

## **Конструкционные материалы для поршней ДВС**

к.т.н. проф. Макаров А.Р., к.т.н. доц. Смирнов С.В., Осокин С.В.

Университет машиностроения

(495) 223-05-23, atd@mami.ru

Пятов И.С., Врублевская Ю.И., к.т.н. Финкельберг Л.А.

ООО «РЕАМ – РТИ», ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»

*Аннотация.* В статье приводится обзор современных конструкционных материалов для производства поршней ДВС, включая композиционные материалы. Проведено сравнение механических и теплофизических свойств этих материалов. Сообщается об опыте производства в России поршней из углерод-углеродного композита.

*Ключевые слова:* поршень, алюминиевые сплавы, композиционные материалы, механические и теплофизические свойства, углерод-углеродные композиты.

Улучшение мощностных, экономических и экологических показателей двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в условиях увеличивающегося спроса в автомобильной и авиационной промышленности является одной из самых актуальных задач.

Эта задача решается как за счет совершенствования рабочего процесса двигателя, так и оптимизацией основных узлов и деталей.

Возможность совершенствования рабочего процесса поршневого двигателя путем повышения давлений газа и тепловых нагрузок на детали в немалой степени связана с конструкцией поршня, применяемых при его производстве технологий и материалов.

Именно поэтому при создании двигателя особое внимание уделяется конструкции поршня, от работы которого зависят основные показатели двигателя.

Поршень должен обладать достаточными прочностными характеристиками, обеспечивающими необходимую надежность и долговечность в условиях воздействия высоких динамических, механических 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.

Особое место отводится отработке конструкции поршня с использованием новейших расчетных методов оптимизации, что позволят выбирать наилучший вариант материала, вида упрочнения и геометрической конфигурации для конкретного типа двигателя, обеспечивающий выполнение норм экологии и высокую топливную экономичность.

Для производства поршней в отечественной и мировой практике используются алюминиевые сплавы, чугуны и стали, в последние два десятилетия за рубежом ведутся разработки поршней из композитов.

Основные размеры поршня определяются на основе свойств материалов, статических данных о соотношении конструктивных элементов поршня, проведения расчетов его напряженно-деформированного состояния, проверенных экспериментальными исследованиями. При этом особое внимание уделяется определению высоты головки и самого поршня, толщины днища и высоте жарового пояса. От этих параметров конструкции поршня зависят его масса, расположение центра тяжести и, следовательно, условия перекладки в цилиндре, шум и вибрации, температура в зоне канавки первого поршневого кольца, являющаяся причиной снижения её твердости и износостойкости и интенсивного коксования масла, приводящее к залеганию кольца в канавке.

Высота жарового пояса определяет также «мертвый» объем камеры сгорания двигателя и выбросы с отработавшими газами несгоревших углеводородов [2].

Для компенсации теплового расширения направляющей части поршня раньше в поршнях бензиновых двигателей широко использовались горизонтальные и вертикальные разрезы на юбке. Однако форсирование двигателей заставило конструкторов для обеспечения тре-

буемой долговечности отказаться от такого решения проблемы. До последнего времени уменьшение теплового расширения направляющей части поршня достигалось применением стальных терморегулирующих вставок, но стремление уменьшить массу поршня привело к снижению выпуска таких поршней. В настоящее время основным способом компенсации и учета значительного расширения направляющей части поршня является оптимизация её геометрической формы – овалльно-бочкообразного профиля [3]. Особенно остро эта проблема встает при проектировании поршней бензиновых двигателей, работающих в цилиндре с минимальными зазорами в условиях, когда тепловое расширение юбки превышает тепловое расширение цилиндра и монтажный зазор между ними, то есть при возникновении упругих деформаций юбки [4]. Ещё больше эта проблема усугубляется в настоящее время при использовании «жестких» коротких поршней с уменьшенной поверхностью трения. Ошибка в выборе профиля при этом может привести к задирам цилиндра-поршневой группы.

