

Таблица 2. Исходные параметры сопряжения цилиндр-поршень КФГ-14

Детали сопряжения	Диаметр, мм	Зазор в сопряжении, мкм
Цилиндр 1 Поршень 1	50,022 49,993	29
Цилиндр 2 Поршень 2	50,015 49,986	29
Цилиндр 3 Поршень 3	50,018 49,990	28
Цилиндр 4 Поршень 4	50,020 49,992	28

Таблица 3. Изменение зазоров в сопряжениях на различных режимах работы кондиционера

Режимы	Зазор в сопряжении, мкм	Температуры поверхности трения цилиндра, К.
1	31	329
2	30	303
3	28	278
4	27	276

### Заключение

Расчетные зависимости, используемые при назначении допусков и зазоров цилиндропоршневого сопряжения надежны.

Необходимы углубленные исследования пусковых износов циклически работающих компрессоров.

### Список литературы:

1. Solovyov S.N. Tribotechnology is a new trend of improved quality and reliability of mechanical systems / S.N. Solovyov // 3rd International Tribology Congress, Warszawa, Poland, 1981, vol. IV A. – P. 221-224.
2. Соловьев С.Н. Триботехнологические принципы создания долговечной техники / С.Н. Соловьев // Трение, износ и смазочные материалы : тр. междунауч. конф. – Ташкент: ФАН, 1985. – Т. 3.4.2. – С. 67-72.
3. Чихос Х. Системный анализ в триботехнике : монография / Х. Чихос. – М.: Мир, 1982. – 351 с.
4. Прогнозирование надежности трибосистем, работающих в экстремальных условиях / С.Н. Соловьев // Проблемы трибологии. – 2003. – № 2. – С. 27-34.
5. Соловьев С.Н. Исследование работоспособности герметичного холодильного компрессора на неустановившихся режимах «влажного холода» / С.Н. Соловьев, Н.П. Стрижак, С.Н. Блиндер // Повышение эффективности и совершенствование компрессорных машин и установок : тр. V Всесоюзной науч.-техн. конф. по компрессоростроению. – М., 1978. – С. 137-139.
6. Соловьев С.Н. Экспериментальные исследования работоспособности узлов трения компрессоров / С.Н. Соловьев, Н.П. Стрижак // Трение и смазка в машинах: тр. Всесоюзной науч.-техн. конф., Челябинск, Транспорт, 1983. – С. 121-125.
7. Стрижак Н.П. Исследование влияния цикличности на интенсивность изнашивания узлов трения герметичных компрессоров / Н.П. Стрижак // Надежность судовых машин: сб. науч. тр. / М-во образования и науки Украины, Николаевский кораблестроительный институт им. адм. С.О. Макарова. – Николаев, 1985. Вып. 141 (2) – С. 25-36.
8. Соловьев С.Н., Модернизированный стенд для моделирования рабочих условий и диагностики пар трения герметичных поршневых компрессоров / С.Н. Соловьев, Н.П. Стрижак // Оптимизация конструкции и моделирование процессов поршневых и центробежных компрессоров высокого давления : тез. докл. всесоюз. научн.-техн. семинара. – М., 1988. – С. 19-21.
9. Кавахара М. Герметичные холодильные компрессоры / М. Кавахара // Рэпто кумё кидзюцу. – 1970. – № 248. – С. 11-21.

УДК 621.436: 621.74

**С.Б.Таран, инж., О.В. Акимов, д-р техн. наук, А.П. Марченко, д-р техн. наук**

## РЕАЛЬНЫЕ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ ДЛЯ ПОРШНЕЙ ВЫСОКОФОРСИРОВАННЫХ ДВС

В Харьковском национальном техническом университете (НТУ «ХПИ») в течение многих лет ведутся конструкторско-технологические разработки и научные исследования поршней для высокофорсированных дизелей. Были разработаны, изготовлены и испытаны на двигателях серии СМД оригинальные конструкции составных и цельнолитых чугунных поршней. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования высокопрочного чугуна с вермикулярным графитом (ВЧВГ) как материала высокофорсированных поршней ДВС. [1,2].

Безусловно, при применении вместо алюминиевых сплавов других материалов необходимо тщательно изучать требования, предъявляемые к материалу поршня для работы в условиях сложного термоциклического нагружения.

