

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

**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 о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0161

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0161

2017-2019 гг

# Ранее проведенные работы

## Повышение теплостойкости поршня АПД-800 путем создания модифицированного поверхностного слоя методом микродугового оксидирования

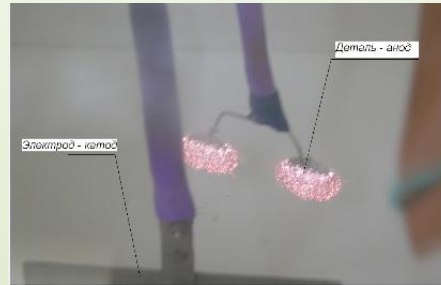
*Актуальность проблемы тепловой защиты поршня АПД*



*Рис. 1 - Поршень двигателя АПД-800*

На взлетном режиме работы поршень АПД прогорает, а двигатель выходит из строя.

*Микродуговое оксидирование (МДО)*

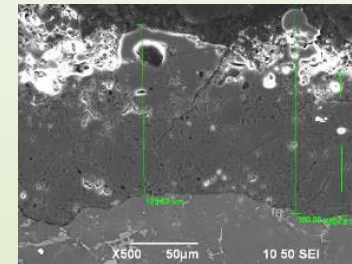


*Рис. 2 – Процесс МДО*

Достоинства технологии МДО:

- микротвердость – до 22 ГПа;
- толщина – до 400 мкм (на деформируемых сплавах);
- высокая коррозионная стойкость и износостойкость;
- состав – оксид алюминия (*керамика*)

*Предварительные исследования МДО-слоя на сплаве АК12Д*



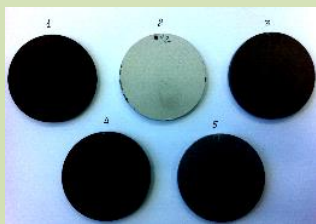
*Рис. 3 - Поперечный шлиф МДО-слоя на сплаве АК12Д*

Удалось сформировать на высококремнистом сплаве АК12Д высококачественный МДО-слой: **толщиной – 126...155 мкм; микротвердостью – до 14 ГПа.**

**Патент №2541246 (2013 г)**

## *Комплекс исследований на лабораторных образцах*

*Покрывается и исследовано более 80 шт. лабораторных образцов*



*а*

*Рис. 4 – Лабораторные образцы после МДО перед испытаниями на: а - термостойкость и коррозионную стойкость; б – на изгиб, в – на прочность*



*б*



*в*



*Рис. 5 – Образцы после испытаний на 3-х точечный изгиб*

Исследования на лабораторных образцах показали высокую адгезионную и коррозионную прочность, а также высокую термостойкость. МДО-слой практически не отслаивается при испытаниях на изгиб (рис. 5) и после термоциклических испытаний сохраняет высокую адгезионную прочность.

# Ранее проведенные работы

## Микродуговое оксидирование поршня АПД-800

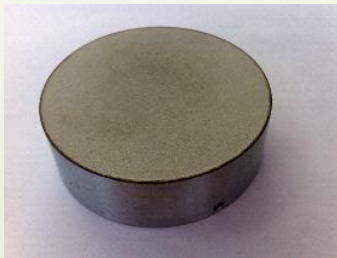


Рис. 1 – Макет поршня с МДО-слоем

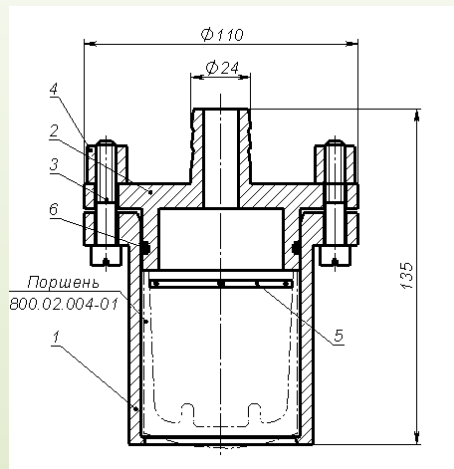


Рис. 2 – Конструкция опытного образца приспособления для МДО поршней



а



б

МДО - слой

Рис. 8 – Поршни АПД: а – без МДО; б – с МДО-слоем

## Конструкция и принцип работы стенда для безмоторных испытаний

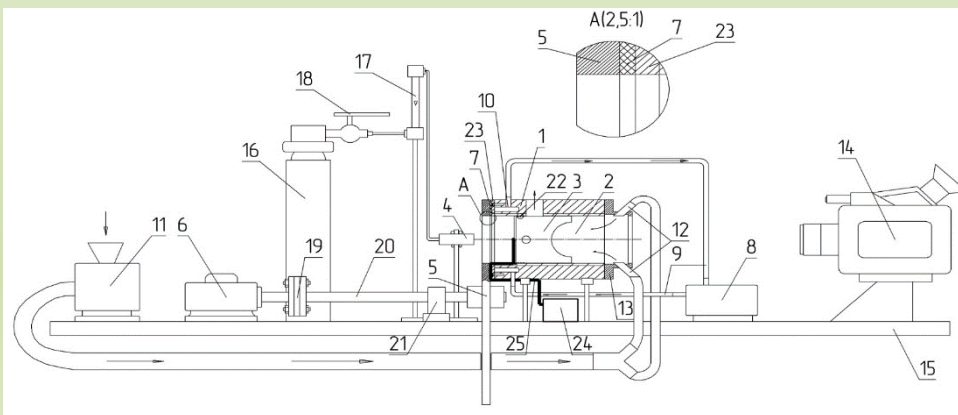
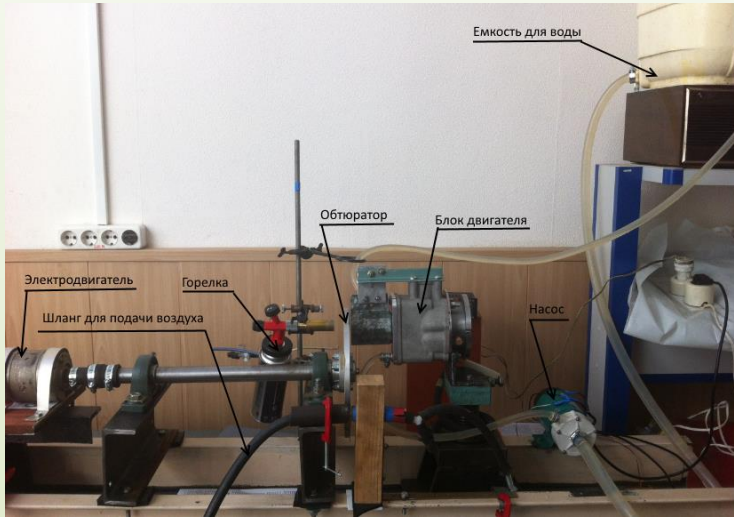


