

На рисунке 9 температурный коэффициент вычислялся по формуле:

$$K_t = \frac{T_0 - T_2}{T_0 - T_{2t}},$$

где: T_0 – температура воздуха на входе в детандер;

T_2 – температура воздуха на выходе из детандера;

T_{2t} – расчетная температура на выходе при расширении сухого воздуха.

Для объективной диагностики момента начала обледенения или момента критических условий, при которых возникает риск обледенения, требуется решение следующих задач:

- проведение численных экспериментов по газовой динамике движения газового потока по проточной части лопаточной машины с изменением количества влаги в рабочем воздухе, вплоть до начала момента кристаллизации;
- термодинамический анализ теплообмена между воздухом и льдом (с учетом теплоты, затраченной на кристаллизацию);
- выбор диагностического признака для обоснования момента ликвидации твердой фазы (льда) в потоке воздуха.

Литература

1. Антонова Н.В., Шустров Ю.М. Проектирование авиационных систем кондиционирования воздуха. М.: Машиностроение, 1997. С. 219-228.
2. Ардашев В.И. Исследование работы турбодетандера на воздухе, насыщенном водяными парами // Глубокий холод и кондиционирование: Тр. МВТУ. 1969.
3. Епифанова В.И. Компрессорные и расширительные турбомашин радиального типа. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1998. С. 444-456.
4. Мартыанов О.А., Меркулов В.И. Анализ обледенения проточной части транспортных турбокомпрессоров // Известия МГТУ «МАМИ», № 3(21), 2014.

Углеродные материалы для деталей ГТД и ДВС, проблемы и перспективы

к.т.н. Пятов И.С., доц. Шибоев О.В., проф. Бузинов В.Г., проф. к.т.н. Макаров А.Р.,
доц. к.т.н. Костюков А.В., доц. к.т.н. Поседко В.Н., к.т.н. Финкельберг Л.А.,
к.т.н. Костюченков А.Н.

ООО «РЕАМ-РТИ», Университет машиностроения, ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова»
kostukov123@yandex.ru

Аннотация. Приведены результаты применения углеродосодержащего материала «КАРБУЛ» для изготовления поршней двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрена технология изготовления поршней из материала «КАРБУЛ». Показаны перспективы применения материала «КАРБУЛ» для малоразмерных газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: углеродосодержащие материалы, поршень, газотурбинный двигатель, теплообменник, центробежный компрессор

Совершенство двигателей определяется совокупностью свойств, среди которых основополагающими являются: топливная экономичность, экологичность, удельная материалоемкость, габаритно-массовые показатели, стоимость и ресурс.

На эти свойства значительное влияние оказывает выбор материалов деталей: у газотурбинных двигателей (ГТД) для роторов компрессорной и турбинной ступеней, вращающегося рекуперативного теплообменника, у поршневых двигателей (ПД) – цилиндро-поршневой группы: головки и блока цилиндров, шатуна, и, особенно, выбор материала для поршня. Кроме того, реализация свойств материала в изделиях, включая стоимость, связана с технологичностью – количеством и энергоемкостью технологических переходов от получения заготовки до конечного продукта.

В настоящее время среди перспективных материалов деталей двигателей особое место занимают высокотемпературные композиты: керамические и углеродсодержащие.

Эти материалы приходят на смену сплавам и композитам на основе алюминия и титана. Особенно там, где требуется получить высокие удельные показатели по массе и габаритам.

Высокие плотности металлических сплавов, их механические и физические свойства ограничивают возможности повышения эксплуатационных характеристик ГТД и ПД как за счет форсирования рабочего процесса, так и повышения быстроходности. Последнее особенно важно для летательных аппаратов.

Так, плотность сплавов на основе алюминия порядка $2,7 \text{ г/см}^3$, прочность на сжатие не ниже 250 МПа при температуре 20°C , коэффициент теплового расширения около $23 \text{ м}\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, высокая теплопроводность.

