

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)
Институт «Политехнический»
Факультет «Автотранспортный»
Кафедра «Двигатели внутреннего сгорания и электронные системы
автомобилей»

Рецензент, (должность)
_____ (И.О. Ф.)

_____ 2019 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ
Заведующий кафедрой
_____ (И.О. Ф.)

_____ 2019 г.

Повышение износостойчивости поршня дизеля использованием
материалов с различными механическими свойствами.

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–130403.2019.069.ПЗ ВКР

Руководитель проекта, (должность)

В.Е. Лазарев _____ (И.О. Ф.)
_____ 2019 г.

Автор работы
студент группы П-209

Е.Б. Рыжук _____ (И.О. Ф.)
_____ 2019 г.

Нормоконтролер, (должность) (И.О.Ф.)
_____ 2019г.

АННОТАЦИЯ

Рыжук Е. Б. Повышение износоустойчивости поршня дизеля использованием материалов с различными механическими свойствами – Челябинск: ЮУрГУ, 2019. - 38 с., 7 илл., 16 табл., библиографический список – 24 наименования, 4 демонстрационных листа ф. А3.

В выпускной квалификационной работе проведен анализ литературы, касающейся видов и конструкций поршней дизельного двигателя, материалов изготовления и их механических свойств.

Рассмотрены отдельные экспериментальные виды алюминия, значения механических свойств которых будут использованы при оценке ресурса сопряжения.

Произведена теоретическая оценка ресурса сопряжения при использовании различных материалов поршней.

Также выполнен анализ полученных результатов, в части ресурса сопряжения и выявлены наиболее подходящие материалы для изготовления поршней.

					ЮУрГУ - 130403.2019.069. ПЗ ВКР			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	Рыжук Е. Б.				Повышение износоустойчивости поршня дизеля использованием материалов с различными механическими свойствами	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>	Лазарев В. Е.						4	
<i>Н. Контр.</i>	Клементьев В.В					ЮУрГУ кафедра ДВСиЭСА		
<i>Утв.</i>	Лазарев В. Е.							

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	6
1 НАЗНАЧЕНИЕ ПОРШНЕЙ, ТРЕБОВАНИЯ К НИМ	8
1.1 ТИПЫ ПОРШНЕЙ	9
1.1.1 ПОРШЕНЬ С ЧЕТЫРЬМЯ ПОРШНЕВЫМИ КОЛЬЦАМИ	9
1.1.2 1 ПОРШЕНЬ С ПЯТЬЮ ПОРШНЕВЫМИ КОЛЬЦАМИ	10
1.1.3 ПОРШЕНЬ С ПОКРЫТИЕМ	11
2 ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОРШНЕЙ	12
3 МАТЕРИАЛЫ ПОРШНЕЙ	14
4 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАРОК СПЛАВА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЕЙ	16
5 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА СОПРЯЖЕНИЯ	17
5.1 АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ	17
5.2 ОЦЕНКА ЗАТРАТ МОЩНОСТИ НА СОВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ ТРЕНИЯ В СОПРЯЖЕНИЯХ	18
5.3 ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНОЙ КРИВОЙ	20
5.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА КОНТАКТИРОВАНИЯ, КОНТУРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПЛОЩАДИ	21
5.5 ОЦЕНКА РЕСУРСА СОПРЯЖЕНИЯ	23
6 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ	30
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	31
ПРИЛОЖЕНИЕ А	35
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	36

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение срока службы современного оборудования, машин и механизмов тесно связано с повышающимися требованиями к качеству и эксплуатационным характеристикам алюминиевых сплавов, которые требуют постоянного совершенствования их состава и технологии производства.

Борьба с изнашиванием, коррозией и окислением металлов и сплавов - один из важнейших резервов повышения долговечности изделий, уменьшения расходов материалов на запасные части, комплексного улучшения качества и надежности машин и механизмов. В этой связи важной является проблема повышения служебных свойств (износостойкости, жаростойкости и коррозионностойкости) алюминиевых отливок, которая актуальна для многих отраслей промышленности - машиностроительной, металлургической, горнодобывающей, химической и др.

Поршень должен обладать достаточными прочностными характеристиками, обеспечивающими необходимую надежность и долговечность в условиях воздействия высоких динамических и тепловых нагрузок. При этом он должен обладать малой массой, высокой износостойкостью контактных поверхностей, низкими потерями на трение при минимальных монтажных зазорах в цилиндре, оптимальной теплопроводностью и малым коэффициентом теплового расширения.

Для производства поршней в отечественной и мировой практике используются алюминиевые сплавы, чугуны и стали, в последние двадцать лет иностранные производители ведут разработки поршней из композитов.

Широкое распространение получили поршни из сплавов алюминия, легированных кремнием с содержанием 11-13% (эвтектические сплавы) и 17-23 % (заэвтектические сплавы).

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Цель выпускной квалификационной работы:

Повышение ресурса сопряжения «поршень - гильза цилиндра», с применением материалов поршней с различными механическими свойствами для повышения износостойчивости поршней двигателя ЯМЗ-236.

Задачи выпускной квалификационной работы:

- 1) Провести литературный обзор и анализ видов, конструкций и материалов поршней двигателей, различных фирм изготовителей.
- 2) Выбор и обоснование отдельных экспериментальных видов сплавов, значения механических свойств которых будут использоваться при оценке ресурса сопряжения.
- 3) Выполнить теоретическую оценку ресурса сопряжения, при использовании различных материалов поршней.
- 4) Провести анализ полученных результатов расчета, в части ресурса сопряжения и выявить наиболее подходящий материал для изготовления поршня.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1 НАЗНАЧЕНИЕ ПОРШНЕЙ, ТРЕБОВАНИЯ К ПОРШНЯМ

Поршни, устанавливаемые на двигателях, изготавливаются из высококремнистого эвтектического алюминиевого сплава. Для улучшения приработки поршня к гильзе его поверхность покрывается тончайшим (0,003-0,006 мм) слоем олова. На юбке поршня предусмотрена специальная выемка для форсунки охлаждения; а также две боковые выемки, чтобы предотвратить задевание противовесов коленчатого вала и поршня при работе. Наружная поверхность поршня снабжена четырьмя (или пятью) канавками для поршневых колец. Три верхние канавки отведены под установку компрессионных колец. Одна канавка выше поршневого пальца для размещения маслосъемного кольца.

Большое внимание уделяется использованию различных покрытий. Направляющую часть поршня покрывают тонким, в несколько мкм, слоем свинца, олова или цинка для предохранения поверхности поршня от задиров в условиях ухудшения смазки на отдельных режимах работы.

Поршневой палец, служащий для соединения поршня с шатуном, является пустотелым, плавающего типа. Его делают из стали 12-ХН/ЗА. Наружные поверхности пальцев цементируются на глубину 1,0-1,4 мм; подвергаются закалке и отпуску до твердости НКС 56-65. Наружный диаметр пальца составляет 50 мм.

Поршни отлиты из эвтектического алюминиево-кремнистого сплава. Охлаждение поршня маслом производится из неподвижной форсунки. На юбке поршня имеется выемка для форсунки охлаждения. В днище поршня выполнена камера сгорания. Поршни маркируются в литье изнутри, на днище.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1.1 ТИПЫ ПОРШНЕЙ.