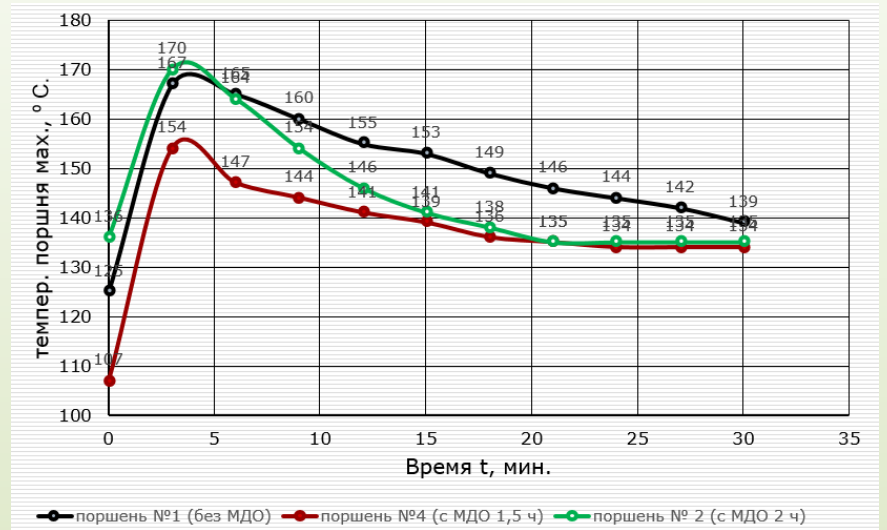
Рисунок 1– Схема стенда для безмоторных испытаний: 1- корпус, 2- гильза цилиндра, 3- исследуемый поршень, 4- нагреватель, 5- обтюратор, 6- электродвигатель, 7- графитовое кольцо, 8- насос, 9- патрубки, 10- рубашкой охлаждения корпуса, 11- компрессор, 12- патрубки, 13- крышка корпуса, 14- тепловизор, 15- основание, 16- газовый баллон, 17- расходомер газа, 18- вентиль, 19- переходная муфта, 20- подшипник, 21- вал, 22- поршневые кольца, 23- уплотнительная крышка, 24 - измерительный прибор ОВЕН ТРМ-200, 25 - термонара

# Ранее проведенные работы

## Стенд для безмоторных испытаний

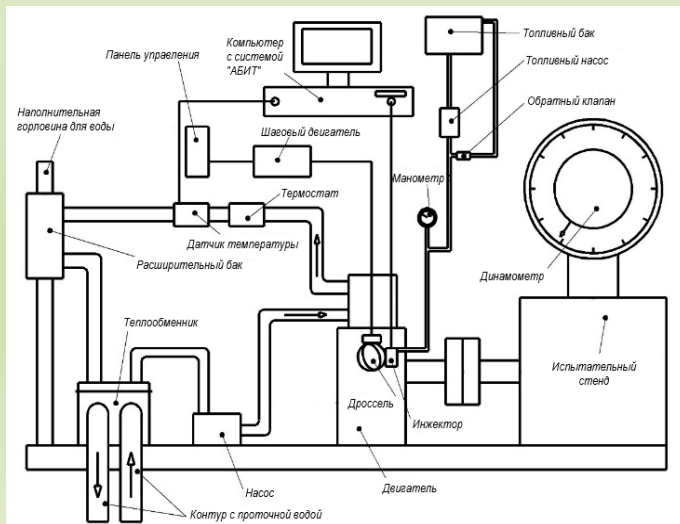


## Результаты безмоторных испытаний



Температура поршня с МДО снизилась на 27 С.

## Схема стенда для моторных испытаний



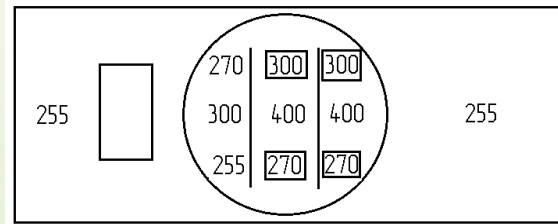
## Стенд для моторных испытаний



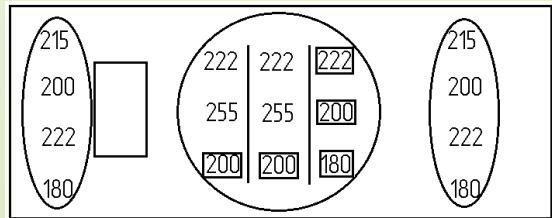
# Ранее проведенные работы

## ИСПЫТАНИЯ ПОРШНЕЙ С МДО-СЛОЕМ НА ТЕПЛОСТОЙКОСТЬ

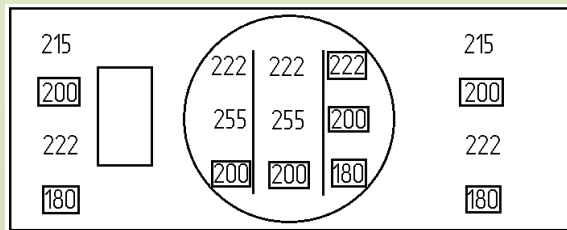
### Результаты испытаний поршней на теплостойкость



а



б



в

Рис. 1 – Схема расположения термоиндикаторов после испытаний: а – на поршне № 1 (без МДО); б – на поршне № 2 с МДО-слоем ( $h_{\text{мдо}}=76$  мкм); в – на поршне № 3 с МДО-слоем ( $h_{\text{мдо}}=108$  мкм)

