

ИСПЫТАНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КАМЕР ЖРД С СОПЛОВЫМИ НАСАДКАМИ ИЗ УУКМ

© 2006 В.Н. Шнякин, А.М. Потапов, В.Г. Переверзев, А.Н. Коваленко, Р.А. Марчан

ГКБ «Южное» им. М.К. Янгеля, г. Днепропетровск, Украина

ГКБ «Южное» для камеры двигателя РД 861К разработало и успешно опробовало новую технологию изготовления сопловых насадков из углерод-углеродных композиционных материалов.

Одним из перспективных направлений по повышению энерго-массовых характеристик ЖРД является увеличение степени расширения сопла за счет применения соплового насадка из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ). Специфика применения УУКМ в ЖРД требует комплексного подхода к решению ряда проблемных вопросов, среди которых наиболее важными являются: химическая и эрозионная стойкость УУКМ в среде продуктов сгорания ЖРД, совместимость УУКМ с металлическими деталями камеры, герметичность соплового насадка из УУКМ и узла его крепления. В настоящее время эти технические проблемы успешно решены [1, 2], но, вместе с тем, остаётся ещё один немаловажный фактор, во многом определяющий коммерческую привлекательность сопловых насадков из УУКМ – это их стоимость, которая является достаточно высокой.

Данная статья посвящена огневым испытаниям сопловых насадков из УУКМ, разработанных в ГКБ «Южное» и изготовленных в кооперации с Государственным заводом «Углекомполит» (г. Запорожье). Основной целью огневых испытаний была экспериментальная проверка работоспособности сопловых насадков из УУКМ в среде продуктов сгорания топлива АТ+НДМГ. Предполагается, что сопловые насадки, изготовленные из УУКМ по новой технологии, будут использоваться в камере двигателя РД861К тягой 8 тс, имеющей в месте стыковки соплового насадка симметричный вдув генераторного газа с температурой ~650°C. Сопряжение УУКМ с металлическими деталями, имеющими столь высокую температуру, создаёт дополнительные трудности, связанные с существенными различиями в коэффициентах температурного расширения материалов. Поэтому дополнительными целями экспериментов были:

имитация теплового режима, соответствующего камере двигателя РД861К и экспериментальная проверка разработанной концепции крепления соплового насадка к камере ЖРД.

Экспериментальная камера ЖРД представляет собой модернизированную камеру серийного двигателя РД 868, тягой 5кН. Модернизация заключалась в демонтировании хромоникелевого соплового насадка радиационного охлаждения и приварке фланца, имитирующего штатное разъемное соединение камеры двигателя РД 861К. Для управления температурой металлических деталей в месте стыка организован тангенциальный вдув инертного газа (например, азота или гелия) внутрь камеры сгорания для создания завесы. Изменением расхода вдуваемого газа осуществлялось регулирование температуры конструкции в месте стыка металлических и углерод-углеродных деталей в процессе испытаний. Учитывая погрешность расчетов, а также возможное влияние на газовый поток изменений в конструкции при доработке камеры программа огневых испытаний предусматривала ограничение на максимальную температуру фланца в районе стыка металлических и углерод-углеродных деталей.

Механизм крепления соплового насадка из УУКМ с охлаждаемым корпусом камеры должен обеспечивать надёжную фиксацию соплового насадка и герметизацию стыка, как при температуре окружающей среды, так и при температурах, характерных для огневой работы камеры. В большинстве известных аналогов механизм крепления располагается на регенеративно охлаждаемом участке сопла и, таким образом, удаётся организовать и охлаждение места стыка. В камере двигателя РД861К механизм крепления совмещён с узлом вдува, что приводит к нагреву механизма крепления до температу-

ры генераторного газа ($\sim 650\text{ }^{\circ}\text{C}$), при этом радиальные расширения сопрягаемых деталей могут достигать несколько миллиметров. Для компенсации температурных расширений была разработана концепция упругой фиксации и центровки соплового насадка.

Механическая связь между камерой ЖРД и сопловым насадком из УУКМ осуществляется разъемным соединением за счёт сжимающих усилий гибких элементов двух типов. Один тип гибких элементов создает сжимающее усилие преимущественно в радиальном направлении по направлению к оси камеры, за счёт чего осуществляется радиальная фиксация, а также центровка соплового насадка в процессе огневой работы камеры ЖРД. В то же время

другой тип гибких элементов создает сжимающее усилие вдоль оси камеры по направлению к минимальному сечению сопла и обеспечивает осевую фиксацию соплового насадка, а также осевое усилие, необходимое для сжатия торцевого замкового уплотнения. Фиксация гибких элементов в устройстве крепления и их сжатие осуществляется с помощью резьбовых соединений. Герметизация узла стыка корпуса экспериментальной камеры с сопловым насадком выполнялась при помощи двух уплотнительных колец из модифицированного терморасширенного графита марки IZOLOCK C-200. Поперечное сечение механизма крепления представлено на рис.1.