1.1.1 ПОРШЕНЬ С ЧЕТЫРЬМЯ ПОРШНЕВЫМИ КОЛЬЦАМИ



Рис. 1 Поршень КМЗ 238НБ-1004015

Поршень 238НБ-1004015 с 4-мя канавками под поршневые кольца (три под компрессионные и одна под маслосъемное кольцо). Камера сгорания смещена на 5 мм. На юбке - вырез для охлаждения поршня маслом. Камера сгорания цилиндрическая без рассекателя. Материал: алюминиевый сплав АК12М2МгН. Покрытие: олово.

Поршень на автомобили МАЗ, КрАЗ, ЗИЛ, Урал, тракторы "Кировец", комбайны "Дон", "Полесье", "Енисей" с двигателями ЯМЗ-236Н, -236НЕ, -236БЕ, -236Б, -238Б, -238БВ, -238БЕ, -238БЛ, -238БК, -238Д, -238ДЕ, -238ДК, -238НДЗ (4,5), -238Л, -238Н и их модификации.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		9

1.1.2 ПОРШЕНЬ С ПЯТЬЮ ПОРШНЕВЫМИ КОЛЬЦАМИ



Рис. 2 Поршень КМЗ 236-1004015К

Поршень КМЗ 236-1004015К устанавливается только с гильзой КМЗ 236-1002021-А (L285). Поршень к двигателю ЯМЗ. Поршень с двумя маслоъемными канавками. Камера сгорания цилиндрическая с высоким рассекателем. Материал: алюминиевый сплав АК12М2МгН. Покрытие: олово.

Поршень на автомобили МАЗ, КрАЗ, ЗИЛ, Урал, автобусы ЛИАЗ, ЛАЗ, экскаватор ЭО-33211, 43211, катера, компрессорные установки с двигателями ЯМЗ-236М2, ЯМЗ-236Г, ЯМЗ-236А, ЯМЗ-236ЕК, ЯМЗ-236ДК, ЯМЗ-236Д, ЯМЗ-238М2, ЯМЗ-238 АМ2, ЯМЗ-238БМ, ЯМЗ-238ГМ2, ЯМЗ-238ИМ2, ЯМЗ-238КМ2, ЯМЗ-238АК, ЯМЗ-240 БМ2-1 (с общей головкой) и их модификациям.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

1.1.3. ПОРШЕНЬ С ПОКРЫТИЕМ



Рис. 3 ПОРШЕНЬ КМЗ 238НБ-1004015

Поршень к двигателю ЯМЗ. Поршень "Супер МАЗ". На юбке - вырез для охлаждения поршня маслом. Камера сгорания цилиндрическая без рассекателя. Материал: алюминиевый сплав АК12М2МгН. Покрытие: Molykote.

Применение антифрикционного покрытия Molykote для уменьшения износа, исключения задиров поршней и стенок цилиндров во время приработки и холодного пуска двигателя. Образует смазочную пленку на весь срок ЦПГ двигателя. Защищает от коррозии.

Применяется поршень на автомобилях МАЗ, КраЗ, ЗИЛ, Урал, тракторы "Кировец", комбайны "Дон", "Полесье", "Енисей" с двигателями ЯМЗ-236Н, -236НЕ, -236БЕ, -236Б, -238Б, -238БВ, -238БЕ, -238БЛ, -238БК, -238Д, -238ДЕ, -238ДК, -238НДЗ (4,5), -238Л, -238Н и их модификации.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

2. ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ПОРШНЕЙ.

Для изготовления поршней ДВС в основном используют алюминиевые сплавы.

Алюминиевые сплавы имеют малую плотность, что позволяет снизить массу поршня, обладают высокой теплопроводностью, позволяющей иметь меньшие температуры деталей поршневой группы. К положительным качествам алюминиевых сплавов относятся малые значения коэффициента трения в паре с чугунными гильзами цилиндров.

Однако поршням из алюминиевых сплавов присущ ряд недостатков – невысокая усталостная прочность, резко уменьшающаяся при повышении температуры, высокий коэффициент линейного расширения, меньшая, чем у чугунных поршней износостойкость, сравнительно большая стоимость.

Для изготовления поршней используют литейные и ковочные сплавы алюминия с кремнием – силумины с содержанием кремния 11...14 % (доэвтектические) и 17...25 % (заэвтектические).

Увеличение содержания кремния в сплаве приводит к уменьшению коэффициента линейного расширения, к повышению термо- и износостойкости, но при этом ухудшаются его технологические качества, растет стоимость производства.

Для улучшения физико-механических свойств силуминов используются различные легирующие добавки. Введение в сплав до 6 % меди повышает усталостную прочность, увеличивает теплопроводность, улучшает литейные качества. Однако, при этом несколько снижается износостойкость поршня. Использование в качестве легирующих добавок натрия, азота, фосфора увеличивает износостойкость сплава. Легирование никелем, хромом, магнием повышает жаропрочность и износостойкость.

Заготовки поршней из алюминиевых сплавов получают путем отливки в кокиль или горячей штамповкой. Первой операцией изготовления заготовки

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

является получение отливки. Перед заливкой металла все внутренние поверхности формы покрывают краской, кокиль подогревают до температуры 220 ... 280° С. После сборки кокиля (установка центрального стержня, терморегулирующих пластин, вставки и стержня-пальца) заливают сплав под давлением при температуре 730°С. На второй операции удаляется литниковая система, и зачищаются заусенцы на опорной части. Третья операция осуществляется на агрегатном станке - обрабатывается наружная поверхность, обрезается прибыль, снимаются фаски, протачивается днище и контролируется масса заготовки. На четвертой операции заготовка термообрабатывается для стабилизации структуры металла и снятия внутренних напряжений. Твердость материала поршня 100 – 130 НВ.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. МАТЕРИАЛЫ ПОРШНЕЙ

Наибольшее распространение получили для поршней отечественных двигателей доэвтектические сплавы А125 и А130. Они хорошо обрабатываются резанием, обладают хорошими литейными свойствами, имеют высокую коррозионную стойкость. Для быстроходных форсированных двигателей (например, ВАЗ-а), поршни изготавливают из сплава АК10М2Н, т.е. с добавками меди и никеля, отличающегося более высокими прочностью и жаростойкостью по сравнению со сплавами А125 и А130.

Для поршней дизельных двигателей получили распространение заэвтектические алюминиевые сплавы – АК15МН (ЗИЛ- 645), АК18 – двигатели КамАЗ и ЯМЗ.

Для некоторых двигателей с воздушным охлаждением нашли применение сплавы с содержанием кремния до 25%. Для поршней тихоходных двигателей применяют чугун, имеющий более высокие прочностью и износостойкостью.

АК12ММгН	Базовый сплав. АК12 ММгН обладает оптимальным сочетанием таких свойств, как износостойкость и жаропрочность, имеет высокую теплопроводность
АК13М3МгН2	Сплав по своим свойствам аналогичен АК12 ММгН. Отличается повышенным содержанием меди и никеля. Поршень из данного вида сплава обладает большей прочностью, термостойкостью, стойкостью к прогоранию и повышенной теплопроводностью.
АК13М5МгН2	Данный сплав обладает наибольшей прочностью среди сплавов данного типа. По своим свойствам сплав аналогичен АК12 ММгН, но в отличие от АК13М3МгН2 имеет большее содержание меди. Благодаря этому поршни из данного сплава обладают особо высокой прочностью.

