

ЖАРОПРОЧНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ С НИЗКИМ ТЕМПЕРАТУРНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ЛИНЕЙНОГО РАСШИРЕНИЯ

Архипов И.В., Шалунов Е.П.

ФГБОУ ВПО «Чувашский государственный университет имени И.Н.Ульянова»,
г. Чебоксары, Россия,
arhipov_i@mail.ru

Многие детали в машиностроении, работающие при повышенных температурах, сопрягаются по посадкам с другими изделиями, в следствии чего для нормальной и безотказной работы они должны иметь малый температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). К таким деталям можно отнести поршни двигателя внутреннего сгорания, подшипники скольжения, направляющие втулки и др.

В тяжело нагруженных двигателях внутреннего сгорания (ДВС), когда среднее давление составляет 1,5...1,8 МПа и более, поршни изготавливают составными [1,2]. В этом случае для повышения термостойкости донной части поршня, где у высокофорсированных дизелей температура может достигать до 350...450°C, эту часть армируют вставкой из жаропрочного материала, например, из жаропрочной стали или чугуна. Однако, это значительно увеличивает массу поршня и усложняет его конструкцию, так как в нее вводятся новые элементы крепления, тоже имеющие массу, и, тем самым, повышаются инерционные нагрузки на шатунно-поршневую группу ДВС.

После появления легких жаропрочных и износостойких нанокompозитов на основе алюминия возникла возможность армировать донную часть поршней вставками из таких материалов. Известны составные поршни, днище которых армировалось вставкой из металллокерамического материала на основе алюминия с наполнением в виде тонкодисперсных частиц SiC, но важной проблемой, по мнению авторов [3], является равномерность распределения SiC в объеме алюминиевой матрицы и прочность связи армирующих частиц, имеющих незначительную площадь контакта. Также есть зарубежный опыт немецкой компании MTU AG, когда вставка из жаропрочного алюминиевого композиционного материала приваривается к днищу поршня из алюминиевого сплава при помощи электронно-лучевой сварки в вакууме.

В работе [4] вставка для донной части составного поршня выполнена из разработанного жаропрочного нанокompозиционного материала системы Al-C-O с содержанием в его исходном составе 4,0 %масс. углерода. Этот материал был получен с использованием метода реакционного механического легирования в атриторе и технологий порошковой и гранульной металлургии. Его субзернистая структура с механохимически синтезированными упрочняющими фазами Al_4C_3 и Al_2O_3 со средним размером частиц 40 нм обеспечили материалу высокие показатели предела прочности при растяжении не только в условиях нормальной температуры (500...520 МПа), но, главное, при температуре 350°C – 200...210 МПа. Соединение армирующей вставки, отштампованной из прутка этого материала, с донной частью поршня из литейного алюминиевого сплава АЛ25 осуществлялось по диффузионному механизму во время получения поршня методом литья с кристаллизацией под давлением. При этом ТКЛР алюминиевого нанокompозиционного материала несколько превышает ТКЛР сплава АЛ25, в связи, с чем во время работы поршня в зоне соединения вставки с его донной частью возникали дополнительные напряжения, отрицательно сказывающиеся на прочности этого соединения.

В настоящей работе авторы предприняли попытку получения методом реакционного механического легирования алюминиевого композиционного материала за счет использования в качестве матричной основы порошкового алюминиевого сплава с повышенным содержанием кремния, как в большинстве поршневых сплавов. В частности, использовался порошок алюминиевого сплава (ПАС) с содержанием в нем 26,3 %масс. Si, 6,06 %масс.

Ni и 1,86 %масс. Fe. В качестве основных добавок к нему были выбраны стандартный алюминиевый порошок ПП-1 и углерод в виде газовой сажи ДГ-100. Для дальнейшего легирования исследуемых композиций использовались также стандартные порошки титана, меди и алюминиймагниевого сплава АМД-50М.

ПАС и его смеси с углеродом, а также с другими, указанными выше порошками, обрабатывались в атриторе в течение 30...180 мин в среде воздуха рабочей камеры атритора. Полученные гранулы затем подвергались холодному двустороннему компактированию в жестком контейнере гидравлического пресса давлением 600 МПа в брикеты. После этого производилась горячая вакуумная дегазация гранульных брикетов в вакуумной печи при температуре 500°C/60 мин и остаточном давлении $1,33 \cdot 10^{-6}$ бар. Термообработанные брикеты заворачивались в алюминиевую фольгу, нагревались в электропечи в атмосфере воздуха до температуры 440°C или 450°C, выдерживались при этих температурах 60 мин и далее подвергались горячей экструзии в прутки из нагретого до 320°C, 380°C или 415°C контейнера гидропресса со скоростью прессования 4,2...6,15 мм/с и коэффициентом вытяжки, равном 17.

Расчет рентгенограмм выявил наличие в полученных материалах α -твердого раствора алюминия, кремния, соединения Al_3Ni . Методом просвечивающей электронной микроскопии с использованием фольги было установлено наличие частиц со средним размером 43 нм, которые далее были идентифицированы как частицы Al_2O_3 и Al_4C_3 алюминия. Было также установлено, что средний размер субзерен тонкой структуры полученных материалов не превышает 190 нм.