Широкое распространение получили поршни из сплавов алюминия, легированных кремнием, с содержанием последнего 11 – 13 % (эвтектические сплавы) и 17 – 23 % (заэвтектические сплавы). Основными достоинствами алюминиевых сплавов перед другими металлами являются: малая плотность материала, высокая теплопроводность и удовлетворительные трибологические характеристики. При этом очевидные недостатки поршней, изготовленных из освоенных промышленностью алюминиевых сплавов, такие как: значительное снижение прочностных характеристик при высоких температурах, высокий коэффициент теплового расширения и низкая износостойкость, преодолеваются за счет конструкционных и технологических мероприятий. К ним относятся:

- разработка специальных сплавов с добавлением компонентов, улучшающих прочностные характеристики при высоких температурах и уменьшающих тепловое расширение;
- использование специальных технологий изготовления заготовок поршней: литьё под давлением, изотермическая и «жидкая» штамповка для эвтектических сплавов и изотермическая штамповка (ковка) для заэвтектических сплавов, в том числе гранулированных.

Необходимо отметить, что возможности традиционных поршневых сплавов уже не удовлетворяют производителей ДВС, сконцентрировавших свои усилия на повышении износостойкости, термической и механической прочности, снижении потерь на трении, снижении массы поршня [2].

Так, для уменьшения износа канавки первого компрессионного кольца используются специальные вставки из чугуна и других материалов, уменьшающих износ в паре трения: поршень – компрессионное кольцо.

Большое внимание уделяется использованию различных покрытий. Направляющую часть поршня покрывают тонким, в несколько мкм, слоем свинца, олова или цинка для предохранения поверхности поршня от задира в условиях ухудшения смазки на отдельных режимах работы. Широко используются покрытия графитом со специальным наполнителем, обеспечивающим прочное сцепление со стенкой направляющей части. Такое покрытие существенно увеличивает износостойкость поршня.

Для упрочнения верхней канавки под компрессионное кольцо всё чаще вместо вставок используют износостойкое покрытие. Обычно такое покрытие делается по огневой поверхности днища поршня, охватывает жаровой пояс и первую канавку по всему периметру. Покрытие имеет толщину 40 – 120 мкм, образуется в результате твердого анодирования, т.е. термохимического преобразования верхнего слоя алюминиевого сплава в твердую керамику (окись алюминия  $Al_2O_3$ ). В бензиновых двигателях с наддувом данное покрытие защищает поршень от разрушения при появлении детонационного сгорания.

Проводимые мероприятия позволили разработать надёжные конструкции поршней из алюминиевых сплавов, обеспечивающие экологические нормы и удовлетворительную экономичность двигателя.

Однако вышеперечисленные недостатки алюминиевых сплавов, несмотря на все проводимые конструктивные мероприятия, ограничивают дальнейшее улучшение основных параметров двигателя.

Концентрация усилий производителей двигателей на повышение термической и механической прочности поршней и за счёт этого достижение снижения их массы, уменьшения поверхностей трения и, следовательно, механических потерь привело к разработке композиционных материалов, в которых матрица – алюминиевый сплав – упрочняется оксидными керамическими волокнами  $Al_2O_3$ , или  $Al_2O_3+SO_2$ , или нитевидными кристаллами карбида кремния SiC. Армирование керамическими волокнами улучшает механические характеристики: прочность, предел текучести базового алюминиевого сплава, особенно при повышенных температурах, снижает коэффициент линейного температурного расширения, повышает износостойкость.

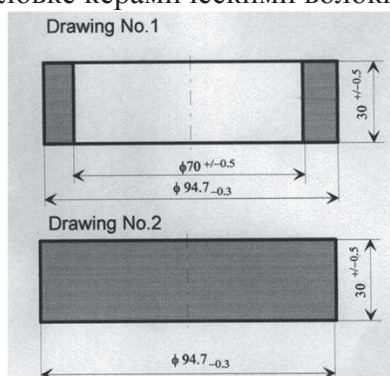
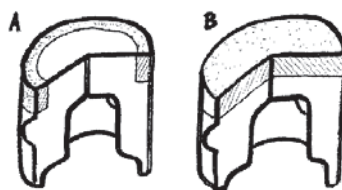
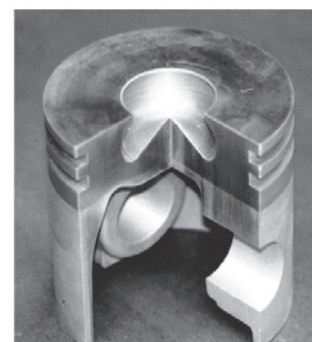
Характеристики материалов [5] представлены в таблице 1.

