

УДК 666.189.21+669.71]:621.43

КЕРАМИЧЕСКИЕ ДЕТАЛИ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Описаны циклы работ, позволивших разработать технологии изготовления ряда керамических деталей для двигателя внутреннего сгорания. Показана работоспособность части из них в условиях работы реального двигателя. Приведены результаты исследований и разработки материала, промежуточного между керамикой и металлом: композиции в системе керамическое волокно – металл. Разработан полный цикл изготовления изделий из композиции. Показано, что изделия из композиции работоспособны в условиях работы реального двигателя и выдерживают более тяжелые условия работы, чем традиционные.

Ключевые слова: керамические детали, высокомодульное волокно, композиция волокно – металл.

В 1972 г. была опубликована статья, которая начиналась словами: «Если и есть магическое слово в области турбостроения, то это слово «керамика» [1]. Далее речь шла о том, что жаропрочные сплавы, из которых изготавливают лопатки турбин, исчерпали свои возможности по температуре эксплуатации. Вместе с тем каждый градус температуры в турбине заметно повышает ее характеристики: мощность, тяговую силу, КПД, экологичность и многие другие. Вероятно, выход из создавшейся ситуации — применение изделий из тугоплавких неорганических материалов (керамических).

Конечно, применением керамических материалов для конструктивных целей занимались и до появления названной статьи, но после ее публикации количество сообщений, связанных с этой проблемой, заметно увеличилось. Так, количество рефератов в РЖ «Химия», посвященных нитриду кремния, как одному из перспективных соединений, возросло с 17 в 1970 г. до 200 в 1980 г. [2]. Появилась надежда на создание «адиабатного двигателя». После сообщения о проблеме в средствах массовой информации появилось ощущение, что задача легко решается, однако это было и остается не так. В настоящей статье изложено, что было сделано и какие результаты достигнуты в области применения керамических изделий в конструкции двигателя внутреннего сгорания (ДВС).

С самого начала было очевидно, что задача весьма непростая и сложности, которые предстоит преодолеть, имеют самый разный характер — научный, технический, организационный. Работы были ориентированы на керамические детали двигателя внутреннего сгорания. Поскольку речь шла о подвижных деталях двигателя, работающих при высоких температурах в условиях термоудара, при выборе материала изделий предпочтение было отдано бескислород-

ным соединениям, хотя с точки зрения изготовления из них деталей это далеко не идеальный выбор. Вместе с тем оксидные материалы не исключали из поля зрения.

Из множества бескислородных соединений для работы по совокупности известных и предполагаемых показателей свойств были выбраны нитрид и в ряде случаев карбид кремния. Был проведен комплекс работ, охватывающий все стадии изготовления керамических деталей: синтез соединения (синтез нитрида кремния осуществляли как в виде порошка, так и в виде керамического тела); изготовление формуемой массы; формование керамической заготовки; термообработка сформованной заготовки; механическая обработка термообработанной заготовки.

Результатом работ стало появление технологий изготовления ряда керамических деталей ДВС. Например, поршень ДВС из плотноспечен-