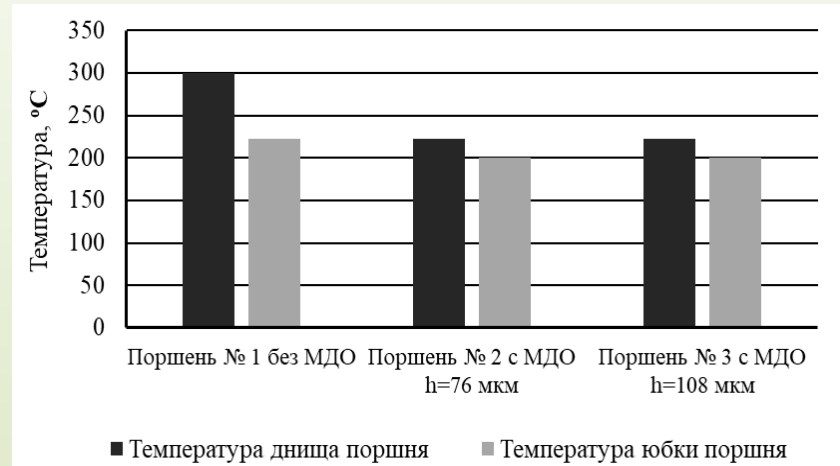


Рис. 2 – Максимальная температура внутренней стороны поршня



Рис. 3 – Поршень № 3 (с МДО-слоем) в цилиндре двигателя после испытаний

Температура поршня с МДО снизилась на **45...78 С.**

**Исследование теплофизических свойств  
наноструктурных композиционных покрытий и  
разработка технологии и образцов оборудования для  
создания теплостойких поршней двигателей  
транспортных средств**

**Этап 1**

**ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ**

**2017 г**

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям  
развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0161

Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0161

# Цель и задачи 1-го этапа Проекта

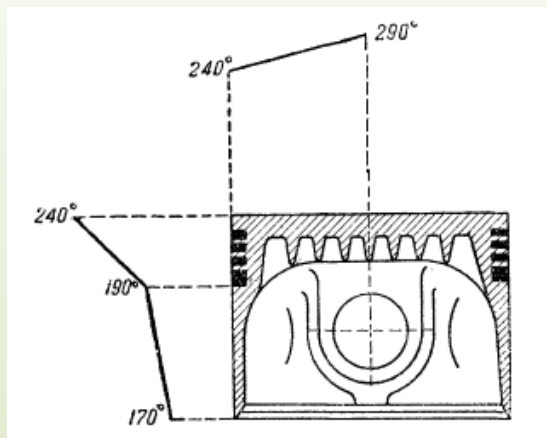
**Цель:** Проведение обоснования и выбор направления исследований для решения задачи тепловой защиты поршней двигателей снегоходов

## **Задачи :**

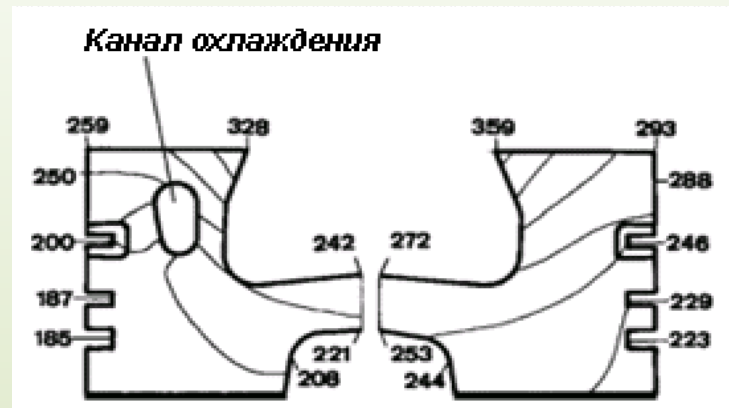
1. Провести анализ современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему тепловой защиты поршней ДВС.
2. Провести патентные исследования по теме «Методы тепловой защиты поршней ДВС».
3. Обосновать и выбрать наиболее эффективные варианты способов тепловой защиты поршней.
4. Обосновать и выбрать направление исследований и материалы (алюминиевые сплавы) для проведения исследований.



