0,5...0,6 МН/м²; 4 – 0,3...0,4 МН/м²; 5 – 0,3...0,2 МН/м² [32]

В работе [33] исследовалось влияние числа оборотов КВ, нагрузки и угла опережения зажигания на температуру ГЦ ДВС М-21А и М-21Д при различных режимах: полученные результаты приведены на Рисунке 1.8. В результате исследований установлено, что в сравнении со скоростным режимом наибольшее влияние на повышение температуры ГЦ оказывает режим нагрузки. Увеличение нагрузки от минимальной до максимальной при числе оборотов $n=2000 \text{ мин}^{-1}$ приводит к росту температуры в верхней полости ГЦ в среднем на 20 °С. Увеличение же количества оборотов с 1500 до 3500 мин^{-1} на режиме холостого хода повышает температуру в том же поясе на 10 °С. Изменение угла опережения зажигания оказывает существенное влияние на температуру верхней полости ГЦ. Так, изменение УОЗ с 10° до 30° на режиме полной нагрузки при частоте вращения 2500 мин^{-1} приводило к росту температуры на 15 °С. Изменение степени сжатия с 6,7 до 7,5 при отсутствии детонации мало влияло на температуру ГЦ, в то время

как при работе двигателя с детонацией температура верхней полости ГЦ достигала 180 °С. При этом в нижней полости температура повышалась всего на 8-10 °С.

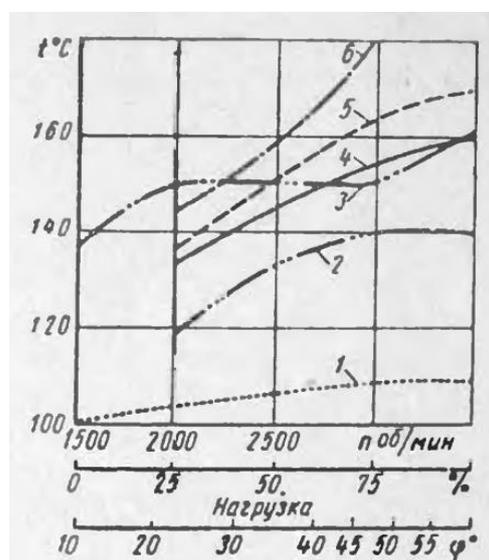


Рисунок 1.8 - Влияние числа оборотов КВ, нагрузки и угла опережения зажигания на температуру ГЦ ДВС при различных режимах: 1 - холостой ход; 2 – увеличение нагрузки двигателя М-21А при $n=2000$ об/мин; 3 – изменение угла опережения зажигания двигателя М-21Д при $n=2500$ об/мин; 4, 5, 6 – нагрузка 100% [33]

Существенное влияние на ресурс рабочей поверхности цилиндра оказывают технологические и конструкционные факторы, в частности, макро- и микрогеометрии зеркала цилиндра (исходная и приобретенная) (Рисунок 1.9). Увеличенная овальность зеркала удлиняет период приработки, трущаяся пара работает при повышенных местных давлениях и температурах, возникают участки без смазки, что может привести к задиру и увеличению интенсивности изнашивания.

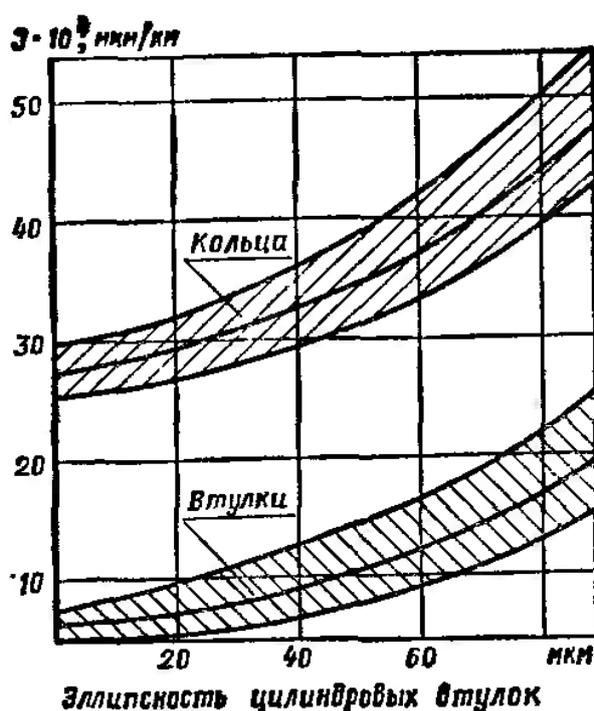


Рисунок 1.9 - Интенсивность изнашивания поршневых колец и цилиндрических втулок тепловозных дизелей Д100 в зависимости от эллипсности цилиндрических втулок [14].

Исходная шероховатость рабочей поверхности цилиндра имеет оптимальные значения, которые выбираются, с одной стороны, исходя из необходимости снижения износа в процессе работы двигателя, и экономических соображений, с другой. Чрезмерное увеличение шероховатости приводит к интенсификации процессов изнашивания, особенно в период приработки. Снижение шероховатости, кроме увеличения стоимости изготовления, может приводить к ухудшению маслоудерживающей способности поверхности, что отрицательно сказывается на сопротивляемости задиру. Оптимальной для цилиндров автомобильных ДВС является шероховатость R_a в диапазоне 0,15...0,4 мкм [14].

Дополнительное профилирование рабочей поверхности цилиндра производится с целью повышения маслоудерживающей способности. Рельеф может быть как регулярным (хонингование), так и нерегулярным (химическое или электрохимическое травление, обдувка дробью и т.д.). Параметры рельефа могут

оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на процессы изнашивания.

Кинематическая схема и геометрические размеры деталей двигателя, соответственно скорости движения и нагрузки на детали, оказывают существенное влияние на износ зеркала цилиндра. Например, увеличение короткоходности двигателя приводит к увеличению механических потерь и износа.

Если говорить о факторах окружающей среды, то основную роль играет содержание абразивных частиц (пыли) в воздухе, поступающем в рабочую камеру ДВС. Чем выше степень форсированности двигателя, тем большее количество воздуха попадает в цилиндр двигателя и, следовательно, абсолютное количество пыли. Износ сопряженных поверхностей в цилиндре увеличивается прямо пропорционально запыленности воздуха и количеству абразивов, подводимых в зону трения [14].

1.4 Анализ современных способов повышения износостойкости рабочей поверхности цилиндра из сплавов алюминия

В современном машиностроении известно и применяется большое количество способов повышения износостойкости трущихся поверхностей. В общем случае они делятся на три группы: конструкционные, трибологические и технологические (так называемый принцип LUDEMA от англ. lubrication, design, materials). Наибольший эффект дает комплексное применение методов из каждой группы. В свою очередь технологические способы повышения износостойкости рабочей поверхности алюминиевых цилиндров подразделяются на три направления:

- изменение свойств материала в объеме детали;
- изменение свойств материала на поверхности детали;
- применение износостойких покрытий, в том числе специальных вставок.

1.4.1 Объемное упрочнение материала

Под объемным упрочнением понимается влияние на свойства материала во всем объеме детали. При изготовлении алюминиевых ГЦ и БЦ наибольшее распространение получили методы легирования материала детали и воздействия на процессы структурообразования. Несмотря на то, что объемной термической обработке подвергается большая часть алюминиевых деталей, эти методы являются общепринятым технологическим решением и не рассматриваются в данной работе.

Методы легирования материала широко применяются при изготовлении деталей из сплавов алюминия, в том числе ГЦ и БЦ. Легирование может использоваться либо как самостоятельное технологическое решение для повышения надежности ГЦ, либо в комплексе с другими методами.

В качестве легирующих добавок используют кремний (до 40%), свинец (до 8%), магний (до 5%), медь (до 10%), а также Fe, Ni, Cr, Zn, Mn, Zr, Li, Ti, В, Р, Со, V с суммарным содержанием до 10% [17; 18]. Кремний обеспечивает высокую твердость и износостойкость сплава, а также улучшает его литейные свойства. Свинец действует как твердая смазка на поверхности трения при повышенных температурах. Другие легирующие элементы повышают стойкость к пригоранию, жаропрочность, обрабатываемость резанием, коррозионную стойкость и т.д.

Достаточно широкое распространение в области поршневого двигателестроения получили эвтектические и заэвтектические силумины. Например, заэвтектический сплав Alusil или Silumal ($AlSi17Cu4Mg$) содержит 17% кремния [21]. Степень насыщения алюминия достигается при доле кремния 12-13%. Более высокая доля кремния приводит к тому, что при застывании расплава образуются первичные кристаллы кремния. Таким образом, та часть кремния, которая из-за насыщения алюминия кремнием не может войти в соединение с алюминием, выкристаллизовывается и откладывается среди насыщенного алюминиево-кремниевого сплава (эвтектика). Величина кристаллов кремния находится в пределах от 20 до 70 мкм. Эти первичные кристаллы кремния,

соответствующим образом обработанные и раскрытые, без дополнительного армирования образуют устойчивую к износу внутреннюю поверхность цилиндра.

Из-за того, что кристаллы кремния равномерно распределены во всем объеме блока цилиндров, возникает проблема изготовления отверстий, пазов, нарезания резьбы и т.д. Она может быть решена применением специальных режущих инструментов. В результате возрастает стоимость и время изготовления такого блока цилиндров. Однако возможность применения сплава Alusil как самодостаточное решение при изготовлении блока цилиндра обеспечивает большую популярность данной технологии. Применяется в двигателях автомобилей и мотоциклов, выпускаемых фирмами BMW, Chevrolet, Ferrari, Citroen, Honda, Lotus, Porsche, Maserati, Suzuki, Yamaha и др. [7; 21]

1.4.2 Упрочнение рабочей поверхности цилиндра

Применение технологических решений объемного упрочнения приводит к необходимости обеспечения максимальных требований к свойствам материала во всем объеме детали, что приводит к увеличению сложности и стоимости технологического процесса производства блока цилиндров. Альтернативным вариантом являются способы повышения износостойкости, изменяющие свойства материала только на рабочей поверхности детали. Одни технологические решения, относящиеся к поверхностному упрочнению, не позволяют гибко управлять физико-механическими свойствами поверхности в отдельных точках или областях поверхности, другие обеспечивают возможность регулирования свойств упрочненного слоя. Это позволяет оптимизировать процесс упрочнения по времени и стоимости обработки. В частности, эпюра износа ГЦ имеет ярко выраженный максимум в области верхнего компрессионного кольца. В то время как в нижней части ГЦ износ значительно меньше. Таким образом, изменяя свойства покрытия в различных зонах рабочей поверхности ГЦ можно повышать эффективность применяемых технологий.

Компания Kolbenschmidt Pierburg AG разработала метод Locasil [21; 22], при котором стандартный сплав для литья под давлением (например, AlSi9Cu3)

обогащается локально кремнием в зоне рабочих поверхностей цилиндров. Это достигается благодаря высокопористым цилиндрическим фасонным частицам из кремния, которые вкладываются в литейную форму и при литье прессованием под высоким давлением заливаются в блок цилиндров. Находящийся под давлением 90...100 МПа алюминиевый сплав продавливается сквозь поры кремниевых фасонных частиц. Таким способом, на рабочей поверхности цилиндра образуются армирующие кристаллы кремния. Благодаря такому местному обогащению кремнием получают свойства рабочих поверхностей, эквивалентные сплаву Alusi1, при этом остальная часть блока цилиндров хорошо обрабатывается резанием. На Рисунке 1.10 показан разрез блока цилиндров, изготовленного по данной технологии. На рисунке видно обогащение кремнием в зоне рабочей поверхности цилиндра. Размеры частиц кремния при этом составляют 30...120 мкм.

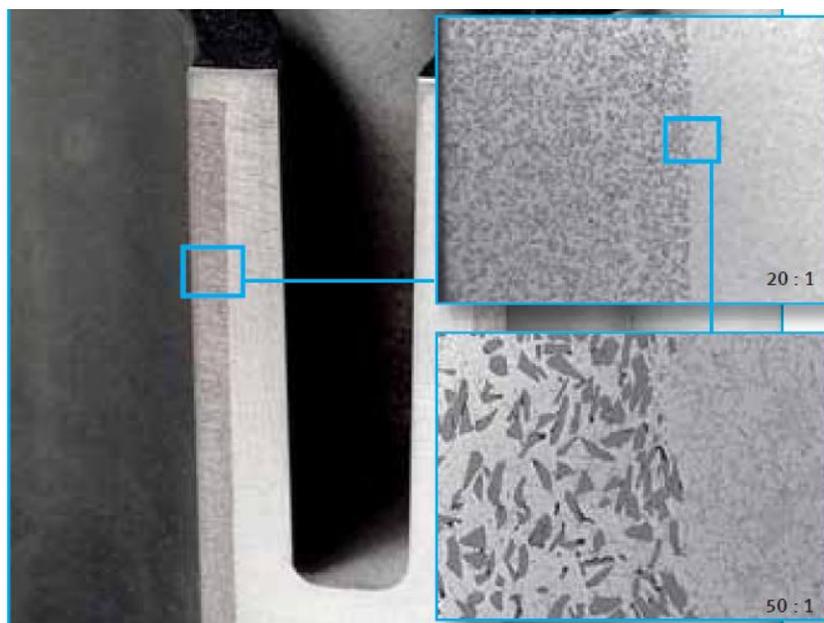


Рисунок - 1.10 Технология Locasil на гильзе цилиндра [21]

Для упрочнения рабочей поверхности цилиндра применяется та же лазерное легирование [23]. В частности, поверхность может армироваться кремнием, свинцом, медью и т.д. При лазерном легировании рабочая поверхность цилиндра, изготовленного из стандартного алюминиево-кремниевого сплава, с помощью

вращающегося лазерного оптического устройства оплавляется и металлургически легируется параллельно подводимым порошком кремния и др. (Рисунок 1.11). Тем самым получают тонкий слой (до 20 мкм) с твёрдой фазой (в основном кремния) в зоне внутренней поверхности цилиндра. После обработки рабочая поверхность цилиндра подвергается хонингованию и проводится раскрытие частиц кремния химическим травлением.

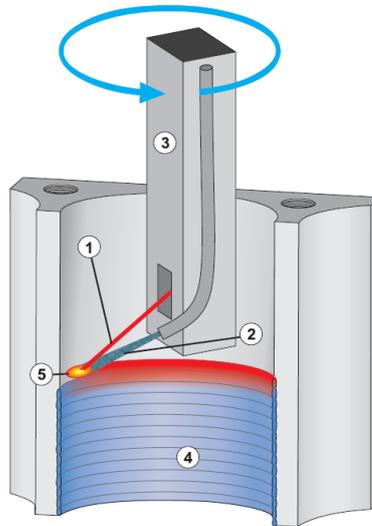


Рисунок 1.11 - Схематическое изображение процесса лазерного легирования поверхности цилиндра кремнием: 1 – лазерный луч, 2 – струя порошка, 3 – вращающееся лазерное оптическое устройство, 4 – легируемый слой, 5 – оплавляемая зона [21]

1.4.3 Нанесение износостойких покрытий и установка вставок

Первые решения, созданные для борьбы с проблемой низкой надежности блоков цилиндров из алюминиевых сплавов, основывались на покрытии рабочей поверхности износостойкими материалами или установкой износостойких вставок. Большая группа применяемых и разрабатываемых методов базируется на процессах напыления конденсацией из паровой (газовой) фазы (PVD – physical vapour deposition) [23]. Физический принцип, лежащий в основе методов PVD,

заключается в напылении покрытий в вакууме путём прямой конденсации пара наносимого материала.

Одним из методов, основанных на PVD-процессе, является покрытие рабочих поверхностей цилиндров нитридом титана (TiN) или нитридом титана и алюминия (TiAlN). Метод разрабатывается компанией Kolbenschmidt Pierburg AG. Материал-донор, в качестве которого выступают алюминий и титан в твёрдой форме, испаряется в вакууме либо путём ионной бомбардировки, либо с помощью электрической дуги. Испарённые или выбитые металлические частицы движутся по баллистическим орбитам через вакуумную камеру или откладываются на покрываемых поверхностях. Подводя в камеру азот, получают нитриды титана и алюминия, который осаждается на рабочей поверхности ГЦ. Длительность процесса покрытия определяет требуемую толщину покрытия.

Покрытие наносится на хонингованную алюминиевую рабочую поверхность цилиндров. Толщина покрытия относительно невелика, так что структура хонингования при покрытии остаётся. Сравнительно высокие затраты и недостаточная надёжность процесса ограничивают широкое применение данного метода в области двигателестроения.

Следующая группа упрочняющих покрытий основывается на электролитическом осаждении тонкого слоя наносимого материала на поверхности ГЦ [23]. Таким способом, получают покрытия из соединений кремния, никеля, хрома и т.д. Принципиальная схема установки для гальванической обработки ГЦ показана на Рисунке 1.12. Во внутренней части ГЦ концентрично обрабатываемой поверхности устанавливается электрод-анод. Роль электрода-катода выполняет ГЦ. Внутренний объем гильзы заполняется электролитом. На электроды подается электрический ток плотностью $1 - 4 \text{ А/дм}^2$ при напряжении 10-25 В. Требуемые параметры электрического тока обеспечиваются системой управления, которая на схеме упрощенно представлена реостатом R, и контролируются в течение процесса обработки.

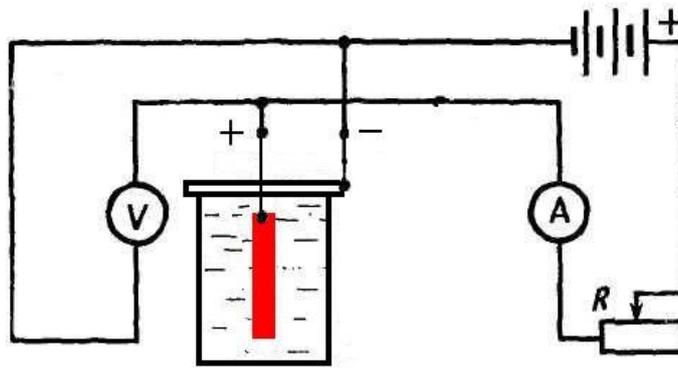


Рисунок 1.12 - Принципиальная схема гальванической обработки ГЦ

Одним из наиболее распространенных электролитических никелевых покрытий является Nikasil или Galnikal [7; 21; 25]. Рабочая поверхность алюминиевого блока цилиндров после чистовой обработки покрывается дисперсионным слоем никеля и карбида кремния (Ni-SiC). Толщина никелевого слоя получается в среднем от 10 до 50 мкм. В данный слой для улучшения износостойкости интегрированы твёрдые фазы из карбида кремния (7–10 % от объема). В качестве основного материала блока цилиндров могут применяться как широко распространенные алюминиевые сплавы, так и специализированные. На Рисунке 1.13 показана рабочая поверхность цилиндра, покрытая никелем, в разрезе.



Рисунок 1.13 - Гильза цилиндра с покрытием Nikasil [21]

Покрyтия типа Nikasil обладают рядом недостатков, которые привели к тому, что в данный момент времени масштабы их применения в ДВС значительно сократились:

1. Получаемое покрытие не совместимо с серосодержащими топливами. При пуске двигателя или при работе в условиях низких температур на некоторых участках поверхности гильзы возможно образование конденсата, который реагируя с продуктами горения серы, образует сернистую кислоту. Это в свою очередь приводит к коррозии и сколам покрытия.

2. Покрытие обладает низкой шероховатостью и плохо смачивается смазочными материалами. В связи с этим существует необходимость проведения заключительной операции хонингования покрытия, обладающего высокой микротвердостью (до 40 ГПа) с применением специально разработанных инструментов.

3. Для получения никелевых покрытий требуются дорогостоящие гальванические установки и устройства утилизации токсичных веществ, содержащихся в электролите.

4. В процессе обработки образуются никелевые шлаки, которые так же необходимо удалять с поверхности и утилизировать.

5. Сложность и высокая стоимость восстановительного ремонта рабочей поверхности ГЦ, требующего применения специализированного оборудования и инструментов.

Покрытие Nikasil применялось в автомобильных двигателях марок BMW, Ferrari, Audi, Jaguar. По причине его несовместимости с серосодержащими топливами в конце 90-х годов использование данного покрытия в серийном производстве автомобильных двигателей остановлено. В настоящее время Nikasil находит применение в малоразмерных одноцилиндровых двигателях бюджетного сегмента фирм Honda, Husqvarna, Hitachi и др.

Кроме никеля, широко распространено гальваническое нанесение покрытий на основе хрома. Хромовое электролитическое покрытие имеет высокие

микротвердость и температуру плавления, хорошую теплопроводность, обладает коррозионной стойкостью и термостойкостью, малым коэффициентом трения со многими материалами. В необработанном виде хромовое покрытие имеет недостаточные маслостойкие свойства, что требует применения специальных методов профилирования поверхности. Почти все хромовые покрытия имеют сетку трещин, величина которой зависит от режимов электролиза и ряда других факторов. С одной стороны, трещины повышают прирабатываемость и маслостойкую способность поверхности, а с другой - ослабляют слой хрома.

С повышением твердости хромового покрытия до некоторой величины износ хрома и сопряженного с ним чугунового контртела уменьшается до минимума, а затем повышается (Рисунок 1.14). Такая зависимость между твердостью и износостойкостью объясняется тем, что с увеличением твердости выше оптимальной увеличивается хрупкость и напряженность покрытия [14]. Еще одним недостатком хромовых покрытий является резкое падение твердости и износостойкости по мере их нагревания.

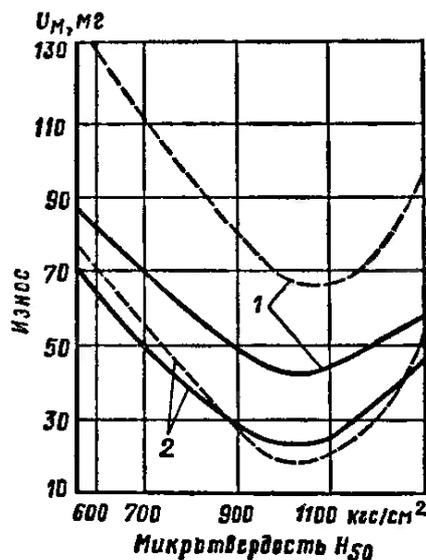


Рисунок 1.14 - Влияние твердости хромового покрытия на износ трущихся пар (сплошная линия – цилиндровая втулка; штриховая – кольцо): 1 – чугун, 2 – хром [14].

Большое количество технологий повышения надежности рабочей поверхности цилиндров базируется на газотермическом напылении покрытий [26]. Общее название «газотермическое напыление» объединяет в себя ряд способов нанесения материала на поверхность. В практике обработки деталей ЦПГ применяются преимущественно плазменное и газопламенное напыление.

Плазменное напыление основано на использовании энергии плазменной струи как для нагревания, так и для переноса частиц металла. Плазменную струю получают пропусканием плазмообразующего газа через электрическую дугу и обжигая стенками специального сопла. При газопламенном напылении металлический либо полимерный порошковый, проволочный, либо шнуровой материал подается в пламя ацетилен-кислородной или пропан-кислородной горелки, расплавляется там и переносится сжатым воздухом на поверхность изделия, остывая на котором приводит к формированию покрытия.

В частности, в серийном выпуске применяются плазменные покрытия на основе железа. На Рисунке 1.15 схематически показан процесс формирования покрытия. В зону обработки подается газ, например, водород или аргон, который ионизируется до состояния плазмы. Температура плазмы достигает 15000 – 20000 °С. Порошок, из которого будет формироваться покрытие, подается в плазменную струю, где расплавляется и со скоростью 80...100 м/с в жидком состоянии наносится на покрываемую поверхность. Процесс происходит при атмосферном давлении. Технология позволяет дополнительно интегрировать в покрытие керамические материалы.

Толщина покрытия, формируемого при плазменном напылении, достигает 0,18...0,22 мм. Полученное на рабочей поверхности цилиндра покрытие подвергается хонингованию для получения окончательной микрогеометрии. В результате толщина покрытия уменьшается до 0,11...0,13 мм. Слой является пористым и на поверхности образуются углубления, которые улучшают маслоудерживающую способность покрытия. Это в свою очередь приводит к улучшению условий трения и снижению износа рабочей поверхности цилиндра.

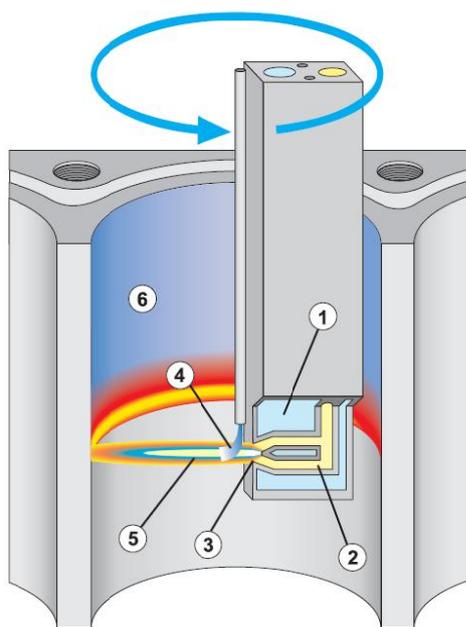


Рисунок 1.15 - Схематическое изображение нанесения плазменного покрытия: 1 – водяное охлаждение, 2 – подвод горячего газа, 3 – выходное сопло, 4 – подвод порошка, 5 – плазменный луч, 6 – плазменное покрытие [21]

Следующей концепцией повышения надежности алюминиевых цилиндров являются заливаемые гильзы цилиндров из алюминиевого сплава. Заливаемые гильзы из алюминиевых сплавов позволяют изготовить блок цилиндров из обычного сплава алюминия, а рабочую поверхность цилиндра – из более износостойкого сплава с высоким содержанием кремния, такие как заэвтектические сплавы Alusil или Silumal. Одним из перспективных решений является технология Silitec. В специальной камере расплав алюминия распыляется с помощью азота, и таким образом слой за слоем образует заготовку (Рисунок 1.16). Форма конуса распыления обуславливает форму полуфабриката. По процессу изготовления компактное набрызгивание находится между спеканием и классическим формообразующим литьём. По сравнению с обычными литейными материалами появляется возможность, как и при спекании, получать материалы необычного состава. Содержание кремния при данном методе может достигать до 25%. Размеры кристаллов кремния составляют 4...10 мкм. Полученный материал

имеет очень тонкую структуру с гомогенным распределением элементов и фаз и хорошими возможностями формоизменения. Таким способом полученный сырой материал в форме заготовки перерабатывается методом непрерывного выдавливания в трубы, которые затем распиливаются на куски и применяются как заливаемые детали для блока цилиндров.

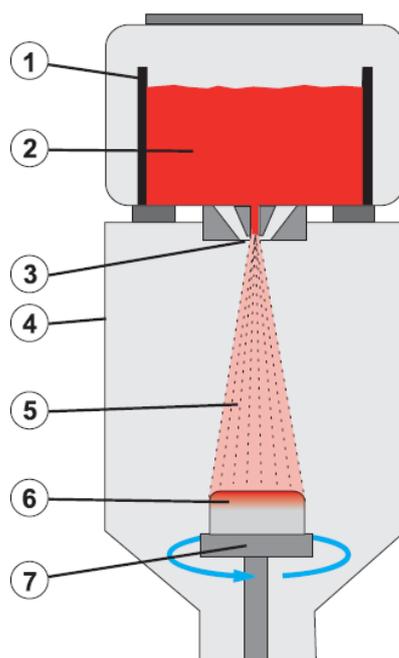


Рисунок 1.16 - Схема получения заготовок для производства заливаемых алюминиевых гильз по технологии Silitec: 1 – литейный тигель, 2 – расплав, 3 – кольцевое сопло, 4 – камера набрызгивания, 5 – конус набрызгивания, 6 – заготовка, 7 – вращающаяся тарелка [21]

1.5 Микродуговое оксидирование и искровое упрочнение

Микродуговое оксидирование (МДО) – электрохимический процесс модификации (окисления) поверхности вентильных металлов (оксиды которых, полученные электрохимическим путем, обладают униполярной проводимостью в системе металл-оксид-электролит, например, Al, Mg, Ti, Zr, Nb, Ta и др.) и их сплавов в электролитной плазме для получения оксидных слоев (покрытий). Другие названия МДО: плазменно-электролитный синтез оксидных слоев, плазменно-электролитическое оксидирование, оксидирование в электролитной

плазме, поверхностная обработка в электролитной плазме, микроплазменное электролитическое оксидирование [10–13]. МДО относится к классу электролитно-плазменных методов обработки и стал известен в 1970-х годах [12, 34].

На Рисунке 1.17 представлена технологическая схема МДО. Обрабатываемая деталь 1 погружается в ванну 2 с электролитом. Так как в процессе оксидирования электролит нагревается, то ванна снабжена системой охлаждения 3. Один вывод источника технологического тока 4 подключается к детали, а второй вывод соединен с корпусом ванны, изготовленной из электропроводного материала. Блок управления 5 позволяет задавать и контролировать параметры и режим процесса оксидирования.

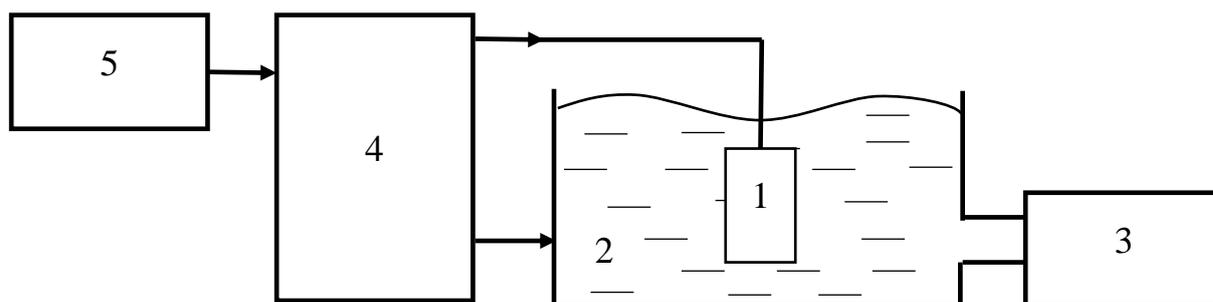


Рисунок 1.17 - Технологическая схема МДО: 1 – обрабатываемая деталь, 2 – электролитическая ванна, 3 – система охлаждения электролита, 4 – источник технологического тока, 5 – блок управления.

Формирование упрочненного слоя в зависимости от условий процесса может продолжаться от нескольких минут до нескольких часов. При этом получается многослойный упрочненный слой, структура которого схематически изображена на Рисунке 1.18. Верхний слой (технологический) 1 является рыхлым и пористым. В данной работе использовался электролит с содержанием жидкого стекла и оксидировались детали из сплавов алюминия. Верхний слой 3 по химическому составу в этом случае это муллит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) [34]. Второй слой (рабочий) обладает наибольшей микротвердостью и состоит из оксида алюминия Al_2O_3 .

Именно свойства этого слоя определяют эксплуатационные параметры покрытия. Толщина рабочего слоя составляет от 10 до 300 мкм. Далее идет тонкий (0,01...0,1 мкм) переходный слой 1 между оксидом и основным металлом. На Рисунке 1.19 показано изменение фазового состава, микротвердости и пористости в разных слоях покрытия.

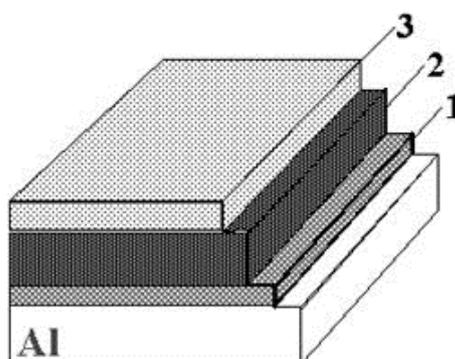


Рисунок 1.18 - Структура МДО-покрытия [35]: 1 – переходной слой, 2 – рабочий слой, 3 – муллит



Рисунок 1.19 - Фазовый состав и некоторые свойства МДО-слоя на алюминии [35]

Свойства МДО-покрытий определяются их составом и структурой, которые зависят от материала основы, состава электролита и режима обработки. Для МДО-покрытий, получаемых на алюминиевых сплавах, характерны следующие данные [10 – 13; 34; 35; 93; 94]:

- толщина до 300 мкм;
- микротвердость до 2500 кг/мм²;
- пробойное напряжение до 6000 В;
- теплостойкость до 2500 °С;
- коррозионная стойкость 1-й балл по десятибалльной шкале;
- износостойкость на уровне твердых сплавов;
- пористость от 5 до 50% (регулируемая).

Толщина УС, полученных МДО, определяется в первую очередь функциональным назначением детали и может варьироваться в достаточно широком диапазоне. Толщина более 100 мкм обеспечивает длительную работу подвижного соединения даже в условиях абразивного изнашивания [36–39]. Увеличение содержания кремния в сплаве приводит к некоторому снижению свойств покрытия, в том числе и толщины. Кроме того, на силуминах образуется большой слой муллита, который удаляется при финишной механической обработке [40–42].

Высокие адгезионные свойства покрытия определяются, прежде всего, тем, что МДО-покрытия образуются за счет обрабатываемого материала с продвижением вглубь границы раздела покрытие – материал основы [43–45]. Кроме того, высокой адгезии способствует образование механического сцепления т. н. «анкерного типа», которое образуется за счет частичного оплавления оксидируемого алюминиевого сплава в зоне контакта с микродуговым разрядом, контакта и его перемешивания с упрочненным слоем, а также за счет сил химической связи, возникающей в результате такого воздействия [46; 47]. Геометрические размеры детали после снятия технологического слоя остаются практически неизменными. Прочность сцепления покрытия с материалом основы может достигать значений 350...380 МПа [46; 47].

Пористость МДО-слоя зависит от режимов обработки, а также от температуры электролита. Размеры пор находятся в диапазоне 2...15 мкм,

пористость составляет 10...30% в рабочем слое и до 50% в слое муллита [39; 42; 48; 49–52].

Теплофизические свойства упрочненного слоя существенно отличаются от свойств материала подложки. В работе [53] коэффициент теплопроводности покрытия на сплаве АК9, определенный методом постоянного теплового потока, составил величину порядка 0,08...1,5 Вт/(м · К). Теми же авторами в работе [35] приведены результаты исследования коэффициента теплопроводности покрытия, полученного на сплаве АК9ПЧ в различных электролитах, который варьируется в диапазоне 3...30 Вт/(м · К).

Износостойкость УС, полученных при рациональных режимах МДО, очень высока и может сравниться с износостойкостью диффузионных боридных покрытий [35; 54–57]. Однако МДО-покрытия обладают высокими фрикционными свойствами [58–60], что приводит к повышенному износу (до 30%) второй детали в паре трения [44; 59; 61]. Для улучшения антифрикционных свойств в условиях приработки и эксплуатации подвижных соединений могут применяться дополнительные меры [42; 50; 59; 62–66; 88]:

1. введение антифрикционных присадок в смазочный материал, которые обладают низким сопротивлением сдвигу;
2. создание на поверхности МДО-покрытия слоя из антифрикционного материала, действие которого снизит коэффициент трения при взаимодействии деталей подвижного соединения;
3. повышение маслоёмкости МДО-покрытия, которое достигается за счёт увеличения количества пор или их искусственного наполнения смазочными материалами;
4. создание МДО-покрытий в электролитах, в состав которых введены антифрикционные материалы, которые при оксидировании входят в состав упрочненного слоя.

Область применения МДО достаточно широка, в т. ч. как износостойкие, коррозионностойкие и/или теплостойкие покрытия. В области двигателестроения

большая часть работ, посвященных применению МДО рассматривают возможность обработки деталей ЦПГ ДВС для повышения их износостойкости и тепловой защиты [2; 34; 52; 59; 67; 93; 96; 98; 100–103].

В работе [2] приведены результаты 300 часовых стендовых испытаний экспериментального двигателя на базе ВАЗ 21083, оснащенного чугунным блоком цилиндров с запрессованными алюминиевыми гильзами (сплав АК6М2) с МДО покрытием рабочих поверхностей. Показано, что:

1. величины износа цилиндров, поршней и поршневых колец находятся в интервале разброса величин износа деталей ранее испытанных двигателей ВАЗ на подобных режимах;
2. износостойкость верхних компрессионных поршневых колец с хромовым покрытием в паре с оксидированными гильзами выше, чем в паре с чугунными гильзами;
3. сколов покрытия на поверхности цилиндров не выявлено.