Плотность титановых сплавов около $4,5 \text{ г/см}^3$, прочность на сжатие порядка 1200 МПа при температуре 20°C , коэффициент теплового расширения около $9 \text{ м}\cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, низкая теплопроводность.

Углеродные композиции в настоящее время занимают достойное место в аэрокосмическом машиностроении, например, защитные покрывные облицовки, детали камер сгорания.

Появление углеродных композиций с высокими прочностными свойствами при плотности менее 2 г/см^3 , не снижающимися с ростом температуры (в отличие от легкосплавных металлов), побудили ряд компаний разработать технологии и предложить рынку графитовые поршни.

Сравнение температурной зависимости прочностных свойств углеродной композиции и алюминиевого сплава на рисунок 1.

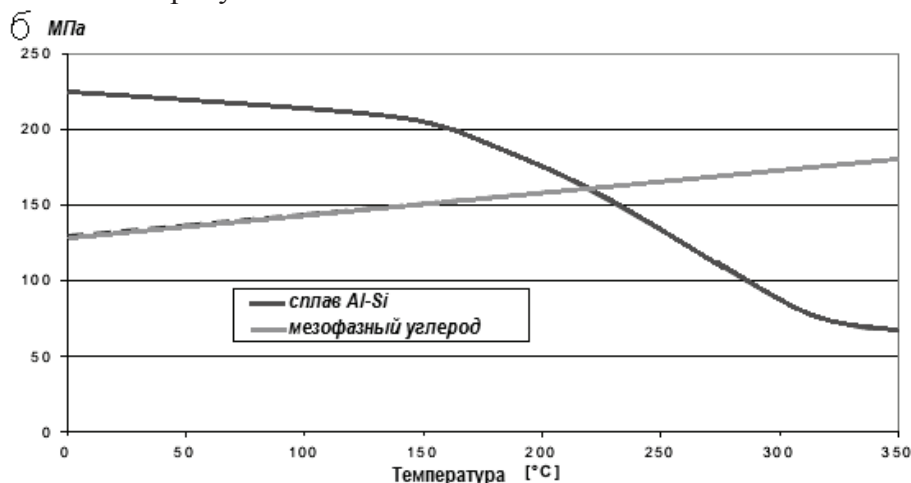


Рисунок 1. Сравнение прочности алюминиевого сплава и мезофазного углерода от температуры

Особенность углеродных материалов – высокие физико-механические свойства рефракторного характера, повышение прочности при росте температур.

Однако освоенные промышленностью традиционные технологии основаны на первичном получении путем длительных термических (термохимических) процессов углерод-графитовых заготовок в виде блоков и последующих операциях механической обработки, что обуславливает высокие цены конечных изделий.

На смену этим технологиям приходят принципиально новые, нацеленные на предварительное формование изделий, сокращение цикла производства и энергопотребления.

Предприятием ООО «РЕАМ-РТИ» разрабатывается технология изготовления деталей из углеродсодержащих композитов, в том числе с содержанием до 30% карбида кремния, через предварительно вулканизованные «прекурсоры».

Данная концепция позволяет получать изделия сложной геометрии, недостижимой прямым формованием или литьем в твердые формы, с малыми толщинами стенок и достаточно значительных габаритов. Технология и материалы на ее основе получили название «КАРБУЛ».

К таким ответственным изделиям сложной геометрической формы относятся роторы ГТД и элементы вращающегося теплообменника (рисунок 2).