Известно, что поршневой материал должен обладать достаточной прочностью при рабочих температурах, износостойчивостью, жаростойкостью, малой плотностью, невысоким коэффициентом линейного расширения, хорошей теплопроводностью и т.д. Практически всем этим требованиям одновременно не может удовлетворять ни один из

существующих поршневых материалов. Поэтому выбор того или иного сплава должен производиться с учетом условий эксплуатации дизеля, степени его форсирования, размеров и конструкции поршня, т.е. необходимо обеспечивать основные требования к материалу поршня, зачастую в ущерб другим, менее важным для данной конструкции.

Следует отметить, что срок службы поршней форсированных дизелей лимитируются не только образованием трещин термической усталости, а также износом канавок уплотнительных колец и тронковой части поршня. Поэтому для обеспечения длительной работы поршня следует принимать меры по повышению антифрикционных свойств и износостойкости поршневых сплавов.

По мере повышения механических и термических нагрузок на поршни и увеличения срока их службы более отчетливыми становятся ограниченные возможности некоторых традиционных конструкций поршней и применяемых для них материалов. Так, при цилиндровой мощности 300 кВт на дизелях используют поршни из алюминиевых сплавов с охлаждением. Согласно экспериментам такие поршни можно применять до средних эффективных давлений 1,5 – 1,6 МПа, а при цилиндровой мощности свыше 370 кВт уже необходимы поршни из других материалов, выдерживающих более высокие температуры и давления. Увеличение степени форсирования двигателя до значений среднего эффективного давления  $p_e = 2,5$  МПа и максимального давления сгорания  $p_z = 15-20$  МПа (для высокофорсированных дизелей) приводит к повышению температуры поршня до 500°C и более. Алюминиевые поршни в таких условиях работать не могут. Поэтому важной задачей является выбор альтернативного материала поршня. Повышение долговечности и надежности поршней с точки зрения выбора сплава для их изготовления, может осуществляться по нескольким направлениям:

- улучшение свойств алюминиевых сплавов;
- замена алюминиевых сплавов сталью или высококачественными чугунами, которые отличаются повышенными механическими, специальными и технологическими свойствами;
- применение составных поршней.

До настоящего времени наибольшее распространение получили поршни из алюминийкремниевых сплавов. Эти сплавы имеют ряд преимуществ: малая плотность, высокая теплопроводность, хорошие литейные свойства и обрабатываемость.

Однако они имеют ограниченную прочность, особенно при температуре выше 200°C, а также недостаточную износостойкость. В форсированных же двигателях резко повышаются рабочие температуры и давления на поршневые кольца. Под действием циклических изменений температур и давлений газов в цилиндре, в поршне возникают переменные термические и механические напряжения. Они и являются причиной образования радиальных трещин на кромках камеры сгорания, длина которых увеличивается со временем, приводя поршень к аварийному состоянию. Этот дефект, а также износ канавок под поршневые кольца лимитируют общую долговечность алюминиевых поршней, лишь некоторое увеличение долговечности может быть достигнуто за счет повышения свойств применяемых новых алюминиевых сплавов.

В высокофорсированных дизелях применение алюминиевых сплавов для поршней вообще проблематично ввиду высоких рабочих температур, приближающихся к температуре плавления сплава, и высоких давлений, способствующих резкому увеличению износа канавок под поршневые кольца.

Возникает необходимость замены алюминиевых и применения стальных, составных или чугунных поршней.

Учитывая необычно высокие термические и механические нагрузки, необходимо принимать меры по обеспечению достаточной усталостной прочности поршня. В связи с этим в последние годы развитие получили работы по снижению температур и термических напряжений в поршнях, по повышению их прочности, что привело к разработке новых методов конструирования поршней и новых методик расчета (метод конечных элементов). Очевидно, что выбор исходной конструкции поршня для нового типа двигателя должен основываться на точной оценке пределов его форсирования. С технической точки зрения конструкция поршня должна удовлетворять пяти основным требованиям: обеспечить достаточную прочность, иметь эффективное охлаждение, не являться источником сильного шума, иметь приемлемые массу и размеры, обеспечивать нормальные условия для работы поршневых колец. Допустимая температура наиболее нагретой части поршня зависит от применяемого материала и не должна превышать для поршневых сплавов на алюминиевой основе 300-350 °С, для чугунов 500-550 °С и для жаростойких сталей

600-650 °С. При более высоких температурах усиливается агрессивное химическое воздействие горячих газов и наблюдается снижение прочностных характеристик материала. Для дизеля, уровень форсирования которого составляет  $p_z = 16$  МПа, а  $p_e = 2,0-2,5$  МПа, возникающие термические и механические нагрузки возрастают до значений, при которых надежность работы может обеспечить материал, отличающийся высокими прочностными характеристиками [1]. Его предел прочности должен составлять  $\sigma \geq 210$  МПа.

