



There is given the analysis of the possibility of change of aluminium piston alloys by high-duty cast iron with globular or vermicular form of graphite.

А. Н. КРУТИЛИН, В. С. ЛОСЬ, Т. В. МАТЮШИНЕЦ, М. В. ОСАДНИК, БНТУ

УДК 621.74.002.6:669.131.7

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ПОРШНЕЙ

Одной из важнейших задач в двигателестроении является увеличение ресурса и продолжительности безотказной работы двигателей. Для повышения надежности и долговечности двигателя необходимо обеспечить надежную работу наиболее ответственных и высоконагруженных деталей, к числу которых относится поршень.

Материал поршня должен иметь высокие прочностные характеристики, термоциклическую стойкость, теплопроводность, низкий коэффициент термического расширения, высокую износо-

стойкость и коррозионную стойкость. В настоящее время в качестве основного материала для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания применяют эвтектические и заэвтектические легированные силумины. Оптимальной считают мелкозернистую структуру с эвтектикой, содержащей кремний размером не более 100 мкм. В табл. 1 приведены физико-механические свойства сплавов АК21М2,5Н2,5 (АК-21) и АК12М2МгН (АЛ-25), определяющие работоспособность поршня [1].

Таблица 1.

| Свойства | Сплав | | | | | |
|---|-------------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | АК21М2,5Н2,5 (АК-21) | АК12М2МгН (АЛ-25) | ЧШГ | | ЧВГ | |
| | | | основа | | основа | |
| | | | феррит | перлит | феррит | перлит |
| Удельный вес γ , т/м ³ | 2,65 | 2,7 | 7,1-7,2 | 7,2-7,3 | 7-7,2 | 7,1-7,3 |
| Предел прочности σ_B , МПа, при: | | | | | | |
| 20 °С | 190 | 215 | 350-550 | 500-800 | 300-400 | 400-550 |
| 300 °С | 118 | 125 | 300-520 | 460-740 | - | - |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа, при: | | | | | | |
| 20 °С | 182 | 205 | 240-380 | 350-650 | 250-350 | 360-480 |
| 300 °С | 113 | 120 | 200-380 | 300-610 | - | - |
| Относительное удлинение δ , % | 0,3-0,5 | 0,3-0,8 | 5-20 | 2-7 | 3-6 | 2-3 |
| Теплопроводность λ , Вт/(м·°С) | 86,6 | 101,5 | 40-46 | 34-42 | 45-55 | 35-45 |
| Коэффициент линейного расширения 10^{-6} , °С ⁻¹ | 17,5 | 21,5 | 10-12 | 11-13 | 11-12 | 12-13 |
| Твердость НВ, МПа | 900-1250 | 900-1250 | 1400-2200 | 2170-2850 | 1500-1800 | 1900-2500 |
| Модуль упругости 10^{-3} , МПа | 8,6 | 7,5 | 150-175 | 175-185 | 145-160 | 160-170 |
| Предел выносливости σ_{-1} , МПа | - | 75-135 | 200-260 | 240-340 | 165-180 | 185-210 |

Большое влияние на свойства получаемых заготовок оказывают технологические особенности их изготовления. Среди технологических процессов изготовления заготовок поршней наибольшее распространение получили литье, жидкая штамповка и обработка заготовки в виде слитка или прутка давлением. В табл. 2 приведены свойства поршневого сплава АК12М2МгН(АЛ-25) в зависимости от способа получения. Представляет интерес способ гранульной технологии, в котором за счет ускоренного охлаждения расплава получают сплав с псевдоэвтектической структурой, состоящей из α -твердого раствора и мелко-

дисперсных кристаллов кремния. Для улучшения свойств в сплав добавляют медь, магний, марганец, железо, цирконий и титан, которые в процессе термической обработки образуют дисперсные упрочняющие фазы типа Mg_2Si , $Cu_2FeAl_6(FeMn)$ и $AlSi(ZrTi)$. За счет более высоких характеристик материала упрощается конструкция поршня (не требуются водоохлаждаемый канал, нирезистовая вставка в зоне первого поршневого кольца и др.); уменьшаются зазоры между юбкой поршня и гильзой, что способствует экономии горючесмазочных материалов, снижению токсичности отработавших газов и т. д. [2].

