

ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

3 (285) июль–сентябрь 2021

DVIGATELESTROYENIYE

Международная выставка
НЕВА — 2021





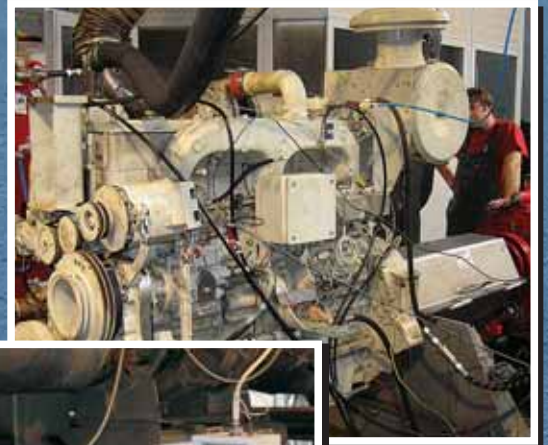
НПФ «Экология»

Сертификационные испытания двигателей на стенде и на борту судна

Лаборатория контроля вредных выбросов ДВС (НПФ «Экология») проводит испытания судовых двигателей на соответствие требованиям Международной морской организации (IMO) и ГОСТ Р с оформлением необходимой технической документации (технических файлов).

- 20-летний опыт испытаний и освидетельствований
- Более 200 сертифицированных двигателей
- Признание в системе МАКО

Россия, 190020,
Санкт-Петербург, а/я 9
Тел.: +7(812) 719-73-30
e-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru



Признание
технической компетентности



Lloyd's Register



РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

Дударева Н.Ю., Прокофьева М.А.
Исследование влияния керамического покрытия
на тепловое состояние гильзы цилиндра

3

ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

Dudareva N.Yu. and Prokofieva M.A.
Influence of ceramic plating
on cylinder liner thermal condition

СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ. АГРЕГАТЫ

Коленько Г.С., Забелин Н.А., Фокин Г.А.
Нестационарное аэродинамическое взаимодействие
лопаточных венцов в энергетических осевых
турбинах и пути повышения вибрационной
надежности рабочих лопаток

7

ENGINE SYSTEMS AND UNITS

Kolenko G.S., Zabelin N.A. and Fokin G.A.
Nonstationary aerodynamic interaction of blade rows
in high-powered axial turbines, and improvement
of blade vibrational reliability

АВТОМАТИЗАЦИЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЕ

Кулагин А.В.
Оценка работоспособности судовых дизелей
методами диагностирования

12

AUTOMATION AND DIAGNOSTICS

Kulagin A.V.
Diagnostics as a means
of marine engine operability evaluation

ТОПЛИВО. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

*Марков В.А., Бовэнь Са,
Неверов В.А., Камалтдинов В.Г.*
Исследование воспламеняемости растительных
масел в камере сгорания дизельного двигателя

16

FUEL AND LUBRICANTS

*Markov V.A., Bowen Sa,
Neverov V.A. and Kamaltdinov V.G.*
Combustibility of vegetable oils
in diesel engine combustion chamber

*Плотников С.А., Пляго А.В.,
Кантор П.Я., Втюрина М.Н.*
Координация процессов стабилизации
и сгорания этанолсодержащих топлив

22

*Plotnikov S.A., Plyago A.V.,
Kantor P.Ya. and Vtyurina M.N.*
Coordination of stabilization and combustion
of ethanol-containing fuels

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

Крохта Г.М., Хомченко Е.Н., Усатых Н.А.
Особенности прогрева двигателя внутреннего
сгорания после холодного пуска

28

MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

Krohta G.M., Homchenko Ye.N. and Usatyh N.A.
Behavior of a reciprocating engine
during warm-up after its cold start

ЮБИЛЕЙ

Кавтарадзе Р.З., Онищенко Д.О.
Учитель, ученый,
государственный деятель, гражданин
(к 100-летию со дня рождения
Михаила Георгиевича Круглова)

35

ANNIVERSARY

Kavtaradze R.Z. and Onischenko D.O.
Master, scientist, statesman, citizen
(anent 100th anniversary of Michail G. Kruglov)

НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Сажеобразование в поршневых ДВС
(по материалам конгресса CIMAC)

39

ENGINE BUILDING NEWS

Carbon-black formation in reciprocating engines
(based on CIMAC Proceedings)