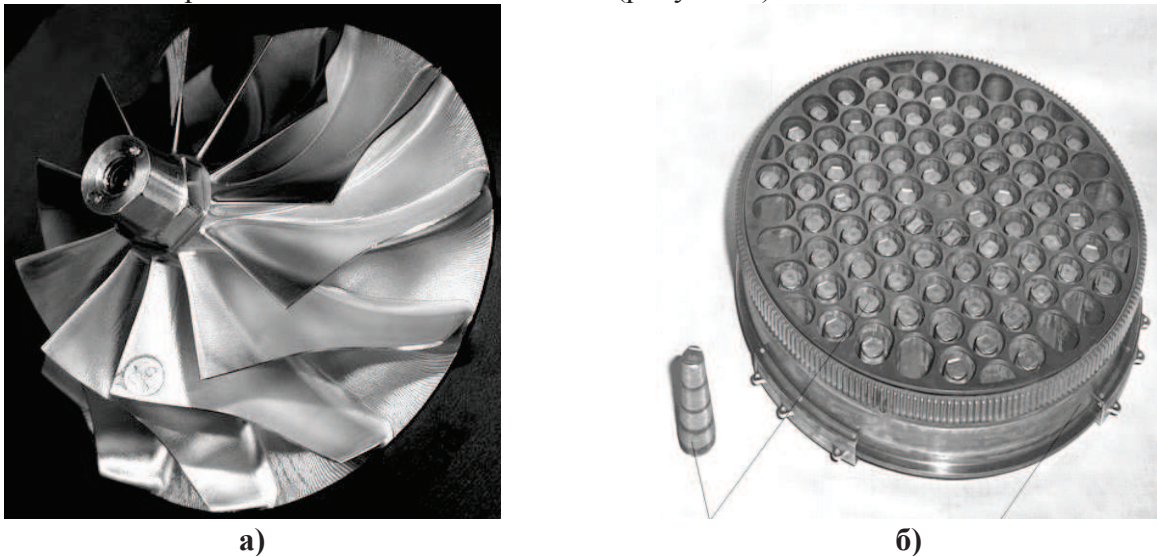


Рисунок 2. Ротор компрессорной ступени (а), корпус вращающегося рекуперативного теплообменника (б) из стали

Выполнение высокооборотных роторов ГТД из графитосодержащих материалов обеспечит снижение их массы и, соответственно, увеличение ресурса и снижение размеров подшипников.

Значительные преимущества будет иметь теплообменник с каркасом, выполненным из силицированного графита [3] :

- малые температурные деформации каркаса (в 4 раза меньшие, чем у каркаса, выполненного из стали) и, соответственно, высокая эффективность работы уплотнений теплообменника;
- малый коэффициент трения и, соответственно, меньшие затраты на привод теплообменника и увеличение ресурса уплотнений;
- более чем в три раза меньшая масса, чем у каркаса из стали (каркас имеет большие размеры и, как следствие, его вклад в общую массу ГТД весьма существенен).

Вид каркаса теплообменника, выполненного из силицированного графита, приведен на рисунке 3.

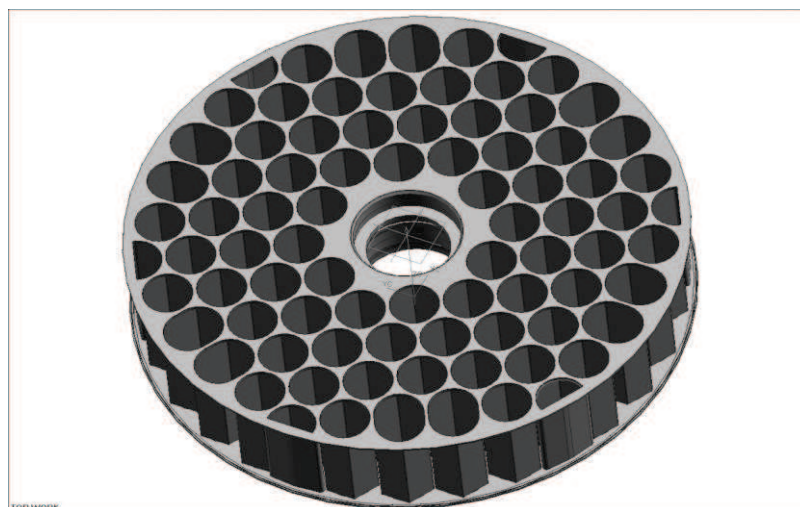


Рисунок 3. Каркас вращающегося теплообменника из графитосодержащего композита

Опыт применения предприятием ООО «РЕАМ-РТИ» технологии «КАРБУЛ» для изготовления деталей из углеродсодержащих композитов охватывает такие изделия, как насосные рабочие ступени для нефтедобывающего оборудования, поршни различного назначения, включая поршни для ДВС.