Таблица 1

**Характеристики материалов поршня**

Параметр	Композит АК12/22% $Al_2O_3$	Силумин АК12
Плотность, г/см <sup>3</sup>	2.711	2.721
Электропроводность, МСм/м	11.5-11.8	18.0-19.0
Теплопроводность, Вт/м·К	90.5	150.5
Коэффициент теплового расширения, $\times 10^{-6}/K$	18.51	21.86
Модуль Юнга, ГПа	90-94	73-75
Прочность на разрыв, МПа	330-345	310-320
Твердость, НВ	175-190	120-130
Предел текучести, $[Н/м^2] \times 10^8$	2.89	2.25
Удельная теплоемкость, Дж/кг·К	1010	960
Коэффициент Пуассона, [-]	0.22	0.28

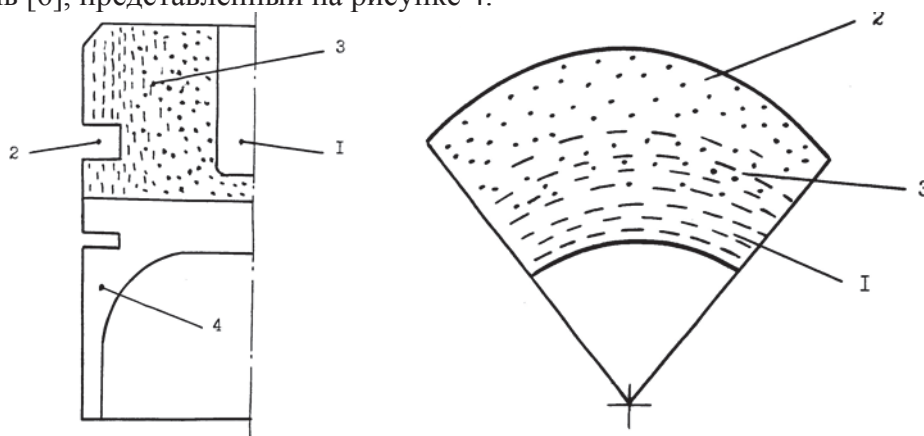
Наиболее нагруженной частью поршня является его головка. Требование обеспечения долговечности поршня при совместном действии механических нагрузок от сил давления газов и термических нагрузок, обусловленных высоким уровнем температур, привело к разработке составных поршней, у которых головка выполнена из стали, а юбка поршня – из алюминиевого сплава (поршни дизельных двигателей ELKO, Cummins). Однако лучшим техническим решением этой проблемы является конструкция поршня, армированного в головке керамическими волокнами [5] (рисунки 1, 2, 3).

**Рисунок 1. Чертежи вставок****Рисунок 2. Поршни с различными вариантами вставок****Рисунок 3. Конструкция поршня, армированного в головке керамическими волокнами**

Исследования [5] показали, что использование составных поршней (за счет уменьшения боковых зазоров алюминиевой юбки) позволяет снизить уровень шума, выброс токсичных веществ, увеличить среднюю температуру рабочего процесса, что позволяет повысить эффективность турбонаддува.

Физико-механические свойства композиционных материалов определяются свойствами алюминиевого сплава и применяемых керамических частиц, размерами и процентным содержанием частиц в композиционном материале. В результате варьирования матричным сплавом, типом упрочнителя, размерами и количеством частиц, вводимых в матричный сплав, возможно изменять свойства композиционного материала в достаточно широких пределах. При этом представляется возможным добиваться получения комплексных свойств композиционного материала, приближенных к необходимым, для поршней ДВС различного исполнения (с искровым зажиганием и дизельных) с различным уровнем форсирования надежности и ресурса. Причем физико-механические свойства композиционных материалов могут быть как изотропными, так и анизотропными за счёт изменения направления ориентации армирующих волокон.