KS1275	Запатентованный сплав немецкого концерна Kolbenschmidt KS1275 применяется при литье поршней для бензиновых и дизельных двигателей. Имеет высокую теплопроводность, износостойкость и жаропрочность.
KS1295	Увеличенное содержание никеля и меди в запатентованном компанией Kolbenschmidt сплаве KS1295 придает изделию наибольшую прочность и жаростойкость. Благодаря своим свойствам поршни из этого вида сплава выдерживают колоссальные нагрузки в мощных дизельных двигателях.
AK18	Базовый эвтектический сплав. Жаростойкий, имеет высокую твердость. Благодаря износостойкости оптимален для изготовления поршней грузовых и тракторных дизельных двигателей. Обладает низким коэффициентом температурного расширения.
AK21M3N1	Обладает всеми положительными свойствами сплава AK18. Благодаря увеличенному содержанию меди и никеля отличается повышенной прочностью и теплопроводностью. Низкий коэффициент теплового расширения данного сплава позволяет уменьшить тепловой зазор между поршнем и цилиндром.

Таблица 1 – Материалы для изготовления поршней

Эвтектический сплав — сплав, в котором основной (алюминий) и легирующий (кремний) компоненты находятся в равновесии.

Заэвтектический сплав — сплав, состав которого имеет избыток легирующего элемента по сравнению с составом эвтектического сплава.

Отливки поршней подвергаются специальной термической обработке для снятия внутренних напряжений (материал поршня становится более пластичным и упругим).

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Механическая обработка поршней осуществляется на автоматических линиях, что обеспечивает стабильность свойств и параметров (форма внешней поверхности, камеры сгорания и т. п.) каждого отдельно взятого поршня при крупносерийном производстве.

На боковой поверхности поршней, посредством специальной механической обработки, создается микрорельеф. Он снижает потери на трение между поршнем и цилиндром (как следствие — увеличение долговечности, снижение расхода топлива).

На поршнях производится фосфатирование, повышающее твердость поверхности, увеличивающее ее износостойкость и коррозионную стойкость.

Химический состав материалов, применяющихся в производстве поршней, приведен в «ПРИЛОЖЕНИИ А».

4. ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА МАРОК АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОРШНЕЙ ДВИГАТЕЛЯ.

Для теоретической оценки ресурса сопряжения были выбраны 4 марки сплавов из ГОСТ 1583 – 93, твердость которых превышает НВ = 90 ед, используемых в изготовлении различных типов зубчатых колес, цилиндров двигателей, дросселях, производства деталей, работающих при высоких механических нагрузках, высоких температурах. Выбранные сплавы (АК21М2,5Н2,5, АМг4К1,5М, АК8МЗч, АМ4,5Кд имеют высокие механические свойства, сопротивление износу и коррозии в слабощелочных и газовых средах, высокую коррозионную стойкость.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Марка сплава	Массовая доля, %								
	Основных компонентов						Примесей, не более		
	магния	кремния	марганца	меди	титана	никеля	Железа		
з, в							к	д	
AK21M2, 5H2,5	0,2-0,5	20-22	0,2-0,4	2,2-3	0,1-0,3	2,2-2,8	-	0,9	-
AMГ4K1, 5M	4,5-5,2	1,3-1,7	0,6-0,9	0,7-1	0,1-0,2	0,003Be	-	0,4	-
AK8M3ч	0,2-0,4	7-8,5	0,75Zn	2,5-3,5	0,1-0,25	0,005-0,1 В	0,4	0,4	0,4
AM4,5Kд	-	-	0,35-0,8	4,5-5,1	0,15-0,35	0,07-0,25Cd	0,15	0,15	-

Таблица 2. Химический состав алюминиевых сплавов

Марка сплава	Предел прочности	Твердость НВ
AK21M2,5H2,5	157-186	90-100
AMГ4K1,5M	211-265	90-104
AK8M3ч	215-392	90-110
AM4,5Kд	294-490	90-120

Таблица 3. Механические свойства алюминиевых сплавов

5. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА РЕСУРСА СОПРЯЖЕНИЯ

5.1. АНАЛИЗ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

В качестве исходных данных принимаем:

- пара трения: поршень - гильза цилиндра (Алюминиевый сплав – Чугун (спец. состава));
- различные механические и теплофизические свойства материалов;
- номинальная площадь контакта $A_a = 1000 \text{ мм}^2$;

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

- массив средних нормальных нагрузок $N = 1000 \dots 5000 \text{ Н}$ с шагом в 500 Н ;
- скорость скольжения $v = 9,8 \text{ м/с}$;
- общая глубина износа $H = 300 \text{ мкм}$;
- прочие данные.

Параметр	Обозначение	Материал		Размерность
		Сплав	Чугун	
Коэффициент теплопроводности	λ	35	21	Вт/(м*К)
Плотность	ρ	2720	7500	кг*м ³
Удельная теплоемкость	c_p	900	469	Дж/(кг*К)
Модуль упругости	E	$0,69 \cdot 10^5$	$0,9 \cdot 10^5$	МПа
Коэффициент Пуассона	μ	0,36	0,29	
Твердость по Бринеллю	HB	90	270	
Отношение высоты волны шероховатости к ее шагу	a_w/L_w	$4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-4}$	
Предел прочности	σ_{BP}	186	330	МПа
Коэффициент аккумуляции энергии	ρ_R	$0,4 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-5}$	

Таблица 4. Различные свойства материалов и исходные данные для пары трения.

5.2. ОЦЕНКА ЗАТРАТ МОЩНОСТИ НА СОВЕРШЕНИЕ РАБОТЫ ТРЕНИЯ В СОПРЯЖЕНИЯХ

Параметры исследуемых сопряжений двигателя 4Ч 13/14:

Коэффициент трения (для всех режимов нагружения): 0,05

Номинальное давление в сопряжении: 0,4 МПа

Номинальная частота вращения коленчатого вала: 2100 мин^{-1}

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

Для оценки окружной скорости скольжения следует использовать зависимость:

$$V = 2\pi \cdot n \cdot R_{п.п.} = 9,8 \text{ м/с}$$

Средняя нормальная нагрузка в сопряжении может быть определена из соотношения давления в сопряжении и номинальной площади контакта.

Сила N действующая перпендикулярно оси цилиндра, называется нормальной силой и воспринимается стенками цилиндра:

$$N = P_{\Sigma} \cdot \operatorname{tg}\beta, \text{ кН};$$

$$N = 11,949 \cdot (-0,089) = -1,0635 \text{ кН.}$$

$$N_{\min} = -2,697 \text{ кН, при } \alpha = 240^\circ \text{ ПКВ}$$

$$N_{\max} = 5,109 \text{ кН, при } \alpha = 380^\circ \text{ ПКВ}$$

Нормальная сила N считается положительной, если создаваемый ею момент относительно оси коленчатого вала направлен противоположно направлению вращения вала двигателя.