Следует подчеркнуть, что углеродные поршни освоены западными компаниями и подтверждают перспективность их применения как в двигателях на легких топливах, так и в дизельных двигателях.

По публикациям компании Schunk (Германия) применение углеродного мезофазного композита в поршнях двухтактных и четырехтактных ПД позволяет:

- 1) снизить расход топлива и масла;
- 2) снизить шум и эмиссию токсичных компонентов с отработавшими газами (ОГ);
- 3) повысить мощность;
- 4) увеличить эксплуатационную надежность;
- 5) снизить виброактивность двигателя;
- 6) повысить динамику набора мощности и крутящего момента.

Данные свойства достигаются за счет реализации следующих факторов:

- **плотность углерода на 30% и более ниже, чем у алюминия.** Это преимущество в массе снижает силы инерции возвратно-поступательно движущегося поршня и, соответственно, виброактивность, расход топлива, улучшает динамику разгона;
- **углерод является рефрактерным материалом.** В отличие от алюминия механическая прочность с ростом температуры увеличивается. Это позволяет упростить требования к конструкции охлаждения поршня;
- **углерод обладает «самосмазываемостью»,** что увеличивает эксплуатационную надежность и позволяет уменьшить расход масла на угар;
- **углерод как материал имеет низкий коэффициент термического расширения.** Это позволяет уменьшить конструктивные «мертвые объемы» зазоров без риска задира при высоких нагрузках, а также позволяет снизить выбросы углеводородов (СН) в режиме холодных пусков;
- **углерод обладает высоким сопротивлением к разрушению в режиме «термо-шок».**

Однако всем этим достоинствам на сегодняшний день противостоит высокая себестоимость производства. Углеродно-графитовые поршни (УГП) нашли ограниченное коммерческое применение в ПД специального назначения, например, для беспилотных летательных аппаратов, для спортивных автомобилей.

Высокая стоимость традиционного производства УГП обусловлена сравнительно сложной и длительной технологией получения заготовки поршня: подготовка сырья со специальной жидко-кристаллической структурой, называемой «мезофазной», предварительное формование, многоступенчатый процесс «карбонизации» с тщательным межоперационным контролем из-за чувствительности материала к окислению, большому выделению летучих, выделяемых при пиролизе, большому проценту усадки.

В этой связи разработка технологий, направленных на снижение производственных затрат, является актуальной задачей.

Работы по разработке и освоению нетрадиционных технологий получения формованных высокоточных изделий из углеродсодержащих композиций начаты предприятием ООО «РЕАМ-РТИ».

В основу технологии заложены процессы формования из углеродсодержащих композиций упругих эластомерных заготовок и их химико-термической карбонизации. Конечные размеры конечных заготовок максимально приближены к требуемой геометрии, что должно позволить сократить количество операций финишной механической обработки.

На настоящий момент получены обнадеживающие результаты изготовления опытных (пилотных образцов) изделий, таких как рабочие колеса и направляющие аппараты насосных ступеней [1, 2], детали героторных насосов, а также демонстрационные образцы поршней для ПД проекта ФГУП «ЦИАМ» им. Баранова (рисунок 4) и гильз цилиндров.

Сравнение физико-механических свойств углеграфитовых материалов для поршней компании Schunk (Германия) и ООО «РЕАМ-РТИ» представлены в таблице 1.

Характерной особенностью технологии и материалов «Карбул» является низкая усадка изделия в процессе производства, которая в зависимости от рецептуры и режима отвержде-

ния лежит в диапазоне 4 – 6 % с высокой степенью повторяемости конечных размеров.