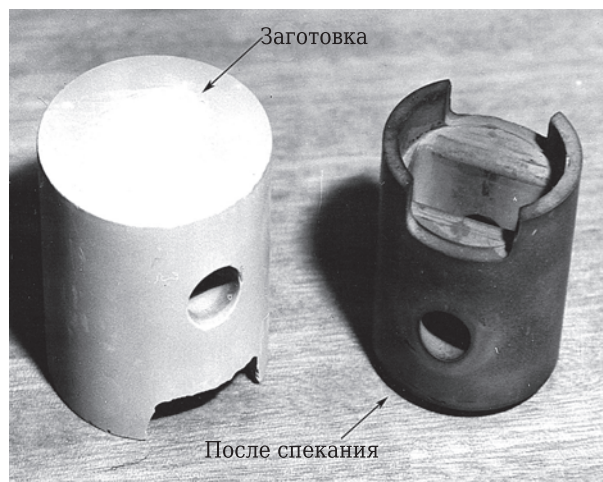


Рис. 1. Керамический поршень из плотноспеченного нитрида кремния

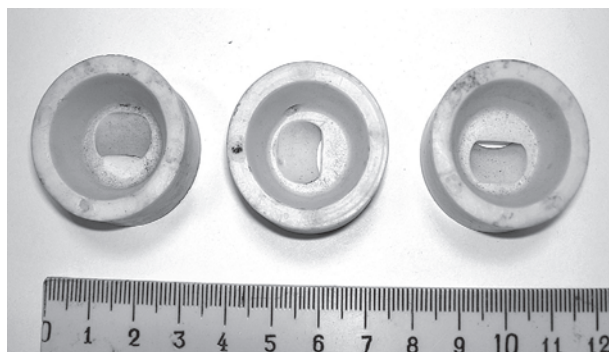


Рис. 2. Керамические форкамеры сгорания из корунда

ного нитрида кремния (рис. 1). К числу таких изделий относятся также форкамеры сгорания из корунда (рис. 2), головка цилиндра из титаната алюминия (рис. 3). Был разработан полный цикл изготовления толкателя клапана ДВС, в котором рабочим телом служит диск из керамического материала. Поскольку пара толкатель – кулачок служит при температурах, близких к температуре окружающей среды, в экспериментальных работах были использованы и оксидные (корунд, диоксид циркония), и бескислородные (нитрид и карбид кремния) соединения (рис. 4).

По совокупности свойств, технологии изготовления, результатов испытаний как наиболее подходящий был признан плотноспеченный нитрид кремния. Была осуществлена подготовка производства толкателей клапана ДВС с рабочим телом из нитрида кремния, включающая:

- изготовление дисков из нитрида кремния и их размерную механическую обработку;
- изготовление металлического корпуса детали;
- совмещение керамического диска и металлического корпуса.

Результаты испытаний толкателя с нитридкремниевым рабочим телом (рис. 5) на испытательном стенде и в реальном двигателе показали, что традиционными методами измерений износ рабочей поверхности рабочего тела зафиксировать не удается, а также что коэффициент трения пары толкатель – кулачок в 4–5 раз меньше по сравнению с этим показателем традиционной пары.

К сожалению, подготовленное производство по целому ряду причин не технического свойства запустить не удалось.

Еще один результат проведенных работ — разработка технологии изготовления рабочего колеса турбокомпрессора из плотноспеченного нитрида кремния (рис. 6). Испытания в выпускном тракте двигателя КамАЗ показали, что нитридкремниевое колесо работоспособно в условиях реального двигателя и выходит на рабочий режим вдвое быстрее по сравнению с изготовленными из традиционных материалов.



Рис. 3. Керамическая головка цилиндра из титаната алюминия

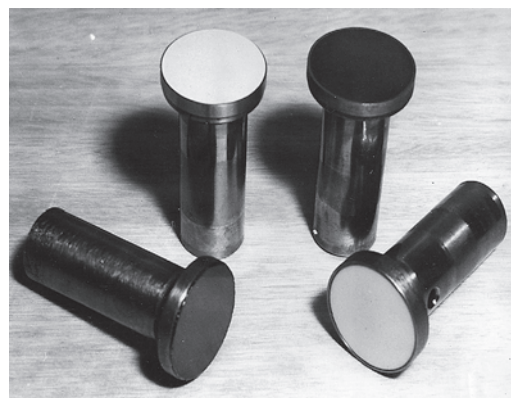


Рис. 4. Толкатели клапана с рабочими телами из корунда, диоксида циркония, нитрида кремния, карбида кремния



Рис. 5. Керамические заготовки и толкатель клапана с нитридкремниевым рабочим телом

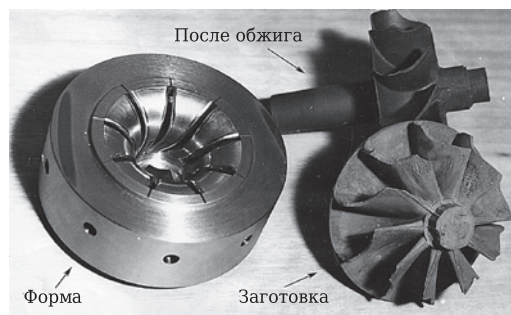


Рис. 6. Керамическое колесо турбокомпрессора из нитрида кремния

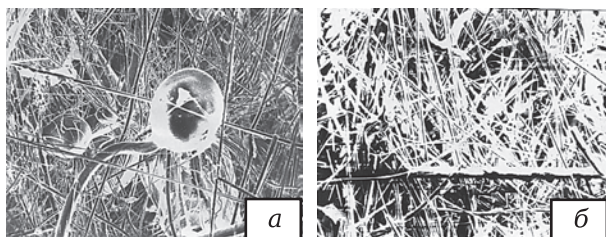


Рис. 7. Исходное (а) и обогащенное (б) стекловолочно муллитокремнеземистого состава

В ходе проведения работ были решены и другие задачи. Например, разработана технология изготовления проникаемых структур из нитрида и карбида кремния; создана технология изготовления керамических структур со сверхвысокой газо- и водопроницаемостью; предложен простой способ изготовления формуемой массы. При его применении на 25–40 % увеличиваются механическая прочность и напряжение электрического пробоя изготавливаемых керамических изделий; уменьшается доверительный интервал показателей свойств в 2–3 раза по сравнению с традиционно получаемыми.