ИНФОРМАЦИЯ

Рефераты статей

55

INFORMATION

Synopsis

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

ПРЕДПРИЯТИЯ

А.Н. Кострыгин	<i>гл. конструктор</i>	<i>ООО ИЦД ТМХ, г. Коломна</i>
В.А. Шелеметьев	<i>зам. техн. директора</i>	<i>АО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
С.В. Хильченко	<i>техн. директор</i>	<i>ООО «Морские пропульсивные системы», Санкт-Петербург</i>
А.К. Лимонов	<i>зам. гл. конструктора</i>	<i>ООО «Энергомаш», г. Щекино, Тульская обл.</i>
Е.И. Бирюков	<i>гл. конструктор</i>	<i>АО «Барнаултрансмаши», г. Барнаул</i>
А.В. Попов	<i>зам. ген. директора</i>	<i>АО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
А.С. Куликов	<i>гл. констр. по двиг.</i>	<i>ПАО «КАМАЗ», г. Набережные Челны</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>ООО МПЦ «Марине», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО «ЧТЗ-Уралтрак», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

НИИ

В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>И ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>рук. науч. направления</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<i>президент</i>	<i>НПХЦ «Миакрон-Нортон», Санкт-Петербург</i>

ВУЗЫ

В.А. Марков	<i>зав. кафедрой Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
В.А. Рыжов	<i>проф. кафедры ТМС и САПР</i>	<i>КИ фил. МПУ, г. Коломна</i>
Ю.В. Галышев	<i>проф. ВШ энерг. маш.</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
М.И. Куколев	<i>проф. ВШ гидротех. стр-ва</i>	<i>СПбПУ Петра Великого, Санкт-Петербург</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
С.П. Столяров	<i>зав. кафедрой СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры СДВС и ДУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ВИ(ИТ) ВА МТО, Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>проф. кафедры ТД</i>	<i>БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>проф. кафедры ЯЭ</i>	<i>БИТИ фил. ФГАОУ МИФИ, г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «НПФ «Экология», Санкт-Петербург

Журнал «Двигателестроение» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Дата включения в обновленный перечень ВАК — 29.05.2017.

Группы научных специальностей:

05.02.00 — Машиностроение и машиноведение

05.04.00 — Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

05.14.00 — Энергетика

Электронные версии журнала (2005–2021 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» (www.elibrary.ru) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор — Н.А. Вольская
Редактор инф. отдела — Г.В. Мельник
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 02.09.2021
Подписано в печать 23.09.2021
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7
Зак. 218. Тираж 500 экз.
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:
ООО «НПФ «Экология», 190020, Санкт-Петербург, а/я 9

Тел.: +7 (921) 956-31-94
+7 (812) 719-73-30

E-mail: ecology@rdiesel.ru
www.rdiesel.ru

**ДВИГАТЕЛЕ
СТРОЕНИЕ**

Типография «Светлица»
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2021. № 3 (285)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРА

*Н.Ю. Дударева, д.т.н., профессор,
М.А. Прокофьева, магистрант,*

Уфимский государственный авиационный технический университет

Представлены методика и результаты исследования теплового состояния гильзы цилиндра двигателя внутреннего сгорания с керамическим покрытием на рабочей поверхности. Рассмотрено влияние толщины и коэффициента теплопроводности керамического покрытия, сформированного методом микродугового оксидирования, на тепловое состояние детали. Описана методика, разработанная для проведения термического расчета гильзы с использованием возможностей программы SolidWorks Simulation. Показания температуры определялись под покрытием в трех зонах по высоте гильзы: в верхнем поясе гильзы, в зоне движения поршня и в нижнем поясе. Каждая из зон различалась задаваемыми граничными условиями, которые максимально были приближены к реальным условиям работы гильзы. Приведены результаты исследования теплового состояния гильзы без покрытия. Также получена математическая зависимость величины снижения температуры поверхности гильзы от толщины покрытия и его коэффициента теплопроводности.