Согласно патенту РФ № 211958 [68] с помощью МДО создают упрочняющее покрытие таким образом, что на поверхности одной из деталей пары трения образуют α -фазу окиси алюминия, содержащую от 70% до 100% α - Al_2O_3 , а на другой детали – γ -фазу, содержащую от 70% до 100% γ - Al_2O_3 . В качестве примера предлагаемого способа рассмотрена обработка МДО гильзы из алюминиевого сплава В-95 и поршня из сплава АЛ-25. Упрочненный слой на поверхности ГЦ состоял преимущественно из α -фазы оксида Al_2O_3 (70...100%), твердость покрытия HV 20000 - 22000 МПа. Поршень имел покрытие, состоящее из фазы γ - Al_2O_3 , имеющую твердость HV 10000 - 12000 МПа. После снятия технологического слоя толщина УС составляла 150 мкм, геометрические размеры не изменились. В результате увеличилась надежность и износостойкость пары ГЦ - поршень, а также в 10 раз снизились потери на трение в этой паре.

В рамках исследования МДО на кафедре Двигателей внутреннего сгорания УГАТУ был разработан метод искрового упрочнения (ИУ). При импульсном воздействии в газовой среде искрового разряда с определенными параметрами

поверхность заготовки подвергается воздействию высоких температур, ионизированных частиц и ударных волн. В результате этого формируется модифицированный поверхностный слой, состоящий из оксидов или нитридов материала подложки [13].

На Рисунке 1.20 показана принципиальная схема установки ИУ. Источник электрического тока обеспечивает на выходе стабилизированное напряжение 5В. Коммутатор $K1$, управляемый таймером $T1$, подает электрический ток на первичную обмотку повышающего трансформатора $L1$. Вторичная обмотка трансформатора подключена к блоку конденсаторов $C1$. Катод высоковольтной части подключается к обрабатываемой детали D , а анод – к электроду \mathcal{E} . Электрод располагают над обрабатываемой поверхностью. Ограничительный диод $VD1$ не дает блоку конденсаторов разрядиться во вторичную обмотку трансформатора.

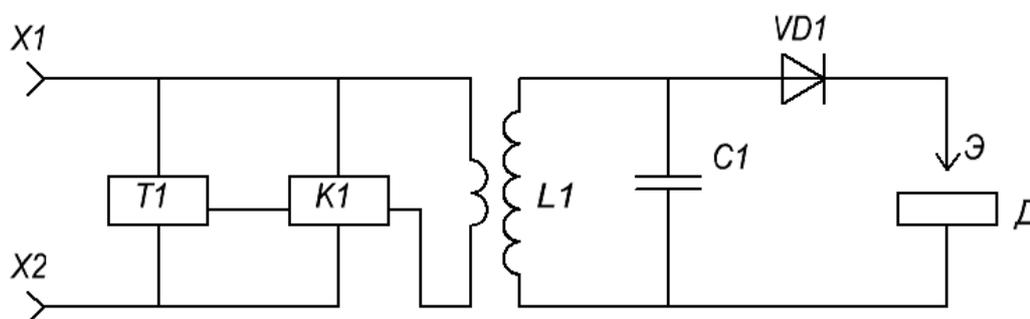


Рисунок 1.20 - Принципиальная схема установки для искрового упрочнения: X1, X2 – разъемы подключения источника электрического тока, T1 – таймер, K1 – коммутатор, L1 – повышающий трансформатор, C1 – блок конденсаторов, D – обрабатываемая деталь, Э – электрод, VD1 – диод

В отличие от МДО искровые разряды возникают не в произвольном месте контакта поверхности детали с электролитом, а на участках, находящихся непосредственно под электродом. При этом возникает необходимость перемещения электрода по всей обрабатываемой поверхности, однако в то же время исчезает необходимость защиты необрабатываемых поверхностей.

Упрочненный слой растет также вглубь материала, однако не происходит образования технологического слоя, который в случае МДО необходимо удалять механической обработкой. Таким образом, исходные размеры детали не изменяются, а модифицированный слой обладает высокой прочностью сцепления с основным материалом.

Искровое упрочнение осуществляется электрическими разрядами длительностью 10^{-7} – 10^{-9} с и энергией ~ 1 Дж. В отличие от электроискрового легирования ИУ происходит при высоких значениях электрического напряжения (5...6 кВ) и маленькой величине тока (10^{-3} ... 10^{-4} А). Частота импульсов варьируется в пределах 1...10 Гц. В процессе обработки не происходит переноса материала электрода и детали [13]. Толщина слоя может достигать 300 мкм при микротвердости более 24 ГПа. Упрочненный слой состоит преимущественно из оксида алюминия α -Al₂O₃.

Несмотря на то, что работы в области искрового упрочнения в настоящее время малочисленны, данный метод имеет ряд преимуществ, позволяющие его применять в узлах трения и, в частности, в деталях ЦПГ. Во-первых, покрытие растет в глубь материала основы и при этом не формируется верхний рыхлый слой, что исключает технологические операции по его удалению. Во-вторых, благодаря тому, что при ИУ обработка происходит непосредственно в области электрода, а не по всей поверхности детали, которая контактирует с электролитом, то нет необходимости защищать участки, которые не должны подвергаться обработке, а также возникает возможность обработки локальных участков поверхности. В-третьих, отсутствие электролита не требует операций по его подготовке и утилизации. В-четвертых, в процессе МДО некоторая часть энергии расходуется на нагрев электролита, что приводит к необходимости организации охлаждения и, как результат, приводит к росту энергопотребления. Возможно получение дискретного упрочненного покрытия, где упрочненные участки чередуются с участками исходного материала, что при определенных условиях может улучшить

антифрикционные свойства и повысить маслоудерживающую способность поверхности.

1.6 Выводы по главе. Формулировка гипотезы, постановка цели и задач

Обзор и анализ отечественных и зарубежных источников литературы, посвященных проблеме повышения износостойкости рабочей поверхности цилиндров из алюминиевых сплавов, позволяет сделать следующие выводы:

1. Одной из актуальных задач в области поршневого двигателестроения является применение сплавов алюминия при изготовлении гильз цилиндров и безгильзовых блоков цилиндра.
2. По причине низкой износостойкости алюминия и его сплавов необходимо применение специальных мероприятий для обеспечения требуемой износостойкости рабочей поверхности цилиндра. Технологические мероприятия заключаются в применении износостойких покрытий, объемного и поверхностного легирования.
3. Существующие технологические решения для повышения износостойкости рабочей поверхности цилиндра обладают рядом недостатков, таких как отслаивание при высоких температурах и больших механических нагрузках, разрушение в результате агрессивного воздействия топлив, высокая стоимость, большой объем брака при серийном производстве и т.д.
4. В настоящее время в отечественной и зарубежной литературе недостаточно полно отражены исследования, направленные на изучение возможности применения метода искрового упрочнения для повышения надежности деталей цилиндропоршневой группы ДВС. Ряд работ [66; 67; 71; 72] 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 о том, что 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.

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

На основании поставленной цели работы определены и сформулированы задачи теоретических и экспериментальных исследований:

1. Обоснование режимов искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра 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. Проведение исследования влияния упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра из алюминиевого сплава методами искрового упрочнения и микродугового оксидирования на тепловой режим деталей ЦПГ и головки цилиндра ДВС.

ГЛАВА 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ НА СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

2.1 Введение

Анализ литературных источников и экспериментальных данных, накопленных на кафедре ДВС ФГБОУ ВО УГАТУ, показал, что, возможность применения метода искрового упрочнения для обработки рабочей поверхности гильзы цилиндра не исследовалась, также отсутствует информация об оптимальных с точки зрения износостойкости параметрах упрочнения. Для подтверждения выдвинутой гипотезы и достижения цели исследования необходимо первоначально решить задачи, связанные с исследованием влияния искрового упрочнения на износостойкость, коэффициент трения, микротвердость и предел прочности покрытия. Для определения износостойкости формируемого покрытия был спланирован и проведен дробный трехфакторный эксперимент, на основании результатов которого выбран режим искрового упрочнения, который далее использовался при подготовке экспериментальных гильз цилиндров для проведения моторных исследований.

Важными свойствами покрытия, определяющими работоспособность рабочей поверхности цилиндра, являются микротвердость и коэффициент трения покрытия. К тому же под воздействием концентрированных потоков энергии в процессе искрового упрочнения в поверхностном слое материала происходят структурные и химические изменения, которые в результате могут оказывать негативное влияние на прочностные свойства всей детали. Поэтому был спланирован и проведен полный трехфакторный эксперимент по определению влияния режимов искрового упрочнения на микротвердость покрытия и предел прочности образцов с покрытием.

Также был спланирован и проведен эксперимент по определению коэффициента трения, при котором производилось сравнение коэффициентов

трения покрытий, полученных методом искрового упрочнения и микродугового оксидирования, образцов из стали 40Х и сплава алюминия АК4-1. Материалы образцов были выбраны исходя из того, что штатная гильза цилиндра двигателя, используемого в моторных исследованиях, изготовлена из стали 40Х, а экспериментальные гильзы цилиндра – из сплава алюминия АК4-1.

2.2 Влияние режимов искрового упрочнения на износостойкость алюминиевых сплавов

2.2.1 Методика исследования

Целью исследования является определение оптимальных с точки зрения повышения износостойкости технологических режимов искрового упрочнения сплавов алюминия. Т.к. покрытие, формируемое при ИУ, обладает большей микротвердостью, чем алюминиевый сплав материала основы, то износостойкость деталей должна увеличиваться. При этом то, насколько изменится износостойкость, определяется в первую очередь технологическими режимами процесса искрового упрочнения. В качестве факторов, определяющих режим приняты емкость блока конденсатора C , мкФ; индуктивность катушки L , Гн; величина зазора между электродом и обрабатываемой поверхностью d , мм (Рисунок 1.25). Данный выбор обусловлен, с одной стороны, техническими ограничениями, накладываемыми экспериментальным оборудованием: этими параметрами можно управлять в известных диапазонах. С другой стороны, увеличение количества факторов ведет к росту количества экспериментов, что, учитывая длительность процесса ИУ, является нежелательным.

Для каждого фактора взяты два уровня значений (Таблица 2.1). Значения для факторов были выбраны исходя из имеющихся в распоряжении автора результатов проведенных ранее однофакторных экспериментов. Так на промежутке значений емкости 0,22...2,2 мкФ получается УС с приемлемым отношением толщины (5...295 мкм), шероховатости (R_a 0,3...3,2) и микротвердости слоя (H_μ 1,5...32 ГПа) [13, 73]. Выбор значений индуктивности обоснован имеющимися

комплектующими и возможностью образования искры при увеличении общего сопротивления цепи. Выбор максимального значения межэлектродного зазора также продиктован условиями образования искры, а также внутренними зазорами катушки зажигания.

Таблица 2.1 Факторы эксперимента

	Емкость конденсаторов C , мкФ	Индуктивность L , Гн	Межэлектродный зазор d , мм
Кодированная переменная	X1	X2	X3
Нижний уровень.(-1)	0,22	100	0,5
Основной уровень	1,21	150	1,25
Верхний уровень (+1)	2,2	200	2
Шаг	0,99	50	0,75

Для сокращения количества экспериментов использовалась полуреплика от эксперимента 2^3 , заданная генерирующим соотношением $x_3 = -x_1x_2$ (Таблица 2.2), что позволило использовать четыре образца вместо восьми. В соответствии с рекомендациями, данными в [74], для исключения влияния систематических ошибок, вызванных внешними условиями, используется случайная последовательность при постановке опытов, запланированных матрицей. Также испытаниям подвергался образец без упрочнения.

Таблица 2.2 Сокращенная матрица планирования

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3
1	+	+	+	-
2	+	-	-	-
3	+	+	-	+
4	+	-	+	+

Образец для испытаний был изготовлен из сплава алюминия марки Д16Т по ГОСТ 21488-97. Эскиз образца приведен на Рисунке 2.1. Внешняя поверхность образца обрабатывается методом ИУ таким образом, чтобы получилось покрытие шириной не менее 1,5 мм. Электрод изготовлен из проволоки марки АМгбН диаметром 1,65 мм. Частота искрового разряда 4 Гц.

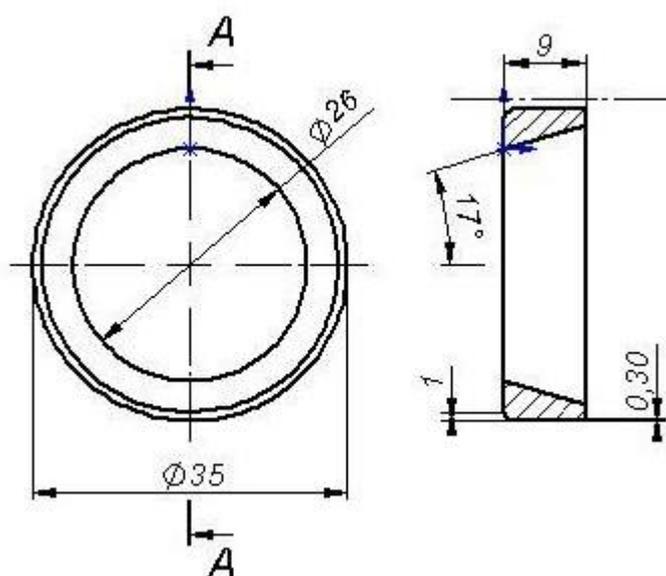


Рисунок 2.1 - Образец для испытаний на износостойкость

Для обработки поверхности образцов было изготовлено приспособление (Рисунок 2.2). На валу 1, привод которого осуществляет от электрического мотора с редуктором, устанавливается образец 3. Шесть электродов 2 установлены таким образом, чтобы получался упрочненный слой с необходимой шириной.

Испытания на износостойкость проводились на машине трения (Рисунок 2.3), разработанной в Научно-производственном объединении Хозрасчетный творческий центр Уфимского авиационного института. Трение осуществляется по схеме «пересекающиеся цилиндры» [73]. Образец 1 устанавливается на вал 2 и закрепляется шайбой 3. Индентер 4 представляет собой ролик диаметром 8 мм. Он устанавливается в обойму 5, на которую с помощью рычага 6 передается нагрузка

от грузов. Вал приводится в действие электродвигателем 7 посредством ременной передачи.

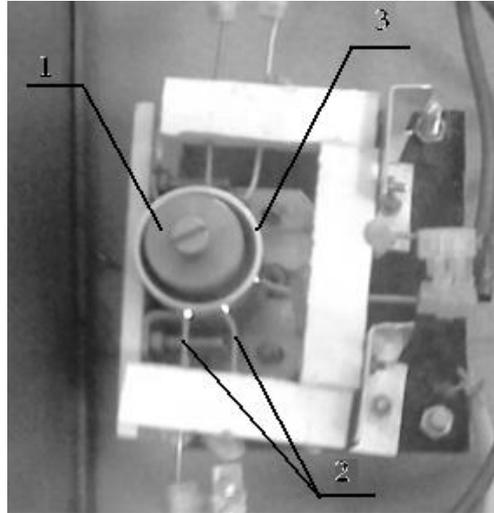


Рисунок 2.2 - Приспособление для искрового упрочнения образцов

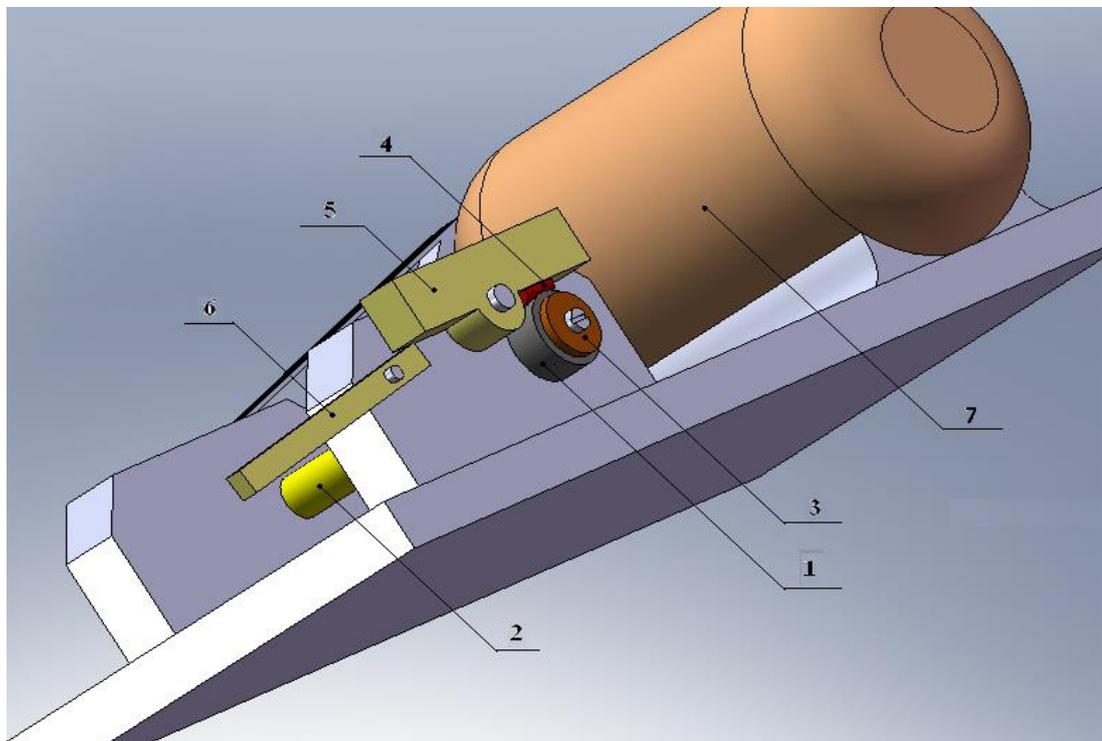


Рисунок 2.3 - Машина трения: 1– образец, 2 – вал, 3 – шайба, 4 – индентор, 5 – обойма крепления индентора, 6- рычаг нагружения, 7 – электродвигатель

Масса груза – 19 кг. Частота оборотов вала машины трения – 352 мин⁻¹. Время испытания 10 минут. В роли смазки использовалось полусинтетическое моторное масло 10W-40. Индентор диаметром 8 мм был изготовлен из сплава ШХ-15 по ГОСТ 3722-81.

После испытаний с помощью микротвердомера HVS-1000 измерялась ширина изношенной канавки. Далее, подставляя ширину канавки b в выражение 2.1, определялась величина износа:

$$I = 0,28 \cdot 10^{-6} \cdot \pi \cdot \left(2 \arcsin \frac{b}{0,008} - \sin \left(2 \arcsin \frac{b}{0,008} \right) \right) \quad (2.1)$$

где b – ширина изношенной канавки.

Далее, используя выражение 2.2, определялась скорость изнашивания:

$$v = \frac{I}{t} = \frac{I}{600}, \quad (2.2)$$

где t – время испытаний в минутах.

2.2.2 Результаты эксперимента

В соответствии с методикой испытаны четыре образца с покрытием, сформированным методом искрового упрочнения, и один образец без покрытия. Полученные результаты сведены в Таблицу 2.3.

Экспериментально установлено, что износ и скорость изнашивания образцов с покрытием, сформированным методом ИУ, значительно снизились. Наименьшее значение скорости изнашивания составило $52,79 \cdot 10^{-6}$ мм³/с, в то время как у образца без покрытия скорость изнашивания равна $1369,71 \cdot 10^{-6}$ мм³/с. В целом искровое упрочнение поверхности образцов привело к увеличению износостойкости в 10...26 раз. Наименьшее значение скорости изнашивания получено при минимальных значениях емкости, индуктивности и зазора.

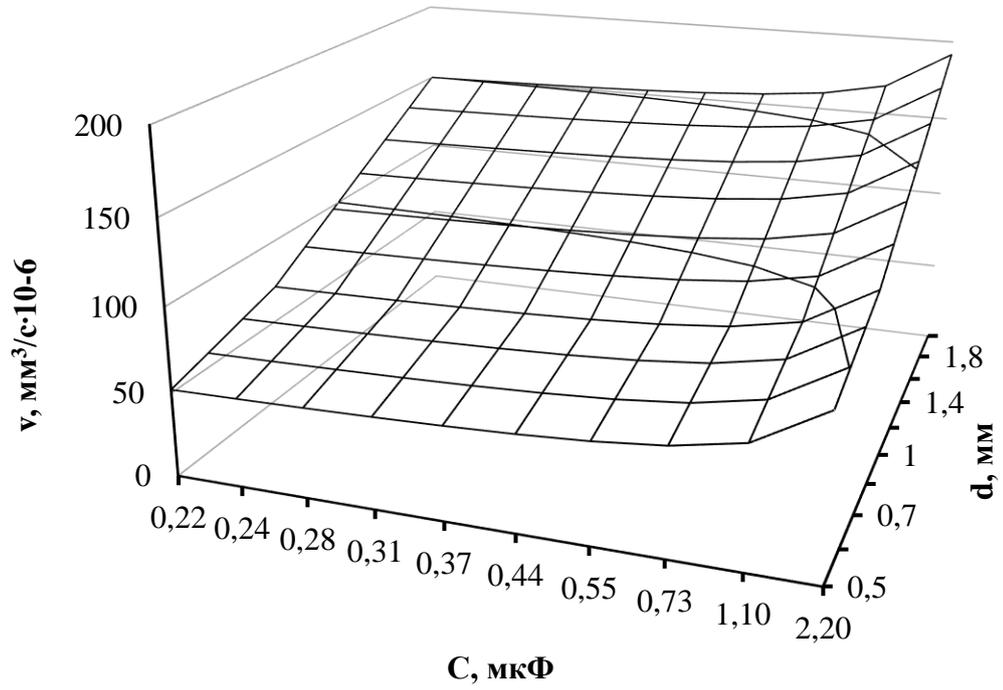
Исходя из экспериментальных значений скорости изнашивания, используя методику, описанную в работе [74], получена зависимость:

$$v = (26,6 + 21,2 \cdot C - 0,12 \cdot L + 65,3 \cdot d) \cdot 10^{-6}. \quad (2.3)$$

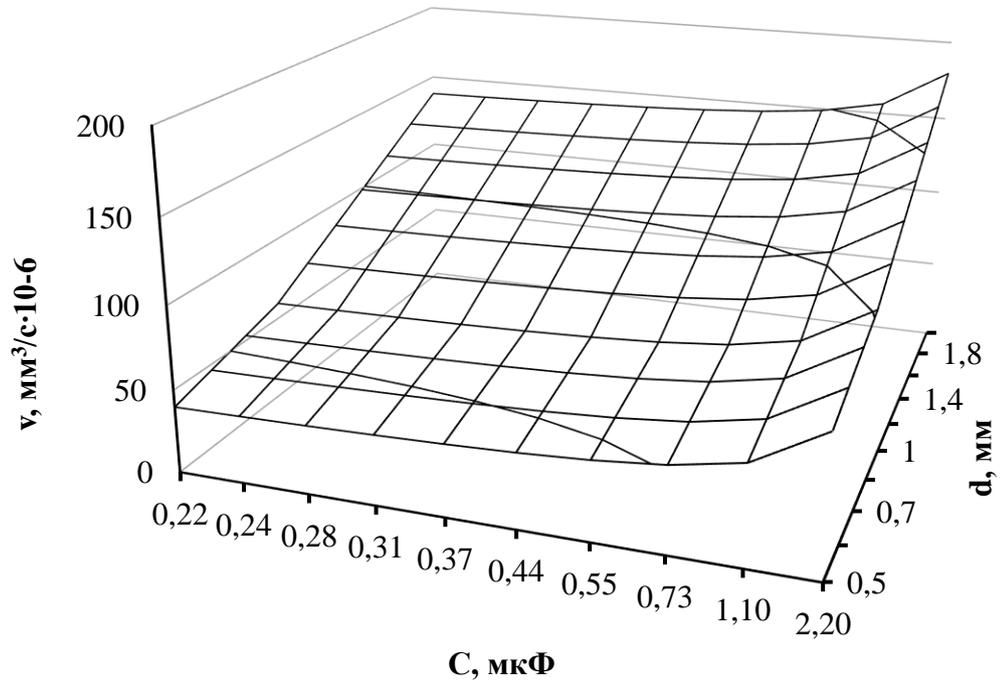
Таблица 2.3 Результаты экспериментов по определению скорости изнашивания

Образец	Ширина канавки b , мм	Износ I , мм ³	Скорость изнашивания ν мм ³ /с
1	0,28	0,05030492	$83,84 \cdot 10^{-6}$
2	0,24	0,03167581	$52,79 \cdot 10^{-6}$
3	0,37	0,11610763	$193,51 \cdot 10^{-6}$
4	0,33	0,08236455	$137,27 \cdot 10^{-6}$
Без ИУ	0,71	0,82182828	$1369,71 \cdot 10^{-6}$

На Рисунке 2.4 приведены графики зависимости скорости изнашивания ν от емкости конденсаторов C и межэлектродного зазора d при индуктивности L равной 100 Гн (а) и 200 Гн (б). Анализ выражения 2.3 показывает, что скорость изнашивания возрастает с увеличением емкости и межэлектродного зазора, что может быть связано, во-первых, с уменьшением толщины и возрастанием шероховатости УС, что согласуется с результатами однофакторных экспериментов. Во-вторых, с увеличением межэлектродного зазора, увеличивается площадь участка поверхности образца, на которую воздействуют искровые разряды, т.е. уменьшается фактическое время обработки единицы поверхности. Индуктивность оказывает незначительное влияние на величину исследуемого параметра. Таким образом, исходя из полученных результатов, а также целесообразности и технических ограничений, в качестве оптимального выбран технологический режим искрового упрочнения, определяемый следующими параметрами: емкость блока конденсаторов C - 0,22 мкФ, индуктивность L - 100 Гн, межэлектродный зазор d - 0,5 мм. При увеличении межэлектродного зазора необходимо увеличение общего времени процесса обработки.



а)



б)

Рисунок 2.4 - График зависимости скорости изнашивания v от емкости конденсаторов C и межэлектродного зазора d при индуктивности L равной 100 Гн (а) и 200 Гн (б).

2.3 Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования на коэффициент трения

2.3.1 Методика исследования

Целью исследования является определение коэффициента трения покрытия, формируемого при искровом упрочнении и микродуговом оксидировании алюминиевых сплавов. Эксперименты проводились на трех образцах из алюминиевого сплава АК4-1 ГОСТ 12592-67, один из которых обрабатывался методом ИУ, второй – МДО, а третий – не подвергался упрочнению. Также испытывался образец из стали 40Х. Диаметр образцов 29 мм, высота 6 мм.

Режим обработки МДО был выбран исходя из результатов исследований, проведенных ранее коллективом кафедры ДВС ФГБОУ ВО УГАТУ, и определялся следующими параметрами:

- концентрация КОН в электролите - 2 г/л;
- концентрация жидкого стекла Na_2SiO_3 в электролите - 2 г/л;
- емкость конденсаторов - 100 мкФ.

Для осуществления искрового упрочнения было изготовлено специальное приспособление (Рисунок 2.5), которое позволяет с помощью 5 электродов получить на поверхности покрытие шириной ~6 мм. Т.к. в ходе испытаний трение происходит по кольцу с определенными геометрическими размерами, то целесообразно обрабатывать только эту область. Технологический режим обработки ИУ определялся следующими параметрами:

- частота искровых разрядов: 4 Гц;
- время упрочнения суммарное: 150 ч;
- количество электродов: 5;
- емкость конденсаторов: 0,22 мкФ;
- межэлектродный зазор: 1 мм.

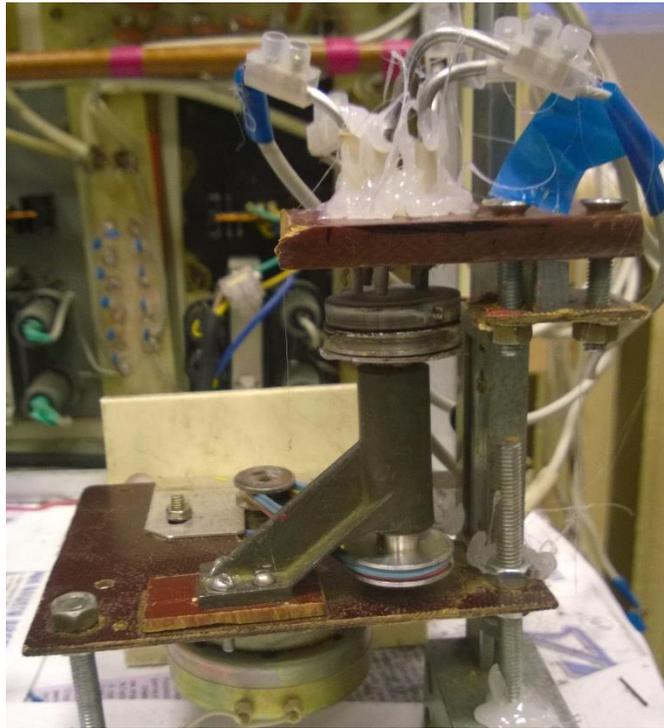


Рисунок 2.5 - Приспособление для искрового упрочнения образцов

Испытания проводились на высокотемпературном трибометре фирмы Nanovea (Рисунок 2.6). Он позволяет оценивать трибологические свойства поверхности и покрытий, в широком температурном интервале в различных средах и режимах смазки. Коэффициент трения определяется во время теста путем измерения прогиба эластичного рычага. Износ исследуемого образца осуществляется путем воздействия неподвижного индентора на вращающийся образец. Так же в результате эксперимента определяется массовый износ образца и индентора, что позволяет оценить интенсивность изнашивания.

Режим испытаний определялся следующими параметрами:

- режим трения: сухое трение;
- нагрузка: 5 Н;
- максимальный испытательный радиус: 6 мм;
- скорость вращения диска: 4000 мм/мин;
- продолжительность: 60 мин;
- контр-тело: шарик ШХ15 радиусом 3 мм.

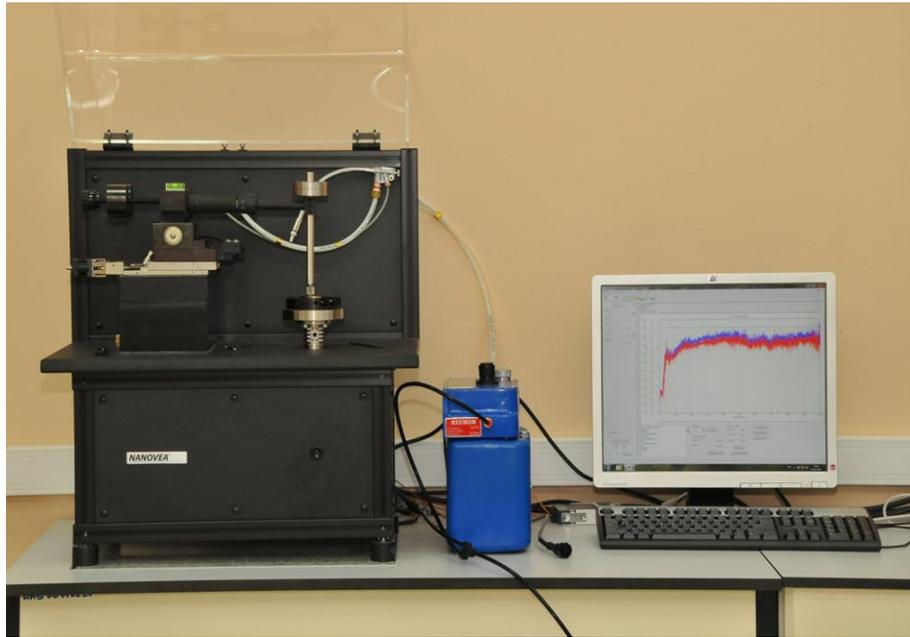


Рисунок 2.6 - Высокотемпературный трибометр Nanovea

2.2.2 Результаты эксперимента

На Рисунке 2.7 показаны лабораторные образцы после испытаний. В результате были получены данные по изменению коэффициента трения в зависимости от времени (Рисунок 2.8). В Таблице 2.4 приведены параметры по массовому износу образцов и контртел, по шероховатости поверхности образцов и толщине покрытия, а на Рисунке 2.9 приведены итоговые значения коэффициентов трения.



Рисунок 2.7 - Лабораторные образцы после испытаний на коэффициент трения, где слева направо: с ИУ-покрытием, с МДО-покрытием, без покрытия, из стали 40Х.

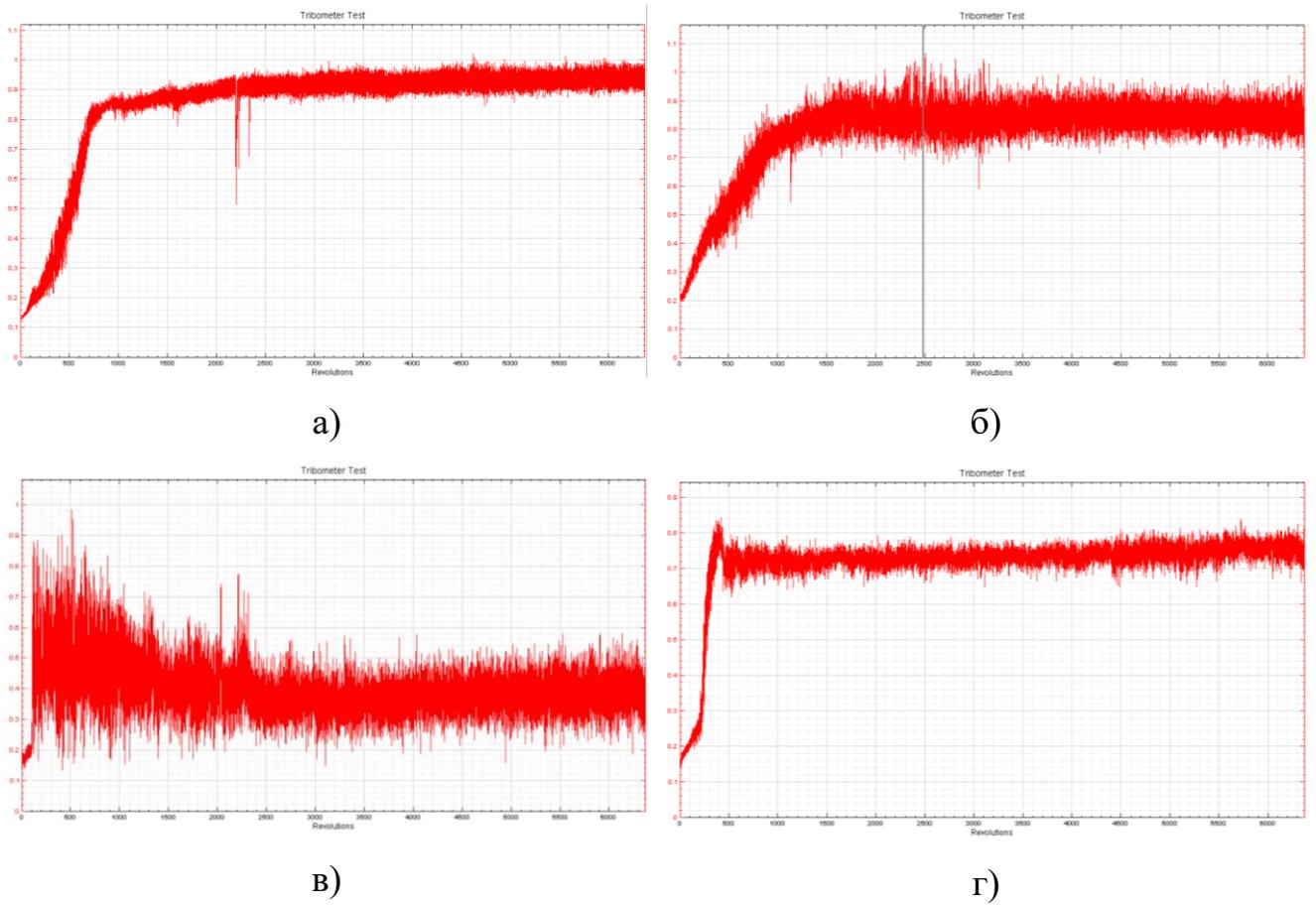


Рисунок 2.8 - Изменения коэффициента трения в процессе испытаний: а) с ИУ-покрытием; б) с МДО-покрытием; в) без покрытия; г) из стали 40Х.