По мере развития работ начали появляться образцы изделий, годные для проведения испытаний, и стала все более проявляться всегда существовавшая проблема. Работающие конструкторы настроены очень скептически к применению незнакомых материалов, тем более обладающих комплексом непривычных свойств, например лучше работают на сжатие, имеют малую упругую деформацию, иногда на порядок меньшее термическое расширение и др. По этой причине помимо обычных организационных мероприятий была проведена большая работа, в результате которой студентам двигателестроительных специальностей начали читать курсы лекций, освещающих керамические материалы, с тем чтобы уже на стадии обучения расширить представление молодых специалистов о круге возможных конструкционных материалов.

Еще одним путем преодоления консерватизма уже работающих конструкторов могло быть предложение использовать более привычный им металлический материал, но с показателями свойств, существенно превосходящими традиционные. Возможным решением такой задачи было армирование привычных конструкторам сплавов высокомодульными волокнами. Такое решение представляется вполне обоснованным на пути хотя бы частичного перехода от металлических к иным деталям двигателя.

Из существующих и доступных волокнистых материалов в качестве армирующего металл волокна по трем определяющим признакам (физико-химические и механические свойства, доступность и цена) наиболее подходит стекловолочно муллитокремнеземистого состава. Однако выпускаемый материал обладает существенным недо-

статком. Технология изготовления волокна такова, что его состав представлен как волокнистыми, так и неволокнистыми ингредиентами. Допускается присутствие в материале неволокнистых частиц (глобулей) размером 0,5 мм в количестве до 3 % (ГОСТ 23619). Это не оказывает заметного влияния на теплофизические свойства материала, но для использования в композиции с металлом наличие неволокнистой составляющей недопустимо (рис. 7, а). Необходимо было разработать несложную технологию изготовления волокна, найти наиболее простые технологические приемы, определяющие доступность применяемого оборудования, а также возможность изменять в широком интервале технологические параметры без заметного влияния на качество и выход конечного продукта. Такая технология была разработана и реализована на специально созданном участке. Содержание остаточных глобулей в волокне, выпускаемом по разработанной технологии, не более 1 % при диаметре менее 10 мкм (рис. 7, б). Волокно пригодно для армирования алюминиевых, медных сплавов, сплавов на основе железа, т. е. возможно создание широкого спектра конструкционных материалов различного назначения.

Анализ существовавших на момент проведения работы обстоятельств показал, что наиболее готово к использованию композиции волокно – металл проектирование и изготовление поршней ДВС с армированным днищем. Поэтому возникла задача совмещения волокна с поршневым алюминиевым сплавом и изготовления из такой композиции поршня ДВС. В настоящее время металлические поршни изготавливают из расплава. В связи с этим был выбран жидкофазный способ изготовления композиции.

Основная проблема при совмещении волокна с расплавом заключается в том, что необходимо преодолеть плохое смачивание расплавом поверхности стекловолочно муллитокремнеземистого состава (краевой угол смачивания около 150°). Представлялось, что наиболее рациональный метод — пропитка под давлением расплавом сплава изготовленной из волокна пористой керамической детали.

Это потребовало разработки простой технологии изготовления из волокна детали, обладающей высокой пористостью и достаточной механической прочностью. При этом, чтобы объемное содержание волокна в композиции составляло 10 %, пористость керамической детали должна составлять 90 %. При такой пористости размер пор керамической детали 5–6 мкм. Для заполнения пор такого размера при угле смачивания 150° необходимо давление металла 0,3 МПа. Показатели пористости и давления металла определили требования к керамической детали.

Требования к технологии изготовления пористых керамических деталей были те же, что и к технологии обогащения волокна: максимальная простота и доступность процессов, оборудова-

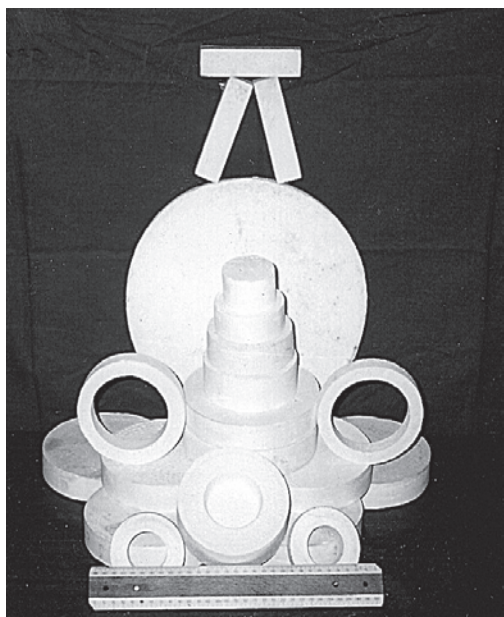


Рис. 8. Высокопористые керамические изделия из стекловолна муллитокремнеземистого состава

ния, сырья. Такая технология была разработана и реализована на участке. Технология позволяет изготавливать керамические детали в широком интервале пористости (75–92 %) и достаточной механической прочности (предел прочности при сжатии 0,5–0,6 МПа). Изделия могут быть изготовлены в виде призм, тел вращения — колец, плоских и фигурных дисков диаметром до 300 мм (рис. 8).