Введение

Основное направление развития современного энергомашиностроения — повышение технико-эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания (ДВС), что сопровождается увеличением тепловых нагрузок на детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Гильзы цилиндра относятся к теплонапряженным, механически нагруженным и особо ответственным деталям ДВС. Одна из тенденций современного двигателестроения — использование гильз из алюминиевых сплавов [1]. Однако это требует применения износостойких и теплостойких покрытий на рабочей поверхности гильзы. Довольно большую популярность приобрели керамические покрытия, формируемые методом микродугового оксидирования (МДО) [2, 3]. Такие покрытия отличаются не только высокими износостойкостью и теплостойкостью, но и достаточно хорошей адгезией к поверхности материала даже в условиях циклических температурных нагрузок [4–6]. Однако из последних публикаций известно, что коэффициент теплопроводности таких покрытий зависит от

химического состава обрабатываемого алюминиевого сплава и режимов процесса МДО. Значение коэффициента теплопроводности может варьироваться в достаточно широком диапазоне: от 0,5 до 10 Вт/(м·К) и даже более [7–9]. По этим причинам работы, направленные на исследование влияния керамических покрытий на тепловое состояние гильз цилиндров ДВС, представляют собой актуальную научно-техническую задачу. Наиболее оптимальным способом проведения таких исследований является численное 3D моделирование с использованием современных прикладных пакетов. Такие исследования позволяют установить влияние керамического покрытия на тепловое состояние детали с учетом толщины и коэффициента теплопроводности покрытия и при этом являются малозатратными по сравнению со стендовыми моторными испытаниями. Поэтому была сформулирована цель работы: исследовать влияние керамического покрытия, сформированного на рабочей поверхности гильзы, на ее тепловое состояние методом 3D моделирования.

Методика моделирования

Для проведения расчетов в программе SolidWorks 2016 [10] были созданы 3D модели гильзы и покрытия. Геометрические размеры моделей гильзы и покрытия соответствовали гильзе авиамодельного двигателя ASPFS80 AR (диаметр гильзы — 26,5 мм, высота — 38 мм) [11]. Модели покрытия представляли собой полые цилиндры с различной толщиной стенки. В качестве материала гильзы был выбран алюминиевый сплав АК4-1 ГОСТ 21488–97 [12], а в качестве материала покрытия — керамика. Параметры сплава АК4-1 в зависимости от температуры представлены в табл. 1. В расчетах использовались несколько 3D моделей покрытия с разной толщиной стенки (мкм): 25; 50; 100; 150; 200; 250, для которых задавались разные коэффициенты теплопроводности (Вт/(м·К)): 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5. Коэффициенты теплопроводности соответствовали значениям для керамических покрытий, формируемых методом МДО [8, 9].

Для проведения расчетов теплового состояния гильзы с МДО-слоем создавалась сборка моделей «Гильза» и «Покрытие» путем их соединения при

Свойства алюминиевого сплава АК4-1 [13]

Температура, °С	20	150	200	250	300
Модуль упругости, МПа	0,72	0,66	0,63	0,59	0,51
Коэффициент линейного расширения, 1/К	19,6	23,1	24,0	—	—
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	142,4	148,6	150,7	155,0	159,0
Предел прочности, МПа	450	400	340	240	170
Предел текучести, МПа	380	360	300	190	140

помощи сопряжений «Концентричность» и «Совпадение». Расчет теплового состояния гильзы проводился в приложении *Simulation* программы *SolidWorks 2016*. В этой программе тепловые расчеты осуществляются методом математического моделирования с применением численного метода конечных элементов на основе дифференциального уравнения Фурье [14].

При проведении расчетов учитывались:

- подвод тепла к поверхности гильзы от рабочих газов;
- тепло, передаваемое к гильзе со стороны поршня;
- теплообмен между смазочным материалом и внутренней (рабочей) поверхностью гильзы;
- отвод тепла в систему охлаждения.

Вышеперечисленные факторы задавались граничными условиями на гранях 3D моделей деталей при помощи опции «Конвекция», благодаря которой можно указывать значения коэффициента конвективной теплоотдачи и массовую температуру окружающей среды. Под окружающей средой в данном случае понимаются рабочие газы, охлаждающая жидкость и смазочный материал. Значения коэффициента конвективной теплопередачи для каждого вида «окружающей среды» задавались разные, в соответствии с известными данными [15, 16].