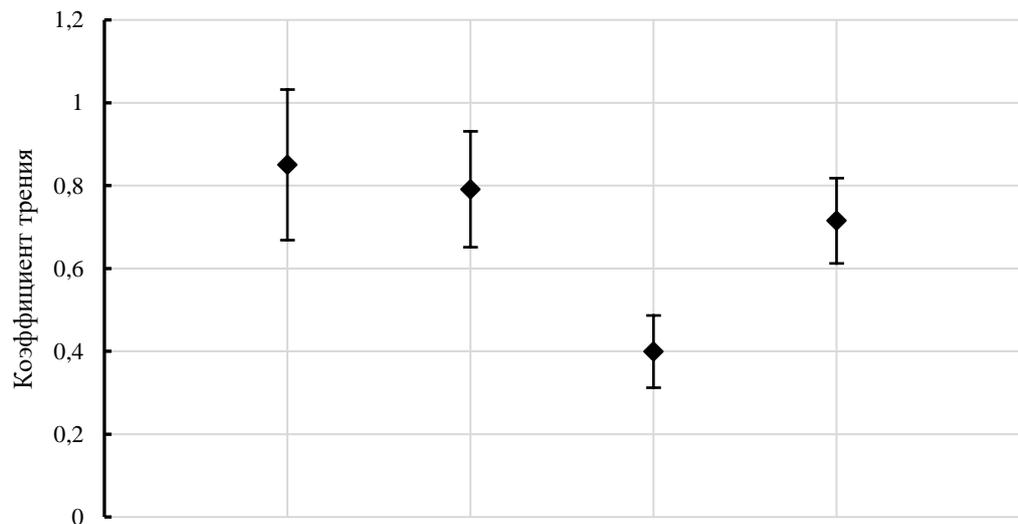


Рисунок 2.9 - Коэффициенты трения для исследуемых образцов: 1) с ИУ-покрытием; 2) с МДО-покрытием; 3) без покрытия; 4) из стали 40Х.

Анализ полученных результатов показывает, что износа образцов с покрытием и для образца из стали 40Х при данных условиях испытаний не наблюдается. Массовый износ образца из сплава АК4-1 без покрытия составил 0,004 г. Износ контртела при испытаниях не наблюдался. Полученные коэффициенты трения для ИУ и МДО-покрытия близки и незначительно превышают значение для стали 40Х: $0,85 \pm 0,18$; $0,79 \pm 0,13$; $0,72 \pm 0,1$ соответственно.

Полученные результаты для МДО-покрытия по своим значениям близки к данным, приведенным в известных исследованиях [79–84], где показано, что коэффициент трения в отсутствии смазочного материала составляет 0,45...0,8.

Таблица 2.4 Результаты испытаний лабораторных образцов

Образец	Шероховатость R_a , мкм	Износ по массе контртела, г.	Износ по массе образца, г.	Толщина покрытия, мкм	Коэф. трения
ИУ	$1,6 \pm 0,2$	0	0	30 ± 3	$0,85 \pm 0,18$
МДО	$1,3 \pm 0,2$	0	0	118 ± 3	$0,79 \pm 0,13$
АК4-1	$1,5 \pm 0,2$	0	0,004	-	$0,40 \pm 0,08$
Сталь 40Х	$1,2 \pm 0,2$	0	0	-	$0,72 \pm 0,1$

2.4 Влияние режимов искрового упрочнения на микротвердость и предел прочности алюминиевых сплавов

2.4.1 Методика исследования

Целью исследования является определение влияния искрового упрочнения на микротвердость и предел прочности сплавов алюминия. Искровое упрочнение оказывает существенное влияние на микротвердость поверхностного слоя алюминиевых сплавов, при этом под действием концентрированных потоков энергии в поверхностном слое могут возникать изменения, негативно сказывающиеся на общей прочности детали. Был запланирован и проведен полный факторный эксперимент вида 2^3 , матрица планирования которого приведена в Таблице 2.5.

Образцы из сплава АЛ30 ГОСТ 2685-75 вырезались электроискровой резкой согласно эскизу, который представлен на Рисунке 2.10. Поверхность образцов полировалась механически. Перемычка образца обрабатывалась методом ИУ с двух сторон по всей длине. Электрод был изготовлен из проволоки марки АПВ диаметром 1 мм. Продолжительность упрочнения составляла 3 часа/мм² при частоте искровых разрядов 4 Гц.

Таблица 2.5 Матрица планирования полного факторного эксперимента

Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃
1	+	-	-	+
2	+	-	+	+
3	+	+	-	+
4	+	+	+	+
5	+	-	-	-
6	+	-	+	-
7	+	+	-	-
8	+	+	+	-

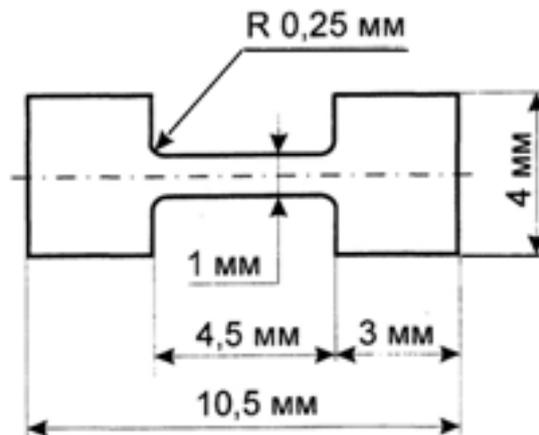


Рисунок 2.10 - Образец для испытаний на прочность

Для испытаний на прочность использовалась методика и машина для растяжения малых образцов (Рисунок 2.11) с вертикальным расположением траверсы, разработанные и применяемые в научно-исследовательском институте

физики перспективных материалов (г. Уфа). Машина оснащена вертикальным измерительно-силовым устройством. Нагружение образца при растяжении на данной установке создается шаговым двигателем, который позволяет задавать скорость перемещения траверсы в диапазоне от 0,001 мм/с до 2 мм/с при точности поддержания скорости 3% [81]. Скорость перемещения траверсы при испытаниях составляла 0,01 мм/мин. Установка оснащена датчиком усилия, имеющим верхний предел 200 кг при точности регистрации усилий 1%. Перемещение траверсы регистрируется оптическим датчиком с точностью до 3 мкм. Силовая часть установки контролируется компьютерной программой с одновременным выводом на дисплей показаний скорости растяжения, величины перемещения, величины усилия на образце.

После проведения испытаний файл отчета содержит значения усилий и перемещений за каждую единицу времени и диаграмму растяжения в координатах «усилие - перемещение». Полученные данные обрабатываются в соответствии с методикой, описанной в [81]. В результате получаем диаграмму растяжения в координатах «напряжение - относительное удлинение». По данной диаграмме определяется предел прочности образца σ_b .



Рисунок 2.11 – Машина для растяжения малых образцов.

На этих же образцах с помощью микротвердомера HVS-1000 производилось измерение микротвердости сформированного покрытия. На каждой стороне образца проводилось минимум 5 измерений, полученные значения усреднялись.

2.4.2 Результаты эксперимента

В соответствии с методикой были испытаны восемь образцов из сплава АЛ30 по ГОСТ 2685-75 с покрытием, сформированном при различных технологических режимах ИУ, и образец без покрытия. Полученные значения микротвердости H_μ и предела прочности σ_b сведены в Таблицу 2.6.

Таблица 2.6 Результаты исследования микротвердости H_μ и предела прочности σ_b образцов

Образец	Факторы эксперимента			Микротвердость H_μ , ГПа	Предел прочности σ_b МПа
	C , мкФ	L , Гн	d , мм		
1	0,22	100	2	4,45	165,47±8,27
2	0,22	200	2	4,04	157,44±7,87
3	2,2	100	2	3,76	168,40±8,42
4	2,2	200	2	1,89	164,66±8,23
5	0,22	100	0,5	2,19	162,73±8,14
6	0,22	200	0,5	3,83	160,56±7,89
7	2,2	100	0,5	1,97	157,86±
8	2,2	200	0,5	2,37	144,25±7,21
Без ИУ	-	-	-	0,92	150,92±7,55

Микротвердость возросла на всех режимах обработки. Максимальная микротвердость, достигнутая при режиме 1, составляет 4,45 ГПа, что в 4,8 раза выше, чем у исходного материала. Минимальная микротвердость получена на режиме 5, и составляет 1,89 ГПа, что в 2 раза выше, чем у образца без ИУ. Основное влияние на микротвердость покрытия оказывают емкость блока конденсаторов C и межэлектродный зазор d . Увеличение емкости блока конденсаторов C оказывает негативное влияние на микротвердость покрытия. Увеличение межэлектродного зазора d приводит к увеличению пробойного напряжения, необходимого для

возникновения искрового разряда, в результате чего возрастает энергия искрового разряда. В дополнении к этому, в искровом промежутке образуется большее количество ионов кислорода, которые внедряются в поверхность материала основы и участвуют в образовании покрытия. В совокупности это приводит к тому, что микротвердость покрытия при больших значениях межэлектродного зазора оказывается выше.

Практически на всех режимах обработки предел прочности σ_b оказался выше, чем у исходного образца [82]. Прочностные свойства образца, обработанного на режиме 8, оказались ниже, чем у исходного. Максимальная величина предела прочности, достигнутая при максимальных значениях емкости и межэлектродного зазора, составила 168 МПа. На Рисунке 2.12 приведен образец, обработанный на указанном режиме, после испытаний. Принимая во внимание, что погрешность измерения при используемой методике может достигать 10%, сделан вывод, что покрытие, формируемое методом искрового упрочнения, не оказывает негативного влияния на прочность алюминиевых сплавов.

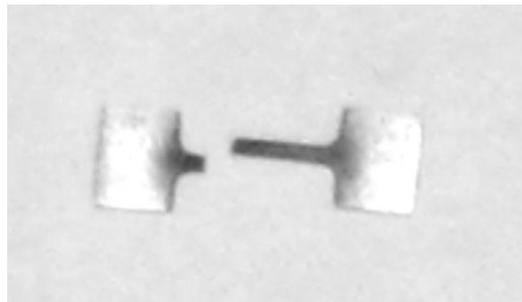


Рисунок 2.12 - Образец после испытаний на растяжение

2.5 Выводы по главе

1. Износостойкость поверхности, формируемой искровым упрочнением, определенная на машине трения и характеризуемая скоростью изнашивания, увеличивается в 10...26 раз по сравнению с исходным сплавом алюминия. Главными технологическими факторами, определяющими износостойкость

покрытия, являются емкость блока конденсаторов и величина зазора между электродом и обрабатываемой поверхностью, обуславливающие энергию искрового разряда, воздействующего на обрабатываемую поверхность.

2. Трибологические свойства поверхностей, формируемых искровым упрочнением и микродуговым оксидированием, характеризуемые коэффициентом трения в условиях сухого трения, практически идентичны.

3. Искровое упрочнение позволяет увеличить микротвердость поверхности в 2...5 раз относительно исходного сплава алюминия. Основными факторами, влияющими на микротвердость сформированного покрытия, являются величина зазора между электродом и обрабатываемой поверхностью и емкость блока конденсаторов.

4. Искровое упрочнение не оказывает негативного влияния на предел прочности алюминиевых сплавов.

ГЛАВА 3. МОТОРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

3.1 Описание экспериментального двигателя

В качестве объекта исследования для расчетно-экспериментальных работ был выбран малоразмерный авиамодельный двигатель ASPFS80 AR (рис. 3.1). Опытный образец представляет собой четырехтактный одноцилиндровый карбюраторный двигатель рабочим объемом 12,8 см³, с верхним расположением клапанов, внешним смесеобразованием, принудительным воспламенением от калильной свечи. Характеристики базового двигателя представлены в Таблице 3.1.

Производителем рекомендуется применять специальные авиамодельные топлива, в состав которых входят метиловый спирт, нитрометан (CH_3NO_2) и синтетическое масло. В период обкатки двигателя используется топливо, содержащее не более 10% нитрометана и не менее 18% масла. В дальнейшем топливо должно содержать не более 15% нитрометана и не менее 16% масла.

Метиловый спирт и нитрометан являются токсичными веществами. При пуске и в процессе работы некоторое количество топлива вытекает из карбюратора. Смазка двигателя осуществляется смазочными материалами, содержащимися в составе топлива. Поршень не имеет маслосъемных колец, вследствие чего масло из рабочей камеры попадает в картер и смазывает детали КШМ. Вместе с маслом в картер может попадать и некоторый объем топлива. Далее смазка вместе с частицами топлива удаляется через штуцер, расположенный в днище картера. Таким образом существует высокая вероятность попадания токсических веществ, содержащихся в рекомендуемой топливной смеси, в окружающую среду. В связи с тем, что стендовые испытания проводятся в закрытом помещении лаборатории, применение рекомендованного производителем двигателя топлива в условиях стендовых испытаний представляет опасность для здоровья.

В результате анализа альтернативных видов топлива, была выбрана топливная смесь, состоящая из этилового спирта, касторового масла и ацетона.

Применение синтетических масел совместно с этиловым спиртом затруднено в связи с тем, что они плохо смешиваются. В Таблице 3.2 представлено сравнение свойств доступных топлив, которые рассматривались в качестве альтернативных.

Таблица 3.1 Характеристики двигателя ASPFS80 AR

Показатели	Значение
Рабочий объем:	12,8 см ³
Число колец на одном поршне: компрессионных маслосъемных	1 0
Диаметр цилиндра:	26,5 мм
Ход поршня:	23,2 мм
Мощность:	1.1 л.с. при 11000 мин ⁻¹
Рабочий диапазон:	2000...11000 мин ⁻¹
Габаритно-массовые характеристики:	
высота, мм	0
ширина, мм	0
длина, мм	0
сухая масса, кг	0,63
Система энергообеспечения	внешний источник питания
Система запуска:	внешний электростартер
Система охлаждения:	воздушная



Рисунок 3.1 - Внешний вид двигателя ASPFS80 AR

Таблица 3.2 Свойства топлив

Показатель	Топливо		
	Метанол	Этанол	Бензин
Октановое число (RON)	156	132	91—99
Удельная теплота испарения, МДж/кг	0,36	0,92	1,2
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	19,9	21,2	45,5
Плотность, кг/м ³	790	790	750
Вязкость, сП, при 25 °С	0,544	1,074	0,52
ПДК, мг/м ³	5	1000	300

3.2 Испытательный стенд

Стенд для проведения моторных испытаний показан на Рисунке 3.2. Он представляет собой коробчатую раму 1, на которой закрепляется двигатель 2, органы управления топливной иглой 3 и дроссельной заслонкой 4, система зажигания 5, система контроля температуры 6 и защитная решетка 7. Топливный бак установлен на весах за пределами стенда.

Двигатель крепится к двум продольным балкам 8 в соответствии с требованиями производителя. Регулятор 3 позволяет изменять и фиксировать положение топливной иглы карбюратора в диапазоне 0...720° с шагом 1°. Ручка управления положением дроссельной заслонки 4 обеспечивает плавное изменение угла открытия дроссельной заслонки (УОДЗ) в диапазоне 0...100%, а так же фиксацию в положениях, соответствующих 25, 50, 75 и 100%.

Применение топлива, отличного от рекомендуемого производителем двигателя, потребовало изменения системы зажигания двигателя. При использовании стандартного топлива электрический ток к калильной свече подводится только в момент пуска двигателя, а в дальнейшем накал обеспечивается за счет теплоты, возникающей в камере сгорания. Применение такого подхода при использовании топлива на основе этилового спирта выявило ряд проблем. В частности, невозможность пуска без предварительного прогрева топлива и БЦ до

55-60 °С, что связано с высокой удельной теплотой испарения этилового спирта; сужение при установленном рекомендованном винте диапазона рабочих частот вращения до величин 4500...7000 мин⁻¹, диапазона УОДЗ до 40...75%; нестабильность работы на переходных режимах.

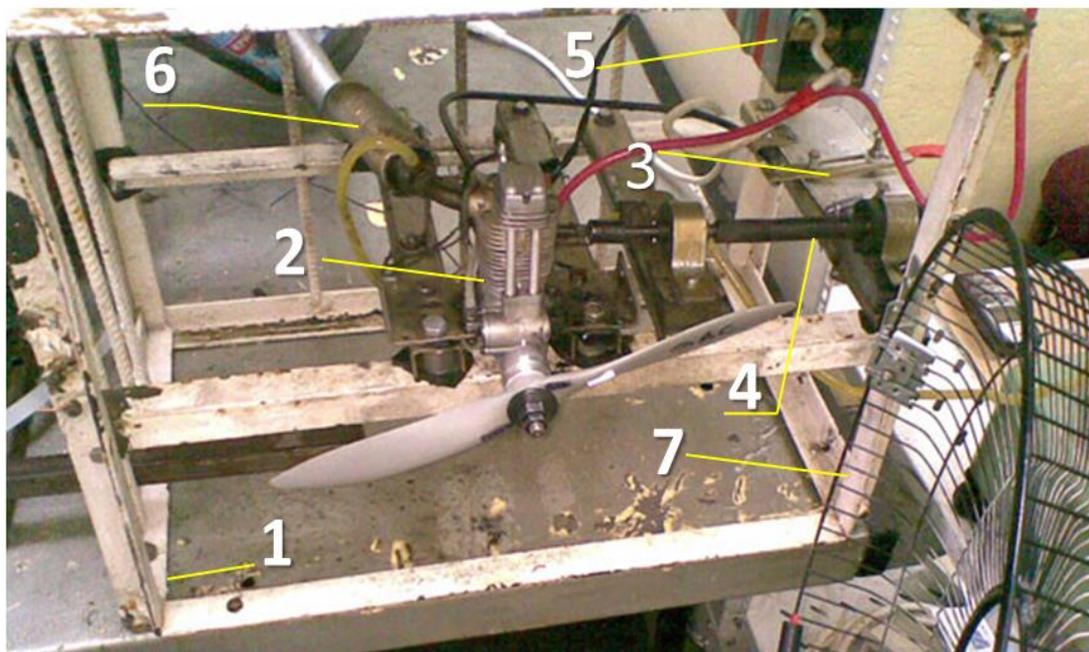


Рисунок 3.2 - Испытательный стенд: 1 — рама, 2 — двигатель, 3 — управление дросселем, 4 — управление топливным жиклером, 5 — система зажигания, 6 — система отвода выхлопных газов, 7 — решетка винта

Разработанная система зажигания обеспечивает нагрев калильной свечи как при пуске, так и при работе двигателя в процессе испытаний. Необходимые значения силы тока на свече подобраны экспериментальным путем.

Для измерения температуры применяются хромель-алюмелевые термопары, подключенные к двухканальному измерителю ОВЕН ТРМ200-Щ2. Термопара устанавливается на головке цилиндра. Контроль значений температуры ведется по экрану прибора.

Топливный бак установлен на электронных весах VigorHX-8205, что позволяет измерять массовый расход топлива. Один из выходов топливного бака соединен с карбюратором двигателя, а второй – с глушителем, тем самым в процессе работы создается избыточное давление в баке.

В качестве нагрузки при испытаниях использовались двухлопастные воздушные винты фиксированного шага с размерами 12x7, 13x7, 14x10, 15x10 дюймов. Измерение частоты вращения коленчатого вала двигателя осуществлялось бесконтактным методом при помощи фототахометра-стробоскопа АКТАКОМ АТТ-6002.

3.3 Методика исследований

Исследования, проведенные в рамках данной работы, состояли из:

1. Испытаний на износостойкость в условиях моторного стенда базовой ГЦ;
2. Испытаний на износостойкость в условиях моторного стенда алюминиевой ГЦ с МДО-покрытием.
3. Испытаний на износостойкость в условиях моторного стенда алюминиевой ГЦ с ИУ-покрытием.
4. Экспериментального определения винтовых характеристик применяемых воздушных винтов и определение эффективной мощности двигателя.
5. Экспериментального определения механических потерь ДВС с исследуемыми ГЦ.

3.3.1 Методика формирования покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра из сплава алюминия методом микродугового оксидирования

Экспериментальная гильза цилиндра изготовлена из алюминиевого деформируемого сплава АК4-1 ГОСТ 4784-97. Материал подвергался закалке в воду в течение 1,5 ч при температуре $530 \pm 5^\circ\text{C}$ и искусственному старению на воздухе в течение 10 часов при температуре $190 \pm 5^\circ\text{C}$.

Для нанесения МДО-покрытия на внутреннюю поверхность ГЦ была разработана и изготовлена специальное приспособление (Рисунок 3.3). Оно представляет собой две фторопластовые втулки (позиция 4 и 7), которые вместе с поверхностью ГЦ 3 образуют стенки электролитической ванны. Вдоль продольной оси ГЦ устанавливается электрод 5 из нержавеющей стали. Через штуцер 1 и рассекатель 6 в объем ванны подается электролит. Шайба 2 необходима для выравнивания потоков жидкости. Электролит через отверстия в верхней заглушке удаляется из ванны и возвращается в теплообменник. Благодаря потоку электролита в межэлектродном пространстве удалось организовать удаление газовых пузырей из зоны, в которой происходит процесс формирования покрытия.

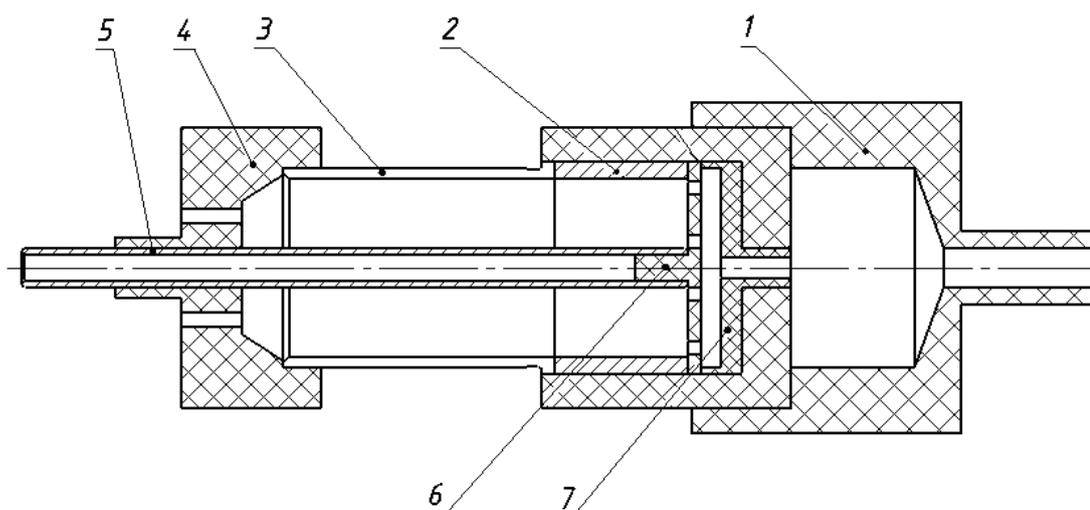


Рисунок 3.3 - Приспособление для нанесения МДО-слоя на гильзу цилиндра: 1–штуцер; 2–шайба; 3–гильза; 4–заглушка верхняя; 5–электрод; 6–рассекатель; 7 –заглушка нижняя.

Режим обработки МДО был выбран исходя из результатов исследований, проведенных ранее коллективом кафедры ДВС ФГБОУ ВО УГАТУ, и определялся следующими параметрами [77]:

- концентрация КОН в электролите - 2 г/л;

- концентрация жидкого стекла Na_2SiO_3 в электролите - 2 г/л;
- емкость конденсаторов - 100 мкФ;
- продолжительность процесса – 3 ч.

В связи с тем, что в результате МДО на поверхности детали образуется рыхлый слой (муллит), он был удален механически на токарном станке при помощи алмазной пасты и специальных приспособлений. Толщина удаленного рыхлого слоя составляла ~15...20 мкм.

3.3.2 Методика формирования покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра из сплава алюминия методом искрового упрочнения

Экспериментальная гильза изготавливается аналогично ГЦ с МДО-покрытием. Для реализации процесса искрового упрочнения была разработана искровая установка, позволяющая использовать большое количество электродов (Рисунок 3.4), и специальное приспособление. Блок управления, подключенный к источнику питания, может управлять 10 установками одновременно. При этом в один момент времени включена только одна установка.

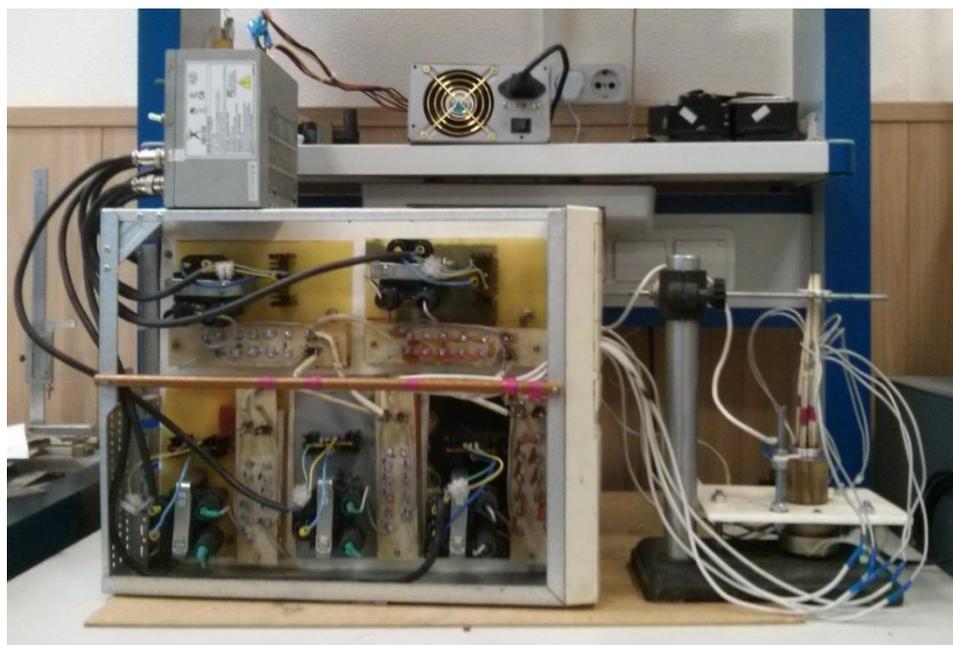


Рисунок 3.4 - Искровая установка на 10 электродов и приспособление для упрочнения поверхности гильзы цилиндра

Задающий генератор генерирует импульсы с регулируемой частотой. Далее импульсы поступают на вход десятичного счетчика, который с каждым импульсом, переключает свои выходы. Выходы счетчика подключены к искровым установкам через коммутаторы, в роли которых выступают транзисторы. Параллельно с первой искровой установкой установлен счетчик, который считает количество искровых разрядов. Высоковольтная часть искровой установки остается аналогичной указанной на Рисунке 1.25.

Для обработки всей внутренней поверхности ГЦ было разработано специальное приспособление, схематически изображенное на Рисунке 3.5. Экспериментальная ГЦ 1 устанавливается в патрон 2 из диэлектрического материала, который вращается с помощью электрического мотора через вал 3. На пять стержней 4 одеваются ролики 5 и шайба 7 из диэлектрического материала, а между ними электроды 6. Таким образом суммарно для обработки экспериментальной ГЦ использовалось десять электродов, высота электрода 2 мм, расстояние между электродами – 2 мм. Межэлектродный зазор определяется разницей между радиусом кольца-электрода и ролика. Искровые установки имеют общий катод, который подключается к внешней поверхности ГЦ через скользящий контакт. Патрон вращается со скоростью 2 мин⁻¹. Таким образом, поверхность гильзы обрабатывается полосами высотой ~2 мм и с зазором в 2 мм между ними. Выбор подобной схемы упрочнения обосновывается, с одной стороны, сокращением суммарного времени обработки всей поверхности, и, с другой стороны, необходимостью обеспечения наиболее тяжелых условий работы покрытия с точки зрения износостойкости, так как при такой схеме нанесения покрытия возникают значительные напряжения на границе мягкого основного металла и твердой упрочненной полосы. В результате, важную роль начинает играть не только микротвердость, но и адгезия упрочненного слоя, а также его способность сопротивляться периодическим изгибающим напряжениям.

Время обработки каждой полосы – 40 часов. Емкость блока конденсаторов составляла 0,22 мкФ, межэлектродный зазор – 1 мм. Частота искровых разрядов 4 Гц на каждом электроде.

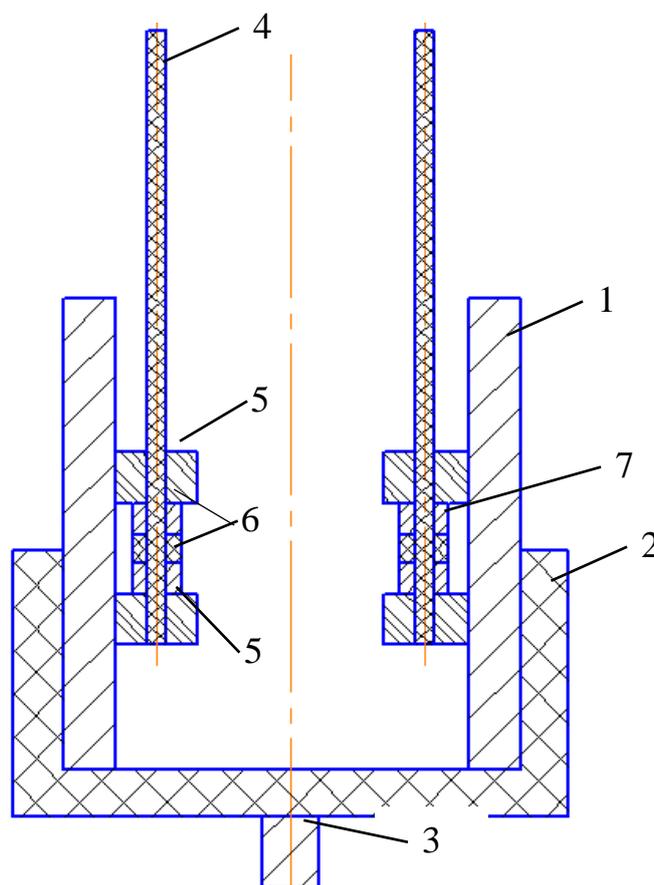


Рисунок 3.5 - Приспособление для модификации методом ИУ внутренней поверхности ГЦ: 1 – обрабатываемая гильза цилиндра, 2 – патрон, 3 – вал, 4 – стержень, 5 – ролик, 6 – электрод, 7 – шайба.

3.3.3 Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы

Моторные испытания исследуемых гильз цилиндров состоит из нескольких этапов. Первый этап, продолжительностью 30 мин – обкатка двигателя и

приработка деталей ЦПГ. После пуска двигателя производится прогрев в течение 1 мин при УОДЗ 25%. Оставшееся время обкатка проводится при частоте вращения КВ 5000 мин⁻¹. Используется рекомендованный производителем винт размером 13x7 дюймов. Состав применяемого топлива: 80% этилового спирта, 20% касторового масла, 30 г ацетона. После завершения обкатки производится разборка двигателя и контроль геометрических размеров и массы деталей ЦПГ.

Далее испытания проводятся следующим образом. После пуска двигатель работает в течение 10,5 минут, при этом происходит изменение УОДЗ в соответствии с Таблицей 3.3. После чего производится останов и остывание двигателя в течение 10 минут.

После каждых десяти часов наработки производится разборка двигателя и контроль геометрических размеров и массы деталей ЦПГ. В зависимости от общего времени испытаний изменяются условия работы двигателя: снижается количество масла в топливе, с помощью различных воздушных винтов изменяется частота вращения и нагрузка (Таблица 3.4). Суммарное время работы двигателя составляет 50 часов.

Измерение износа ГЦ и поршня производится перед началом испытаний, а так же после каждого этапа. Контролируется линейный и массовый износ деталей. Измерения производятся при помощи нутромера НИ 18-35-0,01, скобы индикаторной СИ-50 и аналитических весов ВСЛ-400-1. Схема контрольных точек на рабочей поверхности ГЦ показана на Рисунке 3.6, на поверхности поршня – на Рисунке 3.7. Точки 1, 2 и 3 лежат на плоскости, перпендикулярной продольной оси КВ двигателя. Для того чтобы обеспечить одинаковое положение ГЦ при каждом цикле разборки/сборки в верхней части гильзы сделана риска, указывающая на ось КВ.

Перед проведением измерений поверхность деталей необходимо очистить от грязи и продуктов сгорания. Для этого применяется бензин, водный раствор гидроксида аммония, хозяйственное мыло, этиловый спирт. Результаты измерений заносятся в протокол эксперимента.

Таблица 3.3 Изменение УОДЗ в течение одного запуска ДВС

Этап	УОДЗ, %	Время, сек
1	25	30
2	50	60
3	100	60
4	25	30
5	75	120
6	50	60
7	25	30
8	100	120
9	50	60
10	25	60

Таблица 3.4 Изменение условий работы ДВС в зависимости от времени наработки

Время, ч	Состав топлива			Размер винта
	Этиловый спирт C_2H_5OH , %	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...50	92	8	30	12x7

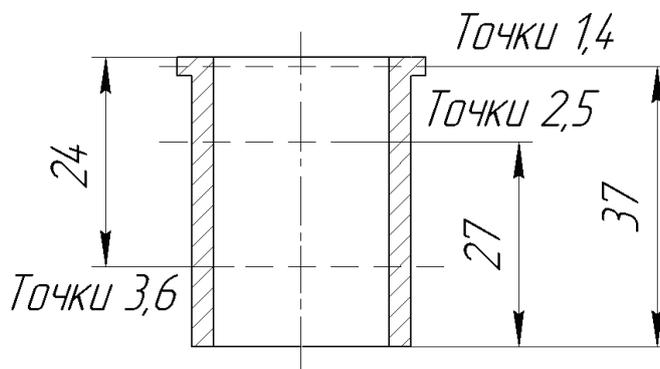


Рисунок 3.6 - Схема расположения контрольных точек на рабочей поверхности гильзы цилиндра.

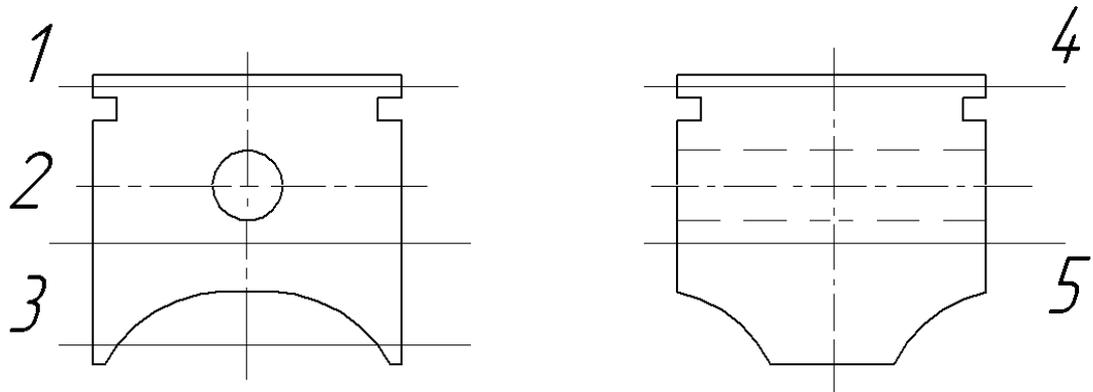


Рисунок 3.7 - Схема расположения контрольных точек на поверхности поршня.

3.3.4 Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя

Мощность механических потерь двигателя с исследуемыми ГЦ определялась методом прокрутки на стенде СТМ-3000. Двигатель соединялся со стендом с помощью гибкой муфты (Рисунок 3.8). Вал двигателя проворачивался с помощью стенда. Диапазон частоты вращения $3000 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$, шаг – 1000 мин^{-1} . На каждой точке производилось измерение и запись крутящего момента в течение 30 секунд, далее данные усреднялись. В связи с тем, что смазочный материал подается в двигатель вместе с топливом, топливная система работала в штатном режиме. УОДЗ – 100%.

Программа испытаний:

1. Включить подачу топлива, открыть топливный жиклер на $\frac{3}{4}$ оборота, выставить УОДЗ в 100%.
2. Прогрев стенда и двигателя. Частота вращения 3000 мин^{-1} , продолжительность 5 мин.
3. Измерение исследуемых показателей. Частота вращения 3000 мин^{-1} , продолжительность измерения 30 с.

4. Увеличение частоты вращения на 1000 мин^{-1} . Измерение исследуемых параметров. Продолжительность измерения 30 с.
5. Повторение шага 4 до тех пор, пока частота вращения не достигнет 6000 мин^{-1} .



Рисунок 3.8 - Двигатель на стенде СТМ-3000

Испытания проводятся для каждой гильзы цилиндров, результаты заносятся в протокол, значения момента для каждой контрольной точки усредняются. Далее измеряются механические потери, возникающие в самом стенде без установленного двигателя. Окончательные значения момента определяются как разность между соответствующими значениями измеренного усредненного момента двигателя и самого стенда.

3.3.5 Методика исследования влияния искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя

Изменение мощности механических потерь при работе с экспериментальными гильзами будет приводить к изменению эффективных

показателей двигателя, в частности, эффективной мощности N_e . После обкатки двигателя снималась внешняя скоростная характеристика двигателя, а после проведения пятидесятичасовых испытаний на износостойкость строились скоростные характеристики двигателя при 25%, 50%, 75% и 100% УОДЗ. Для этого были получены характеристики используемых воздушных винтов, описывающие потребляемую мощность в зависимости от частоты вращения. Далее, зная частоту вращения коленчатого вала двигателя по полученным характеристикам воздушных винтов определялась эффективная мощность N_e .

Определение винтовых характеристик производилось на стенде СТМ-3000 (Рисунок 3.9). Воздушный винт закреплен на валу с помощью болта. Вал установлен в 2 шариковых подшипниках.