# Особенности условий работы поршней ДВС



*а*



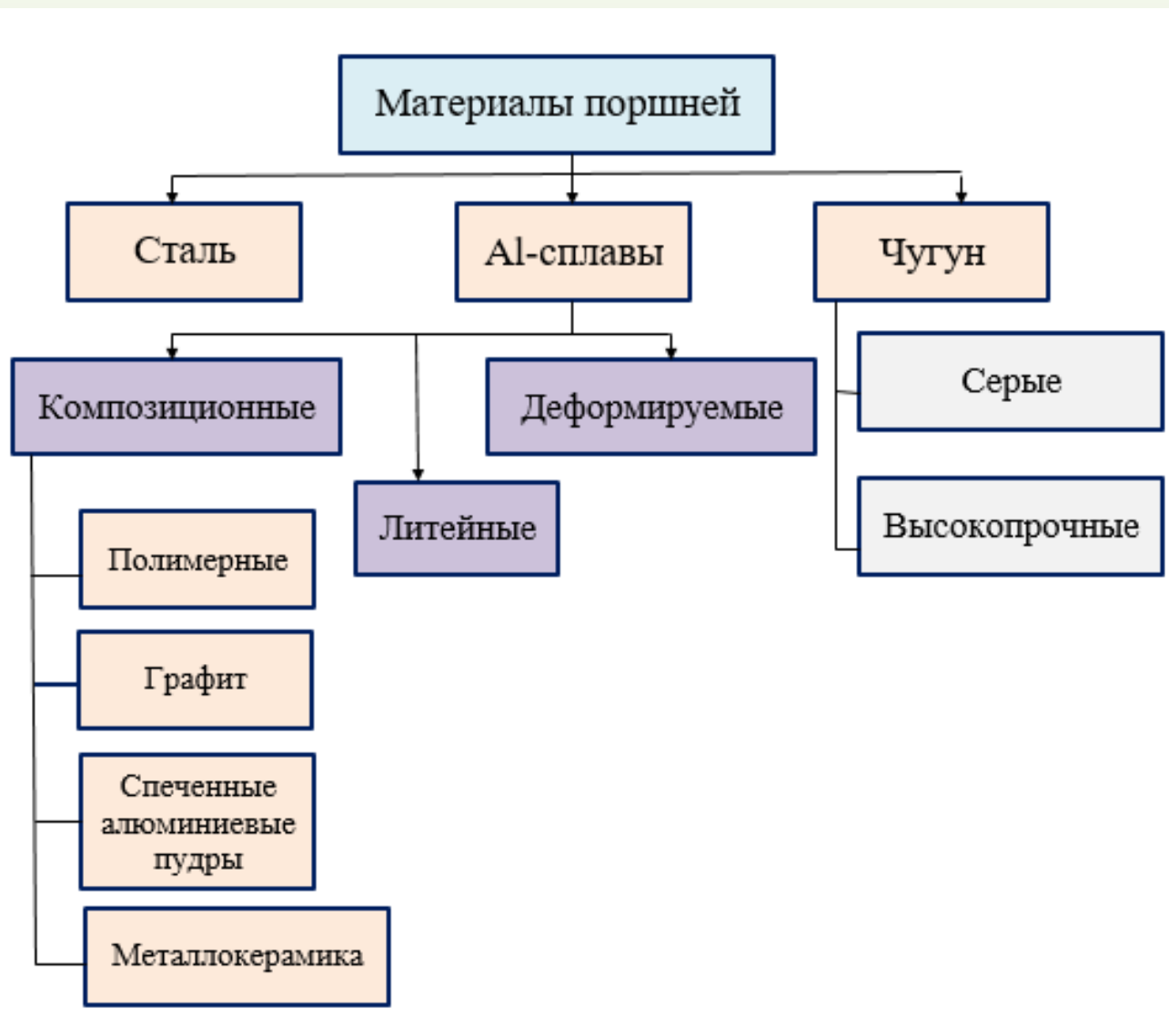
*б*

*Рис. 1 – Распределение температур в алюминиевом поршне двигателя:  
а – распределение температур по данным П.И. Орлова  
б – распределение температур по днищу поршня по данным Kolbenschmidt*



*Рис. 2 – Поршень с прогаром*

# Материалы поршней ДВС



# Обзор методов тепловой защиты поршней и патентные исследования

## Методы тепловой защиты поршней ДВС



## Патентные исследования по теме: «Методы тепловой защиты поршней ДВС»

- ФГБОУ ВПО "Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина" (патенты РФ № 2534327, 130003),
- ФГБОУ ВО УГАТУ (патент РФ № 2616146),
- **АО «УМПО», (патент РФ № 216146),**
- ОАО "АВТОВАЗ" (патент РФ № 2224127),
- ФГУП "Центральный институт авиационного моторостроения им. П. И. Баранова" (патент РФ № 25343270).
- ТОЙОТА ДЗИДОСЯ КАБУСИКИ КАЙСЯ (JP), патент РФ № 2624091,
- GEN MOTORS CORP (US), патент США № 4245611,

Рис. 1 - Классификация методов тепловой защиты поршней

# Выбор перечня алюминиевых сплавов для проведения исследований

Таблица 1 – Химический состав сплавов

Элементы	Полное имя	Массовая доля, %		
		AK4-1	AK12пч	AlSi25CuNiMg.
Al	Алюминий	остальное	остальное	остальное
Cu	Медь	1,9–2,7	0,02	0,98
Mg	Магний	1,2–1,8	–	0,75
Mn	Марганец	0,2	0,08	0,13
Si	Кремний	0,35	10–13	22,0-26,0
Fe	Железо	0,8–1,4	0,35	0,4
Zn	Цинк	0,2	0,06	0,07
Ti	Титан	0,02–0,1	0,08	0,03
Cr	Хром	0,1	–	-
Ni	Никель	0,8–1,4	–	0,8
Прочие примеси	–	0,1 в сумме	0,1 в сумме	-

# Результаты 1-го Этапа проекта:

1. Проведен аналитический обзор современной научно-технической, нормативной, методической литературы, затрагивающей научно-техническую проблему тепловой защиты поршней.
2. Проведены патентные исследования по теме «Методы тепловой защиты поршней ДВС».
3. Проведен анализ способов тепловой защиты поршней с обоснованием и выбором наиболее оптимальных вариантов, рекомендована технология МДО.
4. Проведено обоснование и выбор основных направлений дальнейших исследований технологии МДО.
5. Проведено обоснование и выбор перечня материалов (алюминиевых сплавов) для проведения исследований.
6. Проведено согласование требований, предъявляемых к поршню с теплозащитным покрытием, а также к разрабатываемой технологии и оборудованию с организацией – Индустриальным партнером.
7. Организацией – Индустриальным партнером разработано Техническое задание на проведение опытно-технологических работ для разработки технологии по созданию теплозащитных покрытий методом МДО-слоя на поршнях.

**Исследование теплофизических свойств  
наноструктурных композиционных покрытий и  
разработка технологии и образцов оборудования для  
создания теплостойких поршней двигателей  
транспортных средств**

**Этап 2**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ**

**2018 г**

ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям  
развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы»

Соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0161  
Уникальный идентификатор проекта RFMEFI57417X0161

# Цель и задачи 2-го этапа Проекта

**Цель:** Проведение теоретических и экспериментальных исследований для получения МДО-покрытий с требуемыми эксплуатационными характеристиками на поршнях ДВС

## **Задачи:**

1. Провести теоретические исследования механизмов формирования теплозащитных покрытий методом МДО на алюминиевых сплавах.
2. Провести теоретический анализ и обосновать выбор режимов МДО для формирования теплозащитных покрытий на днище поршней.
3. Разработать «Программу и методики экспериментальных исследований».
4. Провести математическое моделирование влияния формируемого на днище поршня теплозащитного слоя и его основных свойств на тепловое состояние двигателя.
5. Провести экспериментальные исследования на лабораторных образцах с целью нахождения оптимальных технологических режимов для формирования МДО-слоев с требуемыми теплозащитными свойствами (оптимальным коэффициентом теплопроводности), с максимальной адгезионной прочностью, с оптимальной коррозионной стойкостью.
6. Разработать рекомендации наиболее оптимальных режимов формирования теплозащитных покрытий методом МДО на поршнях двигателей.

## Задачи работ на 2-м Этапе (продолжение)

7. Разработать ТЗ на экспериментальный образец установки МДО.
8. Разработать конструкторскую документацию на:
  - а) лабораторные образцы;
  - б) макеты поршней;
  - в) экспериментальный образец приспособления для обработки макетов поршней МДО;
  - г) прототип приспособления для обработки поршней;
  - д) экспериментальный образец установки МДО.
9. Изготовить лабораторные образцы, макеты поршней, экспериментальный образец приспособления для обработки макетов поршней МДО.
10. Разработать технологии МДО для макетов поршней и для опытных образцов поршней.
11. Провести исследования МДО-покрытий на макетах поршней.
12. Изготовить и запустить в эксплуатацию экспериментальный образец установки МДО.
13. Организовать и провести мероприятия по демонстрации и популяризации результатов работы.
14. Провести дополнительные патентные исследования и подготовить 2 заявки на выдачу патента.
15. Подготовить и опубликовать 3 статьи в международных журналах уровня Scopus.