Для задания граничных условий гильза была разбита на 3 участка. Схема представлена на рис. 1. На внутреннюю (рабочую) поверхность в верхнем поясе гильзы (участок I, рис. 1) основное воздействие оказывают рабочие газы. Коэффициент конвективной теплоотдачи был принят равным $1000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, температура — 1100 К [15, 16]. На участке II (см. рис. 1) теплота передается от поршня через смазочный слой, а также, частично, от газов камеры сгорания. При этом необходимо учитывать наличие на поверхности гильзы тонкого слоя масла. Коэффициент конвективной теплоотдачи в этой зоне был принят $2000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при температуре 443 К [15, 16]. На участке III (см. рис. 1) теплота гильзе передается только от поршня через масляную пленку. Коэффициент конвективной теплоотдачи был принят $1800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ при 423 К

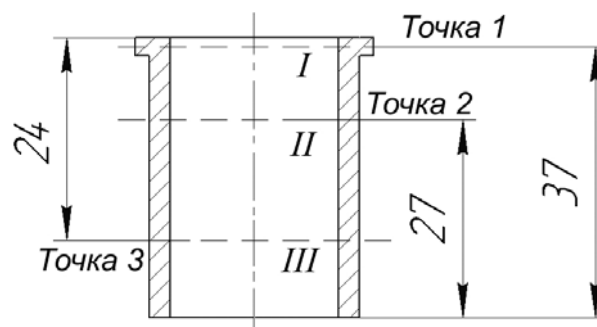


Рис. 1. Схема измерения теплового воздействия на гильзу [9]

[15, 16]. Конвекция системы охлаждения прикладывалась к обратной (наружной) стороне гильзы. Величина коэффициента конвективной теплоотдачи была выбрана $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, а температура — 353 К .

Согласно представленной выше методике был проведен термический расчет гильзы двигателя ASPFS80 AR без покрытия и с МДО-слоем на рабочей поверхности. Показания температур рабочей поверхности гильзы снимались также на трех участках, под поверхностью покрытия.

Результаты и их обсуждение

В результате моделирования был получен массив значений температур на рабочей поверхности гильзы под покрытием. Результаты приведены на графиках. На рис. 2 представлены данные, полученные для участка I гильзы, на рис. 3 — для участка II и на рис. 4 — для участка III. Для гильзы без МДО-слоя температура на рабочей поверхности составила:

- на участке I: $180,1 \text{ °С}$;
- на участке II: $159,6 \text{ °С}$;
- на участке III: $117,0 \text{ °С}$.

Как видно из графиков (см. рис. 2–4) наибольший эффект по снижению тепловой нагрузки за счет керамического МДО-покрытия наблюдается в верхнем поясе гильзы и в зоне движения поршня — на участках I и II (см. рис. 1), то есть в наиболее теплонапряженных зонах. При увеличении коэффициента теплопроводности и толщины МДО-слоя температура рабочей поверхности гильзы под покрытием снижается, при этом изменение толщины покрытия оказывает на уменьшение температуры наибольшее влияние.

Снижение температуры на поверхности гильзы имеет четко выраженный линейный характер особенно для верхнего пояса гильзы. В зоне движения поршня наблюдается отклонение от линейности. В нижнем поясе гильзы эффект от покрытия незначителен, так как в данной зоне наблюдаются наименьшие тепловые нагрузки.

В результате минимальная температура гильзы под МДО-покрытием составляет:

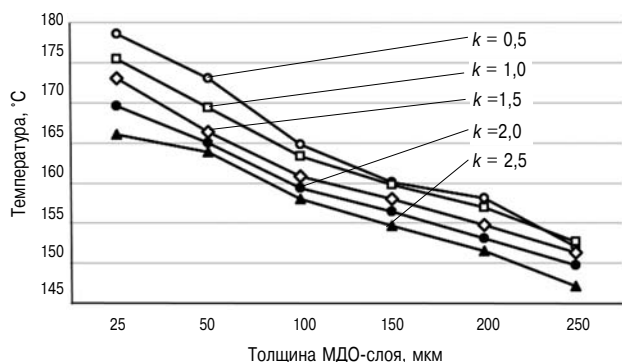


Рис. 2. Изменение температуры в верхнем поясе гильзы (участок I) в зависимости от коэффициента теплопроводности и толщины МДО-слоя

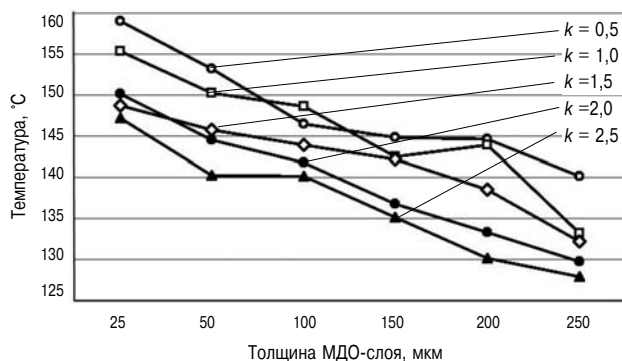


Рис. 3. Изменение температуры в среднем поясе гильзы (участок II) в зависимости от коэффициента теплопроводности и толщины МДО-слоя

- на участке I — 147,2 °С;
- на участке II — 127,9 °С;
- на участке III — 110 °С.