Программа испытаний:

1. Установка исследуемого воздушного винта на стенд.
2. Прогрев стенда. Частота вращения 3000 мин^{-1} , продолжительность 5 мин.
3. Измерение исследуемых показателей. Частота вращения 3500 мин^{-1} , продолжительность измерения 10 с.
4. Увеличение частоты вращения на 500 мин^{-1} . Измерение исследуемых параметров. Продолжительность измерения 10 с.
5. Повторение этапа 4 до тех пор, пока частота вращения не достигнет 9000 мин^{-1} .

Исследования проводятся по 2 раза для каждого воздушного винта, а также для стенда с установленным валом без воздушного винта. Полученные результаты усредняются для каждой исследуемой точки. Окончательные значения исследуемых параметров определяются как разность между измерением соответствующего параметра с воздушным винтом и без него для каждой исследуемой точки.

Таким образом, определяются развиваемый на валу момент и развиваемая мощность в диапазоне частоты вращения вала $3000 \dots 9000 \text{ мин}^{-1}$ с шагом 500 мин^{-1} . На основании полученных результатов строятся графики, показывающие

соответствующие зависимости. Т.к. частота вращения двигателя превышает 9000 мин^{-1} , для по полученным результатам выводятся аппроксимационные многочлены для каждого воздушного винта. Момент воздушного винта имеет квадратичную зависимость от частоты вращения, т.е. $M \sim n^2$ [83]. Аппроксимационные многочлены второй степени получены в программном пакете Microsoft Excel.



Рисунок 3.9 - Воздушный винт на стенде СТМ-3000

Далее проводятся испытания для определения мощности, развиваемой двигателем, при работе с используемыми воздушными винтами. Программа испытаний:

1. Установка воздушного винта на двигатель.
2. Прогрев двигателя, продолжительность 3 мин, частота вращения – 5000 мин^{-1} .
3. Установка УОДЗ 25%. Определение частоты вращения воздушного винта. Контроль массового расхода топлива и температуры на головке цилиндра.

4. Установка УОДЗ 50%. Определение частоты вращения воздушного винта. Контроль массового расхода топлива и температуры на головке цилиндра.
5. Установка УОДЗ 75%. Определение частоты вращения воздушного винта. Контроль массового расхода топлива и температуры на головке цилиндра.
6. Установка УОДЗ 100%. Определение частоты вращения воздушного винта. Контроль массового расхода топлива и температуры на головке цилиндра.

Частота вращения воздушного винта определялась с помощью фототахометра-стробоскопа АКТАКОМ АТТ-6002, температура головки цилиндра измерялась термопарой типа ТХА, установленной в крышке цилиндра, при помощи измерителя ОВЕН ТРМ-200.

3.4 Результаты исследований

3.4.1 Исследование износостойкости деталей цилиндропоршневой группы базового двигателя

В результате спектрального анализа материалов, из которых изготовлены штатные детали ЦПГ двигателя ASP FS 80 AR установлено, что:

1. штатная ГЦ изготовлена из стали марки 40Х ГОСТ 4543-71;
2. штатный поршень изготовлен из сплава алюминия марки АК-12;
3. штатное компрессионное кольцо изготовлено из стали 45.

В соответствии с методикой, описанной в разделе 3.3.3 проведены испытания двигателя в штатной комплектации в условиях стенда. После обкатки и каждые 10 часов испытаний производился разбор двигателя с последующим контролем линейных размеров и массы ГЦ и поршня. Результаты измерений приведены в Таблицах 3.5 и 3.6. Итоговые значения линейного и массового износа деталей сведены в Таблицу 3.7. На Рисунках 3.10 и 3.11 показаны ГЦ и поршень после 50 часов испытаний.

Массовый износ ГЦ за время испытаний составил 0,039 г, поршня – 0,008 г. Максимальный диаметральный износ ГЦ наблюдается в точках 1 и 4 (0,089 и 0,08

мм соответственно), которые лежат в области ВМТ. Наименьший износ поверхности ГЦ наблюдается в точках 3 и 6. Величина скорости изнашивания гильзы цилиндра в период обкатки двигателя (30 мин) достигает $1,33 \cdot 10^{-3}$ мм/мин в контрольной точке 1, и к концу 10 часов работы снижается до $0,032 \cdot 10^{-3}$ мм/мин.

Таблица 3.5 Результаты измерений размеров штатной гильзы

№	Время наработки, ч	Размеры ГЦ по точкам, мм						Масса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,46	26,46	26,465	26,45	26,45	26,46	49,952
2	0,5	26,5	26,497	26,49	26,487	26,488	26,485	49,948
3	10,5	26,52	26,503	26,52	26,52	26,51	26,52	49,945
4	20,5	26,54	26,51	26,52	26,52	26,52	26,52	49,925
5	30,5	26,54	26,52	26,52	26,522	26,52	26,52	49,923
6	40,5	26,543	26,522	26,52	26,526	26,52	26,52	49,922
7	50,5	26,549	26,526	26,526	26,53	26,52	26,52	49,913
Износ		0,089	0,066	0,061	0,08	0,07	0,06	0,039

Таблица 3.6 Результаты измерений размеров поршня

№	Время наработки, ч	Размеры поршня по точкам, мм					Масса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,414	26,41	26,384	26,42	26,424	10,653
2	0,5	26,42	26,41	26,395	26,425	26,43	10,649
3	10,5	26,42	26,42	26,39	26,43	26,43	10,647
4	20,5	26,412	26,42	26,39	26,43	26,43	10,647
5	30,5	26,39	26,42	26,39	26,39	26,43	10,644
6	40,5	26,39	26,42	26,378	26,39	26,43	10,646
7	50,5	26,389	26,42	26,369	26,388	26,43	10,645
Износ		0,025	-0,01	0,015	0,032	-0,006	0,008

Таблица 3.7 Линейный и массовый износ штатной ГЦ и поршня

Деталь	Линейный износ, мм						Массовый износ, г
	1	2	3	4	5	6	
Гильза цилиндра	0,089	0,066	0,061	0,08	0,07	0,06	0,039
Поршень	0,025	-0,01	0,015	0,032	-0,006	–	0,008



Рисунок 3.10 – Штатная гильза цилиндра после испытаний



Рисунок 3.11 – Штатный поршень после испытаний

3.4.2 Исследование влияния микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы

В соответствии с методикой, описанной в разделе 3.3.1, была получена гильза цилиндра с МДО-покрытием на рабочей поверхности (Рисунок 3.12). Толщина и микротвердость упрочненного слоя определялись по образцу-свидетелю, изготовленному из того же материала и обработанному на том же технологическом режиме. Микротвердость покрытия определялась с помощью микротвердомера HVS-1000 и составила 6,3 ГПа. Толщина УС измерялась с помощью толщиномера ТТ-210 и составила 82 мкм.

При испытаниях использовались штатное компрессионное кольцо и поршень. Результаты, полученные в ходе проведения испытаний, приведены в Таблицах 3.8 и 3.9. Итоговые значения линейного и массового износа деталей сведены в Таблицу 3.10.

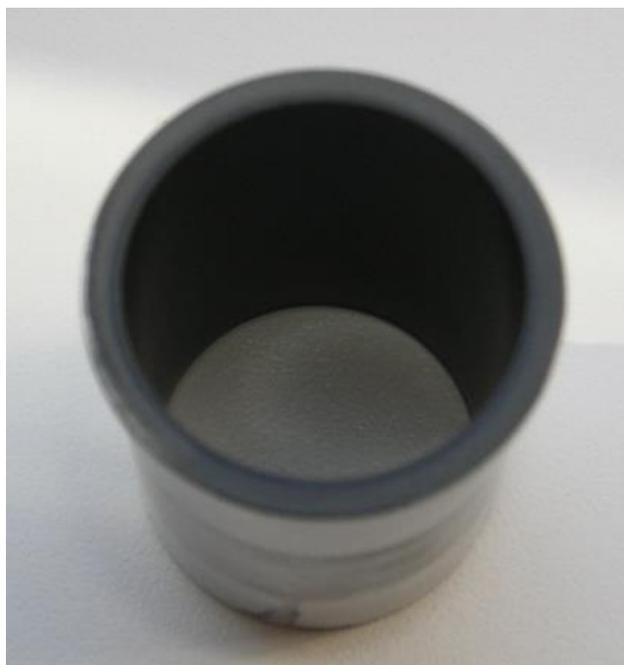


Рисунок 3.12 - Гильза цилиндра из сплава алюминия АК4-1 после МДО

Таблица 3.8 Результаты измерений размеров гильзы с МДО-покрытием

№ замера	Время наработки, ч	Размеры ГЦ по точкам, мм						Масса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,55	26,54	26,535	26,54	26,525	26,52	17,972
2	0,5	26,55	26,54	26,535	26,54	26,525	26,52	17,972
3	10,5	26,558	26,544	26,538	26,542	26,526	26,52	17,971
4	20,5	26,56	26,551	26,54	26,542	26,526	26,52	17,969
5	30,5	26,561	26,557	26,543	26,548	26,526	26,52	17,964
6	40,5	26,569	26,569	26,55	26,548	26,528	26,52	17,957
7	50,5	26,573	26,571	26,551	26,55	26,531	26,521	17,953
Износ		0,023	0,031	0,016	0,01	0,006	0,001	0,019

Таблица 3.9 Результаты измерений размеров поршня

№ замера	Время наработки, ч	Размеры поршня по точкам, мм					Масса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,39	26,421	26,418	26,39	26,44	10,523
2	0,5	26,389	26,421	26,415	26,39	26,449	10,523
3	10,5	26,389	26,42	26,401	26,39	26,445	10,522
4	20,5	26,387	26,416	26,392	26,388	26,44	10,521
5	30,5	26,386	26,414	26,379	26,383	26,442	10,519
6	40,5	26,383	26,411	26,364	26,381	26,438	10,515
7	50,5	26,381	26,407	26,362	26,378	26,437	10,514
Износ		0,009	0,014	0,056	0,012	0,003	0,009

Таблица 3.10 Линейный и массовый износ экспериментальной ГЦ и поршня

Деталь	Линейный износ по точкам, мм						Массовый износ, г
	1	2	3	4	5	6	
Гильза цилиндра	0,023	0,031	0,016	0,01	0,006	0,001	0,019
Поршень	0,009	0,014	0,056	0,012	0,003	-	0,009

Массовый износ ГЦ с МДО за время испытаний составил 0,019 г, поршня – 0,009 г. Максимальный диаметральный износ ГЦ наблюдается в точках 1 и 2 (0,023 и 0,031 мм соответственно). Наименьший износ поверхности ГЦ наблюдается в точках 5 и 6. Наибольший линейный износ поршня наблюдается в точке 3 и равен 0,056 мм. В период обкатки различного износа гильзы цилиндра с МДО-покрытием не происходит, а к концу 10 часов работы скорость изнашивания составила $0,013 \cdot 10^{-3}$ мм/мин, что в 2,5 раза ниже, чем у штатной ГЦ.

3.4.3 Исследование влияния искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы

В соответствии с методикой, описанной в разделе 3.3.2, была получена гильза цилиндра с ИУ-покрытием на рабочей поверхности (Рисунок 3.13). Высота обработанной зоны составляет ~ 34 мм.

При испытаниях использовались штатное компрессионное кольцо и поршень. Результаты, полученные в ходе проведения испытаний, приведены в Таблицах 3.11 и 3.12. Итоговые значения линейного и массового износа деталей сведены в Таблицу 3.13.



Рисунок 3.13 - Гильза цилиндра из сплава алюминия АК4-1 после ИУ

Таблица 3.11 Результаты измерений размеров гильзы с ИУ-покрытием

№ замера	Время наработки, ч	Размеры ГЦ по точкам, мм						Масса ГЦ, г
		1	2	3	4	5	6	
1	0	26,497	26,499	26,507	26,491	26,493	26,503	17,563
2	0,5	26,501	26,501	26,507	26,493	26,493	26,503	17,562
3	10,5	26,512	26,511	26,515	26,5	26,498	26,508	17,557
4	20,5	26,514	26,515	26,517	26,503	26,5	26,508	17,553
5	30,5	26,518	26,524	26,521	26,507	26,501	26,508	17,55
6	40,5	26,527	26,53	26,528	26,512	26,506	26,509	17,544
7	50,5	26,535	26,534	26,532	26,514	26,508	26,509	17,539
Износ		0,038	0,035	0,025	0,023	0,015	0,006	0,024

Таблица 3.12 Результаты измерений размеров поршня

№ замера	Время наработки, ч	Размеры поршня по точкам, мм					Масса, г
		1	2	3	4	5	
1	0	26,41	26,412	26,412	26,419	26,422	10,652
2	0,5	26,406	26,41	26,409	26,42	26,422	10,651
3	10,5	26,401	26,408	26,402	26,418	26,422	10,648
4	20,5	26,398	26,408	26,398	26,414	26,422	10,646
5	30,5	26,394	26,407	26,397	26,412	26,421	10,645
6	40,5	26,385	26,403	26,392	26,409	26,418	10,643
7	50,5	26,381	26,4	26,391	26,404	26,418	10,642
Износ		0,029	0,012	0,021	0,015	0,004	0,01

Таблица 3.13 Линейный и массовый износ экспериментальной ГЦ и поршня

Деталь	Линейный износ, мм						Весовой износ, г
	1	2	3	4	5	6	
Гильза цилиндра	0,038	0,035	0,025	0,023	0,015	0,006	0,024
Поршень	0,029	0,012	0,021	0,015	0,004	-	0,01

Массовый износ ГЦ с ИУ за время испытаний составил 0,024 г, поршня – 0,01 г. Максимальный диаметральный износ ГЦ наблюдается в точках 1 и 2 (0,038 и 0,035 мм соответственно). Наименьший износ поверхности ГЦ наблюдается в точках 5 и 6. Наибольший линейный износ поршня наблюдается в точке 1 и равен 0,029 мм. Величина скорости изнашивания гильзы цилиндра в период обкатки двигателя (30 мин) достигает $0,13 \cdot 10^{-3}$ мм/мин в контрольной точке 1, и к концу 10 часов работы снижается до $0,017 \cdot 10^{-3}$ мм/мин, что в 1,88 раза ниже, чем у штатной ГЦ.

3.4.4 Исследование влияния искрового упрочнения и микродугового окислирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя

В соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.3.4, на стенде СТМ-300 были получены значения крутящего момента при холодной прокрутке двигателя с исследуемыми ГЦ. Дополнительно были измерены механические потери, возникающие в самом стенде. Результаты приведены в Таблице 3.14. Итоговые значения крутящего момента, характеризующие механические потери двигателя, полученные с учетом потерь на самом стенде, приведены на Рисунке 3.14.

Таблица 3.14 Результаты исследования механических потерь

Объект	Крутящий момент при разной частоте вращения, Н·м			
	3000	4000	5000	6000
Штатная ГЦ	0,76	0,74	0,66	0,64
ГЦ с МДО-покрытием	0,63	0,71	0,62	0,56
ГЦ с ИУ-покрытием	0,80	0,79	0,71	0,70
Стенд	0,14	0,13	0,14	0,13

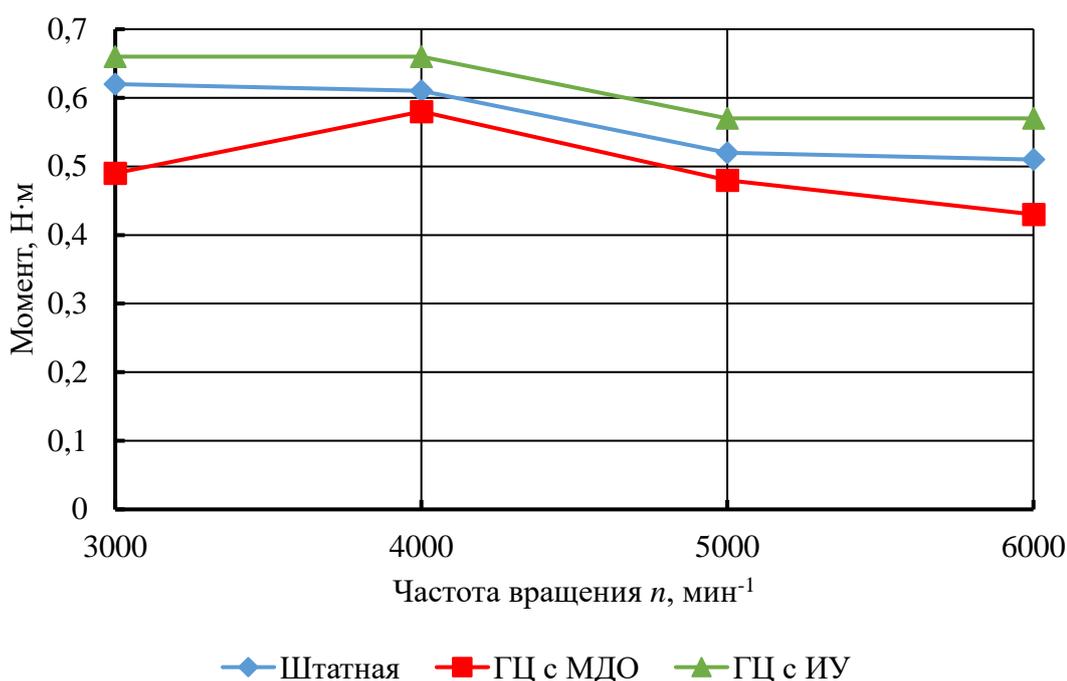


Рисунок 3.14 – Механические потери

Наименьшие механические потери на всем диапазоне частот вращения получены для гильзы цилиндра с МДО-покрытием, наибольшие – для гильзы цилиндра с ИУ-покрытием. Высокие значения механических потерь для ГЦ с ИУ-покрытием объясняются характером нанесения покрытия горизонтальными полосами, т.к., из результатов по исследованию коэффициентов трения, приведенных в разделе 2.3, следует ожидать, что для сплошного покрытия механические потери при искровом упрочнении должны быть близки к значениям, полученным при микродуговом оксидировании.

3.4.5 Определение характеристик воздушных винтов

Изменение мощности механических потерь при работе с экспериментальными гильзами будет приводить к изменению эффективных показателей двигателя, в частности, эффективной мощности N_e . В соответствии с методикой, описанной в разделе 3.3.5, для определения эффективной мощности двигателя необходимо получить характеристики воздушных винтов. Результаты

выполненных в соответствии с методикой испытаний воздушных винтов приведены в Таблице 3.15. На основе полученных данных, построены зависимости (Рисунок 3.15) и получены аппроксимационные многочлены второго порядка для воздушных винтов 12x7, 13x7, 14x10, 15x10 соответственно:

$$M_e = 2,28571 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 + 6,86667 \cdot 10^{-5} \cdot n - 2,46226 \cdot 10^{-1}$$

$$M_e = 6,79321 \cdot 10^{-9} \cdot n^2 + 1,62398 \cdot 10^{-5} \cdot n - 6,23177 \cdot 10^{-3} \quad (3.1)$$

$$M_e = 1,89071 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 - 2,21489 \cdot 10^{-5} \cdot n + 8,69860 \cdot 10^{-2}$$

$$M_e = 1,72967 \cdot 10^{-8} \cdot n^2 + 4,24725 \cdot 10^{-5} n - 1,17055 \cdot 10^{-1}.$$

Полученные результаты зависимости далее использовались при определении эффективных показателей двигателя.

Таблица 3.15 Результаты измерений винтовых характеристик

Винт	Момент винта М при разной частоте вращения, Н·м											
	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500	9000
12x7	0,002	0,071	0,132	0,187	0,242	0,292	0,338	0,391	0,412	0,485	0,542	0,626
13x7	0,118	0,155	0,186	0,225	0,263	0,341	0,378	0,453	0,489	0,560	0,616	0,705
14x10	0,215	0,285	0,368	0,441	0,513	0,631	0,744	0,863	0,971	1,138	1,303	1,497
15x10	0,206	0,299	0,399	0,508	0,617	0,746	0,865	1,007	1,227	1,358	1,521	1,722

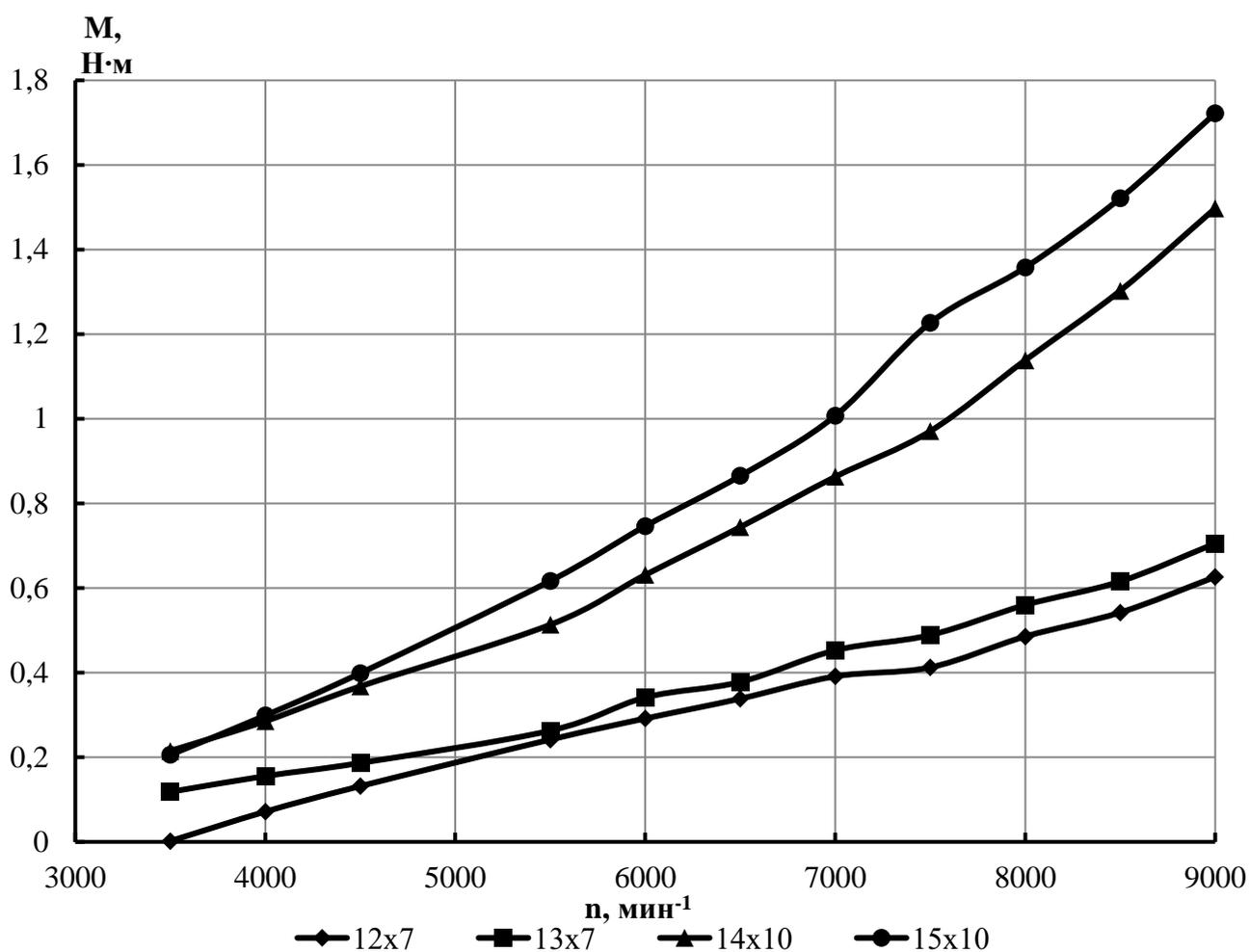


Рисунок 3.15 - Винтовые характеристики.

3.4.6 Исследование эффективных показателей базового двигателя

В соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.3.5, получены значения частоты вращения КВ, расхода топлива и температуры на головке цилиндра для штатной комплектации исследуемого двигателя. Измерения проводились для каждого воздушного винта. В Таблице 3.16 приведены результаты измерения максимальной частоты вращения вала двигателя при 100% УОДЗ при работе на разные воздушные винты после обкатки двигателя. В Таблицах 3.17 – 3.20 приведены результаты, полученные после 50,5 часов наработки двигателя.

Таблица 3.16. Результаты испытаний после обкатки

Воздушный винт	Частота вращения, мин⁻¹
15x10	6200
14x10	6650
13x7	9150
12x7	9650

Таблица 3.17. Результаты испытаний (винт 12x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	7150	19	118,7
50	3	8270	17	123,2
75	3	9040	25	163,1
100	3	9450	31	164,3

Таблица 3.18 Результаты испытаний (винт 13x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	6060	12	115,4
50	3	7040	16	117,4
75	3	8310	20	127,1
100	1:45	8790	21	128,9

Таблица 3.19 Результаты испытаний (винт 14x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	4860	12	119
50	3	5320	13	115,1
75	3	5490	14	138
100	3	5600	16	137

Таблица 3.20 Результаты испытаний (винт 15x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин ⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	4440	20	106,6
50	3	5100	18	108,9
75	1:46	4850	9	130,5
100	3	-	-	-

3.4.6 Исследование влияния микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя

В соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.3.5, получены значения частоты вращения КВ, расхода топлива и температуры на головке цилиндра для исследуемого двигателя при комплектации его гильзой цилиндра с МДО-покрытием. Измерения проводились для каждого воздушного винта. В Таблице 3.21 приведены результаты измерения максимальной частоты вращения вала двигателя при 100% УОДЗ при работе на разные воздушные винты после обкатки двигателя. В Таблицах 3.22 – 3.25 приведены результаты, полученные после 50,5 часов наработки двигателя.

Таблица 3.21. Результаты испытаний после обкатки

Воздушный винт	Частота вращения, мин ⁻¹
15x10	6250
14x10	6960
13x7	9850
12x7	10030

Таблица 3.22. Результаты испытаний (винт 12x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	6800	18	114
50	3	7800	13	111,8
75	3	9830	22	127,9
100	3	10050	31	134,5

Таблица 3.23 Результаты испытаний (винт 13x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	6900	19	109,7
50	3	8100	14	118,1
75	3	9150	22	141,7
100	3	9550	27	144,5

Таблица 3.24 Результаты испытаний (винт 14x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	5450	13	108,6
50	3	5950	14	113,7
75	3	6550	21	120,9
100	3	6250	16	135,7

Таблица 3.25 Результаты испытаний (винт 15x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	5200	15	111,1
50	3	5600	14	115,7
75	3	6050	17	134,6
100	3	6250	16	132,3

3.4.7 Исследование влияния искрового упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндра на эффективные показатели двигателя

В соответствии с методикой, приведенной в разделе 3.3.5, получены значения частоты вращения КВ, расхода топлива и температуры на головке цилиндра для исследуемого двигателя при комплектации его гильзой цилиндра с МДО-покрытием. Измерения проводились для каждого воздушного винта. В Таблице 3.26 приведены результаты измерения максимальной частоты вращения вала двигателя при 100% УОДЗ при работе на разные воздушные винты после обкатки двигателя. В Таблицах 3.27 – 3.30 приведены результаты, полученные после 50,5 часов наработки двигателя.

Таблица 3.26. Результаты испытаний после обкатки

Воздушный винт	Частота вращения, мин⁻¹
15x10	5840
14x10	6150
13x7	8370
12x7	8620

Таблица 3.27. Результаты испытаний (винт 12x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	6700	16	110,4
50	3	7800	14	112,7
75	3	8700	17	119
100	3	8850	22	126,7

Таблица 3.28 Результаты испытаний (винт 13x7)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	6200	13	111,2
50	3	7300	12	113,1
75	3	8400	18	121,5
100	3	8600	22	131,3

Таблица 3.29 Результаты испытаний (винт 14x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	5100	14	107
50	3	5700	13	113,2
75	3	6250	15	122,6
100	3	6300	19	116,5

Таблица 3.30 Результаты испытаний (винт 15x10)

УОДЗ, %	Время, мин	Частота вращения КВ, мин⁻¹	Расход топлива, г	Температура, °С
25	5	4750	14	106,6
50	3	5100	11	111,8
75	3	5600	14	126,1
100	3	5900	19	110,3

3.5 Анализ результатов исследований

3.5.1 Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на износостойкость деталей цилиндропоршневой группы

Для анализа влияния искрового упрочнения и МДО на износостойкость деталей гильзы цилиндра на основе результатов, приведенных в разделах 3.4.1 – 3.4.3, построены графики, описывающие динамику линейного износа гильзы цилиндра в контрольных точках (Рисунок 3.16) и массового износа (Рисунок 3.17).

Контрольные точки 1 и 4 находятся в зоне ВМТ, где происходит перекладка поршня и действуют максимальные температура и давление. Износ в точке 1 составил: для штатной ГЦ 0,089 мм, для ГЦ с МДО 0,023 мм, для ГЦ с ИУ 0,038 мм [96 – 98]. Таким образом, линейный износ алюминиевой ГЦ с МДО-покрытием в зоне ВМТ в 3,87 раза меньше, чем износ штатной ГЦ из стали марки 40Х. Износ ГЦ с ИУ-покрытием в 2,34 раза ниже, чем штатной ГЦ.

Характер кривой динамики износа для остальных контрольных точек идентичен и показывает, что применение искрового упрочнения и микродугового оксидирования позволяет повысить износостойкость рабочей поверхности гильзы цилиндра. Данный вывод подтверждается динамикой массового износа исследуемых ГЦ (Рисунок 3.17), который показывает, что износостойкость ГЦ с МДО и ИУ-покрытием в 2,05 и 1,63 раза выше, чем у штатной. Испытания показали, что покрытие, формируемое при искровом упрочнении, работает в условиях, характерных для ЦПГ ДВС даже в случае несплошности покрытия.

Изменение свойств рабочей поверхности гильзы цилиндра, в частности, микротвердости, приводит к изменению условий трения в сопряжениях «гильза цилиндра – поршень». На Рисунке 3.18 приведена динамика линейного и массового износа поршня.

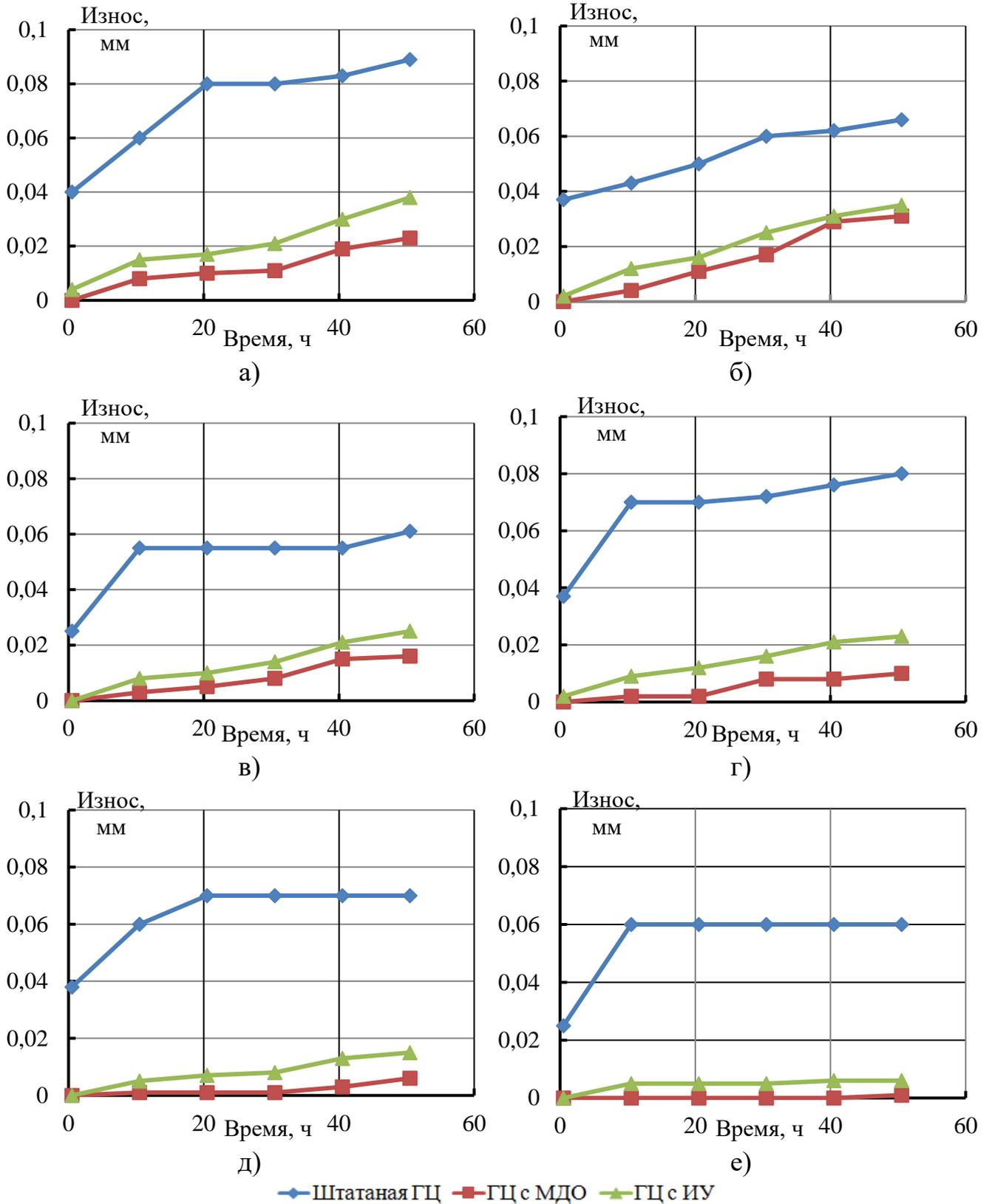


Рисунок 3.16 - Линейный износ исследуемых ГЦ по времени: а) в точке 1, б) в точке 2, в) в точке 3, г) в точке 4, д) в точке 5, е) в точке 6

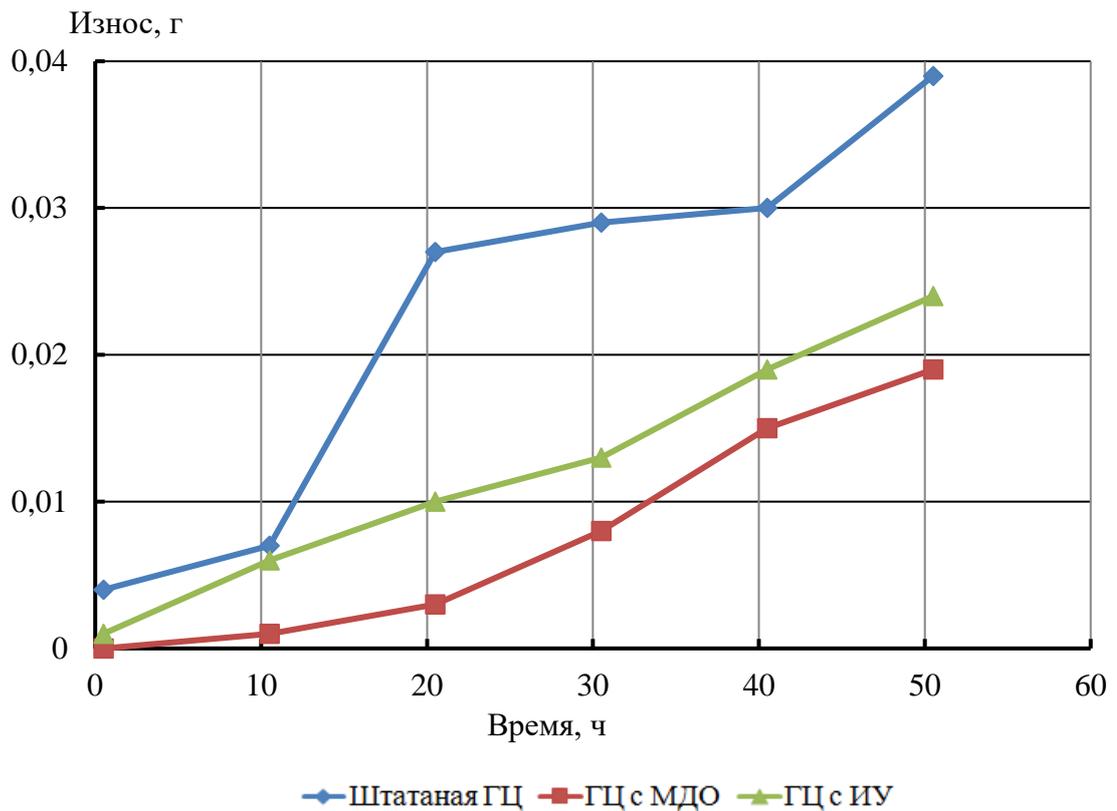


Рисунок 3.17 - Массовый износ исследуемых ГЦ по времени наработки

В процессе обкатки двигателя в штатной комплектации произошло увеличение геометрических размеров поршня в контролируемых точках. По этой причине, как видно из Рисунка 3.18, линейный износ поршней, взаимодействующих с МДО и ИУ-покрытием равномерно растет с течением времени, в то время как износ поршня в паре со штатной ГЦ имеет явные перегибы, особенно в верхней части поршня (контрольные точки 1 и 4). Как результат, массовый износ поршня в паре со штатной ГЦ в первые 20 часов работы оказывается выше. Таким образом можно сделать вывод, что износ поршней в процессе испытаний в первую очередь определялся исходными размерами самого поршня, при этом динамика массового износа поршня показывает, что итоговый износ сопоставим для всех трех испытуемых ГЦ. Массовые износы поршня составили 0,008 г, 0,009 г и 0,01 г для пары трения с штатной ГЦ, ГЦ с МДО-покрытием и ГЦ с ИУ-покрытием соответственно.