Примером конструкции составного поршня с анизотропными свойствами может служить поршень [6], представленный на рисунке 4.



**Рисунок 4. Условное сечение поршня (слева); схема конструкции армирующего элемента (справа): 1 - камера сгорания, 2 - канавка под компрессионное кольцо, 3 - композиционная головка, состоящая из композиционного материала, 4 - юбка поршня**

Недостатком данных технических решений в применении к деталям, работающим в условиях термоциклического нагружения, является различие в коэффициентах линейного температурного расширения материалов поршня и зон, армированных керамическими волокнами с малой теплопроводностью ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  или  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{SO}_2$ ). Установлено, что в связи с разницей в коэффициентах линейного температурного расширения материала, армированного керамическими волокнами, и базового алюминиевого сплава в результате термоциклического режима нагружения поршня на границе раздела композиционного материала и базового алюминиевого сплава возникают касательные напряжения, превышающие пределы текучести как базового сплава, так и композиционного материала при рабочих температурах поршня. Это приводит к возникновению трещин на границе раздела материалов и разрушению поршня. В данных исследованиях это имело место при объёмном содержании керамических волокон более 10%. Такое ограничение по количеству вводимого в поршневой сплав упрочнителя накладывает соответствующие ограничения на свойства получаемого композиционного материала.

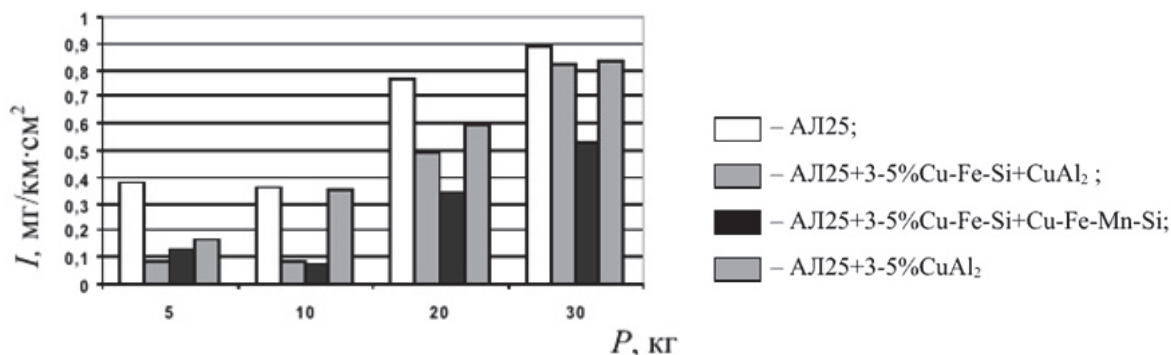
Перейдем к рассмотрению поршней, выполненных полностью из композитного материала.

Всё более широкое применение в автомобилестроении находят литые композиционные материалы системы  $\text{Al} - \text{Si/SiC}$  [7], отличающиеся повышенной износостойкостью, высоким сопротивлением к зарождению трещин, более низким коэффициентом теплового расширения, улучшением прочностных показателей, теплостойкостью. Сдерживает распространение данных материалов усложнение технологии и соответствующее удорожание производства. Авторами статьи [7] разработана технология с использованием метода композиционного литья *in situ* (армирование матричного сплава выделившимися спонтанно в процессе кристаллизации фазами) и для снижения себестоимости используется замешивание в расплав (*in* –



vitro) недорогих и недефицитных армирующих добавок.

Например, получены литые композиционные материалы на основе сплава АК12 при замешивании в алюминиевый расплав неметаллических частиц с существенным уменьшением температурного коэффициента линейного расширения ( $\alpha$  сплава АК25 -  $22 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ , композиционного материала на основе АК25 -  $16 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ ). Существенно повышается и износостойкость разработанных сплавов. На рисунке 5 представлены результаты исследования.