Разработанную технологию легко адаптировать к существующим керамическим производствам. Процесс получения композиции в системе волокно – металл состоит в заполнении порового пространства керамической детали волокнистым строением расплавом сплава с последующим охлаждением. Наиболее перспективный прием для реализации этого процесса — литье расплава с кристаллизацией под давлением. С использованием этого приема разработана технология, позволяющая за один процесс изготавливать композицию в системе волокно – металл и изделие из нее. Таким способом изготовлены заготовки поршней с днищем, армированным волокном (рис. 9).

Механическая обработка композиции лезвийным инструментом мало отличается от обработки сплава. Истинная плотность композиции практически равна истинной плотности сплава и составляет 2,73 г/см³. Тепловое расширение композиции на 10 % меньше, чем у сплава. Без принятия специальных мер пределы прочности композиции и сплава при 20 °С одинаковы, но по мере увеличения температуры предел прочности при растяжении композиции все заметнее превосходит этот показатель сплава, и при 350 °С он составляет 120 и 80 МПа соответственно. Время разрушения образца под нагрузкой при 350 °С для сплава составляет 5–7 ч, для

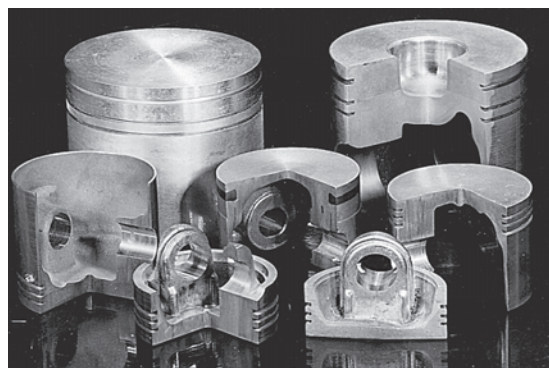


Рис. 9. Поршни ДВС с днищем, армированным стекловолокном

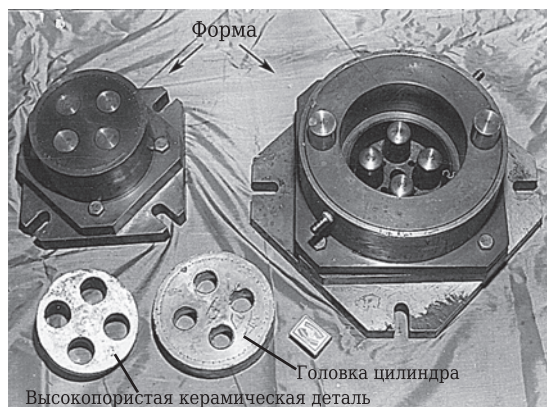


Рис. 10. Головка цилиндра, армированная стекловолокном

композиции — на порядок больше. Кроме того, ряд композиционных образцов показали время разрушения свыше 150 ч. Твердость композиции и сплава при 20 °С 130 и 100 единиц *НВ* соответственно. При определении термостойкости первые трещины на серийном поршне появляются после 2000 теплосмен (термоциклирование в интервале 350–250 °С), на поршне из композиционного материала трещин не обнаружено после 12000 теплосмен.

Поршнями с днищем, армированным волокнами, был укомплектован автомобиль ВАЗ 2108, и получена степень сжатия 13,5. Автомобиль принял участие в чемпионате России по автокроссу, где выиграл все свои заезды.

Были начаты работы по головке цилиндра (рис. 10), гильзе цилиндра. К сожалению, они не получили развития из-за обстоятельств, не относящихся к технике.

Библиографический список

1. *Farmer, R. C.* Where are the ceramic turbines? / *R. C. Farmer* // *Gas Turbine International*. — 1972. — № 7. — Р. 22–27.
2. *Андреевский, Р. А.* Нитрид кремния и материалы на его основе / *Р. А. Андреевский, И. И. Спивак*. — М. : Металлургия, 1984. — 136 с. ■

Получено 10.12.12
© Е. Б. Бендовский, 2013 г.