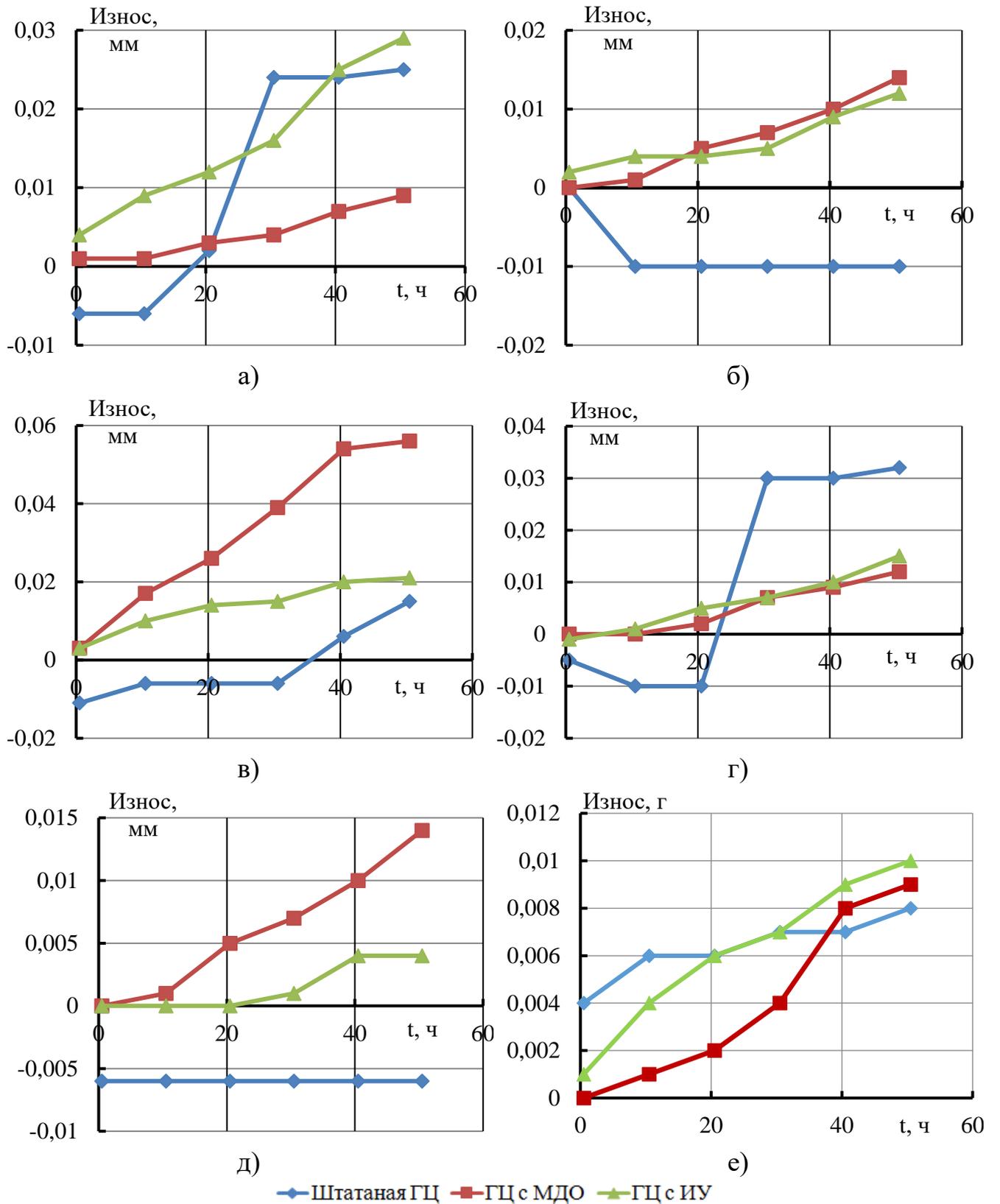


Рисунок 3.18 - Линейный и массовый износ поршней по времени: а) в точке 1, б) в точке 2, в) в точке 3, г) в точке 4, д) в точке 5, е) массовый износ

Износ гильз с МДО-покрытием ниже в ~ 2 раза по сравнению со штатными, что связано с высокой микротвердостью покрытия и согласуется с известными исследованиями износостойкости деталей ЦПГ [14; 93]. Полученные результаты по износу поршней коррелируют с данными известных исследований [2].

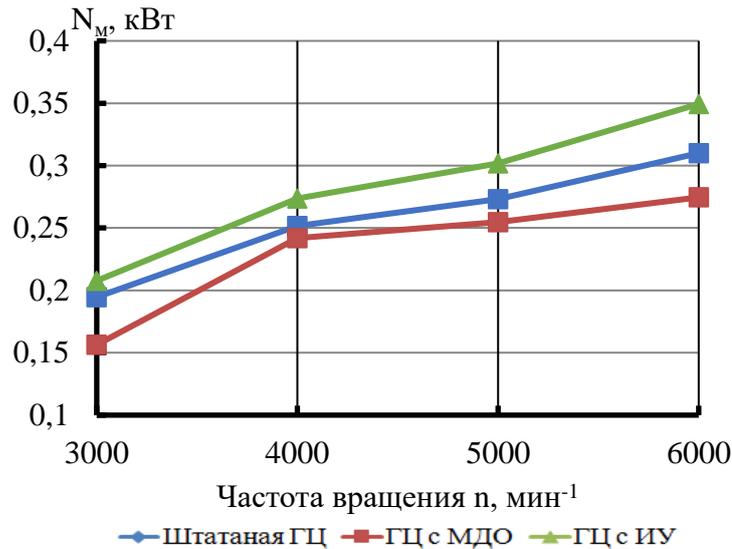
3.5.2 Влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери двигателя

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, преимущественно определяются антифрикционными свойствами поверхности, которые зависят не только от свойств материала, но и от конструктивных особенностей, качества поверхности и точности изготовления, условий смазывания и т.д. Теплофизические свойства материала стенки цилиндра и покрытия оказывают влияние на коэффициент наполнения, коэффициент остаточных газов, индикаторный и эффективный КПД двигателя. К тому же, они влияют и на механические потери двигателя, так как определяют режимы трения в зависимости от температуры поверхности.

Анализ результатов исследования влияния экспериментальных гильз цилиндров на механические потери, приведенных в разделе 3.4.4, показал, что наименьшие механические потери на всем диапазоне частот вращения получены для гильзы цилиндра с МДО-покрытием, наибольшие – для гильзы цилиндра с ИУ-покрытием. На основании экспериментальных данных были получены значения мощности механических потерь двигателя (Таблица 3.31, Рисунок 3.19) в диапазоне частот вращения 3000...6000 мин⁻¹. При частоте вращения 6000 мин⁻¹ мощность механических потерь двигателя при комплектации ГЦ с МДО-покрытием, штатной ГЦ и ГЦ с ИУ-покрытием составила 0,27; 0,31 и 0,35 кВт соответственно.

Таблица 3.31 Мощность механических потерь N_m

Гильза	Мощность мех. потерь N_m при частоте вращения, кВт			
	3000	4000	5000	6000
Штатная	0,19	0,25	0,27	0,31
С МДО-покрытием	0,16	0,24	0,25	0,27
С ИУ-покрытием	0,21	0,27	0,30	0,35

Рисунок 3.19 - Мощность механических потерь $N_{мех}$

Высокие значения механических потерь для ГЦ 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, что приводит к возникновению трения между поверхностями с близкими физическим и химическими свойствами. Коэффициенты трения при отсутствии смазки между поверхностями «алюминий – алюминий» и «сталь – алюминий» равны 0,94 и 0,64 соответственно [99]. 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 в разделе 2.3, показывают, что покрытия, формируемые при микродуговом оксидировании и искровом упрочнении, имеют одинаковые коэффициенты трения. Это позволяет предположить, что при оптимизации процесса искрового упрочнения могут быть получены результаты, аналогичные результатам для МДО-покрытия.

Изменение мощности механических потерь при работе с экспериментальными гильзами будет приводить к изменению эффективных показателей двигателя, в частности, эффективной мощности N_e . На основе результатов, приведенных в разделах 3.4.5–3.4.7, используя характеристики воздушных винтов, были построены скоростные характеристика двигателя. На Рисунке 3.20 приведена внешняя скоростная характеристика двигателя после обкатки при комплектации исследуемыми гильзами цилиндров. Двигатель, оснащенный ГЦ с МДО-покрытием, показывает наибольшую мощность на всем диапазоне частот вращения, по сравнению с другими ГЦ. При этом максимальное значение эффективной мощности N_e достигает 0,87 кВт при 9850 мин⁻¹. Максимальное значение N_e при работе со штатной и ГЦ с ИУ-покрытием составляет 0,71 кВт при 9150 мин⁻¹ и 0,55 кВт при 8370 мин⁻¹ соответственно.

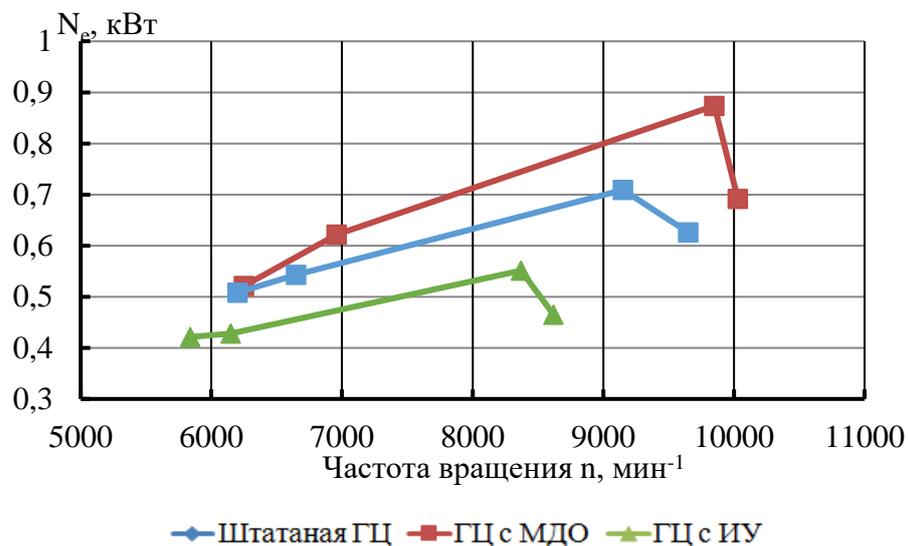


Рисунок 3.20 – Внешние скоростные характеристики двигателя после обкатки.

На Рисунках 3.21 – 3.24 показаны скоростные характеристики двигателя, полученные после 50 часов наработки при различных УОДЗ.

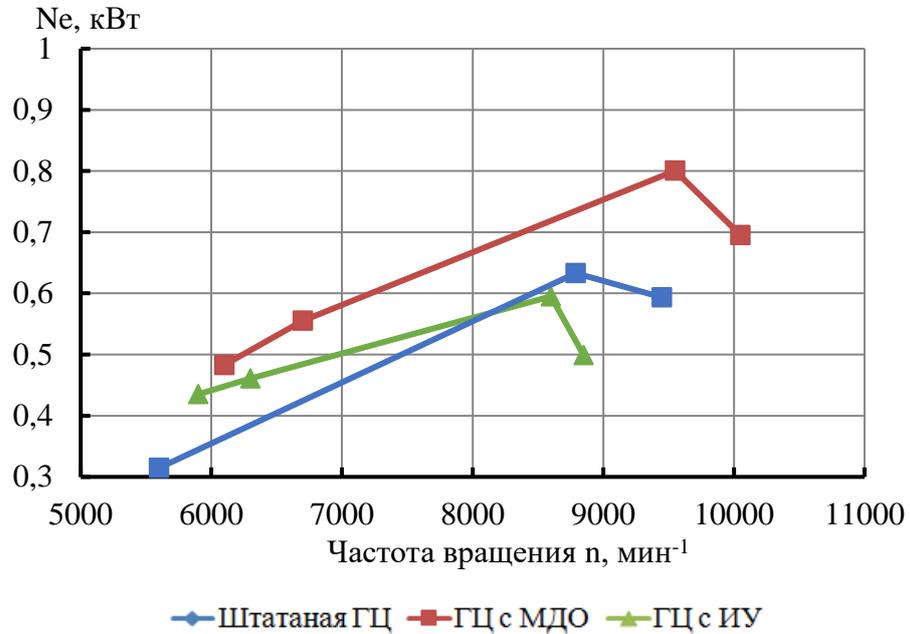


Рисунок 3.21 – Внешние скоростные характеристики двигателя после 50 часов испытаний

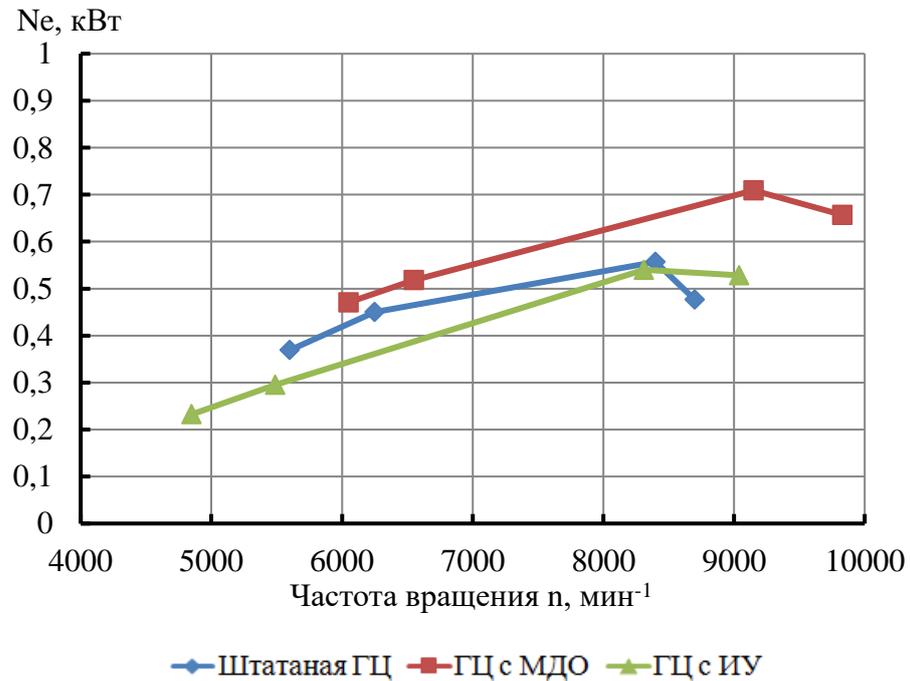


Рисунок 3.22 – Частичные скоростные характеристики двигателя (75% УОДЗ) после 50 часов испытаний

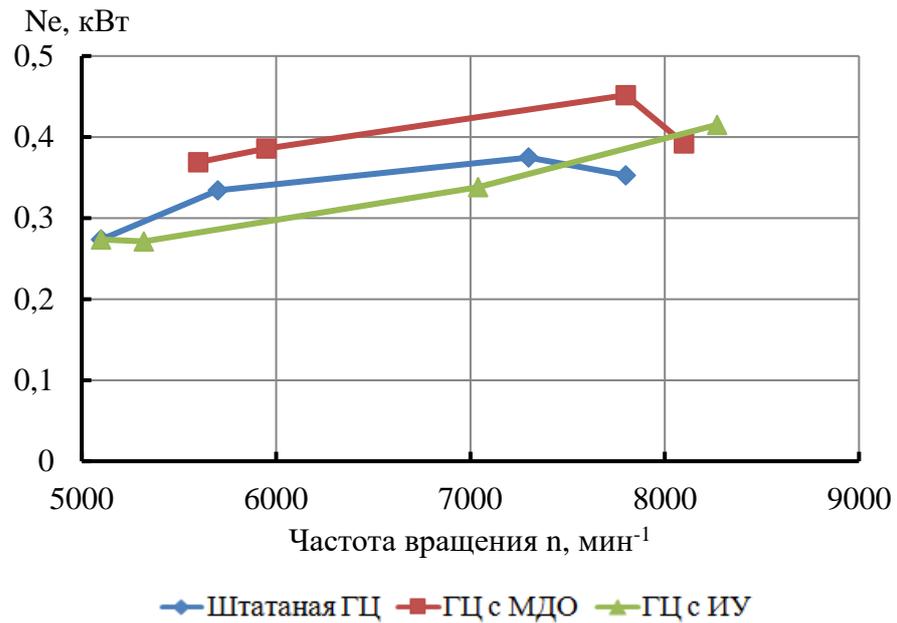


Рисунок 3.23 – Частичные скоростные характеристики двигателя (50% УОДЗ) после 50 часов испытаний

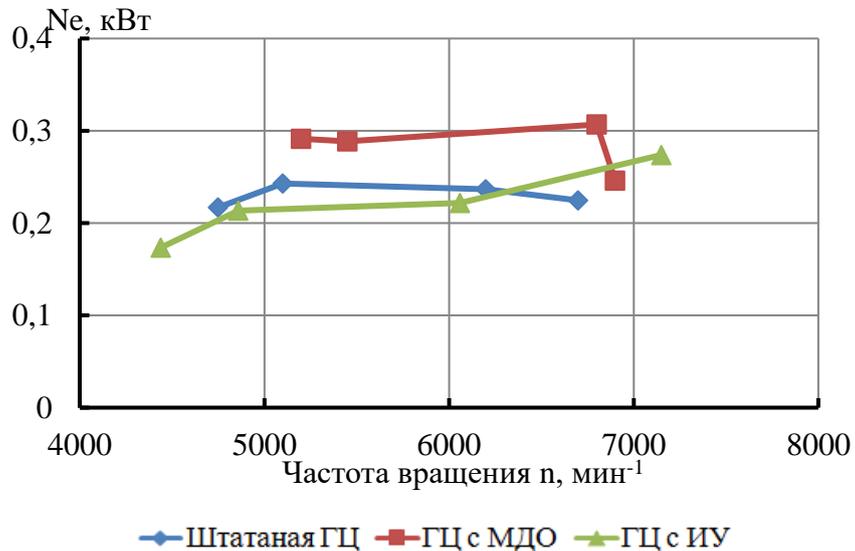


Рисунок 3.24 – Частичные скоростные характеристики двигателя (25% УОДЗ) после 50 часов испытаний

После 50 часов испытаний на износостойкость двигатель, оснащенный ГЦ с МДО-покрытием, показывает наибольшую мощность на всем диапазоне частот вращения при 100% УОДЗ, по сравнению с другими ГЦ. При этом 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. При 75% УОДЗ картина изменения эффективной мощности двигателя существенно не отличается от ВСХ, при этом максимум N_e составляет 0,71 кВт при 9150 мин⁻¹ для ГЦ с МДО-покрытием. При УОДЗ 50% и 25% в верхней части диапазона частоты вращения эффективная мощность двигателя со штатной ГЦ оказывается выше, чем у алюминиевых ГЦ с модифицированной поверхностью.

На Рисунке 3.25 показано изменение эффективной мощности N_e при работе по ВСХ после 50 часов испытаний относительно результатов, полученных после обкатки двигателя. В процессе наработки вследствие износа эффективная мощность двигателя в комплектации с штатной гильзой снизилась на 10-23% в диапазоне частот вращения 6500...9000 мин⁻¹. Более того, при максимальной нагрузке (воздушный винт 15x10), двигатель, оснащенный штатной гильзой, не смог выйти на установившийся режим при работе по ВСХ (наблюдалась неустойчивая работа с значительными колебаниями частоты вращения и непреднамеренным остановом).

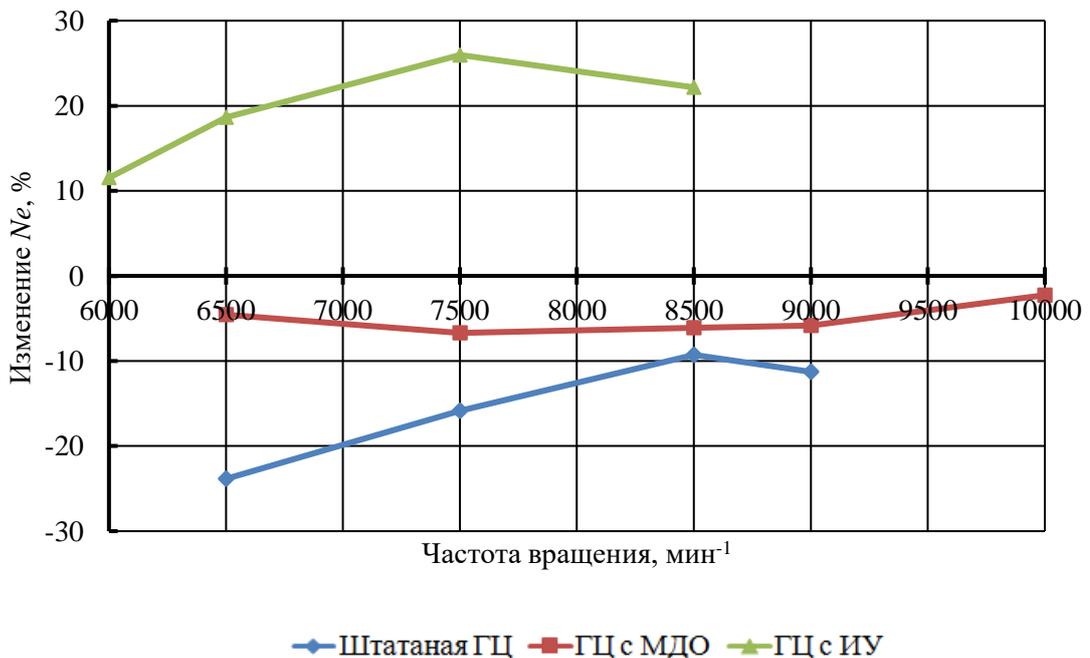


Рисунок 3.25 – Изменение эффективной мощности N_e при работе по ВСХ после 50 часов испытаний относительно результатов, полученных после обкатки двигателя

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, сформированного методом искрового упрочнения. Принимая во внимание потенциал совершенствования процесса искрового упрочнения с точки зрения снижения механических потерь, следует ожидать, что по максимальным значениям эффективной мощности на всем диапазоне частот вращения могут быть получены результаты, аналогичные результатам, полученным на двигателе в комплектации гильзой с МДО-покрытием.

3.5.3 Прогнозирование ресурса двигателя, оснащенного гильзами цилиндров с искровым упрочнением и микродуговым оксидированием рабочей поверхности

С целью прогнозирования ресурса двигателя при работе с экспериментальными гильзами цилиндров получены уравнения регрессии, описывающие зависимость скорости изнашивания рабочей поверхности гильзы цилиндра от частоты вращения n и среднего эффективного давления p_e . На основании результатов, приведенных в разделе 3.4, были подготовлены исходные данные для определения уравнений регрессии (Таблицы 3.32 – 3.33). Частота вращения коленчатого вала двигателя на различных этапах испытаний на износ известна. Используя характеристики воздушных винтов (выражение 3.1), определялись значения эффективной мощности N_e при указанных частотах вращения и, далее, значения среднего эффективного давления p_e :

$$N_e = \frac{M_e \cdot n \cdot \pi}{30000}, \quad (3.2)$$

$$p_e = \frac{30 \cdot \tau \cdot N_e}{V_h \cdot i \cdot n}, \quad (3.3)$$

где M_e – эффективный момент, определяемый по характеристике воздушного винта для данной частоты вращения n , τ – тактность двигателя, V_h – рабочий объем двигателя, i – число цилиндров. Откликами уравнений регрессии выступают

скорости изнашивания v_L в сечении 1 (Рисунок 3.6), в котором наблюдались максимальные значения линейного износа, и скорость изнашивания v_M , характеризующий массовый износ гильзы цилиндра. Далее, с помощью программы DataFit 9 для каждой исследуемой гильзы цилиндра определялись соответствующие уравнения регрессии. Критерием отбора вида уравнений регрессии являлась остаточная сумма квадратов (residual sum of squares), которая показывает разницу между исходными данными и значениями, вычисленным по уравнению регрессии.

Таблица 3.32 Исходные данные для получения уравнения регрессии скорости изнашивания гильзы цилиндра с МДО-покрытием

Воздушный винт	Частота вращения n при 100% УОДЗ, мин^{-1}	Среднее эффективное давление p_e , МПа	Скорость изнашивания v_L , мм/ч	Скорость изнашивания v_M , г/ч
13x7	9150	0,698	0,0008	0,0001
15x10	6200	0,796	0,0002	0,0002
14x10	6650	0,761	0,0001	0,0005
12x7	9650	0,617	0,0008	0,0007

Таблица 3.33 Исходные данные для получения уравнения регрессии скорости изнашивания гильзы цилиндра с ИУ-покрытием

Воздушный винт	Частота вращения n при 100% УОДЗ, мин^{-1}	Среднее эффективное давление p_e , МПа	Скорость линейного изнашивания v_L , мм/ч	Скорость массового изнашивания v_M , г/ч
13x7	9150	0,698	0,0008	0,0001
15x10	6200	0,796	0,0002	0,0002
14x10	6650	0,761	0,0001	0,0005
12x7	9650	0,617	0,0008	0,0007

В результате для гильзы цилиндра с искровым упрочнением рабочей поверхности были получены следующие уравнения регрессии:

$$v_L = 6,201 \cdot 10^{-6} \cdot 1,001^n \cdot p_e^{7,799}, \quad (3.4)$$

$$v_M = 1,486 \cdot 10^{-4} \cdot 1,0001^n \cdot p_e^{-0,838}, \quad (3.5)$$

и для гильзы цилиндра с МДО-покрытием:

$$v_L = 2,614 \cdot 10^{-6} \cdot 1,0007^n \cdot p_e^{3,107}, \quad (3.6)$$

$$v_M = 0,487 \cdot 0,9973^n \cdot p_e^{-41,149}. \quad (3.7)$$

На Рисунках 3.26 – 3.27 приведены графические представления данных уравнений регрессии.

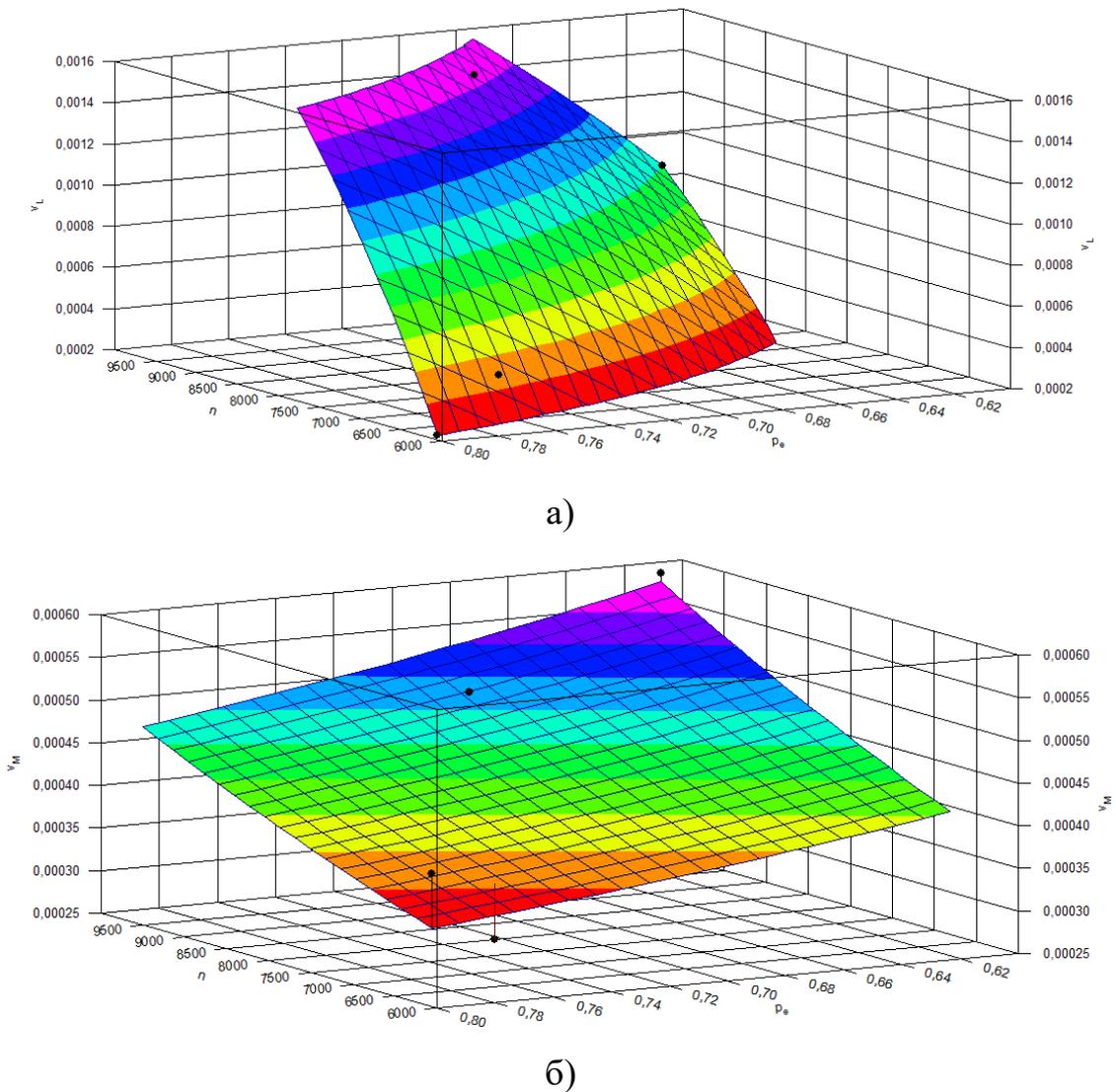
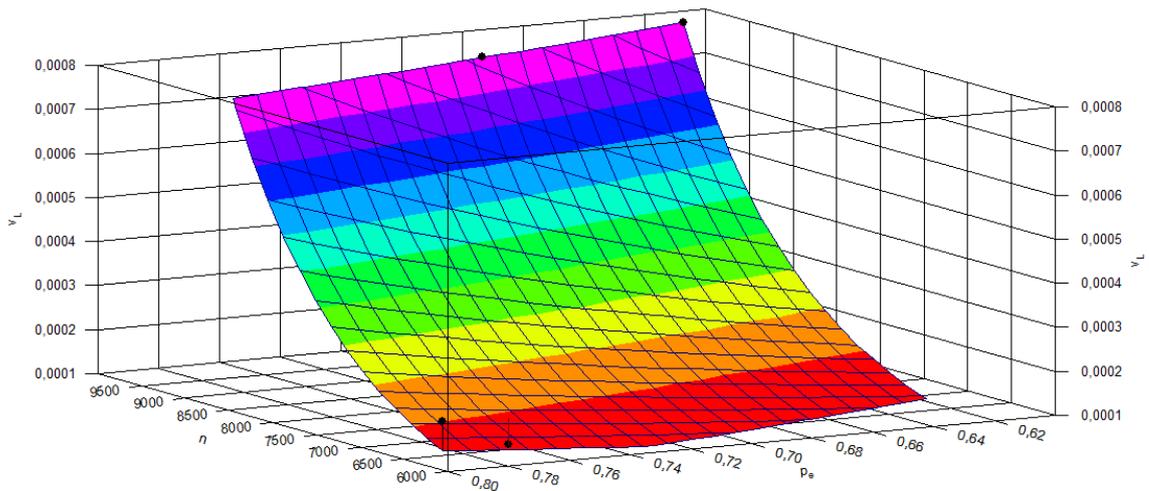
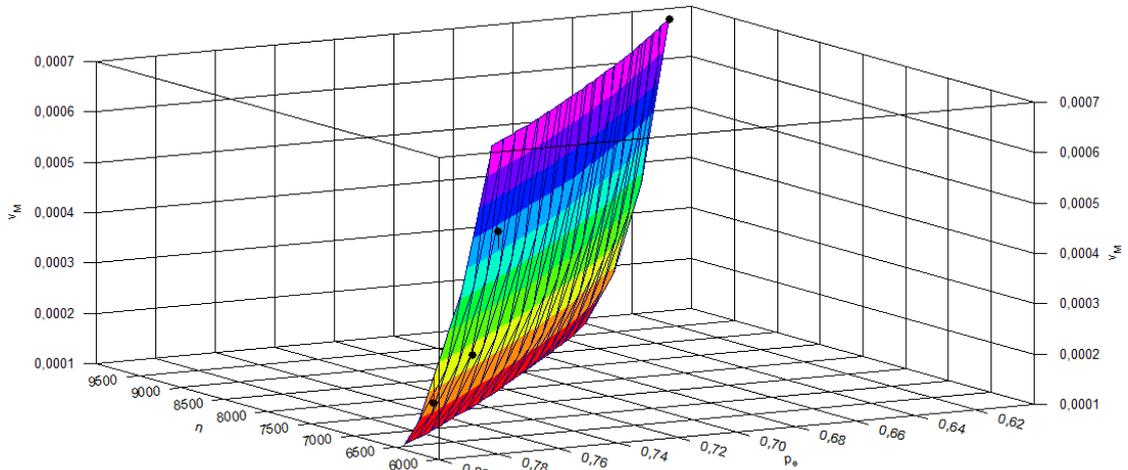


Рисунок 3.26 – Скорости изнашивания гильзы цилиндра с ИУ-покрытием v_L (а) и v_M (б), вычисленные по уравнениям регрессии



а)



б)

Рисунок 3.27 – Скорости изнашивания гильзы цилиндра с МДО-покрытием v_L (а) и v_M (б), вычисленные по уравнениям регрессии

В ходе проведенных моторных исследований было установлено, что двигатель в комплектации со штатной гильзой цилиндров после 50,5 часов наработки не смог выйти на установившийся режим работы при максимальной нагрузке, что указывает на достижение предельного износа гильзы цилиндров. Исходя из этого допустимо принять величину предельного линейного износа гильзы цилиндра равной 0,09 мм.

На Рисунке 3.28 (а) показано изменение износа экспериментальных гильз цилиндров при комплектации двигателя рекомендуемым воздушным винтом

размером 13x7 при частоте вращения 9000 мин^{-1} и среднем эффективном давлении $0,677 \text{ МПа}$. Прогнозируемый ресурс двигателя составляет 90 ч и 140 ч для комплектации гильзой цилиндра с ИУ и МДО покрытием соответственно. На Рисунке 3.28 (б) показано изменение износа экспериментальных гильз цилиндров при частоте вращения 6000 мин^{-1} и том же значении среднего эффективного давления. В этом случае прогнозируемый износ экспериментальных гильз за 160 ч работы составляет около $0,01 \text{ мм}$, а прогнозируемый ресурс достигает 1300 ч.