Таблица 2.

| Метод изготовления | σ_B , МПа | $\sigma_{0,2}$, МПа | δ , % | НВ, МПа | σ_{-1} на базе 10^7 циклов, МПа | $\alpha \cdot 10^{-6}$, $^{\circ}C^{-1}$ |
|-------------------------------------|------------------|----------------------|--------------|----------|--|---|
| Литье в кокиль | 210 | 200 | 0,3 | 950 | 75 | 21 |
| Жидкая штамповка | 250 | 245 | 1 | 1000 | 105 | 20,2 |
| Штамповка из слитка | 330 | 315 | 1,6 | 1000 | 100 | 20 |
| Штамповка из прессованного прутка | 350 | 290 | 3,5 | 1050 | 135 | 19,6 |
| Гранульная технология (сплав 01389) | 250–300 | – | 2–4 | 810–1350 | – | 17,8 |

В процессе эксплуатации поршни испытывают большие механические, тепловые, инерционные нагрузки. Импульсный характер нагружения, обусловленный сменной режимом работы, а также изменение температуры и давления газов в течение рабочего цикла могут привести к значительным деформациям и возникновению напряжений, превышающих предел усталости материала. Циклические напряжения способствуют появлению упругопластических деформаций, которые вызывают образование трещин в зоне кольцевых канавок, в бобышках, на кромке камеры сгорания поршня. Практика показывает, что максимальная температура поршня, изготовленного из алюминиевых сплавов, не должна превышать 300–350 $^{\circ}C$ [3].

На предел усталости алюминиевых сплавов большое влияние оказывают дисперсность структуры, плотность и размер включений, расстояние между включениями упрочняющих фаз. Аналогично усталостной прочности при обработке давлением возрастает термоциклическая стойкость, которая в основном зависит от относительного удлинения материала при высоких температурах. Согласно литературным данным, у доэвтектических легированных силуминов возникновение трещин на кромке литых поршней происходит через 200–300 ч работы, у деформированных поршней — не ранее 1000 ч. Однако деформируемые сплавы имеют более низкую длительную прочность при 300 $^{\circ}C$ по сравнению с литейными поршневыми сплавами и на 20–30% больший коэффициент термического расширения, что требует значительного увеличения зазора между поршнем и стен-

кой цилиндра. Термоциклическая стойкость заэвтектических высококремнистых поршневых силуминов в 2–3 раза меньше по сравнению с эвтектическими. На относительное удлинение отрицательное влияние оказывают первичные кристаллы кремния, которые не растворяются при высоких температурах и играют роль концентраторов напряжений. Термоциклирование оказывает влияние на необратимые изменения размеров поршня, связанные с окислением магния и алюминия в поверхностных слоях поршня. Направленная диффузия магния к поверхности и диффузия атомарного водорода в глубь материала ведут к увеличению объема пор и, в конечном счете, объема поршня. Необходимо обратить внимание и на то, что в процессе работы происходят распад твердого раствора и выделение фаз $CuAl_2$, $MgSi_2$.

К важнейшим характеристикам поршневых сплавов относятся теплопроводность и коэффициент термического расширения. Высокая теплопроводность обеспечивает быстрый отвод теплоты, образующейся при сгорании топлива. Теплопроводность заэвтектических силуминов ниже, чем эвтектических. Коэффициент термического расширения определяет способность материала сохранять размеры в процессе длительной эксплуатации. Увеличение концентрации кремния в алюминиевых сплавах приводит к уменьшению коэффициента термического расширения. Минимальное изменение зазора между гильзой и поршнем возможно, если коэффициенты термического расширения поршневого материала и гильзы цилиндра одинаковы, т. е. если они будут изготовлены из одного и того же материала.