Рисунок 4. Демонстрационные образцы поршней для ПД проекта ФГУП «ЦИАМ» им. Баранова и гильз цилиндров

Таблица 1

Физико-механические свойства «углеродсодержащих композиций» для изготовления поршней ДВС

Варианты композиций	Прочность на разрыв, МПа	Относит. удлинение, %	Прочность на сжатие, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Ударная прочность, кгс см/см ²	Плотность, г/см ³
Углеграфитовые материалы поршней компании SCHUNK, Германия						
<i>SCHUNK FU 4270</i>	Н.Д.	Н.Д.	150	80-100	Н.Д.	1,8
<i>SCHUNK FU 2451</i>	Н.Д.	Н.Д.	250	100-120	Н.Д.	1,9
Углеграфитовые композиты ООО «РЕАМ-РТИ»						
КАРБУЛ 3	40	4	240	120	7	1,17
КАРБУЛ 1	42	2	280	90	8	1,24



Рисунок 5. Образцы поршней по технологии «КАРБУЛ», обработанные в ООО НПП «Автотехнология» МАМИ

Разработка технологии обработки поршней из углеродных композитов «КАРБУЛ» ведется с участием сотрудников Университета машиностроения. Эти работы выявили ряд осо-

бенностей механической обработки углеродных композитов «КАРБУЛ». Найдены решения по подбору лезвийного инструмента, режимов обработки, контролю. На рисунке 5 показаны образцы поршней, обработанные в ООО НПП «Автотехнология» МАМИ.

Опыт изготовления поршней для ПД по технологии ООО «РЕАМ-РТИ» выявил ряд проблем, связанных с поведением «недоотвержденного» углеродсодержащего композита в температурном диапазоне 20 – 200°C (рисунок 6), а также с механической обработкой – необходимостью применения (для прорезания канавок под кольца) режущих инструментов с особо твердыми (износостойкими) пластинами. Данная задача решается ООО «Автотехнология» (Университет машиностроения).

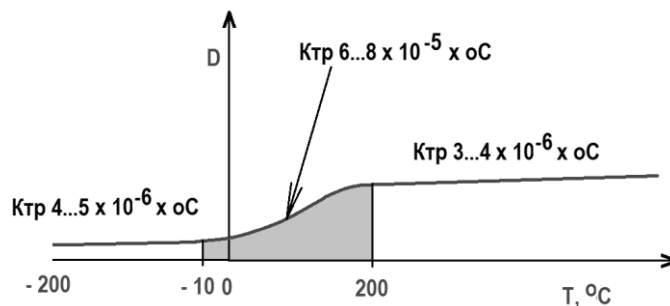


Рисунок 6. «Пародоксальная» характеристика теплового расширения мезофазных углеродных структур низкотемпературной карбонизации

Подводя итоги всего вышеизложенного, можно выделить ряд работ, способствующих развитию технологии производства деталей сложной геометрии из высокопрочных керамикопоподобных углеродсодержащих композитов, которые предстоит осуществить в ближайшее время:

- продолжить формирование требований к свойствам материала и исследование влияния технологических пределов изготовления поршней на достижение этих свойств, уделив особое внимание на тепловое расширение в температурном диапазоне эксплуатации ПД, обеспечение оптимальной теплопроводности, обрабатываемость;
- на основании требований к свойствам материала уточнить рецептуры, режимы химико-термической обработки, механической обработки;
- приступить к более глубокому изучению особенностей инновационной технологии «КАРБУЛ» и материалов, включая углеродсодержащие матрицы с использованием карбидов и других ингредиентов;
- приступить к освоению технологии силицирования структур материала «КАРБУЛ» для высокотемпературных изделий, работающих в окислительной среде ОГ, применительно к задаче высокоэффективных ГТД с регенеративным рабочим циклом.

Литература

1. Пятов И.С. Рабочие ступени насосов из органических керамикопоподобных материалов для осложненного фонда скважин // Инженерная практика, 2013 № 6. - С. 8-11.
2. Пятов И.С. Осложненному фонду скважин – рабочие ступени насосов из углеродных композитов // Доклад для научно-практической конференции «Эксплуатация осложненного фонда скважин 2012».
3. Костюков А.В. Микротурбина с эффективным КПД более 43%. Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2012, т. 1, № 2(14), с. 179-182.