Эти значения достигаются при коэффициенте теплопроводности $k = 2,5$ Вт/(м·К) и толщине МДО-слоя $h = 250$ мкм. Максимальное снижение температуры составило:

- на участке I — 18 % (32,9 °С);
- на участке II — 19 % (31,7 °С);
- на участке III — 6 % (7,0 °С).

В общем виде температурное поле гильзы по результатам моделирования в стационарном режиме можно математически описать в виде:

$$T = f(x, y, z, k, h), \quad (1)$$

где x, y, z — декартовы пространственные координаты точек в объеме гильзы; k — коэффициент теплопроводности покрытия, Вт/(м·К); h — толщина покрытия, мм.

В уравнении (1) свойства материала гильзы (теплоемкость, коэффициент теплопроводности и плотность) принимались неизменными.

Для определения зависимости изменения температуры от параметров покрытия было использовано уравнение:

$$\Delta T_i = T_i(x_i, y_i, z_i) - T_i^*(x_i, y_i, z_i, k, h), \quad (2)$$

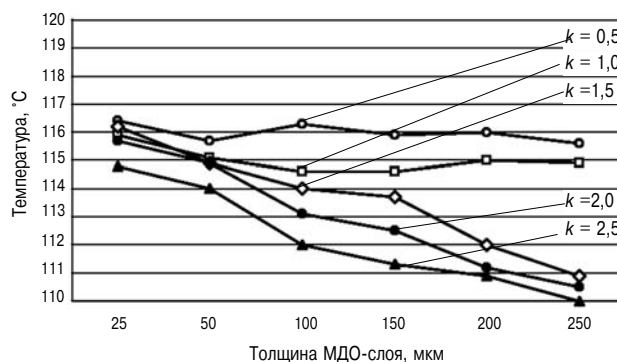


Рис. 4. Изменение температуры в нижнем поясе гильзы (участок III) в зависимости от коэффициента теплопроводности и толщины МДО-слоя

где ΔT_i — изменение температуры на поверхности гильзы под покрытием в точке i ; x_i, y_i, z_i — координаты точки снятия температуры (i -ой точки) с 3D модели гильзы из программы SolidWorks Simulation; T_i — температура в i -ой точке на рабочей поверхности гильзы без покрытия; T_i^* — температура в i -ой точке на рабочей поверхности гильзы с покрытием, измеряется под покрытием.

После обработки результатов было получено уравнение (2) для наиболее нагруженной области гильзы — участка I, на котором наблюдается линейная взаимосвязь величины снижения температуры со свойствами покрытия (см. рис. 2). В ходе обработки массива данных, полученных в результате моделирования, была установлена зависимость изменения температуры гильзы в виде:

$$\Delta T = a^{bk} \cdot c^{dh}, \quad (3)$$

где ΔT — величина снижения температуры поверхности гильзы под покрытием в зоне I, °С; a, b, c, d — коэффициенты, которые подбирались для каждого параметра отдельно.

В результате формула (3) приняла следующий вид:

$$\Delta T = \left(\frac{0,9}{j+2} \right)^{-1,585k} \cdot \left(\frac{15}{j} \right)^{3,824h}, \quad (4)$$

где j — коэффициент, определяющий влияние теплопроводности покрытия (при $k = 0,5$: $j = 1$; при $k = 1,0$: $j = 2$; при $k = 1,5$: $j = 3$; при $k = 2,0$: $j = 4$; при $k = 2,5$: $j = 5$).

Выводы

1. Проведенное исследование показало, что наличие МДО-покрытия на рабочей поверхности гильзы снижает ее тепловую напряженность.

2. Максимальная эффективность от керамического покрытия зафиксирована в наиболее теплонапряженной зоне гильзы — в области камеры сгорания.