**Рисунок 5. Зависимость износостойкости исходного алюминиевого сплава и композитов на его основе от нагрузки в условиях трения со смазкой, скорость скольжения 2 м/с**

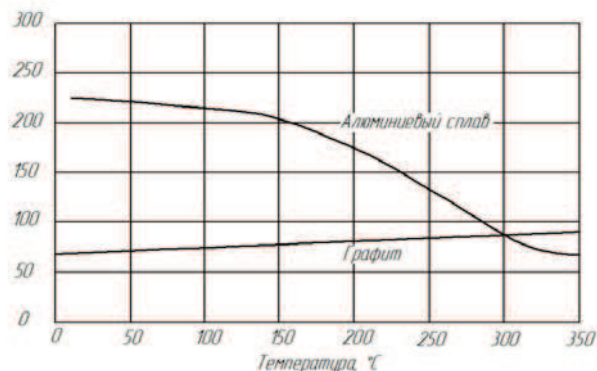
Авторы делают вывод, что применение дешевых армирующих элементов взамен дорогостоящих керамических и борных волокон, частиц карбида кремния позволит существенно снизить стоимость композиционных материалов на основе алюминиевых сплавов, сделать их более доступными для массового производства [7].

В 80-е годы начались исследования возможности использования углерод-углеродного материалов для поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [8, 9]. Данный класс материалов был разработан в начале 1960-х годов для авиакосмической техники. Уникальные свойства этого класса материалов, к уже перечисленным общим достоинствам всех композиционных материалов, дополняются в зависимости от поставленных задач отличными фрикционными или антифрикционными свойствами, что позволяет осуществить подбор композиции и технологии.

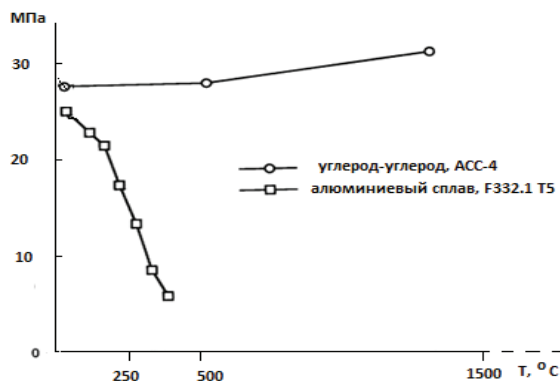
Прочность на растяжение углерод-углеродных композитов зависит от состава и структуры матрицы, а также технологии. Но даже у многих графитовых материалов «малая» прочность на растяжение при комнатной температуре компенсируется тем, что в отличие от алюминиевого сплава, прочность которого с возрастанием температуры значительно снижается, прочность у углерод-углеродных материалов возрастает, и при температуре на режиме полной нагрузки предел прочности выше, чем у алюминиевого сплава [9] (рисунок 6).

Специальные углерод-углеродные композиции превосходят алюминиевые сплавы во всем температурном диапазоне [8] (рисунок 7).

Предел прочности, МПа



**Рисунок 6. Предел прочности на разрыв алюминиевого сплава и графита**



**Рисунок 7. Предел прочности на разрыв алюминиевого сплава F332.1 T5 и углерод-углеродного композита АСС-4**

В статье [9] приводятся результаты испытаний с поршнями из углерод-углеродного материала, которые показали хорошие результаты прежде всего по составу отработавших газов: снижение углеводородов (CH) на 20%, окиси углерода (CO) на 30% и оксидов азота (NO<sub>x</sub>) на 3%, а также снижение масла на угар на 44% и улучшение экономичности на 3%. Результаты показывают перспективность использования данного материала для ДВС.

Максимальные возможности от использования углерод-углеродного материала можно будет достичь только при комплексном проектировании всех деталей цилиндропоршневой группы, колец и гильзы цилиндра. Установка поршня в гильзу, изготовленных из одного материала, позволит обеспечить минимальные монтажные зазоры, уменьшить количество поршневых колец и, возможно, полностью отказаться от их использования, а с учетом отличных антифрикционных качеств данного материала это позволит существенно снизить уровень шума и механические потери.

Оптимизация конструкции поршня и поршневого пальца на основе расчетно-экспериментальных исследований позволит уменьшить массу, что также будет способствовать улучшению показателей двигателя, а повышение общего уровня температур увеличит индикаторные показатели и, следовательно, эффективные показатели двигателя.