# На настоящий момент на 2-м Этапе выполнено:

## 1. Конструкторская документация на лабораторные образцы

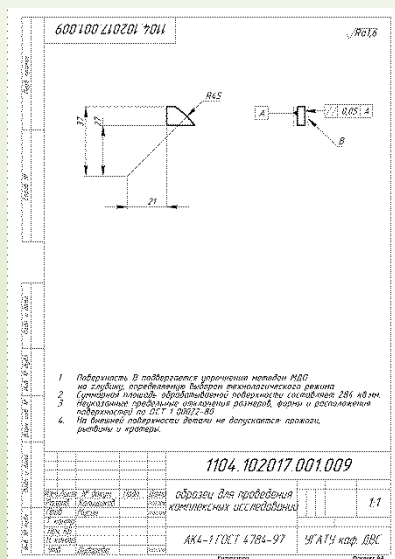
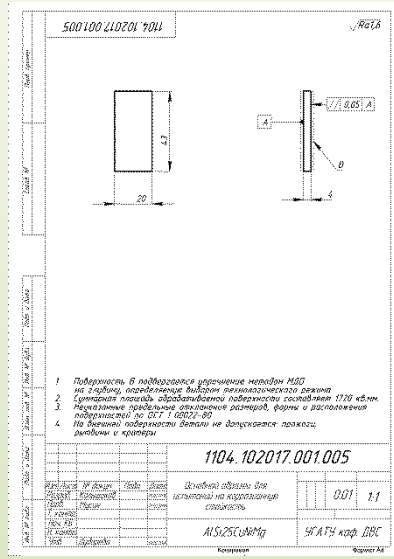
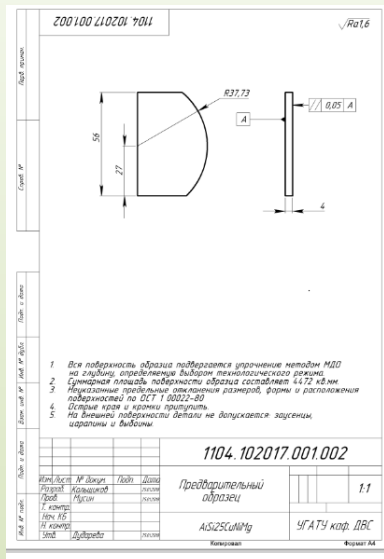


Рис.1 – Образец в процессе МДО



Рис. 2 – Образцы после МДО

## 2. Обоснован выбор режимов для МДО

## 3. Разработана «Программа и методики испытаний лабораторных образцов»

### План и стадии исследований лабораторных образцов:

- структура МДО-слоя (толщина, микротвердость, пористость) – проводятся (выполнено 50%);
- адгезионная прочность – подготавливаются;
- коррозионная стойкость – проводятся (выполнено 75 %);
- Теплоемкость – подготавливаются;
- Коэффициент теплопроводности – подготовка оборудования и методики.

## 4. Проводятся исследования лабораторных образцов с МДО на коррозионную стойкость

### Методика эксперимента

**Состав коррозионно-агрессивного раствора:**

- натрий хлористый ( $NaCl$ ) – 225 г/л;
- калий азотистый ( $KNO_3$ ) – 50 г/л;
- кислота азотная ( $HNO_3$ ) – 5,5 г/л;
- основа – дистиллированная вода.

Скорость коррозии рассчитывается по формуле:

$$V = \frac{m_0 - m_1}{S \cdot t} \quad (1)$$

где  $V$  – скорость коррозии, г/(м<sup>2</sup>ч);

$t$  – продолжительность испытаний, ч.

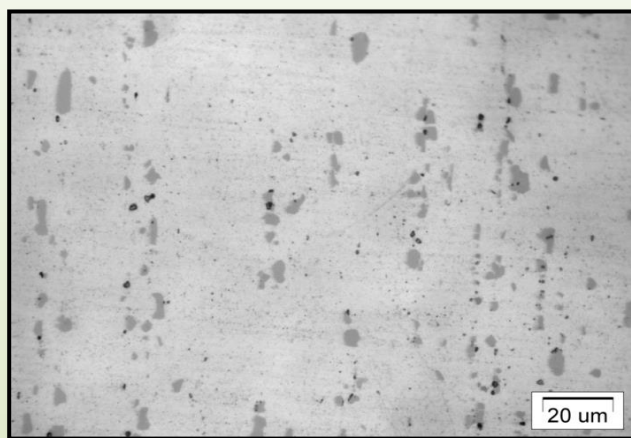


Рисунок 1 – Образцы без МДО в процессе испытаний

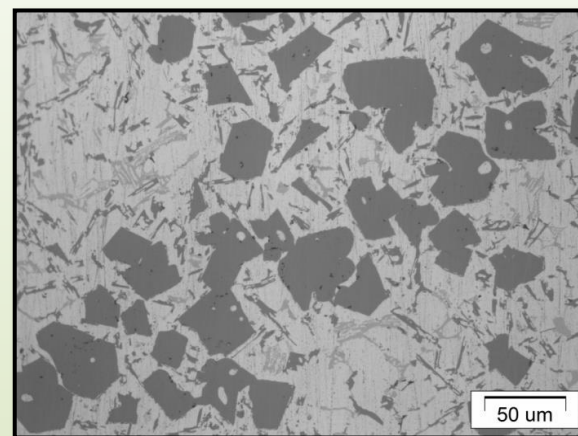


Рисунок 2 – Образцы после испытаний

## 5. Проводятся исследования структуры МДО-слоя на лабораторных образцах



а



б

Рисунок 1 – Микроструктура сплавов: а – АК4-1; б - AlSi25CuNiMg (поршень PM3)