На основании динамического расчета (ПРИЛОЖЕНИЕ Б) имеем:

$$N = p_e \cdot F_{\pi} = 1 \text{ кН}$$

Работа трения, отнесенная к времени контактного взаимодействия, т.е. к времени скольжения тел трения, формирует мощность трения:

$$N_T = f \cdot N \cdot V = 490 \text{ Вт}$$

$V, \text{ м/с}$	f	$N_T, \text{ Вт}$	$N, \text{ Н}$
9,8	0,05	490	1000
9,8	0,05	735	1500
9,8	0,05	980	2000
9,8	0,05	1225	2500
9,8	0,05	1470	3000
9,8	0,05	1715	3500
9,8	0,05	1960	4000
9,8	0,05	2205	4500
9,8	0,05	2450	5000

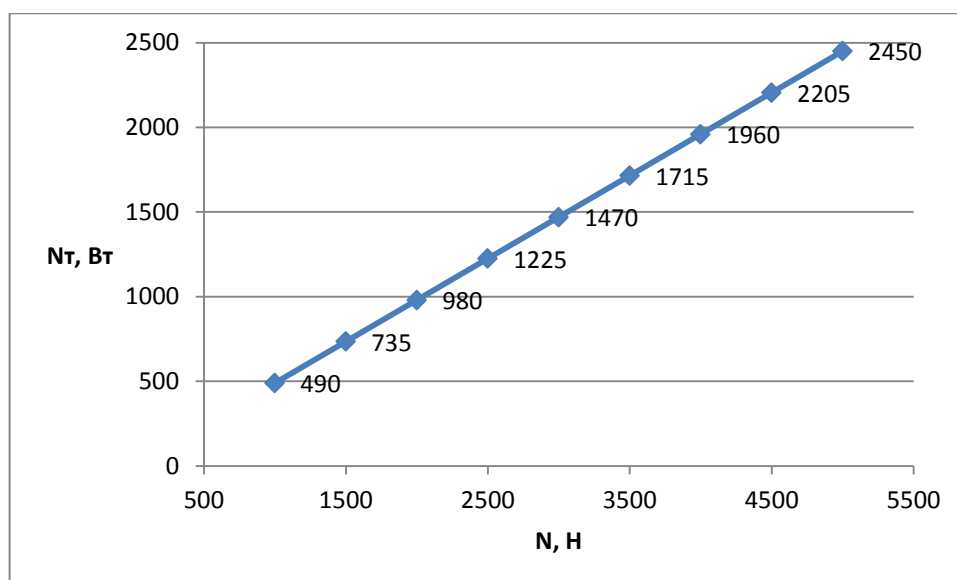


Рисунок 4. График зависимости мощности трения от средней нормальной нагрузки.

5.3 ПОСТРОЕНИЕ ОПОРНОЙ КРИВОЙ

Опорная кривая позволяет выявить распределение металла в поверхностном слое с учетом шероховатости и определить показатели опорной кривой ν и b , используемые для оценки соотношения площадей.

Показатели опорной кривой определяются по двум точкам, выбранным на условно прямой части графика.

Координаты точек 1 и 2 сведены в таблицу 5.

№ точки	t_p	ε
1	0,2	0,35
2	0,75	0,8

Таблица 5 – Координаты точек 1 и 2

Коэффициенты ν и b определяются по формулам:

$$\nu = \frac{\lg(t_{p1}) - \lg(t_{p2})}{\lg(\varepsilon_1) - \lg(\varepsilon_2)},$$

где t_p, ε – координаты соответствующих точек (таблица 5).

$$\nu = \frac{\lg 0,2 - \lg 0,75}{\lg 0,35 - \lg 0,8} = 1,66.$$

$$lgb = 0,5 \cdot \left[\left(\lg(t_{p_1}) + \lg(t_{p_2}) \right) - v(\lg(\varepsilon_1) + \lg(\varepsilon_2)) \right];$$

$$lgb = 0,5 \cdot \left[(\lg 0,32 + \lg 0,75) - 1,66 \cdot (\lg 0,35 + \lg 0,8) \right] = 0,05;$$

$$b = 1,1.$$

5.4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРА КОНТАКТИРОВАНИЯ, КОНТУРНОГО ДАВЛЕНИЯ И ПЛОЩАДИ

Комплекс шероховатости Δ для единичного профиля поверхности определяется по формуле:

$$\Delta = \frac{R_{max}}{R \cdot b^{\frac{1}{v}}}$$

где $R_{max} = 7,5$ мкм – высота профиля;

R - средний радиус микронеровностей, $R = 20$ мкм.

$$\Delta = \frac{7,5}{20 \cdot 1,1^{\frac{1}{1,66}}} = 0,36.$$

С целью оценки соотношения между номинальной и фактической площадью контактирования, следует определить контурное и фактическое давление, в зависимости от вида контактирования:

$$A \leq P_c < B,$$

где P_c - контурное давление контакта, МПа;

$$A = 5,4 \cdot \frac{(1-\mu^2)^4 \cdot HB^5}{\Delta^2 \cdot E^4} - \text{граница упругого контакта};$$

$$B = 14,5 \cdot \frac{(1-\mu^2)^4 \cdot HB^5}{\Delta^2 \cdot E^4} - \text{граница пластического контакта}.$$

$$P_c = 1,87 \cdot E^{0,5} \cdot \left(\frac{a_\omega}{L_\omega} \right)^{0,5} \cdot P_a^{0,5},$$

где $a_\omega / L_\omega = 4 \cdot 10^{-4}$ – отношение волны шероховатости к ее шагу.

Вид контактирования:

- $P_c < A$ – упругое контактирование;
- $B \geq P_c$ - пластическое контактирование;
- $A \leq P_c < B$ – упруго-пластическое контактирование.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

Расчеты будем проводить для наиболее деформируемого материала. В данном случае таким материалом является алюминий.

Относительное сближение поверхностей ε находится по формуле:

$$\varepsilon = \left[\frac{4,2 \cdot P_c \cdot (1 - \mu^2)}{\Delta^{0,5} \cdot E} \right]^{\frac{2}{3}}$$

Фактическое давление в упругой зоне контакта определяется по формуле:

$$P_r = 0,28 \cdot E^{\frac{6}{7}} \cdot \left(\frac{R_{max}}{R} \right)^{\frac{3}{7}} \cdot P_c^{\frac{1}{7}}$$

Фактическое давление в пластической зоне контакта определяется по формуле:

$$P_r = HB \cdot 10.$$

Фактическую площадь контакта найдем исходя из равенства нормальной нагрузки:

$$N = P_a \cdot A_a = P_r \cdot A_r \rightarrow A_r = \frac{P_a \cdot A_a}{P_r}$$

Результаты всех расчетов сводятся в таблицу 6.

№ п/п	P_a , МПа	N , Н	P_c , МПа	Вид контакта	P_r , МПа	A_r , мм ²	A_a/A_r
1	1	1000	9,84	Пластический	90	11,11	90
2	1,5	1500	12,05		90	16,67	60
3	2	2000	13,91		90	22,22	45
4	2,5	2500	15,55		90	27,78	36
5	3	3000	17,04		90	33,33	30
6	3,5	3500	18,40		90	38,89	25,71429
7	4	4000	19,67		90	44,44	22,5
8	4,5	4500	20,87		90	50,00	20
9	5	5000	21,99		90	55,56	18

Таблица 6. Расчет поршня (Алюминий АЛ 25)

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		22

5.5 ОЦЕНКА РЕСУРСА СОПРЯЖЕНИЯ

Ресурс сопряжения регламентирован временем его фактической работы.

Изнашивание – процесс изменения геометрических характеристик трибосопряжения, физико-механических свойств его составляющей или эксплуатационных свойств в процессе работы.

Основной характеристикой изнашивания, являются интенсивность изнашивания.