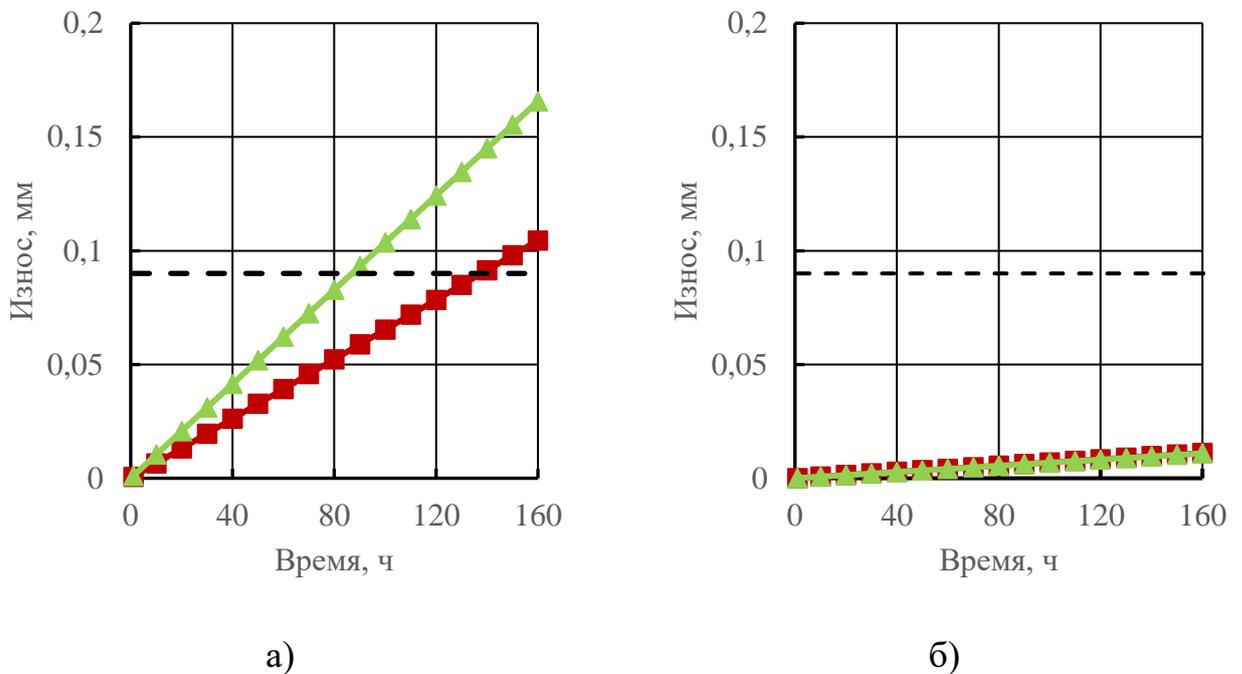


Рисунок 3.28 – Расчетный износ экспериментальных гильз цилиндров при $p_e = 0,677 \text{ МПа}$ и $n=9000 \text{ мин}^{-1}$ (а) и $n=6000 \text{ мин}^{-1}$ (б).

3.6 Выводы по главе

1. Экспериментально установлено влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра из алюминиевого сплава. Показано, что после 50,5 часов наработки максимальный линейный износ по сравнению со штатной гильзой снизился в 2,87 и в 2,34 раза для ГЦ с МДО-покрытием и ИУ-покрытием соответственно. Массовый износ сократился в 2,05 и 1,63 раза соответственно. Таким образом, износостойкость

алюминиевой ГЦ с модифицированной рабочей поверхностью более чем в 1,5 раза выше, чем у штатной.

2. Установлено, что массовый износ поршней отличается несущественно и, преимущественно, определяется отклонениями размеров детали.

3. Экспериментально установлено влияние искрового упрочнения и микродугового оксидирования рабочей поверхности гильзы цилиндра на механические потери и эффективную мощность двигателя. Наименьшее значение механических потерь в диапазоне частот вращения 3000...6000 мин⁻¹ получено на гильзе цилиндра с МДО-покрытием. Двигатель, оснащенный гильзой цилиндра с МДО-покрытием, также показал лучшие значения эффективной мощности во всем диапазоне частот вращения (6000...10000 мин⁻¹) при работе по ВСХ, как после обкатки, так и после 50,5 часов наработки.

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, не снизилась, при этом максимальная мощность 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.

Учитывая, что результаты безмоторных исследований показывают, что покрытия, формируемые при микродуговом оксидировании и искровом упрочнении, имеют одинаковые коэффициенты трения, следует ожидать, что для гильзы цилиндра с ИУ-покрытием, при полноценной доводке процесса искрового упрочнения, могут быть получены результаты, аналогичные для МДО-покрытия. Показатели гильзы цилиндра с ИУ-покрытием связаны с увеличением механических потерь из-за обработки рабочей поверхности горизонтальными полосами.

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИСКРОВОГО УПРОЧНЕНИЯ И МИКРОДУГОВОГО ОКСИДИРОВАНИЯ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ДЕТАЛЕЙ ЦИЛИНДРОПОРШНЕВОЙ ГРУППЫ И КРЫШКИ ЦИЛИНДРА

4.1 Анализ влияния покрытия, сформированного посредством микродугового оксидирования и искрового упрочнения, на процесс теплопередачи через стенку гильзы цилиндра

Теплофизические свойства упрочненного слоя отличаются от свойств исходного материала. Так, например, коэффициент теплопроводности алюминия 98,5% чистоты при температуре 273 К равен 201 Вт/(м·К), а коэффициент теплопроводности большинства сплавов алюминия находится в диапазоне 130...220 Вт/(м·К) при той же температуре. В то же время коэффициент теплопроводности МДО-слоя по разным данным составляет от 0,08 до 30 Вт/(м·К) [36; 53; 84; 87]. Изменение свойств поверхностного слоя влияет на суммарный коэффициент теплоотдачи, который условно можно разделить на конвективную и лучистую составляющие. В результате этого теплоперенос через стенку ГЦ будет отличаться для различных материалов, что в свою очередь скажется на температуре всех деталей ЦПГ.

Оценку влияния модифицированного слоя на теплоперенос через стенку цилиндра можно сделать на основе расчета отношения тепловых потоков через стальную и алюминиевую ГЦ к ГЦ с покрытием. Для сравнения рассмотрены три гильзы цилиндра: из стали 40Х, из алюминиевого сплава АК4-1 и из алюминиевого сплава АК4-1 с покрытием. На Рисунке 4.1 приведена расчетная схема для цилиндра с внутренним диаметром $d_в$, наружным диаметром $d_н$. Для гильзы с упрочненной поверхностью задается толщина покрытия δ . Температура газов в цилиндре равна $T_г$, а окружающей среды – $T_о$. Коэффициент теплоотдачи со стороны горячих газов в стенку цилиндра обозначен α_1 , от внешней стенки

цилиндра в окружающую среду – α_2 . При этом сделано допущение о том, что для всех рассматриваемых цилиндров соответствующие коэффициенты теплоотдачи одинаковы.

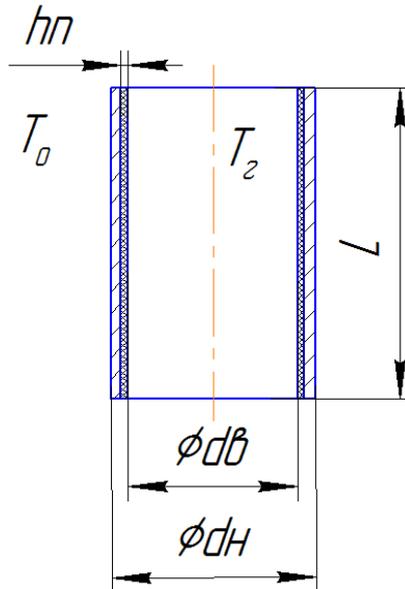


Рисунок 4.1 – Расчетная схема

Примем, что длина трубы велика по сравнению с толщиной стенки, тогда возможно пренебречь потерями тепла через торцы цилиндра. Тогда линейная плотность теплового потока, передаваемого в процессе теплопередачи через стенку цилиндра из сплава 40X или АК4-1, может быть записана как [85]:

$$q_l = \frac{(T_{\Gamma} - T_0) \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_B} + \frac{1}{2\lambda_M} \ln \frac{d_H}{d_B} + \frac{1}{\alpha_2 d_H}} \quad (4.1)$$

В формуле (4.1) λ_M – коэффициент теплопроводности материала, а сумма слагаемых в знаменателе является линейным термическим сопротивлением R_l .

Линейная плотность теплового потока через ГЦ с упрочненным слоем (УС) рассчитывается как для двухслойной цилиндрической стенки [85]:

$$q_l = \frac{(T_{\Gamma} - T_0) \cdot \pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_B} + \frac{1}{2\lambda_{\Pi}} \ln \frac{d_B + 2 \cdot h_{\Pi}}{d_B} + \frac{1}{2\lambda_{ал}} \ln \frac{d_H}{d_B + 2 \cdot h_{\Pi}} + \frac{1}{\alpha_2 d_H}} \quad (4.2)$$

В (4.2) $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{ал}}$ - коэффициенты теплопроводности УС и сплава алюминия соответственно.

Линейные плотности тепловых потоков $q_{\text{ст}}$, $q_{\text{ал}}$, $q_{\text{уп}}$, проходящих через соответственно ГЦ из сплава Ст40Х, АК4-1 и АК4-1 с упрочненным слоем, могут быть записаны соответственно, как:

$$\begin{aligned}
 q_{l,\text{ст}} &= \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ст}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{н}}}} = \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{R_{l,\text{ст}}}, \\
 q_{l,\text{ал}} &= \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ал}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{н}}}} = \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{R_{l,\text{ал}}}, \\
 q_{l,\text{уп}} &= \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{\frac{1}{\alpha_1 d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{п}} \ln \frac{d_{\text{в}}+2\cdot h_{\text{п}}}{d_{\text{в}}} + \frac{1}{2\lambda_{\text{ал}} \ln \frac{d_{\text{н}}}{d_{\text{в}}+2\cdot h_{\text{п}}} + \frac{1}{\alpha_2 d_{\text{н}}}}} = \frac{(T_{\Gamma}-T_0)\cdot\pi}{R_{l,\text{уп}}}.
 \end{aligned} \tag{4.3}$$

Выразим из (4.3) отношение тепловых потоков $q_{\text{ст}}/q_{\text{ал}}$, $q_{\text{ст}}/q_{\text{уп}}$, $q_{\text{ал}}/q_{\text{уп}}$, что позволит оценить относительное изменение линейной плотности тепловых потоков через стенку ГЦ из разных материалов:

$$\begin{aligned}
 \frac{q_{l,\text{ст}}}{q_{l,\text{ал}}} &= \frac{R_{l,\text{ал}}}{R_{l,\text{ст}}}, \\
 \frac{q_{l,\text{ст}}}{q_{l,\text{уп}}} &= \frac{R_{l,\text{уп}}}{R_{l,\text{ст}}}, \\
 \frac{q_{l,\text{ал}}}{q_{l,\text{уп}}} &= \frac{R_{l,\text{уп}}}{R_{l,\text{ал}}}.
 \end{aligned} \tag{4.4}$$

Линейное термическое сопротивление R_l зависит от свойств материалов, геометрических параметров и теплоотдачи между цилиндром и газовой средой. Примем для расчетов цилиндр: с внутренним диаметром 26 мм, что совпадает с исследуемым в работе ДВС, и 78 мм. Толщину стенки цилиндра будем изменять в диапазоне 1...20 мм с шагом 1 мм. Толщина упрочненного слоя при микродуговом оксидировании и искровом упрочнении в зависимости от технологических режимов может достигать 300 мкм, в связи с этим примем диапазон 50...300 мкм с шагом 50 мкм. Коэффициент теплопроводности сплава Ст40Х равен 40 Вт/(м·К), сплава АК4-1 – 146 Вт/(м·К) [85; 100]. Для упрочненного слоя примем коэффициент теплопроводности 1 Вт/(м·К).

В работе [86] показано, что при различных углах ПКВ коэффициент α_1 в объеме только камеры сгорания может меняться в диапазоне 20...10000 Вт/(м²·К), а коэффициент α_2 не столь сильно изменяется в процессе работы двигателя. Для простоты его оценки воспользуемся эмпирической зависимостью [81]:

$$\alpha_2 = 1,37(1 + 0,0075T_{cp})(w_B/0,278)^{0,73}, \quad (4.5)$$

где T_{cp} – среднеарифметическое значение температур ребра и обдувающего воздуха, К; w_B – скорость воздуха в межреберном пространстве, м/с, принимается равной 20-50 м/с [88]. Для выбранных диаметров цилиндра примем w_B равной 20 м/с. Так как по экспериментальным данным средняя температура у основания ребер цилиндров из алюминиевых сплавов колеблется в пределах 403...423 К, то примем 410 К при температуре окружающей среды – 300 К. Тогда величина α_2 оказывается равной 114 Вт/(м²·К).

Результаты расчета линейного термического сопротивления для трех видов ГЦ в зависимости от диаметров d_n и d_B , толщины упрочненного слоя δ при α_1 равном 2000 Вт/(м²·К) приведены в Приложении А, и для них графически построены зависимости q_{cm}/q_{yn} и q_{cm}/q_{yn} для цилиндров диаметров 26 мм (Рисунок 4.2) и 78 мм (Рисунок 4.3).

Как видно из анализа Рисунков 4.2–4.3, тепловые потоки через алюминиевый цилиндр без УС и через цилиндр из стали 40Х в зависимости от толщины стенки выше до 5% при выбранных условиях сравнения. Упрочняющий слой увеличивает термическое сопротивление стенок алюминиевого цилиндра, что приводит к снижению теплового потока. С ростом толщины УС плотность теплового потока через алюминиевый цилиндр с упрочнением становится меньше, чем через цилиндр из стали 40Х. Кроме того, при одинаковой толщине стенки цилиндра с увеличением его диаметра теплозащитные свойства УС относительно стального снижаются.

В приведенных выше расчетах значения коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 были зафиксированы. Между тем для различных ДВС они могут варьироваться в

широком диапазоне. На Рисунке 4.4 показана зависимость отношения плотности теплового потока через стенку стального цилиндра к потоку через стенку с упрочненным слоем q_{cm}/q_{yn} для УС толщиной 300 мкм при толщине стенки 5 мм в зависимости от коэффициента теплоотдачи α_1 (при $\alpha_2=114 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) и α_2 (при $\alpha_1=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$). Значения коэффициента теплоотдачи от горячих газов α_1 и от стенки цилиндра в окружающую среду α_2 оказывают существенное влияние на итоговый тепловой 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.

В процессе работы двигателя в рабочем цилиндре ДВС значительно изменяются: давление, температура, состав, скорость и направление движения среды и пр. Кроме того, даже в выбранный момент времени значения коэффициентов α_1 и α_2 существенно различаются в зависимости от участка поверхности ГЦ. При выполнении расчетов, результаты которых приведены выше, сделаны ряд допущений, не учитывающие как эти изменения, так и теплоотвод через поверхность крышки цилиндра, поршня и поршневые кольца. Между тем 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 были проведены численные расчеты в пакете Star CCM+.

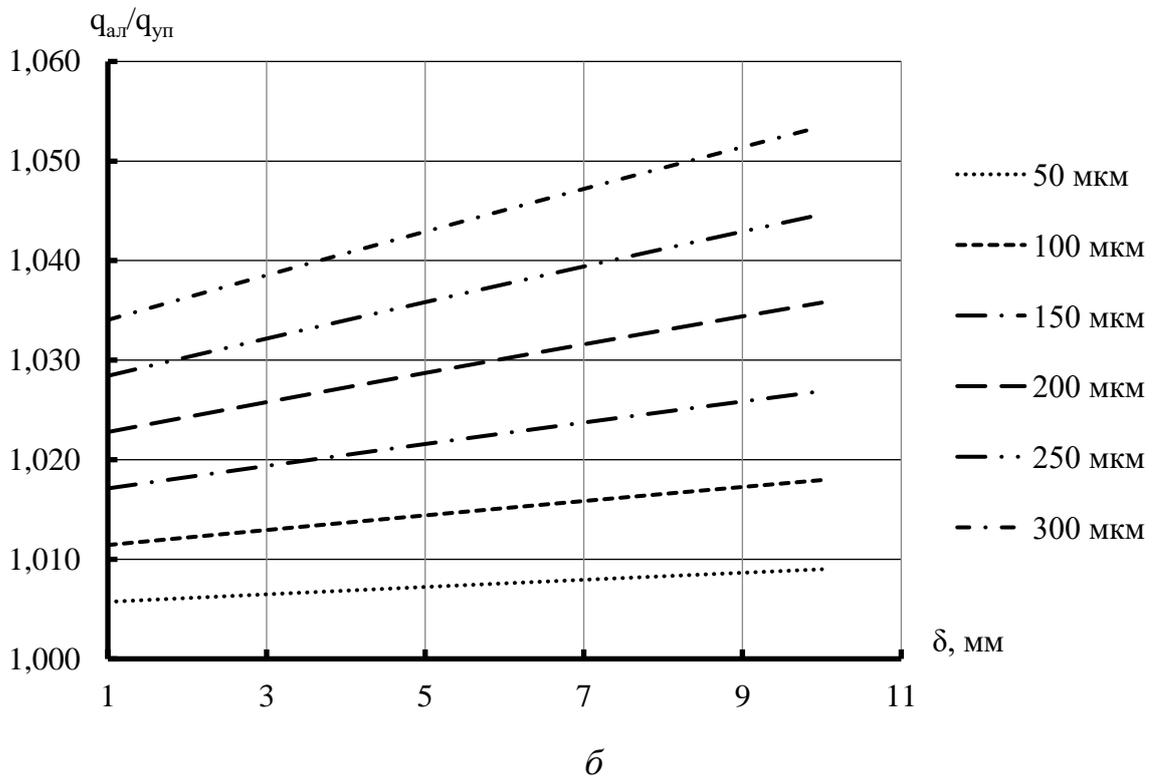
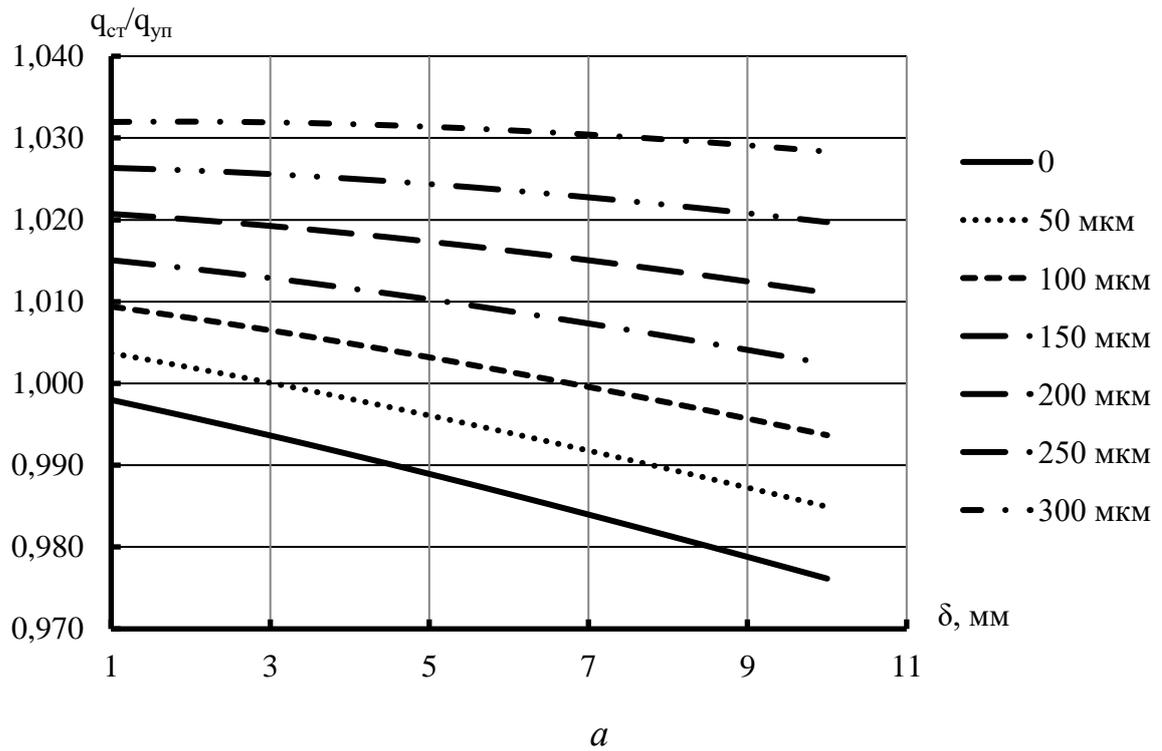


Рисунок 4.2 – Отношение плотностей тепловых потоков: а – $q_{ст}/q_{yn}$, стальной цилиндр к цилиндру с УС; б – $q_{ал}/q_{yn}$ алюминиевый цилиндр к цилиндру с УС при внутреннем диаметре 26 мм и $\alpha_I=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

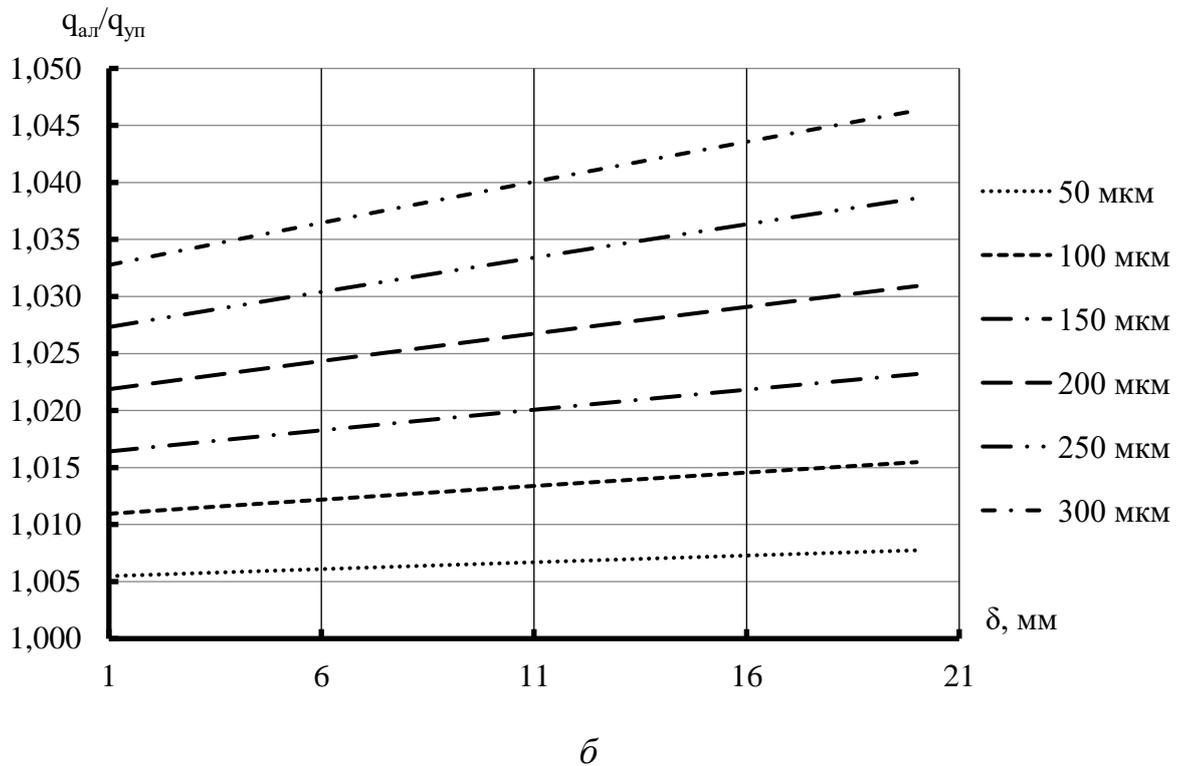
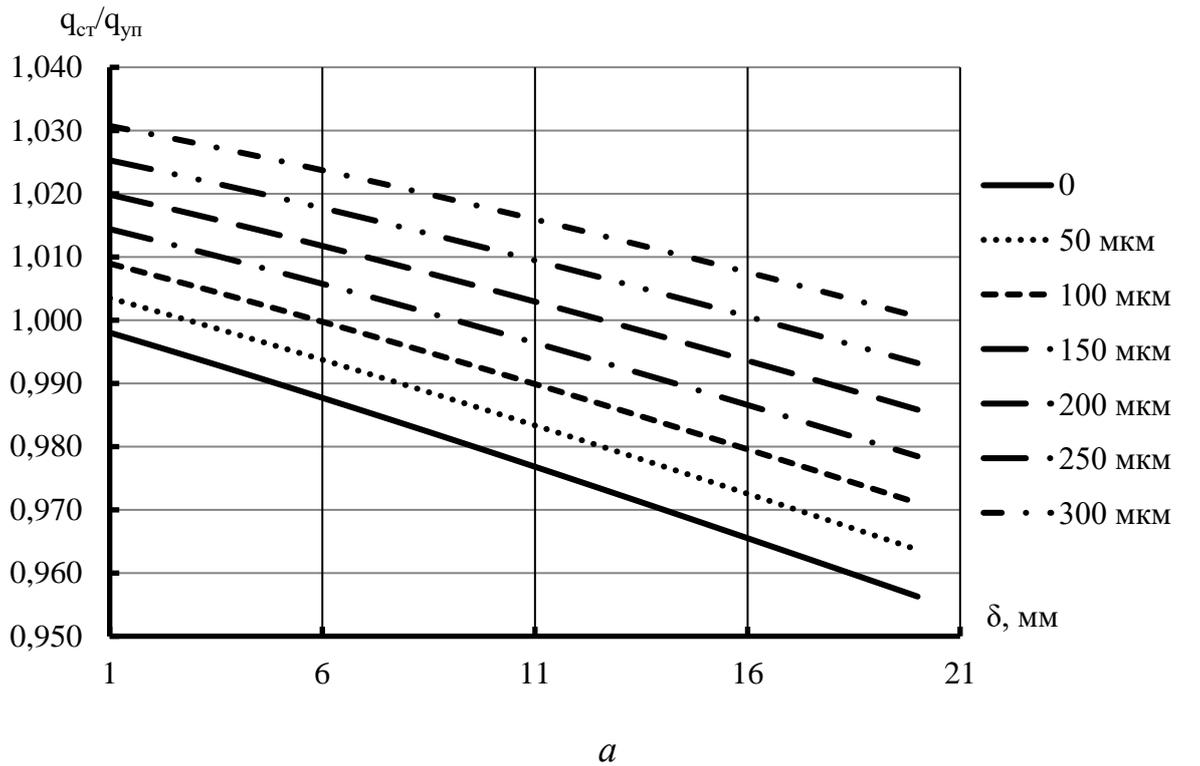


Рисунок 4.3 – Отношение плотности тепловых потоков: а – q_{cm}/q_{yn} стальной цилиндр к цилиндру с УС; б – q_{al}/q_{yn} алюминиевый цилиндр к цилиндру с УС при внутреннем диаметре 78 мм и $\alpha_I=2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

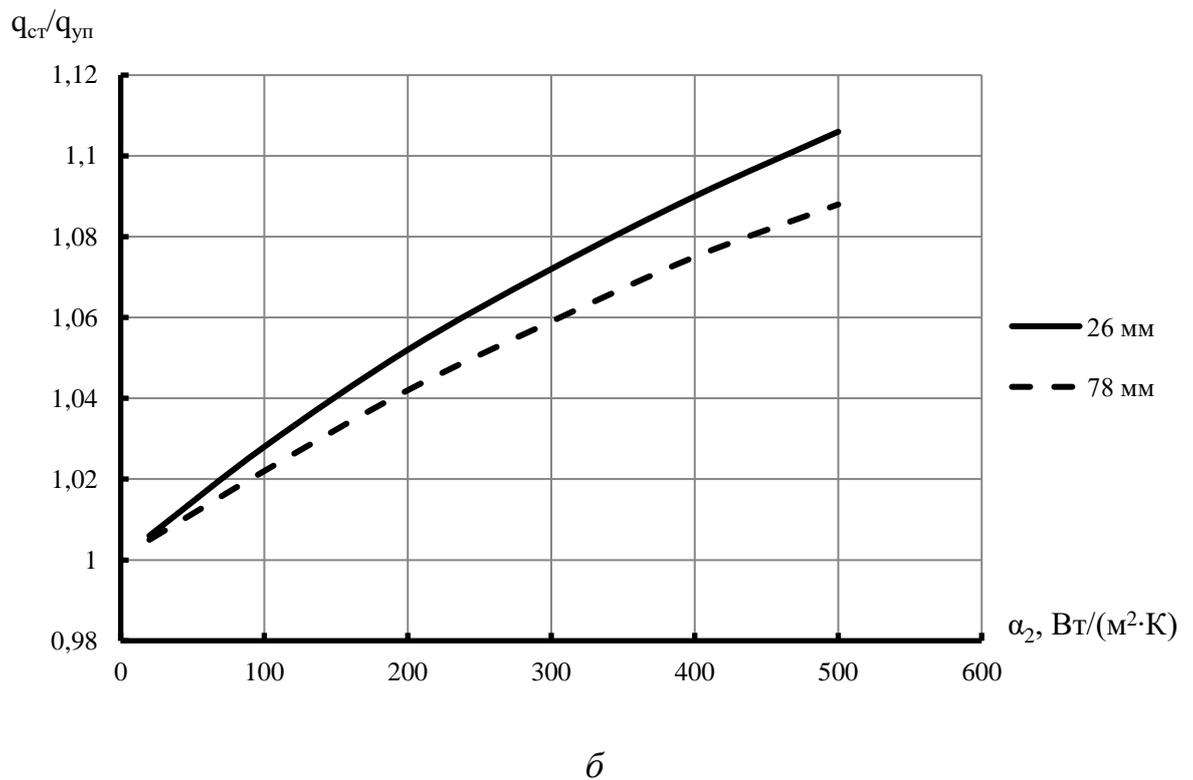
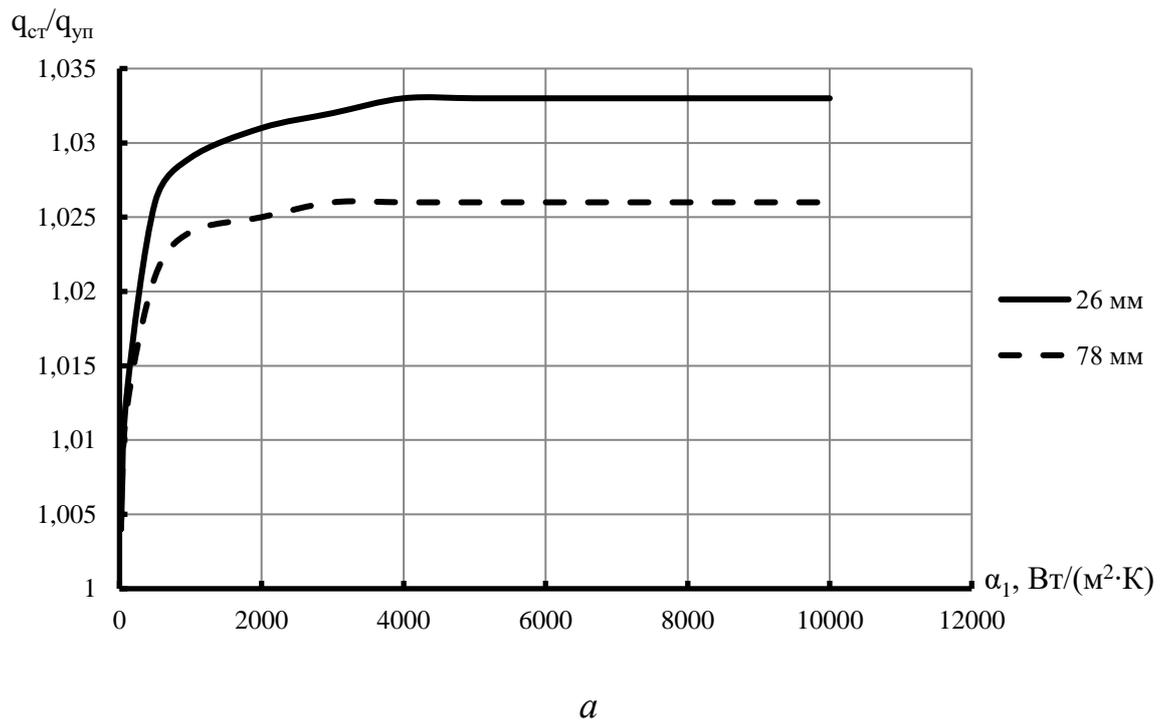


Рисунок 4.4 – Зависимость отношения теплового потока через стенку стального цилиндра к потоку через стенку с упрочненным слоем $q_{ст}/q_{уп}$ от коэффициентов теплоотдачи α_1 (а) и α_2 (б)

4.2 Анализ влияния покрытия на рабочей поверхности гильзы цилиндра на температурный режим деталей цилиндропоршневой группы и крышки цилиндра

4.2.1 Постановка задачи

Уравнение теплового баланса реального ДВС имеет вид:

$$Q = Q_e + Q_{\text{охл}} + Q_{\text{г}} + Q_{\text{н.сг}} + Q_{\text{ост}}, \quad (4.6)$$

где Q – теплота, введенная в цилиндр двигателя с топливом; Q_e – теплота, использованная для осуществления внешней эффективной работы; $Q_{\text{охл}}$ – теплота, отведенная в систему охлаждения двигателя; $Q_{\text{г}}$ – теплота, отведенная отработавшими газами; $Q_{\text{н.сг}}$ – теплота, потерянная вследствие неполноты сгорания топлива; $Q_{\text{ост}}$ – остаточная теплота, в которую входят трудно учитываемые тепловые потери (на лучеиспускание, часть механических потерь и др.) [90]. Очевидно, что для двигателей, оснащенных ГЦ из различных материалов, но работающих на одинаковом установившемся режиме, величины Q и Q_e будут равны (без учета влияния свойств поверхности ГЦ на механические потери). Оценка влияния свойств рабочей поверхности ГЦ на тепловые потери, возникающие вследствие неполноты сгорания топлива, представляет определенную трудность. Свойства материала ГЦ оказывают непосредственное влияние на теплоту, отведенную в систему охлаждения двигателя через детали двигателя, и, как следствие этого, на температуры этих деталей.

Целью численного расчета является сравнение теплового состояния деталей ЦПГ при использовании трех ГЦ: штатной, алюминиевой и алюминиевой с УС. Современные программные пакеты, такие как Ansys, StarCCM+ и др. позволяют осуществить моделирование процессов, происходящих в рабочей камере, и дальнейший расчет тепловых потоков и температуры деталей в нестационарной постановке (с расчетом горения, турбулентности, движения поршня и т.д.). Однако такой подход применительно к решаемой задаче является неоптимальным по следующим причинам:

- 1) требует значительных затрат машинного времени,
- 2) точность определения температурных полей деталей будет определяться ошибкой в граничных и начальных условиях,

В рассматриваемом численном эксперименте граничные и начальные условия определены теоретически, исходя из рекомендаций в литературе. 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 [91]. Учитывая все приведенные выше факторы и тот факт, что результаты для трех ГЦ будут сравниваться друг с другом, допустимо применение стационарного подхода при моделировании.

Рекомендации к выполнению расчетов теплового состояния деталей ЦПГ, в том числе определение граничных и начальных условий описаны в работах [90–92]. Схема для расчета теплового состояния деталей ЦПГ, а также крышки цилиндра приведена на Рисунке 4.5. Рабочая камера двигателя ограничена стенками ГЦ, крышки цилиндра и днищем поршня. При этом геометрические формы деталей максимально упрощены. В крышке цилиндра расположены впускные и выпускные каналы. Основные геометрические размеры соответствуют двигателю ASP FS80 AR.

При проведении исследования сделаны следующие допущения:

- 1) поршень фиксируется в положении НМТ,
- 2) локальные температуры газов в РК заменяются постоянной результирующей температурой $T_{г.рез}$,
- 3) локальные коэффициенты теплоотдачи между средой в РК и внутренней стенкой ГЦ заменяются постоянным результирующим коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{г.рез}$,
- 4) условия теплообмена на рабочей поверхности гильзы в зоне от верхней кромки ГЦ до верхней кромки поршня, на днище и периферии огневого

- днища поршня определяются граничными условиями третьего рода и задаются с помощью температуры $T_{г.рез}$ и коэффициента теплоотдачи $\alpha_{г.рез}$,
- 5) условия теплообмена между твердыми телами «идеальные», т.е. на границах термическое сопротивление равно нулю.

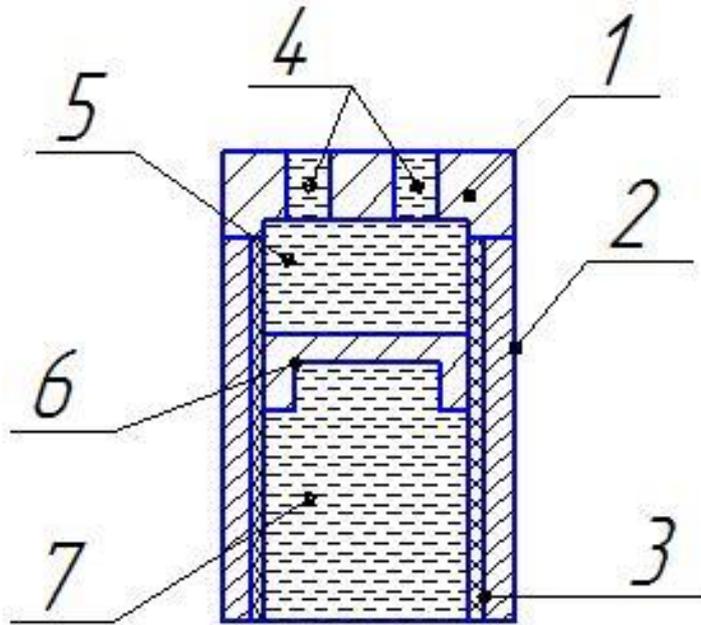


Рисунок 4.5 – Упрощенная схема ЦПГ для расчета в Star CCM+: 1– крышка цилиндра, 2 – цилиндр, 3 – упрочненный слой (для соответствующего расчета), 4 – впускной и выпускной канал, 5 – рабочая камера, 6 – поршень, 7 – среда в картере

Т.к. в данном случае целью является оценка влияния ГЦ с УС на температуры деталей ЦПГ в целом, то целесообразно произвести расчеты для двух крайних возможных случаев:

- 1) достаточное охлаждение деталей ЦПГ;
- 2) недостаточное охлаждение деталей ЦПГ.