Разработка методов влияния на свойства материалов в зависимости от его состава, строение компонентов и технологии изготовления позволит создавать конструкции, максимально учитывающие особенности работы поршня в двигателе. Например, изменение теплопроводности поршня позволит изменять температуры днища поршня. Для двигателей с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия [10, 11] требуется увеличение максимальных температур днища поршня для улучшения смесеобразования, а в бензиновых двигателях для обеспечения бездетонационной работы необходимо ограничивать максимальные температуры.

Производство углеродных поршней освоено в Германии (компания SCHUNK) и в США (компания SGL) для специальных ДВС и ДВС спортивного назначения.

В основе технологий изготовления углеродных поршней лежит прессование углеродного порошкового сырья со специальными ингредиентами и высокотемпературная карбонизация. В основе матричной структуры материала лежит получение мезофазной системы углерод-углеродной композиции.

На настоящий момент препятствием массового применения углеродных композитов в ДВС является высокая стоимость.

Таблица 2

**Сравнительные данные по физико-механическим показателям углеродных материалов (фирма «SCHUNK») и керамикоподобных композиций разработанных ООО «РЕАМ-РТИ»**

Показатель \ Модель	SCHUNK FU 4270	SCHUNK FU 2451	Поршень ООО «РЕАМ-РТИ»
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,8	1,9	1,0-1,3
Предельная прочность, МПа			
- на растяжение	-	-	40-54
- на сжатие	150	250	250-300
- на изгиб	80-100	100-120	80-118

В нашей стране ведутся работы по созданию новой технологии конструкционных материалов. Так, например, фирма ООО «РЕАМ-РТИ» освоила новый способ получения конструкционного материала с керамикоподобными свойствами. Данный материал представляет собой твердую композицию, который содержит углеродные наполнители, прошедшие специальную термическую обработку. По своей природе он напоминает органическую керамику. Данный материал обладает высокими прочностными характеристиками, твердостью, высо-

кими значениями износостойкости, термостойкостью и может быть пригоден для изготовления поршней для ДВС.

Некоторые сравнительные физико-механические характеристики керамикоподобного материала ООО «РЕАМ-РТИ» с материалами фирмы «SCHUNK» (производитель углеродных поршней) приведены в таблице 2.

На рисунке 8 показан образец поршня из углеродного материала Карбул, выполненный по заказу ФГУП «ЦИАМ» для авиационного ДВС (по технологии ООО «РЕАМ-РТИ»), механическая обработка проведена в Московском государственном машиностроительном университете (МАМИ) ООО «НПП «Автотехнология-МАМИ»



**Рисунок 8. Поршень из углеродного материала Карбул  
(технология ООО «РЕАМ-РТИ»)**

Дальнейшие работы в этом направлении представляются весьма перспективными, так как производители углеродных поршней по результатам испытаний и эксплуатации бензиновых и дизельных двигателей приводят следующие аргументы в пользу углеродных конструкций [8, 12-15]:

- значительное сокращение выбросов с отработавшими газами:  $\text{HC} > 40\%$ ,  $\text{CO} > 50\%$ ,  $\text{NO}_x > 12\%$ ;
- снижение расхода топлива: на 3 - 8%;
- сокращение потребления масла на угар: на 40 - 55%;
- низкая плотность:  $1.5 - 2.2 \text{ г/см}^3$  (снижение веса поршня на 10 - 20%, уменьшение момента инерции на 30 - 40%);
- низкий коэффициент теплового расширения:  $5 - 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , а следовательно, обеспечение минимального зазора в сопряжении юбка поршня - цилиндр при высоких тепловых нагрузках;
- уменьшение прорыва картерных газов;
- увеличение степени сжатия примерно на 10%;
- увеличение механической прочности при повышении температуры: 2 - 5% при  $400^\circ\text{C}$ ;
- обеспечивается прочность:
  - 90 - 110 МПа: для малофорсированных двигателей: малой мощности двухтактные и четырехтактные двигатели, газонокосилки, бензопилы, мотоциклы, скутеры и др.,
  - 110 - 130 МПа: для средненагруженных двигателей: четырехтактные двигатели с искровым зажиганием и дизельные двигатели, легковые автомобили, мотоциклы, лодочные моторы, стационарные двигатели,
  - 130 - 160 МПа: для высоконагруженных двигателей: четырехтактные двигате-