В последнее время для дизелей со сверхвысоким форсированием  $p_e$  и  $p_z$  возрастают, соответственно, до значений 3,5 МПа и 21 МПа. Такое увеличение среднего эффективного давления и давления сгорания осуществляется применением двухступенчатой системы турбонаддува.

Большое значение при выборе поршневых сплавов имеют показатели их физических свойств. Высокое значение коэффициента линейного расширения приводит к необходимости увеличения зазоров между поршнем и гильзой в «холодном» состоянии. Поэтому его значение находится в пределах  $8-10 \cdot 10^{-6}$  1/град. Кроме того, распределение температур в поршне и уровень термических напряжений определяются величиной коэффициента теплопроводности материала. Ее значение должно быть по возможности больше и составлять  $\lambda \geq 30$  Вт/м град.

Из всего сказанного следует, что к материалу поршней высокофорсированных двигателей, наряду с общими традиционными требованиями (достаточная длительная прочность, твердость, низкий коэффициент термического расширения, повышенная теплопроводность, малая плотность) предъявляется требование высокой термической выносливости, т.е. сопротивляемости термоциклическому воздействию.

Преимуществом алюминиевых сплавов для поршней, безусловно, является их высокая удельная прочность (отношение предела прочности к плотности) и высокая теплопроводность. В то же время алюминиевые сплавы, используемые для поршней дизелей, имеют высокий коэффициент термического расширения  $\alpha = 24 \cdot 10^{-6}$  1/град, что вызывает необходимость увеличения «холодных» зазоров между поршнем и гильзой, приводит к увеличению расхода масла, уровня шума. Низкая их износостойкость, приводит к быстрому изнашиванию канавок под поршневые кольца.

Практика показала, что применяемые в настоящее время алюминиевые сплавы не в состоянии удовлетворять требованиям, предъявляемым к материалу поршня в случае форсирования дизеля, особенно при работе на тяжелом топливе.

Основным направлением увеличения надежности и долговечности поршней из алюминиевых сплавов являются работы по повышению прочностных характеристик и упрочнению канавок для поршневых колец путем плазменного переплава, а также применение специальных покрытий, снижающих износ.

Для высокофорсированных дизелей применяются составные поршни, в которых днище изготовлено из более прочного материала (стали или чугуна). Такое решение позволяет обеспечить высокую жаропрочность и стойкость днища поршня при сохранении хороших антифрикционных свойств тронковой части.

К сожалению, составные поршни имеют целый ряд существенных недостатков. Их вес больше, чем алюминиевых, поэтому величина инерционных сил также больше, что приводит к увеличению нагрузок на коренные и шатунные подшипники. Во время работы при больших нагрузках ( $p_e > 2$  МПа) зачастую происходит разрушение тронка поршня. В винтах, скрепляющих тронк с головкой, возникают усталостные деформации. Винты отпускаются и защемляются между выемкой в тронке поршня и втулкой цилиндра, в результате тронк поршня разрушается. Одним из недостатков составных поршней является также их повышенная стоимость.

Последние достижения в области производства тонкостенных отливок из чугуна вызвали повышенный интерес к чугуну, как материалу для поршней [3,4]. Чугун по сравнению с алюминиевыми сплавами имеет более высокие прочность и уровень рабочих температур, что определяет его преимущества. Повышенная твердость обеспечивает меньший износ канавок под поршневые кольца.

Значительно меньшая величина коэффициента линейного расширения чугуна по сравнению с алюминиевыми сплавами, позволяет уменьшить зазор между поршнем и гильзой, тем самым снизить уровень шума двигателя, обеспечить оптимальное прилегание поршня к стенкам чугунной гильзы, а также правильное скольжение. Резко уменьшается опасность удара поршня в холодном состоянии и схватывания в горячем. Кроме того,

циклическая вязкость чугуна значительно больше, чем алюминиевых сплавов, благодаря чему уменьшается скорость распространения трещин усталости. Из всех вариантов повышения надежности и долговечности поршней применение ВЧВГ является наиболее приемлемым и эффективным.