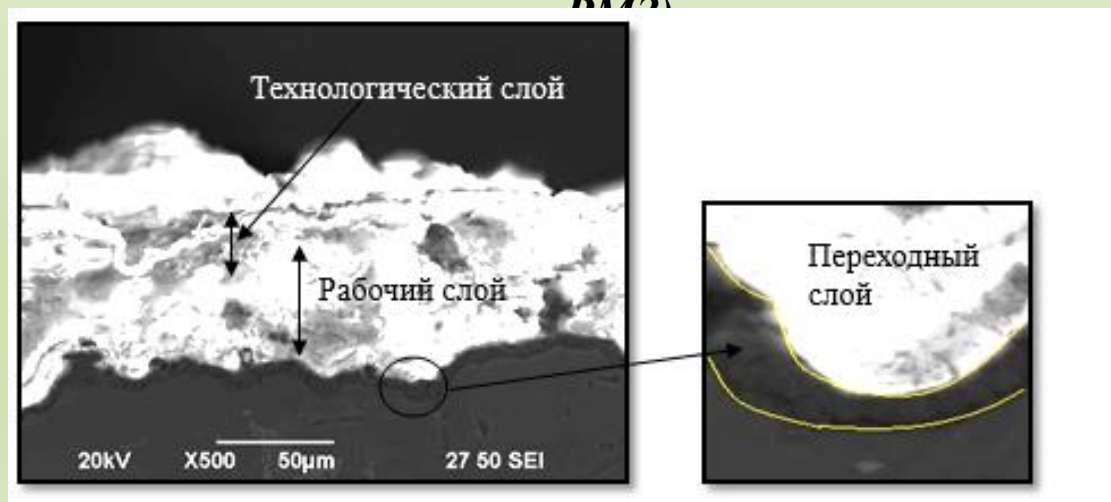


Рисунок 2 – МДО-слой на сплаве AlSi25CuNiMg (поршень PM3)

## 6. Проводятся исследования структуры МДО-слоя на лабораторных образцах

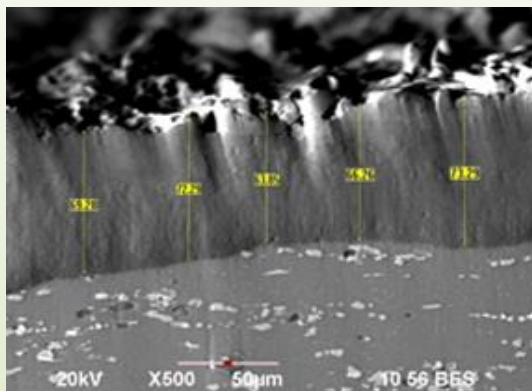


Рис. 1 – МДО-слой на сплаве АК4-1

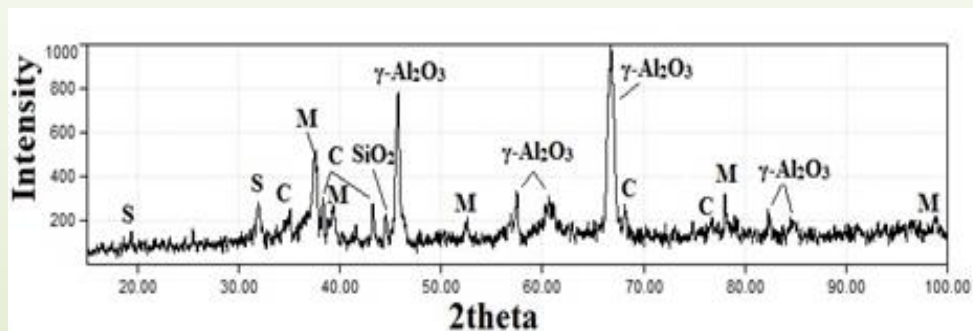


Рис. 2 – Фазовый состав МДО-слоя на сплаве АК4-1:  
С – корунд; М – муллит; S - силлиманит

**Коэфф. теплопроводности:  $\lambda = 5.17 - 0.002 \cdot T$ .**

**Влияние химического состава алюминиевых сплавов на качество оксидных слоев, формируемых методом микродугового оксидирования**

Таблица 1. Характеристики МДО-слоев

Сплав	Свойства МДО-слоев			
	Толщина, [мкм]	Пористость, [%]	Микротвердость, НВ	
			максимальная	средняя
АК4-1	70±22	9.0±1.0	1500	1335±252
АК12Д	154±11	13.0 ±2.0	900	645±200