При этом условия подвода теплоты со стороны РК являются одинаковыми.

4.2.2 Расчетная область и сетка

Исходя из схемы, представленной на Рисунке 4.5, была создана твердотельная модель в САПР SolidWorks 2007, включающая ГЦ, поршень и крышку цилиндра. Далее эта модель была экспортирована в STAR CCM+ в виде поверхностной геометрии и разбита на области (Рисунок 4.6). Соответствие деталей на Рисунке 4.5 и расчетных областей приведено в Таблице 4.1.

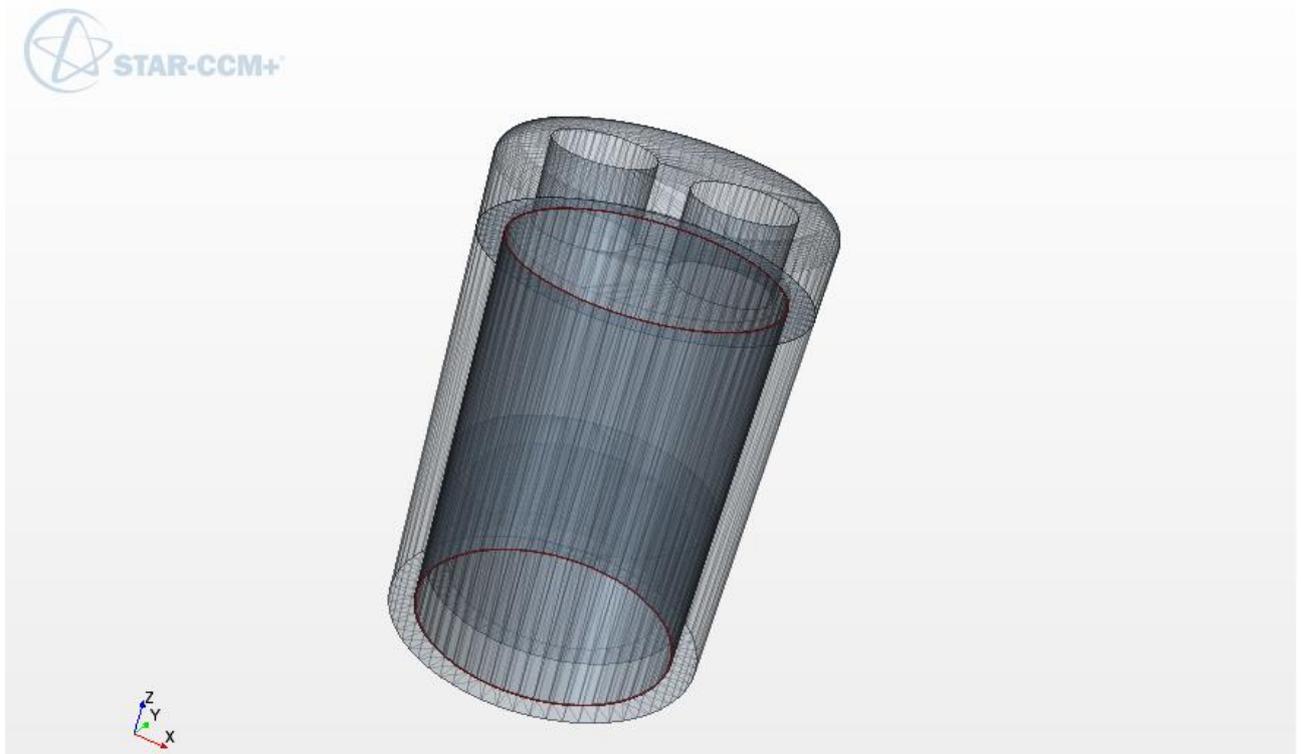


Рисунок 4.6 – Поверхностная геометрия после импорта в StarCCM+

Таблица 4.1 Расчётные области

Деталь	Расчётная область
Крышка цилиндра	head
Гильза цилиндра	cylinder2
Упрочненный слой	cylinder
Поршень	piston

Модели построения сетки различаются для разных областей. Это связано с необходимостью уменьшения количества ячеек в расчетной области с одной стороны, и сохранения точности и сходимости расчета с другой. Всего используется две модели, описание которых приведено в Таблице 4.2. В таблице указаны только те параметры генераторов сетки, которые были изменены. Остальные параметры использовались со значениями по умолчанию.

Таблица 4.2 Модели построения расчетной сетки

Модель	Генераторы сетки	Области	Параметры
Для упрочненного слоя	генератор для тонких объектов	cylinder	базовый размер: 1мм; слой для генератора для тонких объектов: 5.
Для твердых тел	генератор многогранных ячеек	cylinder2, head, piston	базовый размер: 1мм; относительный минимум размера: 0,25 мм; относительная желаемая величина размера: 1 мм; плотность и коэф. роста тетраэдров и многогранников: 1,5.

В итоге была получена расчётная стека, состоящая из 20156 ячеек, содержащая 89310 вершин и 107812 внутренних граней. На Рисунке 4.7 показана расчетная сетка в процессе моделирования.

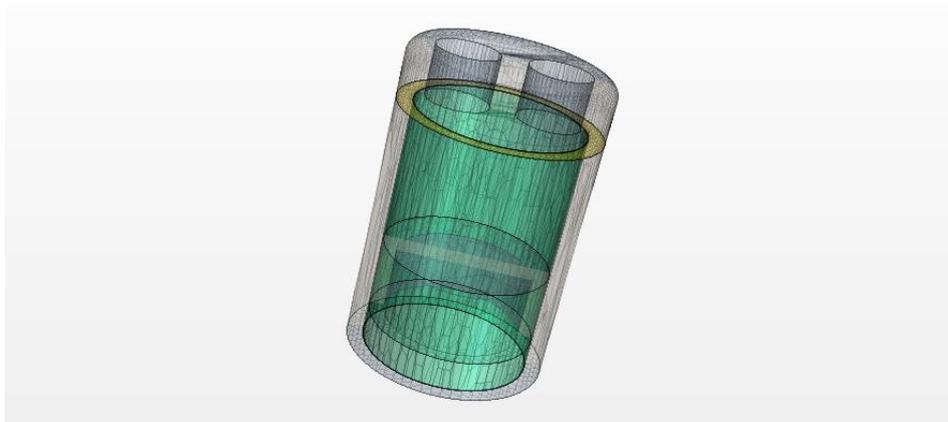


Рисунок 4.7 – Расчетная сетка

4.2.3 Физически модели, начальные и граничные условия

Физические модели определяют первичные переменные в расчете, включая давление, температуру, скорость, а также математический аппарат, используемый для решения. Всего используются три группы моделей, описание которых приведено в Таблице 4.3. В таблице указаны только те параметры опорных величин и начальных условий, которые были изменены. Остальные параметры использовались со значениями по умолчанию.

Расчет производился в трехмерной постановке со стационарной моделью времени. Каждая из областей была разбита на границы. Процесс теплообмена задан граничными условиями третьего рода (Рисунок 4.8, Таблица 4.4).

Значения для граничных условий в Таблице 4.7 описывают два расчетных сценария, описанных при постановке задачи. Коэффициент теплоотдачи α_2 и температура газов T_2 - эквивалентные результирующие величины, определяющие теплообмен между рабочим телом в цилиндре и тепловоспринимающей поверхностью деталей ЦПГ [90]:

$$\alpha_r = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} \alpha d\varphi, \quad (4.7)$$

$$T_r = \frac{\int_0^{4\pi} \alpha T d\varphi}{\int_0^{4\pi} \alpha d\varphi}. \quad (4.8)$$

Таблица 4.3 Физические модели

Группа	Модели	Области	Параметры
Film, Al, Fe	трехмерная; градиенты; сплошной; постоянная плотность; стационарный; энергия разделенного твердого тела; нейтрализация ячеек плохого качества	cylinder, cylinder2, head, piston	Статическая температура: 300 К

Таблица 4.4 Граничные условия

Параметр	Вариант 1	Вариант 2
α_{Γ}	308	308
T_{Γ}	1390	1390
$\alpha_{o.гц}$	2500	114
$T_{o.гц}$	300	300
$\alpha_{o.кр}$	2500	114
$T_{o.кр}$	300	300
$\alpha_{o.п}$	1280	290
$T_{o.п}$	330	330
$\alpha_{к}$	290	290
$T_{к}$	330	330
$\alpha_{в}$	40	40
$T_{в}$	310	310

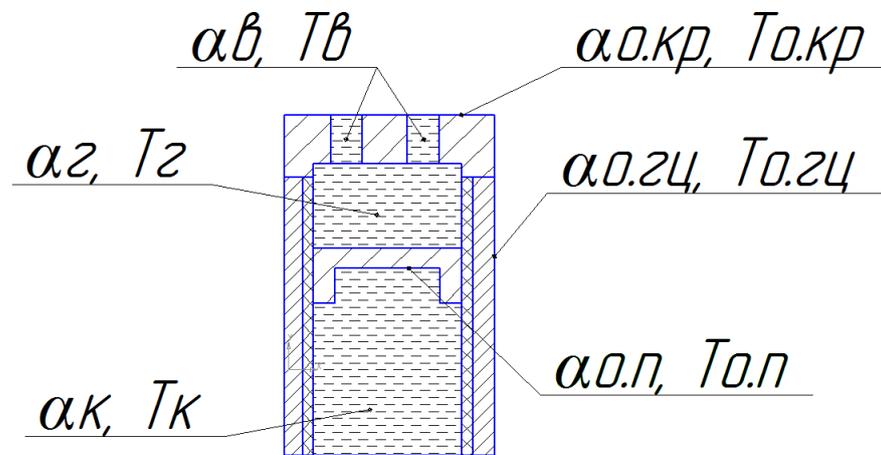


Рисунок 4.8 – Граничные условия

Для вычисления результирующих величин необходимо знать текущие значения температуры газа T и коэффициента теплоотдачи α . Т.к. целью расчета является сравнительная оценка температур в общем случае, коэффициент теплоотдачи α может быть с достаточной точностью определен из формулы Вошни [91]:

$$\alpha = 0,12793D^{-0,2}T^{-0,53}p^{0,8} \left[C_1 c_m + C_2 \frac{V_h T_a}{p_a V_a} (p - p_0) \right]^{0,8}. \quad (4.9)$$

Коэффициенты C_1 и C_2 примем как для двигателя с непосредственным впрыском: $C_1=6,16$ для процессов газообмена, $C_1=2,28$ для процессов сжатия-сгорания-расширения, $C_2=0,00324$ [92]. Также для вычисления коэффициента теплоотдачи α необходимо знать давления p_a , температуру T_a и объем цилиндра V_a в момент начала сжатия; давление воздуха на входе в цилиндр p_0 ; рабочий объем V_h ; текущие значения температуры T и давления p , среднюю скорость поршня c_m . Для получения значения этих параметров был проведен расчет в системе имитационного моделирования «Альбея». Сборка (Рисунок 4.9) моделирует двигатель ASP80 FS AR на режиме 100% УОДЗ, при частоте вращения 7000 мин^{-1} . Были заданы геометрические параметры двигателя, этанол в качестве топлива. На Рисунке 4.10 показаны графики текущего давления p и температуры T по углу ПКВ, полученные в СИМ «Альбея». Так же результаты расчета были выведены в файл. Подставляя полученные величины в выражения 4.7–4.9 получаем результирующий коэффициент теплоотдачи $\alpha_2=308 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$, результирующую температуру газов $T_2=1390 \text{ К}$.

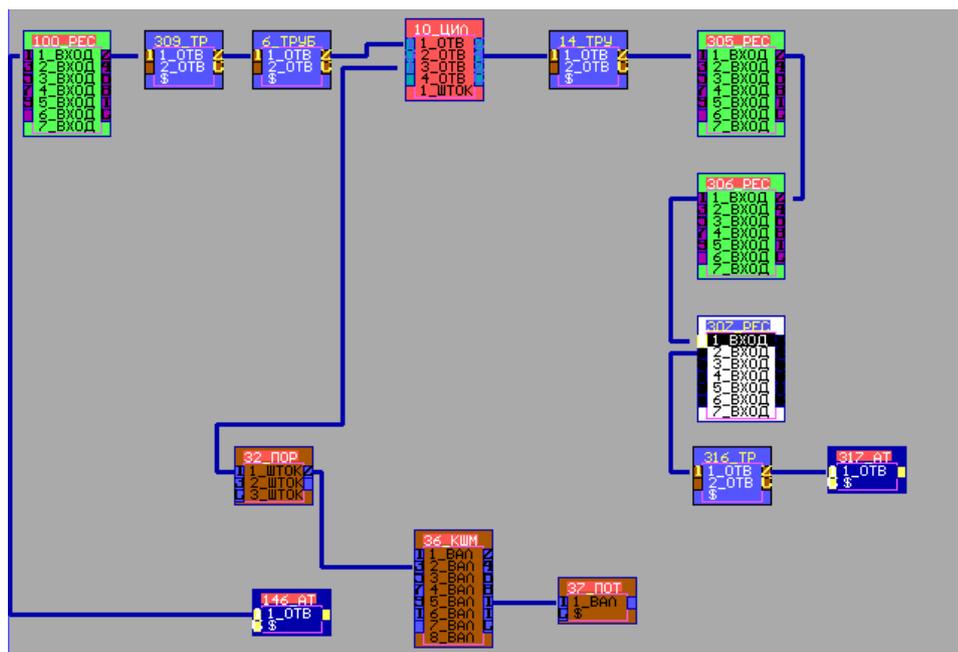


Рисунок 4.9 – Сборка двигателя ASP80FSR в СИМ «Альбея»

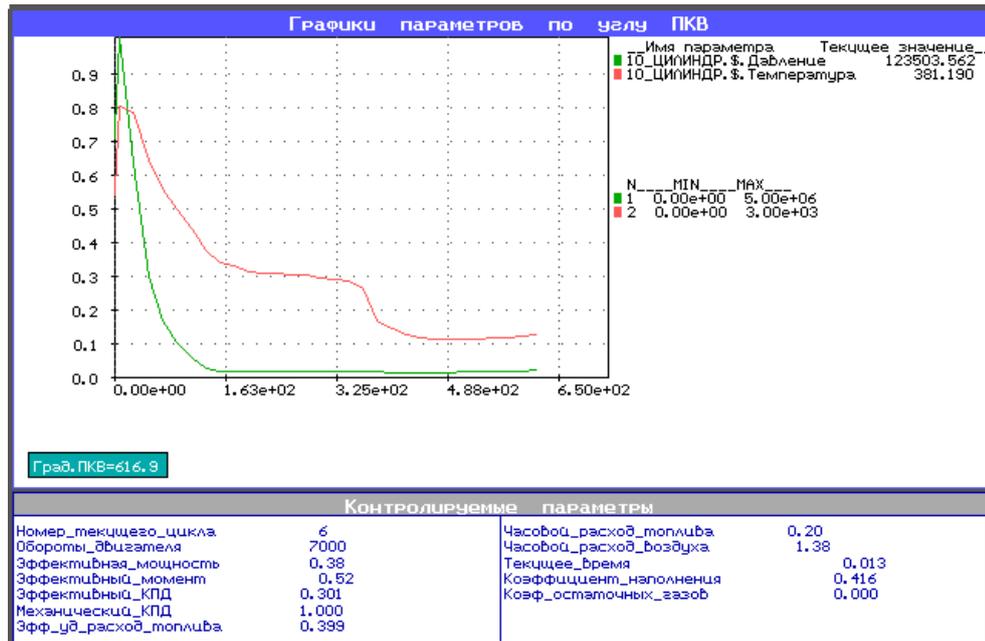


Рисунок 4.10 – Текущее давление p и температура T по углу ПКВ, полученные в СИМ «Альбея»

В работах [90–92; 94] описаны диапазоны коэффициентов теплоотдачи для теплоотводящих поверхностей деталей ЦПГ. В Таблице 4.4 использованы нижние и верхние пределы данных диапазонов.

В ходе расчетов используются три гильзы из сплава Ст40Х, АК4-1, АК4-1 с упрочненным слоем. Основные физические свойства материалов, используемые при моделировании, приведены в Таблице 4.5. Для упрочненного слоя коэффициент теплоемкости и плотность взяты как для оксида алюминия $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$, т.к. известно, что он состоит преимущественно из данного материала.

Гильза цилиндра разбита на две концентрические цилиндрические области (cylinder и cylinder2). При моделировании штатного и алюминиевого ГЦ этим областям задается одинаковый материал (Ст40Х и АК4-1 соответственно). В случае алюминиевой ГЦ с покрытием области cylinder задается материал УС, а области cylinder2 – АК4-1. Это сделано для того, чтобы во всех расчетах можно было использовать одинаковую расчетную сетку. Материалом крышки цилиндра и поршня для всех расчетов является сплав АК4-1.

Таблица 4.5 Свойства материалов цилиндра

Свойство	Ст40Х	АК4-1	УС
Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	46	146	1
Удельная теплоемкость c_p , Дж/кг·К	466	797	775
Плотность, кг/м ³	7800	2800	3990

Далее эмпирически подбирались параметры решателей, такие как коэффициенты релаксации. Основным критерием при подборе являлись значения невязок и сходимость расчета.

4.2.4 Результаты эксперимента

Для количественного сравнения температур на внутренней и внешней поверхности ГЦ по образующей, а также на равном расстоянии между ними были установлены точечные «датчики». Так же датчики были размещены на днище поршня и в крышке цилиндра. Их расположение показано на Рисунке 4.11. В результате проведенных расчетов были получены скалярные поля температур в деталях ЦПГ (Рисунок 4.12 – 4.13), возникающие при применении алюминиевой ГЦ (а), ГЦ с УС (б) и стальной ГЦ (в) при двух расчетных сценариях. Исходя из данных, полученных в контрольных точках были построены поля температур (Рисунок 4.14 – 4.15) в ГЦ (а) и в поршне (б). Также получены температуры в перемычке между клапанами (Рисунок 4.16).

Анализ Рисунков 4.12 – 4.16 показывает, что температуры деталей ЦПГ в условиях достаточного охлаждения (вариант расчета 1) оказываются более чем в 1,5 раза ниже, чем при граничных условиях, определяемых вариантом 2. Температурные градиенты в алюминиевой ГЦ ниже, чем в стальной. Например, в верхней части ГЦ разница температур на внешней и внутренней стенке для алюминиевой ГЦ составила 8 К и 2 К для первого и второго вариантов расчета, в то время как для стальной ГЦ – 28 К и 7 К соответственно. В случае алюминиевой

ГЦ с покрытием градиенты температур в объеме материала основы аналогичны алюминиевой ГЦ без покрытия, в то время как на поверхности покрытия температура выше, что говорит о значительных перепадах температуры в объеме покрытия.

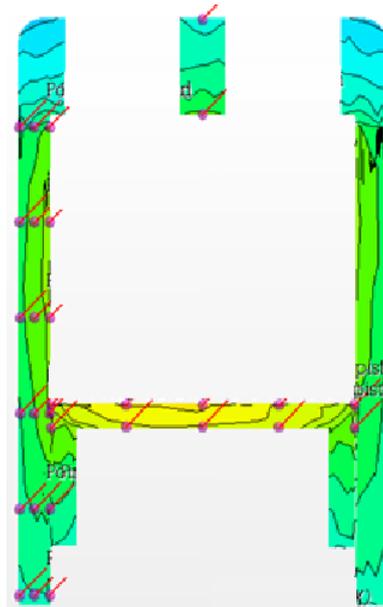
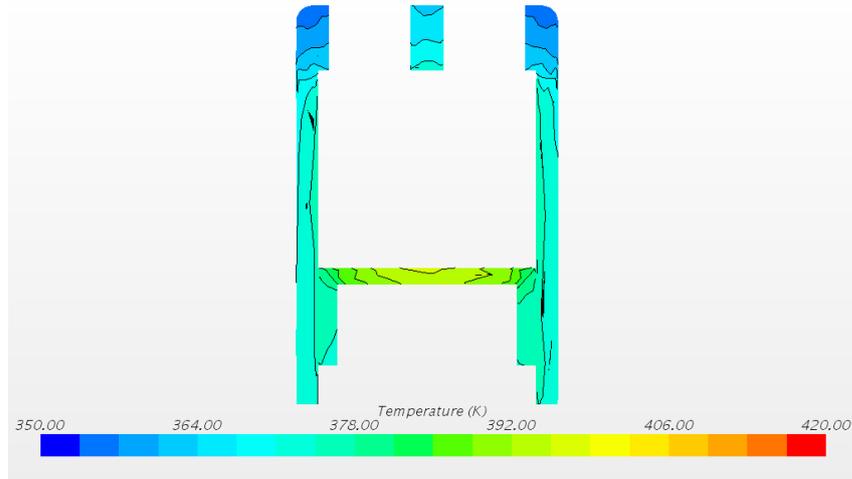


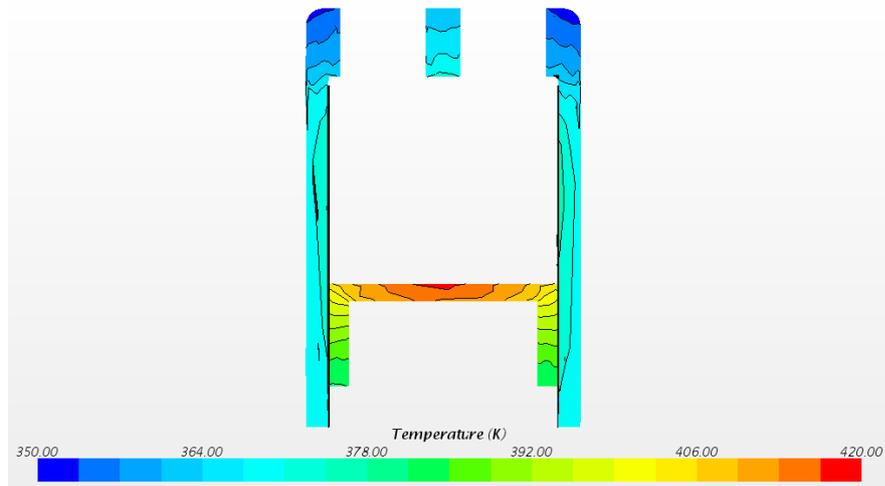
Рисунок 4.11 – Схема расположения контрольных точек-датчиков (показаны красными точками)

В условиях достаточного охлаждения самый низкий перепад температур на внешней и внутренней стенке днища поршня наблюдается при использовании алюминиевой ГЦ, что объясняется отводом тепла от поршня в том числе через стенку ГЦ. Наибольший перепад температур наблюдается при ГЦ с покрытием. В этом случае из-за того, что температура поверхности УС выше, чем при алюминиевой и стальной ГЦ, теплоотвод от поршня в стенку ГЦ оказывается ниже, т.к. ниже температурный напор.

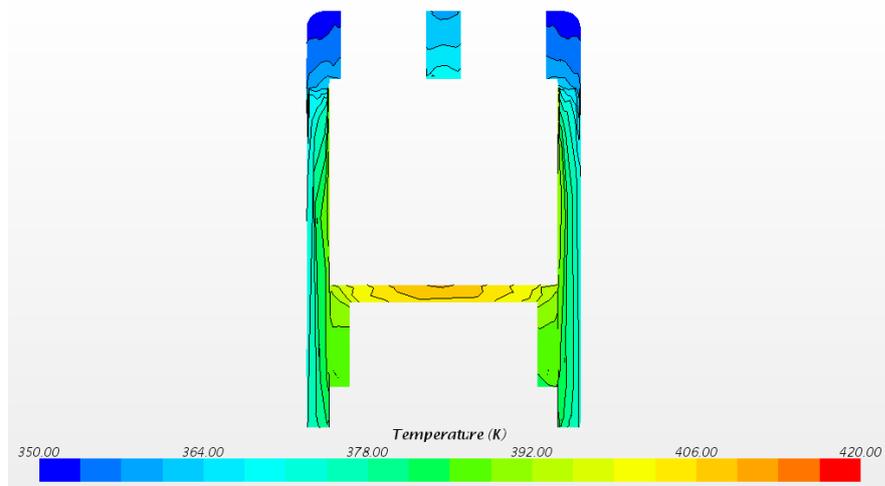
Из Рисунка 4.16 видно, что чем ниже термическое сопротивление стенки ГЦ, тем выше температура крышки цилиндра в перемычке между клапанами. Разница в случае алюминиевой и стальной ГЦ составила около 4 К независимо от вариантов охлаждения.



а)

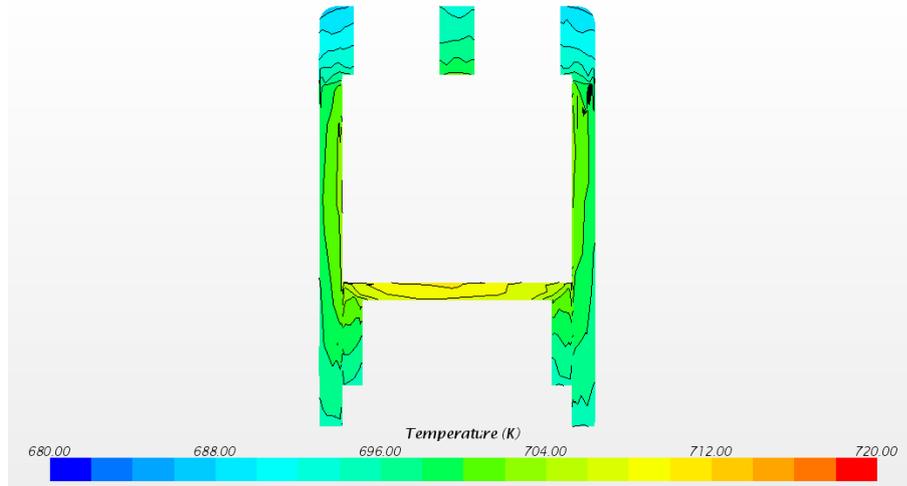


б)

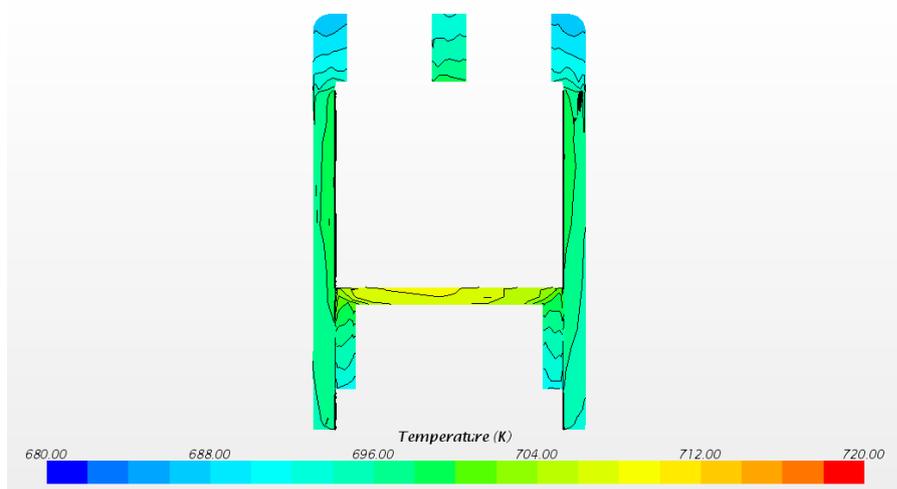


в)

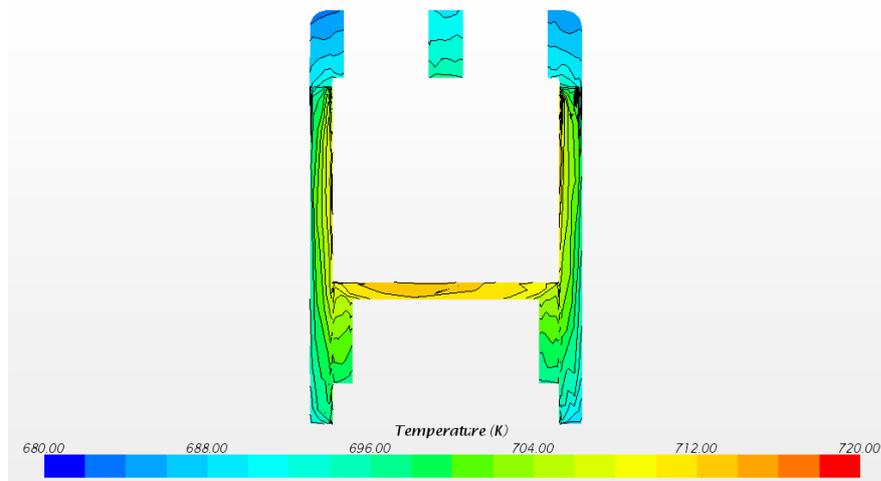
Рисунок 4.12 – Скалярные поля температур в деталях ЦПГ (вариант расчета 1): а) при алюминиевой ГЦ, б) при ГЦ с покрытием, в) при стальной ГЦ.



a)

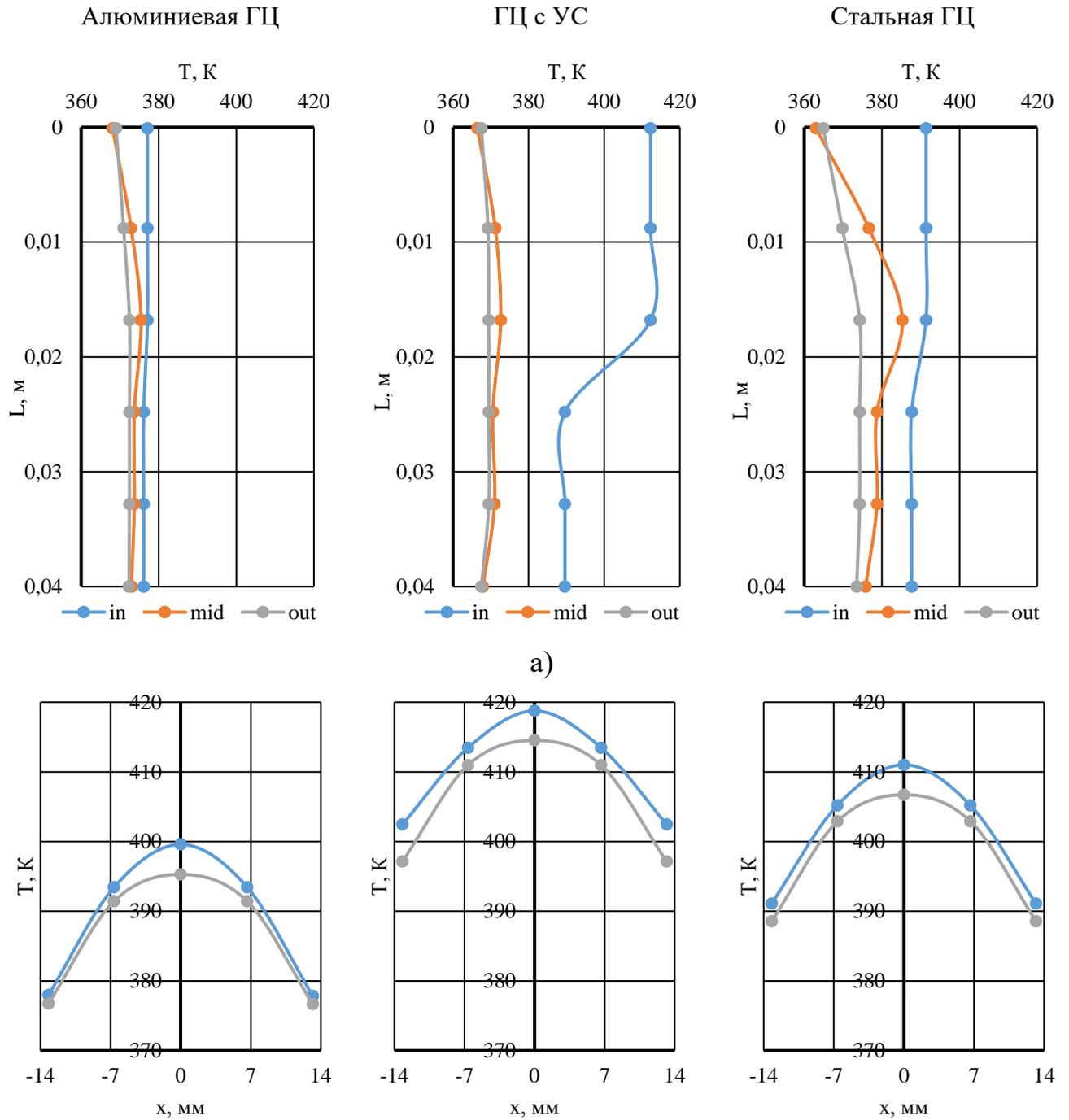


б)



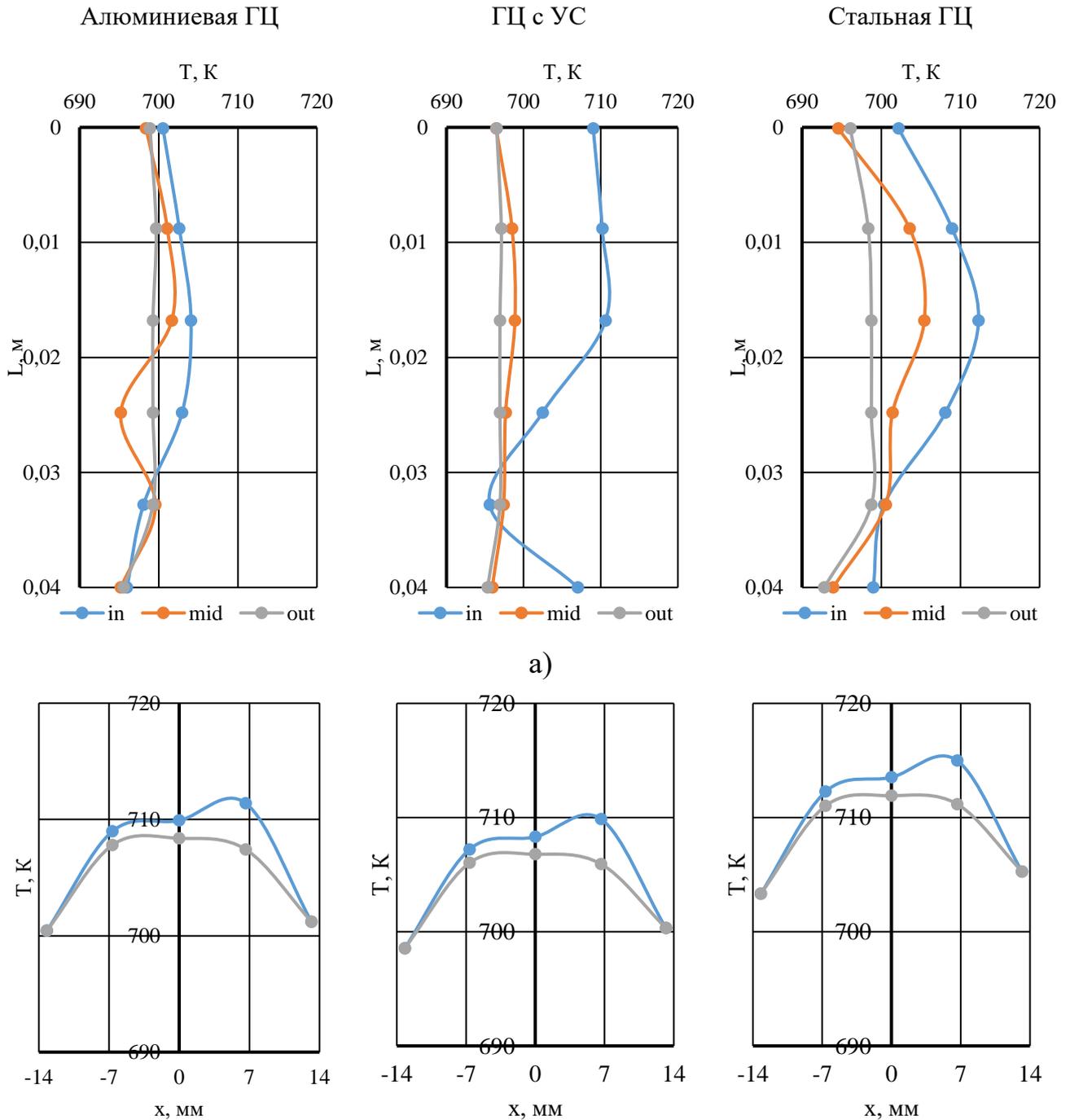
в)

Рисунок 4.13 – Скалярные поля температур в деталях ЦПГ (вариант расчета 2): а) при алюминиевой ГЦ, б) при ГЦ с УС, в) при стальной ГЦ.