Ресурс работы:

$$t = \frac{h}{I_h \cdot v},$$

где h – глубина изношенного слоя, м;

I_h – линейная интенсивность изнашивания.

$$I_h = \frac{f \cdot P_a}{\left[\frac{\sigma_{\text{ВР}}^2 \cdot \sigma^2}{2 \cdot E} \right]} \cdot \rho_R^2,$$

где $\rho_R = 3 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент аккумуляции энергии.

Суммарный износ сопряжения:

$$H = h_1 + h_2; H = 300 \text{ мкм.}$$

Предполагаем соотношение глубин изношенных слоев равным соотношению линейных интегральных интенсивностей изнашивания.

Следовательно:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{I_{h_1}}{I_{h_2}}.$$

В зоне контакта $\sigma = P_r$.

Результаты расчетов сводятся в таблицы 7 и 8.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	270	1000	0,05	4E-10	146	36500
2	1,5	270	1500	0,05	6E-10	146	24333,33
3	2	270	2000	0,05	8E-10	146	18250
4	2,5	270	2500	0,05	1E-09	146	14600
5	3	270	3000	0,05	1,2E-09	146	12166,67
6	3,5	270	3500	0,05	1,4E-09	146	10428,57
7	4	270	4000	0,05	1,6E-09	146	9125
8	4,5	270	4500	0,05	1,8E-09	146	8111,11
9	5	270	5000	0,05	2E-09	146	7300

Таблица 7. Расчет ресурса сопряжения для гильзы цилиндра.

(Чугун спец. состава)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	90	2000	0,05	4,16667E-10	154	36500
2	1,5	90	2500	0,05	6,25E-10	154	24333,33
3	2	90	3000	0,05	8,33333E-10	154	18250
4	2,5	90	3500	0,05	1,04167E-09	154	14600
5	3	90	4000	0,05	1,25E-09	154	12166,67
6	3,5	90	4500	0,05	1,45833E-09	154	10428,57
7	4	90	4000	0,05	1,66667E-09	154	9125
8	4,5	90	4500	0,05	1,875E-09	154	8111,11
9	5	90	5000	0,05	2,08333E-09	154	7300

Таблица 8. Расчет ресурса сопряжения для поршня (АЛ 25)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	270	1000	0,05	4E-10	151	37786,52
2	1,5	270	1500	0,05	6E-10	151	25191,01
3	2	270	2000	0,05	8E-10	151	18893,26
4	2,5	270	2500	0,05	1E-08	151	15114,61
5	3	270	3000	0,05	1,2E-09	151	12595,51
6	3,5	270	3500	0,05	1,4E-09	151	10796,15
7	4	270	4000	0,05	1,6E-09	151	9446,63
8	4,5	270	4500	0,05	1,8E-09	151	8397,00
9	5	270	5000	0,05	2E-08	151	7770,30

Таблица 9. Расчет ресурса сопряжения для цилиндра (Чугун спец. состава)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	100	1000	0,05	3,93E-10	149	37786,51
2	1,5	100	1500	0,05	5,90E-10	149	25191,01
3	2	100	2000	0,05	7,87E-10	149	18893,25
4	2,5	100	2500	0,05	9,84E-10	149	15114,60
5	3	100	3000	0,05	1,18E-09	149	12595,50
6	3,5	100	3500	0,05	1,37E-09	149	10796,14
7	4	100	4000	0,05	1,57E-09	149	9446,62
8	4,5	100	4500	0,05	1,77E-09	149	8397,00
9	5	100	5000	0,05	1,96E-09	149	7770,30

Таблица 10. Расчет ресурса сопряжения для поршня (АК21М2,5Н2,5)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	270	1000	0,05	4E-10	165	41234,40
2	1,5	270	1500	0,05	6E-10	165	27489,60
3	2	270	2000	0,05	8E-10	165	20617,20
4	2,5	270	2500	0,05	1E-08	165	16493,76
5	3	270	3000	0,05	1,2E-09	165	13744,80
6	3,5	270	3500	0,05	1,4E-09	165	11781,25
7	4	270	4000	0,05	1,6E-09	165	10308,60
8	4,5	270	4500	0,05	1,8E-09	165	9163,20
9	5	270	5000	0,05	2E-08	165	8090,88

Таблица 11. Расчет ресурса сопряжения для гильзы цилиндра (Чугун спец. состава)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	104	1000	0,05	3,27E-10	135	41234,40
2	1,5	104	1500	0,05	4,91E-10	135	27489,60
3	2	104	2000	0,05	6,55E-10	135	20617,20
4	2,5	104	2500	0,05	8,18E-10	135	16493,76
5	3	104	3000	0,05	9,82E-10	135	13744,80
6	3,5	104	3500	0,05	1,14E-09	135	11781,25
7	4	104	4000	0,05	1,31E-09	135	10308,60
8	4,5	104	4500	0,05	1,47E-09	135	9163,20
9	5	104	5000	0,05	1,63E-09	135	8090,88

Таблица 12. Расчет ресурса сопряжения для поршня (АМг4К1,5М)

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	270	1000	0,05	4E-10	170	42605,63
2	1,5	270	1500	0,05	6E-10	170	28403,75
3	2	270	2000	0,05	8E-10	170	21302,81
4	2,5	270	2500	0,05	1E-08	170	17042,25
5	3	270	3000	0,05	1,2E-09	170	14201,87
6	3,5	270	3500	0,05	1,4E-09	170	12173,03
7	4	270	4000	0,05	1,6E-09	170	10651,40
8	4,5	270	4500	0,05	1,8E-09	170	9467,91
9	5	270	5000	0,05	2E-08	170	8521,12

Таблица 13. Расчет ресурса сопряжения для гильзы цилиндра (Чугун спец. состава)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	110	1000	0,05	3,04E-10	129	42605,63
2	1,5	110	1500	0,05	4,56E-10	129	28403,75
3	2	110	2000	0,05	6,08E-10	129	21302,81
4	2,5	110	2500	0,05	7,60E-10	129	17042,25
5	3	110	3000	0,05	9,12E-10	129	14201,87
6	3,5	110	3500	0,05	1,06E-09	129	12173,03
7	4	110	4000	0,05	1,21E-09	129	10651,40
8	4,5	110	4500	0,05	1,36E-09	129	9467,91
9	5	110	5000	0,05	1,52E-09	129	8521,12

Таблица 14. Расчет ресурса сопряжения для поршня (АК8МЗч)

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	270	1000	0,05	4E-10	178	44747,90
2	1,5	270	1500	0,05	6E-10	178	29831,93
3	2	270	2000	0,05	8E-10	178	22373,95
4	2,5	270	2500	0,05	1E-08	178	17899,16
5	3	270	3000	0,05	1,2E-09	178	14915,97
6	3,5	270	3500	0,05	1,4E-09	178	12785,11
7	4	270	4000	0,05	1,6E-09	178	11186,97
8	4,5	270	4500	0,05	1,8E-09	178	9943,98
9	5	270	5000	0,05	2E-08	178	8949,58

Таблица 15. Расчет ресурса сопряжения для гильзы цилиндра
(Чугун спец. состава)