**Подготовлены и отправлены 2 статьи!**

## 7. Подготовка методики и оборудования для исследования коэффициента теплопроводности МДО-слоя (ТГУ)

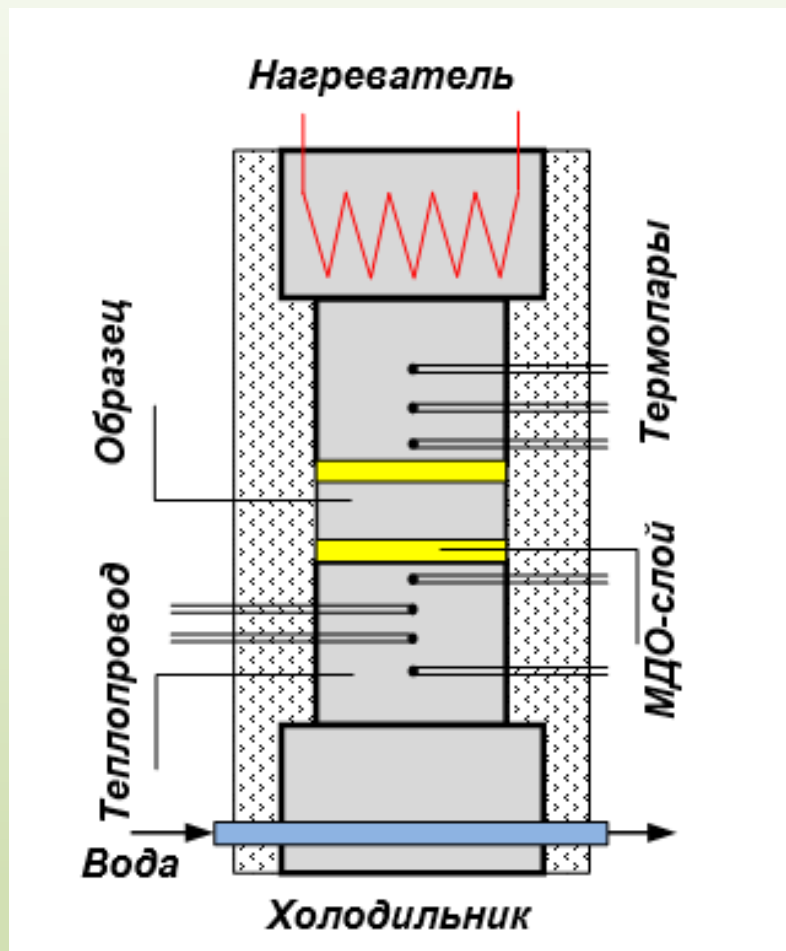


Рис. 1 – Методика измерения коэффициента теплопроводности



Рис. 2 – Установка после доработки конструкции

*Подготовлена статья!*

## 8. Установка МДО (ТГУ)

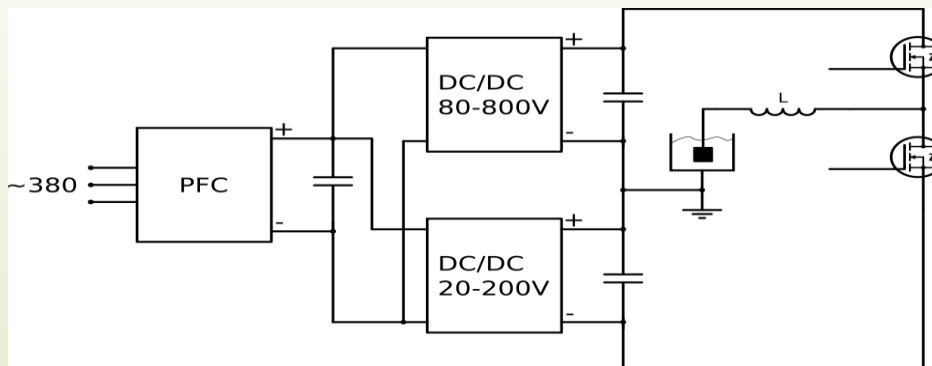


Рисунок 1 – Предлагаемая схема источника питания установки МДО

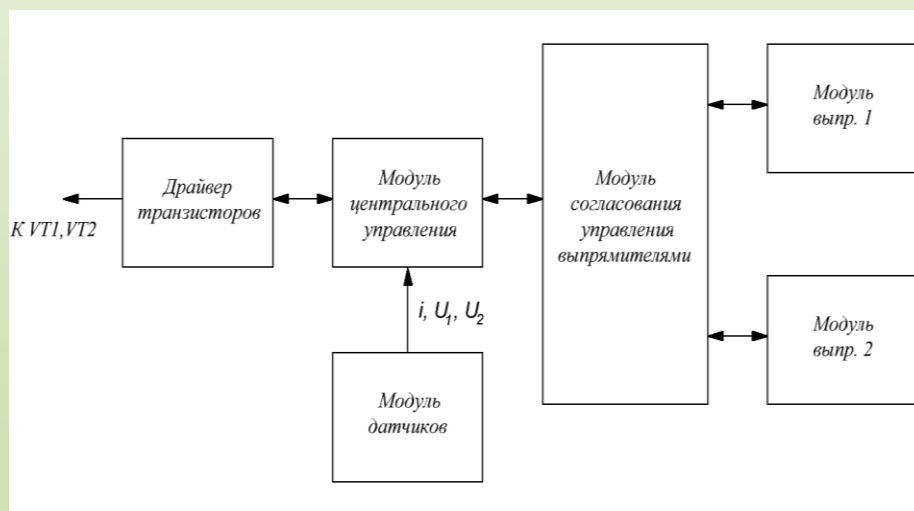


Рисунок 2 – Блок-схема системы управления

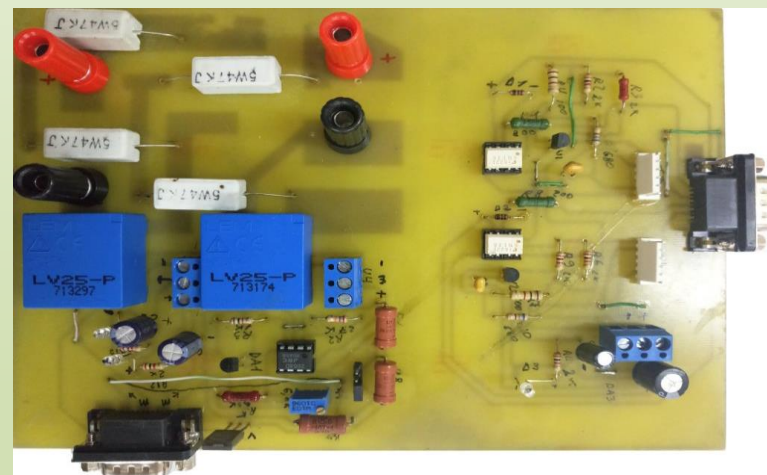


Рисунок 3 – Изготовлена плата датчиков тока и напряжения (левая часть) и плата управления выпрямителями (правая часть)

## 9. Проведено математическое моделирование влияния формируемого на днище поршня теплозащитного слоя на тепловое состояние двигателя