Улучшение качества алюминиевых сплавов возможно за счет объемного, локального и поверхностного упрочнения деталей при использовании композиционных материалов. Армирование высококомодульными керамическими волокнами отдельных зон алюминиевых поршней позволяет значительно снизить массу детали, повысить уровень физико-механических свойств при высоких температурах, уменьшить уровень термических напряжений в поршне и рабочие зазоры сопрягаемых деталей камеры сгорания. Предел текучести армированных материалов в зависимости от температуры испытания и режима термической обработки составляет 35–280 МПа, коэффициент термического расширения – 15,4–21,3 °С⁻¹, теплопроводность – 110–150 Вт/(м·°С) [4, 5].

Однако внедрение в практику машиностроения волокнистых керамических материалов ограничено их дефицитностью и высокой стоимостью.

В связи с форсированием двигателей внутреннего сгорания алюминиевые сплавы уже не в состоянии в полной мере удовлетворять всем требованиям. Наиболее перспективным материалом можно считать высокопрочный чугун с шаровидной или вермикулярной формой графита [6]. Выбор чугуна для использования в качестве альтернативного сплава обусловлен более высокими прочностными характеристиками при повышенных температурах, устойчивостью к росту в процессе эксплуатации. Уровень физико-механических свойств этих чугунов в сопоставлении с алюминиевыми сплавами представлен в табл. 1 [7, 8].

Чугун с шаровидным графитом обладает благоприятным комплексом физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств, среди которых высокое сопротивление усталостному разрушению, ударная вязкость, высокие эксплуатационные характеристики при знакопеременных нагрузках в условиях трения и повышенных температур. В процессе циклических нагрузок высокопрочный чугун упрочняется, что дает дополнительный резерв повышения усталостной прочности и открывает возможность замены с большим экономическим эффектом традиционно применяемых в отрасли алюминиевых сплавов.

Основным сдерживающим фактором является различие в массе алюминиевых и чугунных сплавов, так как масса поршня в значительной мере определяет уровень инерционных сил в кривошипно-шатунном механизме. Однако использование компьютерной техники на современном этапе позволяет оптимизировать конфигурацию поршня исходя из конкретных условий работы при уменьшении его массы.

Прочность и относительное удлинение высокопрочных чугунов с шаровидной и вермикулярной формами графита при температуре до 400 °С практически не изменяются. При повышенных

температурах и длительном нагружении металл вследствие явления ползучести разрушается под действием меньших напряжений, чем при кратковременных испытаниях. Более высокие пластические свойства ферритного чугуна способствуют перераспределению локальных концентраций напряжения равномерно по всей детали, что уменьшает опасность разрушения.

Чугун с вермикулярной формой графита по сравнению с высокопрочным чугуном с шаровидной формой графита при достаточно высоких физико-механических свойствах обладает более высокой теплопроводностью, низкой чувствительностью к скорости охлаждения, что делает его весьма перспективным для деталей, работающих в условиях теплосмен при значительном перепаде температур. Особенностью металлической основы структуры ЧВГ является наличие значительного (70–90 %) количества феррита, который располагается в виде оторочек вокруг графита. В структуре этого чугуна наряду с ВГ всегда имеется до 20% включений ШГ. Благодаря более низкому модулю упругости и несколько лучшей теплопроводности чугун с ВГ лучше ведет себя при перемене температур под нагрузкой.

Модуль упругости для ЧВГ и ЧШГ всех составов с повышением температуры постепенно снижается, на его величину основное влияние оказывает степень локализации включений графита, которая при шаровидной форме максимальна. Чугуны с шаровидной формой графита имеют относительно большой модуль упругости, что ведет к большим напряжениям, которые превышают условный предел текучести и тем самым способствуют короблению и деформации детали. Несмотря на то что большое влияние на уровень прочностных свойств оказывают количество и форма включений графита, определяющим фактором является металлическая основа высокопрочного чугуна. Кроме того, на пластические и прочностные характеристики высокопрочного чугуна оказывают влияние неметаллические включения в зоне вокруг графита. Важно, что одновременно со сфероидизацией графита в процессе модифицирования расплава происходят процессы рафинирования, десульфурации и дефосфорации.