№ п/п	P_a , МПа	P_r , МПа	N, H	f	I_h , м/м	h , мкм	t , ч
1	1	120	1000	0,05	2,70E-10	121	44747,90
2	1,5	120	1500	0,05	4,05E-10	121	29831,93
3	2	120	2000	0,05	5,40E-10	121	22373,95
4	2,5	120	2500	0,05	6,76E-10	121	17899,16
5	3	120	3000	0,05	8,11E-10	121	14915,97
6	3,5	120	3500	0,05	9,46E-10	121	12785,11
7	4	120	4000	0,05	1,08E-09	121	11186,97
8	4,5	120	4500	0,05	1,21E-09	121	9943,98
9	5	120	5000	0,05	1,35E-09	121	8949,58

Таблица 16. Расчет ресурса сопряжения для поршня (АМ4,5Кд)

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

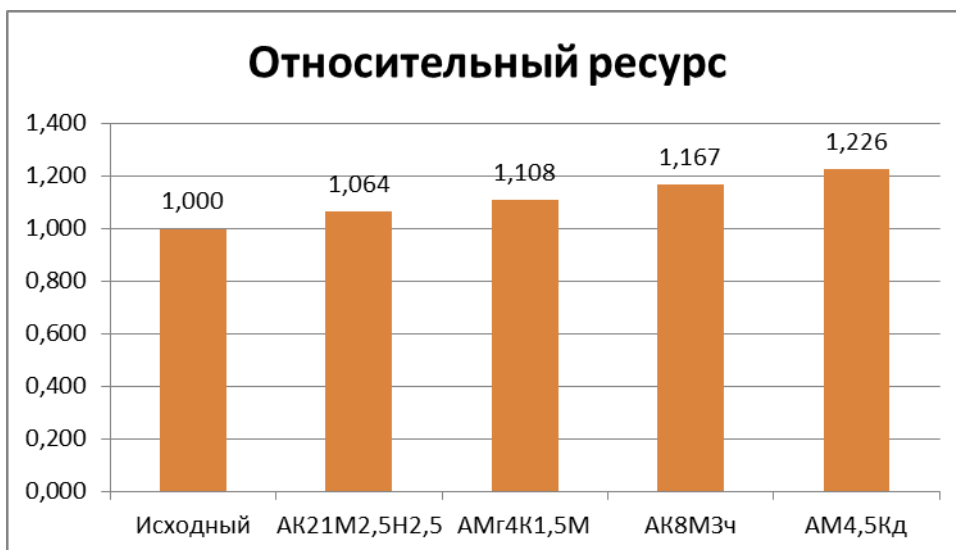


Рисунок 5. График ресурса сопряжения относительно исходного материала поршня.

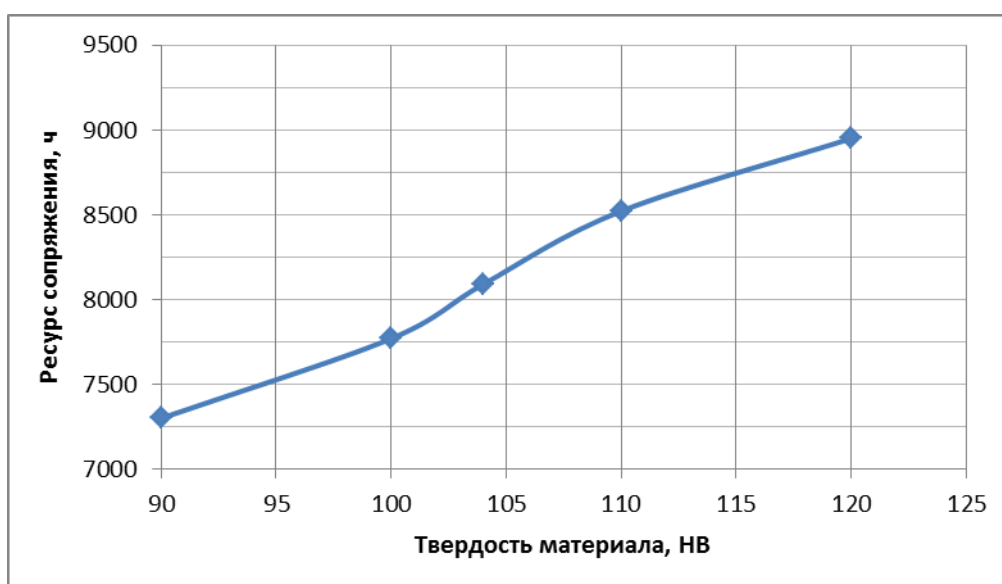


Рисунок 6. График зависимости ресурса сопряжения от твердости материала поршня.

6 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

По результатам расчетов был построен график ресурса сопряжения относительно исходного материала поршня (Рисунок 8) и график зависимости ресурса сопряжения от твердости материала поршня (Рисунок 9),

При увеличении твердости материала поршня с HB=90 ед., как у исходного образца, до HB=100ед. у сплава АК21М2,5Н2,5 наблюдается повышение ресурса на 6,4%. Рассматривая материал поршня АМг4К1,5М с твердостью HB=104 ед., прирост ресурса сопряжения составляет до 10,8%. Сплав АК8МЗч, используемый при расчетах поршня имеет твердость HB=110 ед. в свою очередь повышает ресурс на 16,7%. Последний из рассмотренных образцов, АМ4,5Кд с твердостью HB=120 ед. увеличивает ресурс сопряжения на 22,6%.

Механические свойства материала гильзы цилиндра при проведении исследования не изменялись, для получения более точных результатов зависимости ресурса сопряжения.

В работе исследовалась зависимость ресурса сопряжения «поршень – гильза цилиндра» от твердости материала поршня и, следовательно, оптимальным вариантом материала поршня двигателя ЯМЗ-236 является алюминиевый сплав марки АМ4,5Кд с твердостью HB 120 ед.

Изменение твердости на 30 единиц по Бринеллю не повлечет за собой изменения технологического процесса производства поршней, следовательно, и не требует за собой внедрения модернизированного оборудованию

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Special-Purpose alloy castings to resist abrasion. Bradley and foster Ltd., Darlaston, England, 2006.-20 p.
2. Norman T. E. Materials for the Mining Industry, Symposium. / T. E. Norman. Colorado. 2004.-p. 207-217.
3. В. А. Тейх, Н. Ф. Бомко, Я. В. Соболева // Литейное производство, 2000. - №10.-С. 15-17.
4. Афанасьев В. К., Гладышев С. А., Ефименко Б. С. и др. Поршневые силумины. Кемерово: Изд-во «Полиграф», 2005.
5. Овчинников В. В., Жданович О. Е., Ласковнев А. П. Производство алюминиевых поршней для высокофорсированных двигателей внутреннего сгорания. Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2003.
6. Немененок Б. М., Задруцкий С. П., Бежок А. П., Кудравец Н. И. Оценка экологической безопасности процессов плавки и внепечной обработки алюминиевых сплавов// Литье и металлургия. 2008. № 3. С. 171-174.
7. Краев Б. А., Садоха М. А., Мельников А. П. и др. Технология и оборудование для литья поршней // Литье и металлургия. 2001. № 4. С. 52-54.
8. Комаров А. И., Сенють В. Т., Шипко А. А. и др. Новые технические решения при создании композитов на основе эвтектических силуминов// Инновации в машиностроении: Сб. науч. тр. МНТК ОИМ НАН Беларуси. Мн., 2008.
9. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю. Измельчение структуры вторичных алюминиевых сплавов // Новые материалы и технологии: Материалы докл. 8-й МНТК ГНПО ПМ НАН Беларуси. Мн., 2008. С. 78-79.
10. Волочко А. Т., Изобелло А. Ю. Моделирование теплонапряженного состояния поршней высокофорсированного дизельного двигателя

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

внутреннего сгорания с циркуляционным охлаждением // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук. 2008. №2. С. 63-68.2. — С. 29.