3. При увеличении толщины и коэффициента теплопроводности покрытия температура рабочей поверхности гильзы под покрытием снижается,

причем наиболее эффективно в верхнем поясе и в зоне движения поршня. В верхнем поясе максимальное значение снижения температуры составляет 18 % ($-32,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), в зоне движения поршня — 19 % ($-31,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), в нижнем поясе — 6 % ($-7,0\text{ }^{\circ}\text{C}$). Данный эффект достигается при коэффициенте теплопроводности МДО-слоя $k = 2,5\text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ и толщине $h = 250\text{ мкм}$.

Литература

1. Beer S. Verbesserung der Anlaufperformance durch den Einsatz von Frontloading-Massnahmen / Anlaufmanagement in der Automobilindustrie erfolgreich umsetzen: Ein Leitfadens für die Praxis: [S. I]. Ed. G. Schuh, W. Stolzle, F. Straube. Kolbenschmidt Aluminium-Technologie AG; Springer, 2008. Part of the VDI-Buch book series. P. 43–52.

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

3. Малышев В.Н., Марков Г.А., Федоров В.А., Петросянц А.А., Терлеева О.П. Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. № 1. С. 26–27.

4. Кузнецов Ю.А., Шарифуллин С.Н., Коломейченко А.В., Гончаренко В.В., Ферабков А.В., Калашикова Л.В. Оценка износостойкости оксидно-керамических покрытий в условиях гидроабразивного изнашивания // Низкотемпературная плазма в процессах нанесения функциональных покрытий. 2019. Т. 1. № 10. С. 445–450.

5. Krishtal M.M., Chudinov V.A., Pavlikhin S.E., Polunin V.I. A Wear-Resistant Coating for Aluminium-Silicon Alloys using Microarc Oxidation and an Application to an Aluminium Cylinder Block // SAE Technical Paper. 2002. № 2002-01-0626.

6. Dudareva N.Yu., Kalschikov R.V., Butusov I.A., Grin R.R., Alexandrov I.V., Musin F.F. The Investigation of the Effect of Micro-Arc Oxidation Modes on the Adhesion Strength of Coatings // Journal of Engineering Science and Technology Review. 2014. Vol. 7. № 5. P. 5–8.

7. Криштал М.М., Ивашин П.В., Павлов Д.А., Полунин А.В. О теплопроводности оксидных покрытий, полученных методом микродугового оксидирования, на силумине АК9пч // Вектор науки ТГУ. 2012. № 4/22. С. 169–172.

8. Curran J.A., Clyne T.W. The Thermal Conductivity of Plasma Electrolytic Oxide Coatings on Aluminium and Magnesium // Surface & Coatings Technology. 2005. № 199. P. 177–183.

9. Dudareva N.Yu., Ivashin P.V., Gallyamova R.F., Tverdokhlebov A.Ya., Krishtal M.M. Structure and thermophysical properties of the oxide layer formed by microarc oxidation on the Al–Si alloy AK12D // Metal Science and Heat Treatment. 2021. № 62. P. 701–708.

10. Гузнецов В.Н., Журбенко П.А., Бондарева Т.П. SOLIDWORKS 2016, трехмерное моделирование деталей и выполнение электронных чертежей: учебное пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. 128 с.

11. Двигатель самолетный ДВС ASP FS80AR [Электронный ресурс] // Пилотаж: радиоуправляемые модели: [сайт]. URL https://www.pilotage-rc.ru/products/dvigatelj_samoletnij_dvs ASP_FS80AR_RC9376/ (дата обращения: 11.01.2021).

12. ГОСТ 4784–2019. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки: дата введения 01.09.2019. М.: Стандартинформ. 2019. 30 с.

13. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технология, применение): справочник. Киев: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.

14. Кавадзэ Р.З., Онищенко Д.О., Зеленцов А.А., Кадыров С.М., Ариджанов М.М. Расчетно-экспериментальное исследование влияния теплоизоляции поршня и гильзы на образование оксидов азота в продуктах сгорания быстроходного дизеля // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. № 4. С. 83–102.

15. Гурвич И.Б., Сыркин П.Э., Чумак В.И. Эксплуатационная надежность автомобильных двигателей: 2 изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1994. 144 с.

16. Коэффициент конвективной теплопередачи [Электронный ресурс] // Справка по SOLIDWORKS 2016: [сайт]. URL: https://help.solidworks.com/2016/RUSSIAN/SolidWorks/cworks/c_Convection.htm (дата обращения: 11.11.2020).