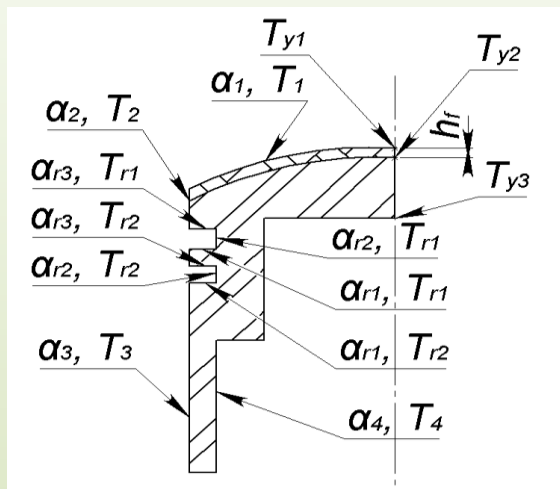


Рис. 1 – Расчетная схема и граничные условия

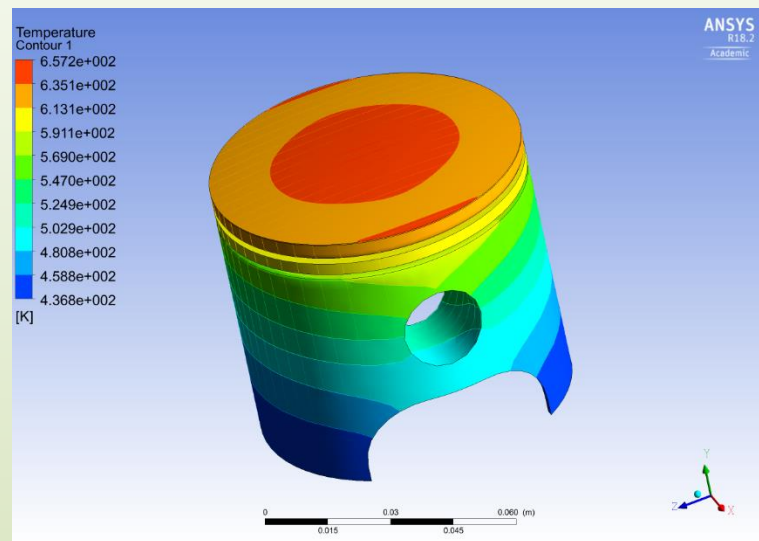


Рис. 2 – Температуры в поршне

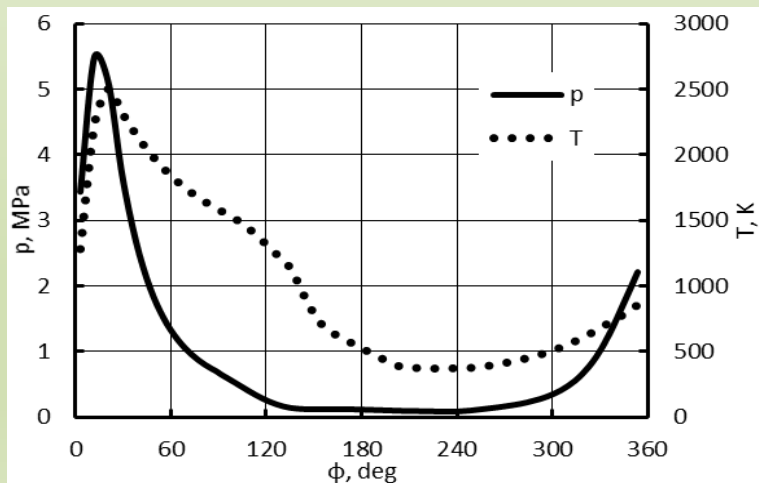


Рис. 3 – Изменение параметров рабочего цикла двигателя по углу поворота коленчатого вала  $\phi$ , где  $p$  – индикаторное давление, МПа,  $T$  – температура, К.

Исходя из полученных уравнений регрессии: при коэффициенте теплопроводности покрытия 0,3...0,7 Вт/м·К и толщиной 150...300 мкм можно ожидать снижение температуры поршня со стороны картера **на 27...55 К.**

*Подготовлена и отправлена статья!*

## 10. Разработана конструкция приспособления для обработки макетов поршней

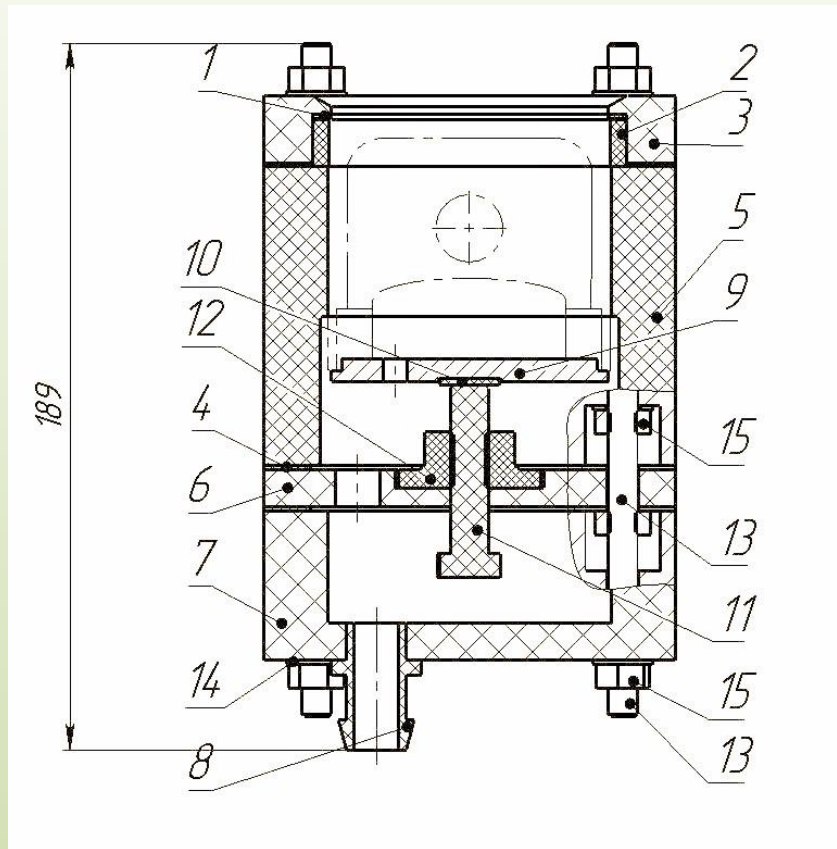


Рис.1 - Приспособление для обработки поршня двигателя РМЗ-550 методом МДО, в разрезе: 1 – упрочняемый поршень; 2 – главный уплотнительный элемент; 3 – центрирующая втулка; 4 – крышка; 5 – уплотнительный элемент; 6 – корпус; 7 – промежуточная крышка; 8 – корпусная крышка; 9 – штуцер; 10 – токоподводящая пластина; 11 – изолирующая шайба; 12 – натяжительная втулка; 13 – болт; 14 – шайба; 15 – гайка; 16 – шпилька

**Подготовлена заявка на полезную модель!**

# Планы Проекта

1. Отработка технологии теплозащитных МДО-покрытий на макетах
2. Разработка Приспособления для обработки поршней.
3. Разработка Технологической документации на процесс МДО поршней.
4. Разработка и изготовление экспериментальной установки МДО
5. Разработка и изготовление установки МДО для серийного производства поршней.
6. Покрытие поршней.
7. Проведение приемочных моторных испытаний.
8. Создание МИП.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**