11. Кащеев В.И. Процессы в зоне фрикционного контакта металлов. М.: Машиностроение, 2008. 215 с.

12. Slawinski Z., Jankowska D., Jankowski A., Nykiel J., Sieminska B. Novel alloy for modern IC engine piston application // World Journal of Engineering. — Supplement 2009. — pp. 963-964.

13. Литые композиционные материалы на основе алюминиевого сплава для автомобилестроения / Е. В. Миронова (и др.) // Вестник ХГАДТУ. – 2006. №3. с.20-22.

14. Gorton M.P. Carbon-carbon piston development [Электронный ресурс] // NASA. – 1994. – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/2060/19940031440>

15. Bäuml F. Werkstoffgerechte Auslegung und Festigkeitsnachweis für Verbrennungsmotorkolben aus Mesophasenkohlenstoff, 2001.

16. Ярошевич В.К. Технология производства и ремонта автомобилей: уч. пособие для вузов / В.К.Ярошевич, А.С. Савич, В.П. Иванов. – Минск: Адукацыя і выхаванне, 2008 – 640 с.

17. Арзамасов Б.Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина.-М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана,2005.-648с.

18. Колонаков А.А. Повышение качества современных поршневых сплавов/ А.А. Колонаков, А. В. Кухаренко, В. Б. Деев, И. Ф. Селянин// ОАО «РУСАЛ Новокузнецк», Сибирский государственный индустриальный университет, г.Новокузнецк, 2008.-586с.

19. Попова М.В. Научно-технологические основы разработки заэвтектических силуминов с регулируемым температурным коэффициентом линейного расширения / М.В.Попова // Автомир.- 2004г. №1.– С. 15-21.

20. Хрулёв А. Поршень в общем и в частности. / А.Хрулёв // Автомир. - 2010 №2. – С. 60-68.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

21. Скворцов В.Ф. – Основы размерного анализа технологических процессов изготовления деталей: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – 100с.
22. Михаевич Е.П. - Технология машиностроения: Учебнометодическое пособие. - Томск: Изд. ТПУ, 2010. – 100с.
23. Безызносная эксплуатация двигателей внутреннего сгорания: монография / Р.Ю. Соловьев, С.А. Соловьев, Д.А. Гительман [и др.]; под общей ред. Р.Ю. Соловьева. – М.: ФГБНУ ГОСНИТИ, 2015. – 196 с.
24. Халфин, М.А. Состояние и перспективы повышения качества и надежности сельскохозяйственной техники / М.А. Халфин // Научные проблемы и перспективы развития, ремонта, обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей: материалы международной научно-технической конференции. – М.: ГОСНИТИ, 2004. – С. 281–290.

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		33

ПРИЛОЖЕНИЯ

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		34

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Химический состав алюминиевых сплавов

Группа сплава	Марка	Массовая доля, %, не более					
		Mg	Si	Mn	Cu	Ti	Ni
Сплавы на основе системы алюминий-кремний-магний	AK12(АЛ12)	-	10-13	-	-	-	-
	AK9	0,2-0,4	8-11	0,2-0,5	-	-	-
Сплавы на основе алюминий-кремний-медь	AK5M	0,35-0,6	4,5-5,5	-	1,0-1,5	-	-
	AK8M3ч (ВАЛ8)	0,2-0,45	7,0-8,5	Zn 0.5-1.0	2.5-3.5	0.1-0.25	Be 0.05-0.25
	AK21M2, 5H2,5	0.2-0.5	20-22	0.2-0.4	2.2-3.0	0.1-0.3	2.2-2.8
Сплавы на основе алюминий-медь	AM4,5Кд	Zn 0.1	0.20	0.05	-	-	-
	AM5	Zn 0.2	0.3	0,05	-	-	0.1
Сплавы на основе алюминий-магний	AMг4К1,5М	4,5-5,2	1,3-1,7	0,6-0,9	0,7-1,0	0,1-0,25	Be 0.002-0.004

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Данные из динамического расчёта двигателя 6Ч13\14.

j	P _г , кН	P _ж , кН	P _с , кН	N, кН	P _ш , кН	Z, кН	T, кН
0	-0,004	-22,4583	-22,4623	0,0000	-22,4623	-22,4623	0,0000
10	-0,004	-21,9061	-21,9101	-1,0017	-21,9330	-21,4033	-4,7911
20	-0,004	-20,2918	-20,2958	-1,8331	-20,3784	-18,4449	-8,6641
30	-0,004	-17,7377	-17,7417	-2,3535	-17,8971	-14,1880	-10,9090
40	-0,004	-14,4337	-14,4377	-2,4764	-14,6485	-9,4681	-11,1774
50	-0,004	-10,6178	-10,6218	-2,1848	-10,8441	-5,1539	-9,5411
60	-0,004	-6,5526	-6,5565	-1,5337	-6,7335	-1,9501	-6,4450
70	-0,004	-2,4992	-2,5032	-0,6384	-2,5833	-0,2562	-2,5706
80	-0,004	1,3068	1,3028	0,3494	1,3488	-0,1178	1,3437
90	-0,004	4,6766	4,6726	1,2737	4,8431	-1,2737	4,6726
100	-0,004	7,4823	7,4783	2,0054	7,7426	-3,2735	7,0165
110	-0,004	9,6642	9,6602	2,4638	9,9695	-5,6192	8,2349
120	-0,004	11,2292	11,2252	2,6257	11,5282	-7,8865	8,4084
130	-0,004	12,2420	12,2380	2,5172	12,4942	-9,7947	7,7568
140	-0,004	12,8095	12,8055	2,1964	12,9925	-11,2214	6,5487
150	-0,004	13,0611	13,0572	1,7321	13,1715	-12,1739	5,0286
160	-0,004	13,1269	13,1229	1,1852	13,1763	-12,7369	3,3745
170	-0,004	13,1170	13,1130	0,5995	13,1267	-13,0179	1,6867
180	-0,004	13,1051	13,1012	0,0000	13,1012	-13,1012	0,0000
190	-0,123	13,1170	12,9936	-0,5940	13,0072	-12,8994	-1,6713
200	-0,097	13,1269	13,0300	-1,1768	13,0831	-12,6467	-3,3507
210	-0,044	13,0611	13,0174	-1,7268	13,1314	-12,1367	-5,0132
220	0,023	12,8095	12,8321	-2,2010	13,0195	-11,2447	-6,5622
230	0,129	12,2420	12,3706	-2,5445	12,6296	-9,9009	-7,8409
240	0,275	11,2292	11,5038	-2,6909	11,8143	-8,0823	-8,6171
250	0,460	9,6642	10,1245	-2,5823	10,4487	-5,8893	-8,6308
260	0,739	7,4823	8,2213	-2,2046	8,5117	-3,5987	-7,7136
270	1,124	4,6766	5,8003	-1,5811	6,0119	-1,5811	-5,8003
280	1,694	1,3068	3,0009	-0,8047	3,1069	-0,2714	-3,0951
290	2,543	-2,4992	0,0440	-0,0112	0,0454	0,0045	-0,0451
300	3,870	-6,5526	-2,6827	0,6275	-2,7551	-0,7979	2,6371
310	6,046	-10,6178	-4,5722	0,9405	-4,6680	-2,2186	4,1071

ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР

Лист

36

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата
------	------	----------	---------	------

320	9,787	-14,4337	-4,6470	0,7971	-4,7148	-3,0475	3,5976
330	16,433	-17,7377	-1,3045	0,1730	-1,3159	-1,0432	0,8021
340	28,002	-20,2918	7,7098	-0,6963	7,7411	7,0066	-3,2912
350	60,478	-21,9061	38,5718	-1,7634	38,6121	37,6796	-8,4345
360	105,531	-22,4583	83,0727	0,0000	83,0727	83,0727	0,0000
370	105,080	-21,9061	83,1738	3,8025	83,2607	81,2499	18,1877
380	75,841	-20,2918	55,5488	5,0170	55,7749	50,4828	23,7133
390	49,361	-17,7377	31,6229	4,1948	31,9000	25,2888	19,4443
400	32,234	-14,4337	17,7999	3,0531	18,0599	11,6731	13,7804
410	21,846	-10,6178	11,2282	2,3095	11,4632	5,4481	10,0858
420	15,478	-6,5526	8,9255	2,0878	9,1664	2,6547	8,7736
430	11,445	-2,4992	8,9458	2,2816	9,2322	0,9156	9,1866
440	8,792	1,3068	10,0985	2,7080	10,4553	-0,9132	10,4153
450	6,934	4,6766	11,6110	3,1651	12,0347	-3,1651	11,6110
460	5,594	7,4823	13,0768	3,5066	13,5388	-5,7241	12,2692
470	4,653	9,6642	14,3168	3,6515	14,7751	-8,3279	12,2045
480	3,989	11,2292	15,2184	3,5598	15,6292	-10,6921	11,3996
490	3,498	12,2420	15,7403	3,2376	16,0698	-12,5978	9,9767
500	3,167	12,8095	15,9762	2,7403	16,2095	-13,9999	8,1702
510	2,915	13,0611	15,9758	2,1192	16,1157	-14,8950	6,1526
520	2,755	13,1269	15,8823	1,4345	15,9470	-15,4151	4,0841
530	2,663	13,1170	15,7796	0,7214	15,7961	-15,6652	2,0297
540	0,089	13,1051	13,1940	0,0000	13,1940	-13,1940	0,0000
550	0,089	13,1170	13,2059	-0,6037	13,2197	-13,1101	-1,6986
560	0,089	13,1269	13,2158	-1,1936	13,2696	-12,8270	-3,3984
570	0,089	13,0611	13,1500	-1,7444	13,2652	-12,2604	-5,0643
580	0,089	12,8095	12,8984	-2,2124	13,0868	-11,3028	-6,5962
590	0,089	12,2420	12,3308	-2,5363	12,5890	-9,8690	-7,8157
600	0,089	11,2292	11,3180	-2,6474	11,6236	-7,9518	-8,4780
610	0,089	9,6642	9,7531	-2,4875	10,0653	-5,6733	-8,3141
620	0,089	7,4823	7,5712	-2,0303	7,8387	-3,3141	-7,1036
630	0,089	4,6766	4,7655	-1,2991	4,9394	-1,2991	-4,7655
640	0,089	1,3068	1,3957	-0,3743	1,4450	-0,1262	-1,4395
650	0,089	-2,4992	-2,4103	0,6148	-2,4875	-0,2467	2,4752
660	0,089	-6,5526	-6,4637	1,5119	-6,6382	-1,9225	6,3537
670	0,089	-10,6178	-10,5289	2,1657	-10,7493	-5,1089	9,4577
680	0,089	-14,4337	-14,3448	2,4604	-14,5543	-9,4072	11,1055

					<i>ЮУрГУ - 130303.2019.069 ПЗ ВКР</i>			Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				37

690	0,089	-17,7377	-17,6488	2,3412	-17,8034	-14,1138	10,8519
700	0,089	-20,2918	-20,2030	1,8247	-20,2852	-18,3605	8,6245
710	0,089	-21,9061	-21,8173	0,9974	-21,8400	-21,3126	4,7708
720	0,089	-22,4583	-22,3694	0,0000	-22,3694	-22,3694	0,0000

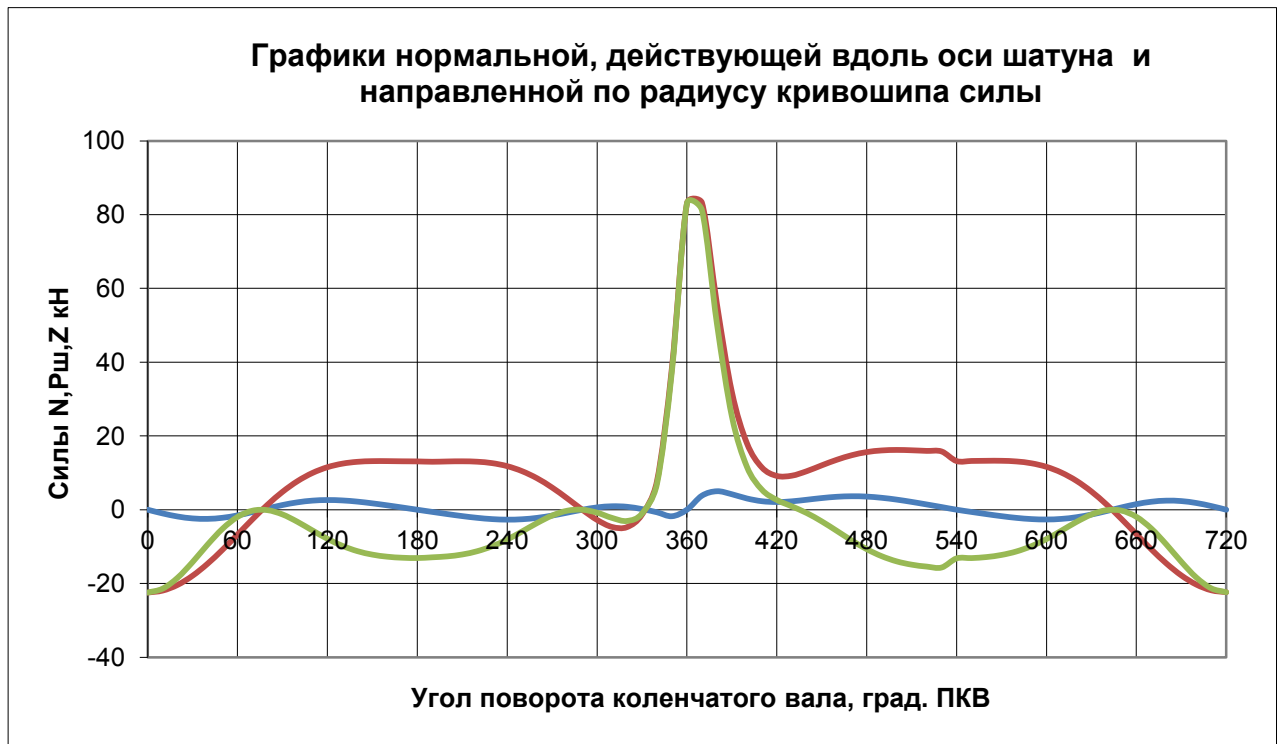


Рисунок 7. График сил Pш,N,Z