Анализ свойств горячекструдированных прутков (таблица), позволил выявить однозначную тенденцию: чем больше было в исходном порошке ПАС добавок порошка алюминия ПП-1 (при одинаковой концентрации углерода – 1,0 %масс.), тем выше была прочность, твердость и жаропрочность материала прутков из таких композиций, и тем меньшими значениями ТКЛР обладал материал этих прутков. В частности, если прутки из композиции ПАС-1, в которой соотношение между порошками ПАС и ПП-1 составляло 50:50, имели предел прочности на растяжение при 20°C – от 600 МПа до 650 МПа и при 350°C – от 165 МПа до 185 МПа при значениях ТКЛР в диапазоне температур испытаний 20...100°C и 20...350°C, соответственно, $(16,7...18,2) \cdot 10^{-6}$ 1/°C и $(19,6...21,2) \cdot 10^{-6}$ 1/°C, то при соотношении этих порошков 25:75 (ПАС-3) предел прочности при 20°C – от 445 МПа до 520 МПа и при 350°C – от 125 МПа до 145 МПа при значениях ТКЛР для указанных выше диапазонов температур, соответственно, $(16,2...16,5) \cdot 10^{-6}$ 1/°C и $(18,6...18,8) \cdot 10^{-6}$ 1/°C. Наиболее низкие значения ТКЛР были получены на материалах, дополнительно легированных титаном, медью, магнием (ПАС-21 и ПАС-31 в таблице).

Анализ влияния тех или иных компонентов исходных порошковых композиций и структурных составляющих на физико-механические свойства исследуемых материалов позволяет предположить, что эти свойства формировались, практически, на основе аддитивного влияния [5] на процесс их формирования таких одновременно реализуемых механизмов создания структуры и получения свойств материалов как интенсивная пластическая деформация (ИПД) обрабатываемых в атриторе порошковых композиций, дисперсионное твердение порошкового алюминийевого сплава ПАС и дисперсное упрочнение, преимущественно, порошка алюминия ПП-1.

В заключение можно отметить, что разработанные жаропрочные материалы по своим физико-механическим свойствам превосходят стандартные алюминиевые поршневые сплавы, что позволяет рекомендовать их для эффективного армирования вставками из этих материалов поршней форсированных ДВС. Также следует обратить внимание на то, что удельная прочность ($\sigma_{вп}$) материалов ПАС-1/120 и ПАС-1/150 при температуре 350°C составляет, примерно, 6,8 км, что соответствует удельной прочности при данной температуре лучших стандартных жаропрочных алюминийевых сплавов (например, Д16), но имеющих при этом термический коэффициент линейного расширения, на 30...35% больший, чем у полученных в настоящей работе материалов.

Таблица. Основные физико-механические свойства разработанных и стандартных поршневых алюминиевых материалов

| Обозначение материала | ρ , г/см ³ | σ_b (МПа) при температуре (°С) испытаний: | | δ_5 , % | ТКЛР (10^{-6} 1/°С) при температурах (°С) испытаний: | | HV _{50/30} , МПа |
|---|-------------------------------|--|-----|-------------------|---|----------|------------------------------|
| | | 20 | 350 | | 20...100 | 20...350 | |
| Разработанные нанокompозиты | | | | | | | |
| ПАС-1/120 | 2,68 | 627 | 183 | 1,6 | 17,6 | 20,3 | 1705 |
| ПАС-1/150 | 2,70 | 603 | 182 | 1,2 | 18,1 | 19,8 | 1735 |
| ПАС-1/60 | 2,71 | 607 | 165 | 2,0 | 16,7 | 19,6 | 1600 |
| ПАС-21 | 2,72 | 485 | 136 | 1,5 | 16,8 | 18,8 | 1930 |
| ПАС-31 | 2,73 | 445 | 126 | 1,2 | 15,8 | 18,1 | 2070 |
| Стандартные поршневые литейные сплавы | | | | | | | |
| АЛ25 | 2,72 | 225 | 50 | 0,5 | 19,0 | 21,5 | 1170 |
| KS1275 | 2,68 | 225 | 50 | 0,8 | 19,0 | 22,5 | 1000 |
| KS281.1 | 5,98 | 200 | 40 | 0,7 | 18,5 | 20,5 | 1000 |
| KS280 | 7,89 | 200 | 40 | 0,5 | 17,8 | 19,5 | 1000 |
| Стандартные поршневые деформируемые сплавы | | | | | | | |
| АК4-1 | 2,80 | 450 | 100 | 13 | 21,2 | 24,5 | 1100 |
| АК12Д | 2,72 | 460 | 100 | 11 | 20,5 | 22,5 | 1300 |

Список литературы

1. Вырубов Д.Н., Ефимов С.И., Иващенко Н.А. Двигатели внутреннего сгорания: конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей. М.: Машиностроение, 1984. 384 С.
2. Рождественский Ю.В., Гаврилов К.В. Современные конструкции поршней для тепловых двигателей. Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2009. 50 С.
3. Фоченков Б.А. Литые поршневые заготовки излитейных композиционных материалов под изотермической штамповку // Современные технологии в области производства и обработки цветных металлов: Сб. тр. научно-техн. конф., Москва, 15 ноября 2007г. М.: МИСиС, 2007. С. 15-16.
4. Архипов И.В., Шалунов Е.П. Повышение эксплуатационных свойств отливок из алюминиевых сплавов за счет их армирования объемными наноструктурными материалами // Научные инновации для промышленности, сельского хозяйства и здравоохранения: Сб. тр. лауреатов конкурса по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса». Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2010. С. 33-38.
5. Порошковая металлургия. Спеченные и композиционные материалы / Под ред. В. Шатта. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1983. 520 С.