Сравнительные исследования чугунов с различной формой графита (табл. 1) свидетельствуют о лучшем сочетании механических и теплофизических свойств у чугуна с вермикулярным графитом.

Таблица 1. Сравнительные исследования чугунов с различной формой графита

Свойства	Пластинчатый графит	Вермикулярный графит	Шаровидный графит
$\sigma_b$ , МПа при 20° С	250	400	600
при 600° С	140	320	400
$\delta$ , % при 20° С	1,2	3,2	5,0
при 600° С	2,0	4,8	10,0
E, МПа при 20° С	13,9	16,5	17,8
при 600° С	11,5	13,4	14,5
$\lambda$ , 100 Вт/м °С при 20° С	54,0	46,5	33,5
при 600° С	42,0	41,0	25,1
$\alpha$ , 10 <sup>-6</sup> м/м °С при 20° С	10,0	12,0	11,0
при 600° С	12,3	15,0	11,5

Дополнительным резервом повышения свойств ЧВГ может стать применение в качестве материала поршней высокофорсированного ДВС низкокремнистого алюминиевого чугуна системы Fe-C-Al.

К настоящему времени в промышленности применяется более 300 марок чугунов. Они отличаются по химическому составу, свойствам, структуре и технологии получения, но обладают одним общим признаком – все они построены на базе известной системы Fe-C-Si. Использование этой системы обусловлено традиционной технологией переработки железной руды в доменных печах, где основной продукт доменного производства – чугун всегда содержит углерод и кремний, которые являются основными составляющими химического состава.

В начале 70-ых годов прошлого столетия Ю.Г. Бобро показал [5], что чугуны могут быть построены на принципиально новой системе Fe-C-Al, на базе которой можно получить такое же разнообразие чугунов и их свойств, как и для системы Fe-C-Si. Эти чугуны назвали алюминиевыми.

Как показали многочисленные исследования их свойства значительно выше традиционных чугунов. Только вермикулярная форма графита в чугуне может обеспечить ему прочность более 500 МПа. Ощутимо лучшие и другие характеристики алюминиевого чугуна. Именно поэтому в работе уделено особое внимание использованию алюминиевого ВЧВГ при изготовлении монолитных тонкостенных поршней высокофорсированных дизелей.

Проведенные нами исследования термической выносливости алюминиевого ВЧВГ показали рост этого показателя в 2-2,5 раза по сравнению с ЧВГ системы Fe-C-Si.

Технология производства низкокремнистого ЧВГ системы Fe-C-Al может быть легко освоена для производства тонкостенных поршней ДВС.

Таким образом, накопленный опыт конструкторско-технологических разработок по использованию ВЧВГ в качестве материала высокофорсированных дизелей свидетельствует о перспективности изготовления монолитных чугунных поршней. С целью дальнейшего повышения рабочих характеристик ВЧВГ необходимо углубить исследования по оптимальному его легированию, особое внимание следует уделить чугуну системы Fe-C-Al.

#### Список литературы:

1. Варожейнов А.И. Разработка конструкции и исследование теплонапряженного состояния поршней дизеля для энергонасыщенного трактора: Дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / Варожейнов Анатолий Иванович. – Харьков, 1983. – 205 с. 2. Пыльов В.А. Повышение долговечности деталей камеры сгорания быстроходных дизелей: Дис. доктора техн. наук: 05.0503 / Пыльов Владимир Александрович. – Харьков, 1990. – 400с. 3. Балакин В.И. Форсированные дизели / В.И. Балакин, Н.Н. Иванченко, М.Г. Круглова – М.: Машиностроение, 1978. – 360 с. 4. Дзучкоева Р.Б. Перспектива развития материалов и технологии изготовления литых поршней форсированных дизелей / Р.Б. Дзучкоева, М.Д. Никитин // - Энергомашиностроение. – 1976. – № 8. – с. 24-25. 5. Бобро Ю.Г. Алюминиевые чугуны / Ю.Г. Бобро. – Харьков.: ХГУ, 1964. 195 с.