ли с искровым зажиганием и дизельные двигатели с турбонагнетателем и прямым впрыском топлива;

- постоянная твердость HRB = 90 – 125 во всем диапазоне температур;
- высокое сопротивление изнашиванию на всех активно трущихся поверхностях;
- постоянно обеспечивается сохранение трибосвойств: коэффициент трения при смазке от 0.01 до 0.03, коэффициент трения при ограниченной смазке от 0.04 до 0.07; не подвергается схватыванию, задирам;
- хорошая адгезия смазочного масла на поверхности;
- высокая стабильность размеров;
- возможность изменять теплопроводность в широких пределах от 35 до 120 Вт /м·К;
- обеспечивает идеальные условия для поршней с «изоляционным эффектом», особенно в дизельных двигателях и в двигателях с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия;
- высокая коррозионная стойкость: нет отложений за счет агрессивных или электролитических процессов при остановках двигателя

#### Литература

1. Материалы для карбюраторных двигателей: справочное пособие / А.В. Лакедемонский [и др.]; под ред. А.В. Лакедемонского. – М.: Машиностроение, 1969. – 223 с.
2. Поршень двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2116487 РФ: МПК F02F3/00. / Бураков Ю.В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Акционерное общество закрытого типа «ТЕТРА». – № 97105205/06; заявл. 04.04.1997; опубл. 27.07.1998.
3. Профилирование юбок поршней / Б.Я. Гинцбург [и др.]. М.: Машиностроение, 1973. 89 с.
4. Костров А.В. Особенности конструкции поршня бензиновых ДВС / А.В. Костров, А.Р. Макаров, С.В. Смирнов // Автомобильная промышленность. 1987. №4. с. 8-10.
5. 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
6. Поршень двигателя внутреннего сгорания [Текст]: пат. 2015388 РФ: МПК F02F3/26. / Карнаухов Б.Г. [и др.]; заявитель Научно-исследовательский институт автотракторных материалов Научно-производственного объединения «Автопромматериалы»; патентообладатель Хаюров Сергей Сергеевич. – № 4950332/06; заявл. 27.06.1991; опубл. 30.06.1994.
7. Литые композиционные материалы на основе алюминиевого сплава для автомобилестроения / Е.В. Миронова [и др.] // Вестник ХГАДТУ. – 2006. № 33. с.20-22.
8. Gorton M.P. Carbon-carbon piston development [Электронный ресурс] // NASA. – 1994. – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/2060/19940031440>
9. Heuer J.L. Development and testing of carbon pistons [Электронный ресурс] // ACS Fuels. – 1991. – 36 (3) – pp.1088 – 1093. – Режим доступа: <https://web.anl.gov/PCS/acsfuel/preprint%20archive/Files/Volumes/Vol36-3.pdf>
10. Камалгдинов, В.Г. Влияние температуры огневой поверхности цилиндра на процесс сгорания и показатели рабочего цикла HCCI – двигателя / В.Г. Камалгдинов, В.А. Марков // Грузовик. – 2010. № 12. с. 38-47.
11. Двигатель, работающий с самовоспламенением гомогенной смеси от сжатия (HCCI – процесс) / А.В. Костюков [и др.] // Автомобильная промышленность. – 2012. № 6. с. 11-12.
12. Bäumel F. Werkstoffgerechte Auslegung und Festigkeitsnachweis für Verbrennungsmotorkolben aus Mesophasenkohlenstoff, 2001.
13. Afify E. M., Roberts W. L. Durability, performance, and emission of diesel engines using carbon fiber piston and liner [Электронный ресурс] // NASA. – 1999. – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/2060/19990080052>
14. Liberatore A.J. Spark-Ignited Heavy Fuel, Part Deux [Электронный ресурс] // EAA Experimenter. – December 2009. – Режим доступа: <http://hdl.handle.net/2060/19990080052>
15. Schmidt J., Moergenthaler K.D., Brehler K.-P., Arndt J. High-strength graphites for carbon piston applications // Carbon. — 1998. — 36 (7) — pp. 1079-1084.