б)

Рисунок 4.14 – Температура ГЦ вдоль образующей и поршня вдоль днища (вариант расчета 1), где in – на поверхности, соприкасающейся с горячими газами, mid – в средней части стенки ГЦ, out – на охлаждаемой поверхности



б)

Рисунок 4.15 – Температура ГЦ вдоль образующей и поршня вдоль днища (вариант расчета 2), где in – на поверхности, соприкасающейся с горячими газами, mid – в средней части стенки ГЦ, out – на охлаждаемой поверхности.

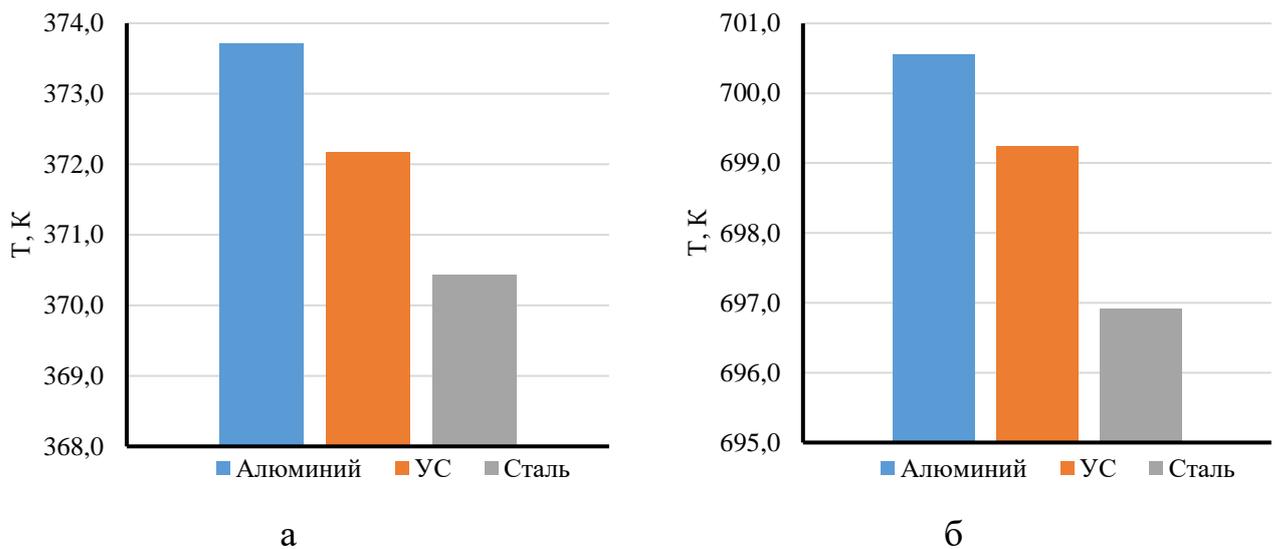
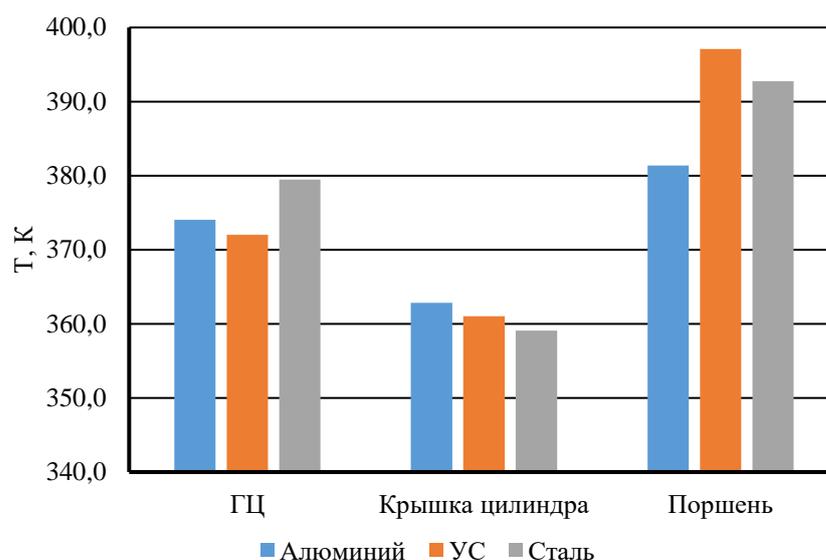


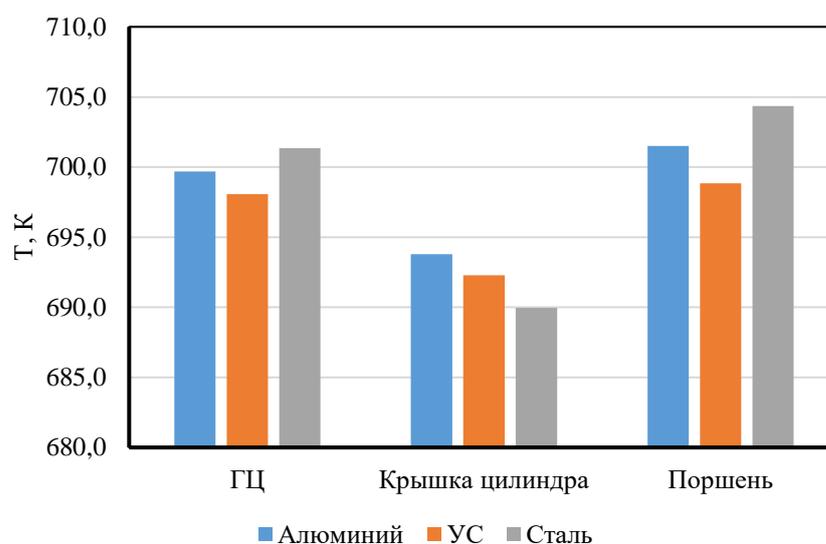
Рисунок 4.16 – Температура крышки цилиндра в перемычке между клапанами:
 а) расчет по сценарию 1, б) расчет по сценарию 2.

На Рисунке 4.17 представлены усредненные по объему температуры деталей ЦПГ. Видно, что ГЦ с УС в обоих случаях имеет наименьшую среднюю температуру, а стальная ГЦ – наибольшую. Средняя температура крышки цилиндра тем ниже, чем выше термическое сопротивление стенки ГЦ, т.е. минимальная для стальной ГЦ, максимальна – для алюминиевой. Необходимо отметить, что разница средних температур не превышает 4-7 К. Средняя температура поршня при достаточном охлаждении деталей ЦПГ максимальная в случае ГЦ с УС. Температура в случае стальной ГЦ на 5 К ниже, в то время в случае алюминиевой ГЦ – ниже на 16 К. То есть, УС блокирует отвод тепла от поршня через стенку ГЦ. В случае недостаточного охлаждения, средняя температура поршня в случае ГЦ с УС минимальна, на 6 К ниже, чем в случае стальной ГЦ.

Результаты теоретического исследования теплового состояния деталей двигателя с керамическим покрытием на рабочей поверхности цилиндра согласуются с экспериментальными данными зарубежных и российских исследований в области, посвященной тепловой защите деталей ЦПГ посредством МДО-покрытий [100–105].



а)



б)

Рисунок 4.17 – Средняя температура деталей: а) расчет по сценарию 1, б) расчет по сценарию 2.

4.3 Выводы по главе

1. Упрочненный слой на рабочей поверхности 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 $1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ наблюдается снижение средней температуры гильзы на $5\dots 10 \text{ К}$ и возрастание средней температуры поршня и крышки цилиндра в том же диапазоне. При этом на $20\dots 25 \text{ К}$ увеличивается температура на рабочей поверхности гильзы.

2. 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 нагрева и охлаждения разница может достигать 10% .

3. Чем интенсивнее теплообмен между газами в рабочей камере и стенкой цилиндра и теплообмен между внешней стенкой гильзы и охлаждающей средой, тем сильнее проявляются теплозащитные свойства упрочненного слоя. С ростом коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 разница между тепловыми потоками через алюминиевую гильзу с ИУ-покрытием и стальную гильзу растет. Интенсивность теплоотвода в окружающую среду оказывает более существенное влияние на разницу тепловых потоков, чем интенсивность теплоподвода со стороны рабочей камеры.

4. Средняя температура гильзы цилиндра с упрочненным слоем незначительно ниже, чем у алюминиевой гильзы цилиндра, в то время как стальная гильза имеет наибольшую среднюю температуру. Чем хуже охлаждение гильзы, тем эта разница ниже.

5. Средняя температура поршня при использовании гильзы с ИУ-покрытием в условиях достаточного охлаждения выше, чем при использовании алюминиевой и стальной гильз. С ухудшением охлаждения деталей цилиндропоршневой группы средняя температура поршня, работающего совместно с гильзой с ИУ-покрытием, становится ниже, чем при работе с другими исследуемыми гильзами. Средняя температура крышки цилиндра в случае алюминиевой гильзы всегда выше, чем у гильзы с УС. Минимальная температура крышки цилиндра обеспечивается при использовании стальной гильзы цилиндра.

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%.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарипов М.Д., Рудой Б.П. Перспективы развития поршневых ДВС //Иновационные проблемы развития машиностроения в Башкортостане: Сб. науч. трудов. Уфа: Гилем, 2003.- с. 33 - 48.
2. М.М. Криштал, П.В. Ивашин, П.В. Коломиец Использование технологии микродуговогооскидирования при разработке ДВС с блоком цилиндров из алюминиевого сплава // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, т, 12, №4, 2010 – с, 242 – 246
3. Путинцев С. В. Механические потери в поршневых двигателях: специальные главы конструирования, расчета и испытаний //М.: МГТУ им. НЭ Баумана. – 2011.
4. Качканьян Р. А., Кульмагамбетов К. С. Пути снижения потерь на трение в кривошипно-шатунном механизме поршневых ДВС //Молодой ученый. – 2016. – №. 10. – С. 231-234.
5. Srivastava, M., Sinha, U., Muniprakash, M., Mithran, A. et al., "Wear Resistant and Fuel Efficient Ni-Co Based Composite Coating for Engine Cylinder Application," SAE Technical Paper 2017-26-0165, 2017, <https://doi.org/10.4271/2017-26-0165>.
6. Lenny J. Replacing the cast iron liners for aluminum engine cylinder blocks: a comparative assessment of potential candidates //Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, Connecticut. – 2011.
7. Goodman J. Nikasil and Alusil //Engine Professional. – 2008. – С. 18-22.
8. Kainer K. U. (ed.). Metal matrix composites: custom-made materials for automotive and aerospace engineering. – John Wiley & Sons, 2006.
9. Dell R., Rand D. A. J. Clean energy. – Royal Society of Chemistry, 2004. – Т. 5.

10. Электролитно-плазменная обработка: моделирование, диагностика, управление: монография / Е. В. Парфенов, Р. Р. Невьянцева, С. А. Горбатков, А. Л. Ерохин. – М.: Машиностроение, 2014. – 380 с.
11. Б. В. Шандров, Е. М. Морозов, А. В. Жуковский Основы технологии микродугового оксидирования: Учебное пособие. – М.: «ИД Альянс», 2008 – 80 с.
12. Микродуговое оксидирование: теория, технология, оборудование / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. – М.: ЭКОМЕТ, 2005. – 368 с.
13. Нанотехнологии в энергомашиностроении: научно-образовательный курс / Н. Ю. Дударева, И. А. Бутусов, Р. В. Кальщиков, Н. Х. Мусин / Под ред. Н. Ю. Дударевой; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т, Уфа: УГАТУ, 2013. - 112 с.
14. Трение, изнашивание и смазка, Справочник, В 2-х кн, Кн, 2, / Под ред. И. В. Крагельского и В. В. Алисина – М.: Машиностроение, 1979- 358с.
15. Крутилин А. Н., Курбатов М. И., Курбатова М. И. Условия работы и основные требования, предъявляемые к материалу гильз блока цилиндров //Литьё и металлургия. – 2005. – №. 2-1 (34).
16. Гинцбург Б, Я, Теория поршневого кольца – М.: Машиностроение, 1979 г, – 247 с.
17. Papadopoulos P., Priest M., Rainforth W. M. Investigation of fundamental wear mechanisms at the piston ring and cylinder wall interface in internal combustion engines //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2007. – Т. 221. – №. 3. – С. 333-343.
18. Y. Enomoto, T. Yamamoto New materials in automotive tribology // Tribology Letters № 5, 1998 г, с, 13-24.
19. Cole G. S., Sherman A. M. Light weight materials for automotive applications //Materials characterization. – 1995. – Т. 35. – №. 1. – С. 3-9.
20. Rohatgi P. Cast aluminum-matrix composites for automotive applications //Jom. – 1991. – Т. 43. – №. 4. – С. 10-15.
21. Schäfe A. Ремонт алюминиевых блоков цилиндров : справочник. Германия, 2006. 100 с.

22. Schmid J. Metallic composite materials for cylinder surfaces of combustion engines and their finishing by honing //Metal matrix composites. Custom-made materials for automotive and aerospace engineering. – 2006. – С. 215-242.

23. Sundararajan G., Joshi S. V., Krishna L. R. Engineered surfaces for automotive engine and power train components //Current opinion in chemical engineering. – 2016. – Т. 11. – С. 1-6.

24. Ostermann A. E. Experiences with Nickel-Silicon-Carbide Coatings in Cylinder Bores of Small Aluminum Engines. – SAE Technical Paper, 1979. – №. 790843.

25. Mistry K., Priest M., Shrestha S. The potential of plasma electrolytic oxidized eutectic aluminium-silicon alloy as a cylinder wall surface for lightweight engine blocks //Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology. – 2010. – Т. 224. – №. 2. – С. 221-229.

26. Ernst P., Barbezat G. Thermal spray applications in powertrain contribute to the saving of energy and material resources //Surface and Coatings Technology. – 2008. – Т. 202. – №. 18. – С. 4428-4431.

27. Токарев А,А., Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля, – М.: Машиностроение, 1982 г, – 224 с,

28. Дьяченко Н. Х., Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей, М.: Машиностроение, 1969 г, – 248 с,

29. Образование и разложение загрязняющих веществ в пламени: пер, с англ./ Под ред, Н,А, Чигиря,- М.: Машиностроение, 1981.

30. Арзамасцева Э,А, Применение алюминиевых сплавов в автомобилестроение, журнал Автомобильная промышленность США, 1987, № 3,4, с. 35-38

31. Влияние легирования на структуру и свойства деталей из чугуна с шаровидным графитом / Р,А, Семенов, В,М,Садофев, А,В, Запольская и др, // Применение новых материалов для повышения долговечности деталей транспортных дизелей, – М.: НИИ ИНФОРМТЯЖМАШ, – 1972, – № 5, – с. 12-24

32. Микулин Ю.В. Смазка и износ двигателя при пусковом режиме в условиях положительных и отрицательных температур воздуха // Электромашиностроение, – 1969 – № 1, – С. 9-14
33. Гурвич И,Б,, Сыркин П,Э,, Чумак В,И, Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей, – М,: Транспорт, 1994 – 144 с.
34. Канарчук В,Е,, Долговечность и износ двигателей при динамических режимах работы, – Киев: Наук, Думка, 1978г, – 256 с,
35. Гурвич И,Б, Долговечность автомобильных двигателей, – М,: Машиностроение, 1967 г, – 103 с,
36. М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полуниин, Д.А. Павлов Повышение износостойкости деталей алюмининево-кремниевых сплавов методом МДО для работы в экстремальных режимах трения // Известия Самарского научного центра Российской академии наук, 2011. Т.13, №4(3), С. 765 – 768.
37. М.М. Криштал, П.В. Ивашин, А.В. Полуниин, Д.А. Павлов О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, на силумине АК9ПЧ // Вектор науки ТГУ, 2012. №4(22). С. 169 – 172.
38. Фёдоров, В.А. Разработка основ применения лёгких сплавов в качестве материалов триботехнического назначения за счёт формирования поверхностного керамического слоя [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.А. Фёдоров. – М., 1993. - 49 с.
39. Петросянц, А.А. Кинетика изнашивания покрытий, нанесённых методом микродугового оксидирования [Текст] / А.А. Петросянц, В.Н. Малышев, В.А. Фёдоров // Трение и износ. - 1984. - Т. 5, № 2. – С. 350-354.
40. Новиков, А.Н. Восстановление и упрочнение деталей из алюминиевых сплавов микродуговым оксидированием [Текст]: учеб. пособие / А.Н. Новиков, А.Н. Батищев, А.В. Коломейченко [и др.] – Орёл: ОрёлГАУ, 2001. - 99 с.

41. Михеев, А.Е. Технологические возможности микродугового оксидирования алюминиевых сплавов [Текст] / А.Е. Михеев, Н.А. Терёхин, В.В. Стацера // Вестник машиностроения. - 2003. - № 2. – С. 56-63.
42. Суминов, И.В. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов [Текст] В 2-х т. Т. 2 / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, Б.Л. Крит, А.М. Борисов – Москва: Техносфера, 2011. – 512 с.
43. Суминов, И.В. Микродуговое оксидирование защищает металл [Текст] / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, А.М. Борисов // Наука в России. - 1999. - № 4. – С. 21-25.
44. Стребков, С.В. Обеспечение работоспособности оксидированных поверхностей деталей [Текст] / С.В. Стребков, И.Г. Голубев, А.В. Грамолин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 1997. -№ 7. – С. 30-31.
45. Фёдоров, В.А. Разработка основ применения лёгких сплавов в качестве материалов триботехнического назначения за счёт формирования поверхностного керамического слоя [Текст]: автореф. дис. ... докт. техн. наук / В.А. Фёдоров. – М., 1993. - 49 с.
46. Новиков, А.Н. Пористость МДО-покрытий на восстановленных поверхностях деталей из алюминиевых сплавов [Текст] / А.Н. Новиков, В.В. Жуков // Ремонт, восстановление, модернизация. - 2005. - № 6. – С. 7-9.
47. Новиков, А.Н. Технологические основы восстановления и упрочнения деталей сельскохозяйственной техники из алюминиевых сплавов электрохимическими способами [Текст] / А.Н. Новиков. – Орёл: ОрёлГАУ, 2001. - 233 с.
48. Коломейченко, А.В. Влияние режима МДО на плотность покрытий [Текст] / А.В. Коломейченко, Н.С. Чернышов // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2006. - №7. – С. 12-14.
49. Коломейченко, А.В. Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей

комбинированными методами [Текст] : автореф. дис. докт. техн. наук / А.В. Коломейченко. – М., 2011. - 31 с.

50. Логачев, В.Н. Влияние концентрации метасиликата натрия на толщину МДО-покрытия, сформированного на пластически деформированном сплаве АК7ч [Текст] / В.Н. Логачев // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения: сб. науч. работ. – Брянск: БГСХА, 2004. – С. 181-184.

51. Каракозов, Э.С. Микродуговое оксидирование – перспективный процесс получения керамических покрытий [Текст] / Э.С. Каракозов, А.В. Чавдаров, Н.В. Барыкин // Сварочное производство. - 1993. - № 6. – С. 4-7.

52. Батищев, А.Н. Свойства покрытий, сформированных микродуговым оксидированием [Текст] / А.Н. Батищев, А.В. Ферябков, А.Л. Севостьянов // Изв. Орл. гос. техн. ун-та. Сер. Строительство. Транспорт. – Орёл, 2004. - № 1-2. – С. 67-69.

53. Кузнецов, Ю.А. Восстановление и упрочнение деталей машин и оборудования АПК микродуговым оксидированием [Текст]: автореф. дис. докт. техн. наук / Ю.А. Кузнецов. – М., 2006. – 35 с.

54. Коломейченко, А.В. Микродуговое оксидирование как способ восстановления и упрочнения деталей машин [Текст] / 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.

55. Криштал М. М. и др. Повышение эффективности технологии микродугового оксидирования алюминиево-кремниевых сплавов // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – 2015. – №. 2-2.

56. Смелянский В.М. Методика технологического проектирования МДО [Текст] / В.М. Смелянский, О.Ю. Герций // Автомобильная промышленность. - 2001. - № 2. – С. 31-33.

57. Черненко, В.И. Получение покрытий анодно-искровым электролизом [Текст] / В.И. Снежко, И.И. Папанова. - Л.: Химия, 1991. - 128 с.: ил.

58. Трение, износ и смазка (трибология и триботехника) [Текст] / А.В. Чичинадзе, Э.М. Берлинер, Э.Д. Браун [и др.]; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 2003. - 576 с.

59. Voevodin, A.A. Characterisation of wear resistant Al-Si-O Coatings formed on al-based alloys by micro-arc discharge treatment [Text] / A.A. Voevodin, A.L. Yerokhin, V.V. Lyubimov // Surface and Coating Technology. - 1996. - V 86-87. – P. 516-521.

60. Кузнецов, Ю.А. Противоизносные свойства керамических покрытий, полученных микродуговым оксидированием [Текст] / Ю.А. Кузнецов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. - 2004. - № 6. – С. 28.

61. Козлов, А.В. Повышение износостойкости деталей машин микродуговым оксидированием с последующим модифицированием покрытия [Текст]: дис. канд. техн. наук / А.В. Козлов. – Орел., 2014. – 152 с.

62. Пат. 2287025 Российская Федерация, С23 С26/00. Способ фрикционно-механического нанесения антифрикционных покрытий на внутренние цилиндрические поверхности деталей и устройство для его осуществления [Текст] / В.Л. Басинюк, Е.И. Мардосевич, А.В. Коломейченко [и др.]. - № 2005117285/02; заявл. 06.06.2005; опубл. 10.11.2006, Бюл. № 31. – 910 с.

63. Малышев, В.Н. Упрочнение поверхностей трения методом микродугового оксидирования [Текст]: автореф. дис. докт. техн. наук / В.Н. Малышев. – М., 1999. - 53 с.

64. Марков, Г.А. Микродуговые и дуговые методы нанесения защитных покрытий [Текст] / Г.А. Марков, О.П. Терлеева, Е.К. Шулепко // Повышение износостойкости деталей газонефтяного оборудования за счет реализации эффекта избирательного переноса и создания износостойких покрытий: сб. тр. / под ред. А.А. Петросянца, А.Г. Кана. - М., 1985. - Вып. 185. - С. 54-64.

65. Ерохин, А.Л. Повышение фрикционных характеристик МДО-покрытий вакуумно-плазменной обработкой [Текст] / А.Л. Ерохин, А. Мэттьюз, С. Доуи [и др.] // Трение и износ. - 1998. - Т. 19, № 5. – С. 642-646.

66. Дударева, Н.Ю. Поршневое кольцо из алюминиевого сплава для двигателей внутреннего сгорания [Текст] : автореф. дис. канд. техн. наук / Н.Ю. Дударева. – Уфа., 1999. - 31 с.

67. Дударева Н.Ю. Исследование возможности упрочнения верхних поршневых канавок двигателя внутреннего сгорания методом искрового упрочнения [Текст] / Дударева Н.Ю., Соколов С.А. // Вестник УГАТУ. – 2008. – т.10, № 1. – С. 54-56.

68. Салахутдинов И. Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров бензиновых двигателей металлизацией рабочей поверхности трения / Салахутдинов И. Р, Хохлов А. Л. // Вестник Ульяновской ГСХА. – 2012. – №2 (18). – С. 86-89.

69. Хохлов, А.Л. Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей нанесением покрытий на детали цилиндропоршневой группы бензиновых двигателей [Текст] : автореф. дис. док. техн. наук / А.Л. Хохлов. – Пенза., 2017. - 40 с.

70. Пат. 2119587 Российская Федерация, F02 В77/02. Способ получения совместимости пар трения для двигателей внутреннего сгорания [Текст] / В.В. Белозеров, А. И. Махатилова, А. Ф. Минак, И. В. Севрук, Б. А. Вурье . - № 96111855/06, заявл. 11.06.1996; опубл. 27.09.1998.

71. Дударева Н.Ю. Поршневое кольцо для ДВС, выполненное из алюминиевого сплава [Текст] // Автомобильная промышленность. – 2012. –№ 3. – С. 25.

72. Дударева Н.Ю. Поршневое кольцо для ДВС, выполненное из алюминиевого сплава [Текст] / Дударева Н.Ю., Соколов С.А. // Автомобильная промышленность. – 2010. –№ 7. – С. 31-32.

73. 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/ Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т.– Уфа, 2011. – С.55-56.

74. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. – М.: Наука, 1976 г. – 280 с.

75. Карасик И.И. Методы трибологических испытаний в национальных стандартах. - Минск : Наука и техника, 1993. - 325 с.

76. Tian J. et al. Structure and antiwear behavior of micro-arc oxidized coatings on aluminum alloy // Surface and Coatings Technology. – 2002. – Т. 154. – №. 1. – С. 1-7.

77. Дударева, Н. Ю. Трибологические параметры МДО-слоев, сформированных в силикатно-щелочном электролите на образцах из высококремниевое алюминиевого сплава АК12 / Н. Ю. Дударева, Д. А. Ахмедзянов // Вестник УГАТУ. - 2018. - Т. 2, № 3(81). -С. 10-16.

78. Nie X. et al. Thickness effects on the mechanical properties of micro-arc discharge oxide coatings on aluminium alloys //Surface and Coatings Technology. – 1999. – Т. 116. – С. 1055-1060.

79. Malayoglu U. et al. An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 aluminum alloy //Materials science and Engineering: A. – 2011. – Т. 528. – №. 24. – С. 7451-7460.

80. Wei T., Yan F., Tian J. Characterization and wear-and corrosion-resistance of microarc oxidation ceramic coatings on aluminum alloy //Journal of Alloys and Compounds. – 2005. – Т. 389. – №. 1-2. – С. 169-176.

81. Методика работы на установке для проведения механических растяжений малых образцов: методические указания к лабораторной работе № 5 по курсу «Физика прочности и пластичности наноматериалов»/ УфГАТУ, Составители: Кулясова О.Б., Нурисламова ГВ, Исламгалиев РК. - Уфа, 2007 – 13 с.

82. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. Исследование влияния искрового упрочнения на прочностные свойства алюминиевого сплава //Вестник Уфимского

государственного авиационного технического университета. – 2012. – Т. 16. – №. 8 (53).

83. Патрахальцев Н.Н, Характеристики двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие, – М.: Изд-во РУДН, – 100 с.

84. Curran, James A. Thermal and mechanical properties of plasma electrolytic oxide coatings. Diss. University of Cambridge, 2006.

85. Цирельман Н.М. Прямые и обратные задачи тепломассопереноса / Н.М. Цирельман. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 392 с.

86. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях: Учеб. пособие для вузов. – 2 изд. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 472 с.

87. Коротких А.Г. Теплопроводность материалов: учебное пособие / А.Г. Коротких; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2011. – 97 с.

88. Колчин А.И., Демидов В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей. - М.: Высш. школа, 1980. - 400 с.

89. Нурутдинов, А.Ш. Микродуговое окисление/А.Ш. Нурутдинов, А.Л. Хохлов, В.А. Степанов, Д.М. Марьин, К.У. Сафаров//Инновации в науке. 2013. № 16-1. С. 121-127.

90. Костин А.К., Ларионов В.А., Михайлов Л.И. Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания. Л., 1979 г.

91. Чайнов Н.Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Н.Д. Чайнова. М.: Машиностроение, 2008 г. – 496 с.

92. Максимов Е.А., Кавтарадзе Р.З., Бенидзе Д.Ш. Методика экспериментального определения мгновенных значений плотностей тепловых потоков и температур поверхности камеры сгорания ДВС на рабочих режимах // Двигателестроение, 1989. №10. С. 47-49.

93. Салахутдинов И. Р. и др. Повышение износостойкости гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания //Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2011. – №. 1 (13).

94. Давыдов Г.А., Овсянников М.К. Температурные напряжения в деталях судовых дизелей, - Л., «Судостроение», 1969 г., 248 с.
95. Стефановский Б.С., Скобцов Е.А., Корси Е.К. Испытания двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1972 г, 368 с.
96. Dudareva N. Y., Musin N. K. Feasibility Study on the MAO-and SH-coated Cylinder Liners Application in ICE //Procedia Engineering. – 2017. – Т. 206. – С. 692-697.
97. Дударева Н.Ю., Мусин Н.Х. и др. Исследование износостойкости алюминиевых гильз цилиндров с модифицированной рабочей поверхностью // XIII КОРОЛЁВСКИЕ ЧТЕНИЯ Международная молодёжная научная конференция, сборник трудов. Том. 1 / СГАУ имени ак. С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). – Самара, 2015. – с.224-225.
98. Дударева Н. Ю., Мусин Н. Х. и др. Исследование влияния микродугового оксидирования на износостойкость гильзы цилиндра ДВС из алюминиевого сплава //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – №. 9 (80).
99. Александров В. Г., Майоров А. В., Потюков Н. П. Авиационный технический справочник //М.: Транспорт, 1975 г. – 432 с.
100. Повышение технико-эксплуатационных показателей ДВС методом микродугового оксидирования днищ поршней : [моногр.] / А.А. Глущенко, А.Л. Хохлов. — Ульяновск : УлГУ, 2016. — 126 с.
101. Нурутдинов А. Ш. Повышение технико-эксплуатационных показателей ДВС модернизацией цилиндропоршневой группы трения / Нурутдинов А. Ш., Степанов В. А., Хохлов А. Л., Уханов Д. А., Каняева О. М. //Аграрный научный журнал. – 2013. – №. 11. – С. 56-59.
102. Лиханов В.А., Гребнев А.В., Скрябин М.Л., Смехова И.Н. Повышение жаропрочности поршневых алюминиевых сплавов дизельных двигателей//Строительные и дорожные машины. -2018. -№ 2. -С. 41-46.

103. Смехова, И.Н., Скрябин, М.Л. Этапы формирования пористых структур при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов//Ползуновский вестник. -2017. -№ 4. -С. 192-196.

104. Chigrinova N. M. Formation of coatings by anodic microarc oxidation and their operation in thermally-stressed assemblies //Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2001. – Т. 40. – №. 5-6. – С. 213-220.

105. Chigrinova N. M., Chigrinov V. E., Kukharev A. A. The heat protection of highly forced diesel pistons by anodic microarc oxide coating //Protection of Metals. – 2000. – Т. 36. – №. 3. – С. 269-274.

Приложение А
(справочное)

Результаты расчета линейного термического сопротивления

Таблица А.1 Термическое сопротивление цилиндра из сплава Ст40Х при $\alpha_1=2000$ Вт/(м²·К) и $\alpha_2=114$ Вт/(м²·К)

Диаметр внутренний $d_{в}, м$	Диаметр наружный $d_{н}, м$	Отношение $d_{н}/d_{в}$	Термическое сопротивление $R_{l,cm}$ при различной толщине покрытия
0,026	0,028	1,077	0,33344
0,026	0,03	1,154	0,313417
0,026	0,032	1,231	0,295949
0,026	0,034	1,308	0,280582
0,026	0,036	1,385	0,266963
0,026	0,038	1,462	0,254815
0,026	0,04	1,538	0,243914
0,026	0,042	1,615	0,234081
0,026	0,044	1,692	0,225169
0,026	0,046	1,769	0,217057
0,078	0,08	1,026	0,116376
0,078	0,082	1,051	0,11401
0,078	0,084	1,077	0,111764
0,078	0,086	1,103	0,10963
0,078	0,088	1,128	0,107599
0,078	0,09	1,154	0,105665
0,078	0,092	1,179	0,103821
0,078	0,094	1,205	0,102061
0,078	0,096	1,231	0,10038
0,078	0,098	1,256	0,098773
0,078	0,1	1,282	0,097235
0,078	0,102	1,308	0,095763
0,078	0,104	1,333	0,094352
0,078	0,106	1,359	0,092998
0,078	0,108	1,385	0,0917
0,078	0,11	1,410	0,090452
0,078	0,112	1,436	0,089253
0,078	0,114	1,462	0,088101
0,078	0,116	1,487	0,086991
0,078	0,118	1,513	0,085923

Таблица А.2 Термическое сопротивление цилиндра из сплава АК4-1 ($\alpha_1=2000$ Вт/м², $\alpha_2=114$ Вт/м²·К)

Диаметр внутренний $d_в$, м	Диаметр наружный $d_н$, м	Отношение $d_н/d_в$	Термическое сопротивление R_{lat} при различной толщине покрытия
0,026	0,028	1,076923	0,332768
0,026	0,03	1,153846	0,312119
0,026	0,032	1,230769	0,294065
0,026	0,034	1,307692	0,278147
0,026	0,036	1,384615	0,26401
0,026	0,038	1,461538	0,251371
0,026	0,04	1,538462	0,240004
0,026	0,042	1,615385	0,229729
0,026	0,044	1,692308	0,220394
0,026	0,046	1,769231	0,211879
0,078	0,08	1,025641	0,116146
0,078	0,082	1,051282	0,113556
0,078	0,084	1,076923	0,111092
0,078	0,086	1,102564	0,108744
0,078	0,088	1,128205	0,106504
0,078	0,09	1,153846	0,104366
0,078	0,092	1,179487	0,102323
0,078	0,094	1,205128	0,100368
0,078	0,096	1,230769	0,098496
0,078	0,098	1,25641	0,096701
0,078	0,1	1,282051	0,09498
0,078	0,102	1,307692	0,093328
0,078	0,104	1,333333	0,091741
0,078	0,106	1,358974	0,090215
0,078	0,108	1,384615	0,088746
0,078	0,11	1,410256	0,087332
0,078	0,112	1,435897	0,08597
0,078	0,114	1,461538	0,084657
0,078	0,116	1,487179	0,08339
0,078	0,118	1,512821	0,082166

Таблица А.3 Термическое сопротивление цилиндра из сплава АК4-1 с упрочненным слоем ($\alpha_1=2000$ Вт/м², $\alpha_2=114$ Вт/м²·К, $\lambda_n=1$ Вт/м · К)

Диаметр внутр. $d_в$, м	Диаметр наруж. $d_н$, м	Отнош. $d_н/d_в$	Термическое сопротивление R_{lyn} при различной толщине покрытия					
			5 мкм	100 мкм	150 мкм	200 мкм	250 мкм	300 мкм
0,026	0,028	1,077	0,335	0,337	0,338	0,340	0,342	0,344
0,026	0,03	1,154	0,314	0,316	0,318	0,320	0,322	0,323
0,026	0,032	1,231	0,296	0,298	0,300	0,302	0,304	0,305
0,026	0,034	1,308	0,280	0,282	0,284	0,286	0,288	0,289
0,026	0,036	1,385	0,266	0,268	0,270	0,272	0,273	0,275
0,026	0,038	1,462	0,253	0,255	0,257	0,259	0,261	0,263
0,026	0,04	1,538	0,242	0,244	0,246	0,248	0,249	0,251
0,026	0,042	1,615	0,232	0,234	0,235	0,237	0,239	0,241
0,026	0,044	1,692	0,222	0,224	0,226	0,228	0,230	0,232
0,026	0,046	1,769	0,214	0,216	0,218	0,219	0,221	0,223
0,078	0,08	1,026	0,117	0,117	0,118	0,119	0,119	0,120
0,078	0,082	1,051	0,114	0,115	0,115	0,116	0,117	0,117
0,078	0,084	1,077	0,112	0,112	0,113	0,114	0,114	0,115
0,078	0,086	1,103	0,109	0,110	0,111	0,111	0,112	0,113
0,078	0,088	1,128	0,107	0,108	0,108	0,109	0,110	0,110
0,078	0,09	1,154	0,105	0,106	0,106	0,107	0,108	0,108
0,078	0,092	1,179	0,103	0,104	0,104	0,105	0,105	0,106
0,078	0,094	1,205	0,101	0,102	0,102	0,103	0,104	0,104
0,078	0,096	1,231	0,099	0,100	0,100	0,101	0,102	0,102
0,078	0,098	1,256	0,097	0,098	0,099	0,099	0,100	0,101
0,078	0,1	1,282	0,096	0,096	0,097	0,098	0,098	0,099
0,078	0,102	1,308	0,094	0,095	0,095	0,096	0,097	0,097
0,078	0,104	1,333	0,092	0,093	0,094	0,094	0,095	0,096
0,078	0,106	1,359	0,091	0,091	0,092	0,093	0,093	0,094
0,078	0,108	1,385	0,089	0,090	0,091	0,091	0,092	0,093
0,078	0,11	1,410	0,088	0,089	0,089	0,090	0,091	0,091
0,078	0,112	1,436	0,087	0,087	0,088	0,089	0,089	0,090
0,078	0,114	1,462	0,085	0,086	0,087	0,087	0,088	0,088
0,078	0,116	1,487	0,084	0,085	0,085	0,086	0,087	0,087
0,078	0,118	1,513	0,083	0,083	0,084	0,085	0,085	0,086