Учитывая, что графитные включения не связаны между собой, высокопрочный чугун хорошо противостоит внутреннему окислению. Длительное постоянство объема и свойств в диапазоне температур до 450 °С достигается при изготовлении деталей из высокопрочного чугуна с ферритной структурой. Реакция железа и примесей с кислородом или окисляющими газами ведет к образованию окалина из продуктов окисления Fe, Si, а также примесей и легирующих элементов при температурах выше 550 °С. В диапазоне температур 250–400 °С этим фактором можно пренебречь, так как температура нагрева поршня в

зоне соприкосновения с продуктами сгорания топлива, очевидно, не будет превышать 500°C.

Различные части поршня работают в различных условиях. В связи с этим представляет интерес обеспечение стабильного получения отливок с заданными дифференцированными по высоте структурой и свойствами. Перлитные чугуны с шаровидной формой графита рекомендуется применять только до тех пор, пока в процессе эксплуатации не происходит распад связанного углерода, что приводит к увеличению размеров до 1,5 %. Распад перлита значительно ускоряется под воздействием динамических нагрузок. Наличие в структуре цементита необходимо исключить, так как теоретически 0,1 % связанного в цементит углерода вызывает при распаде увеличение объема ~ 0,18 %. Элементы, увеличивающие стабильность перлита и упрочняющие феррит, положительно влияют на свойства высокопрочного чугуна при длительных нагрузках.

Одним из наиболее чувствительных к изменению структуры свойств чугуна является теплопроводность, что особенно важно при производстве отливок, работающих в условиях термоциклирования. В связи с локализацией включений графита у чугуна с вермикулярной формой графита теплопроводность близка к чугуну с шаровидной формой графита. С точки зрения теплопроводности, термостойкости и ростоустойчивости предпочтительной является ферритная структура [9].

Таким образом, высокопрочный чугун с шаровидной и вермикулярной формами графита, обладая хорошими физико-механическими, тех-

нологическими и эксплуатационными свойствами, вполне может использоваться в качестве замены алюминиевым сплавам, используемым для изготовления поршней в дизельных двигателях. Решение этой проблемы возможно при тесном сотрудничестве литейщиков и конструкторов, так как работа должна идти не только по пути создания оптимальной конфигурации поршня, но и технологичной с точки зрения литейного производства конструкции.

Литература

1. Зильберг Ю. А., Хрушова К. М., Гершман Г. Б. Алюминиевые сплавы в тракторостроении. М.: Машиностроение, 1971.
2. Шмаков Ю. В. Новый поршневой сплав // Автомоб. пром-сть. 1999. № 12. С. 29–31.
3. Повышение надежности поршня дизеля с воздушным охлаждением / А. Н. Гоц, В. К. Фомин, С. В. Папонов, Б. К. Балюк // Двигателестроение. 1988. № 10. С. 40–42.
4. Состояние и перспективы совершенствования композиционных материалов на основе поршневых силуминов / Е. Б. Бендовский, В. Н. Платонов, А. Н. Шалай, В. М. Попов // Двигателестроение. 1991. № 10–11. С. 57–60.
5. Гершман Г. Б., Ротенберг В. А., Бурхина А. Н. Основные направления совершенствования литейных алюминиевых сплавов для отечественных деталей двигателей и тракторов. М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1978.
6. S y k o g a P. Pouziti tvazne litiny pro vyrobu pistu a dalsich soucasti pracujicich za zvyšenych teplot. // Techn. Sb. VU CKD. 1977. N 33–34. С. 72–82.
7. Попов В. М., Коган Б. Л. Теплофизические свойства чугунов с различной формой графита // Литейное производство. 1990. № 5. С. 4–6.
8. Горенко В. Г., Компаниченко В. М. Уруго-пластические свойства высокопрочного чугуна в интервале 20–800°C // Литейное производство. 1976. № 8. С. 14–15.
9. Попов В. М., Коган Б. Л. Теплофизические свойства чугунов с различной формой графита // Литейное производство. 1990. № 5. С. 4–6.