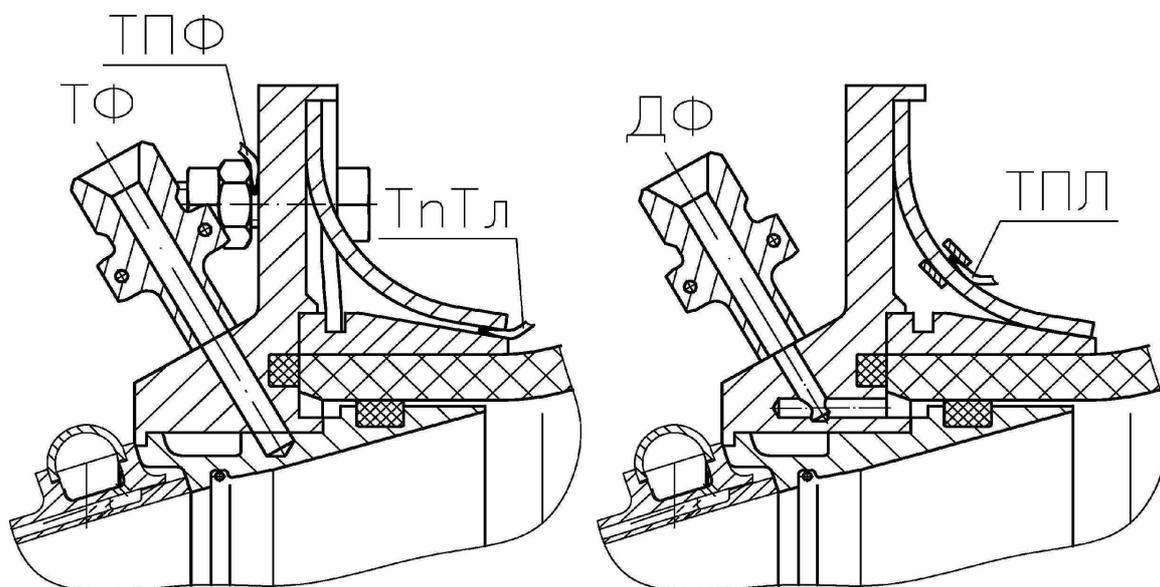


Рис.1. Организация замеров для контроля работоспособности фланца, прижимных и уплотнительных элементов

Материал, применяемый для прижимных элементов, должен сохранять упругие свойства в процессе работы при температурах $\sim 600\text{...}650\text{ }^{\circ}\text{C}$. В изделиях отрасли для упругих уплотнений, работающих при температуре свыше $650\text{ }^{\circ}\text{C}$, нашли применение железоникелевые жаропрочные сплавы ЭП915 (ХН43БМТЮ), ЭП-700 (10Х15Н27Т3МР), а также жаропрочный никелевый сплав ЭК61 или 40НХТЮМ (никель-кобальт-хром). В настоящих экспериментах применялся железоникелевый сплав 36НХТЮ (ЭИ702), который рекомендуется для упругих элементов, длительно работающих при температурах до

$300\text{...}350\text{ }^{\circ}\text{C}$ или кратковременно (несколько минут) до температур $500\text{...}550\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для оценки фактического поля температур элементов конструкции механизма крепления были предусмотрены следующие замеры (рис.1): ТПФ - температура поверхности фланца, ТПЛ - температура поверхности лепестков и ТпТл - температура поверхности титанового сегмента; ТФ - температура фланца вблизи огневой поверхности. Контроль герметичности бокового уплотнения осуществлялся по показаниям датчика давления, подсоединенного к штуцеру ДФ (рис.1). Температура наружной поверхности соплового насадка из УУКМ измерялась в

шести точках: по три термопары на срезе сопла и в районе стыка с фланцем.

Общая характеристика экспериментальных сопловых насадков из УУКМ.

ГКБ «Южное» имеет собственный опыт по изготовлению и применению сопловых насадков из УУКМ как для РДТТ, так и для ЖРД. Для условий ЖРД наилучшие показатели были у материала КУП ВМ БС (композиционный углепластик высокомодульный боросилицированный), однако этот материал имел относительно высокую плотность ($\sim 1,9...2,0 \text{ г/см}^3$), а также сложную и трудоемкую технологию изготовления. Материал КУП ВМ БС был разработан в 70^х годах прошлого столетия. В настоящее время для условий ЖРД разработаны и опробованы материалы нового поколения, например российский «Граурис» или французская «Спестра», которые применяются для изготовления габаритных тонкостенных сопловых насадков камер ЖРД и имеют плотность $\sim 1,4 \text{ г/см}^3$.

ГКБ «Южное» для камеры двигателя РД 861К разработало и успешно опробовало новую технологию изготовления сопловых насадков из УУКМ, которая учитывает фактическое состояние производственной базы, а также условия работы соплового насадка в составе камеры двигателя РД 861К. Применение соплового насадка из УУКМ в модернизируемом двигателе позволило увеличить геометрическую степень расширения сопла со 111 до 177. Среднеобъемная плотность сопловых насадков, изготовленных по новой технологии, составляет $\sim 1,35 \text{ г/см}^3$. Технология изготовления насадков из углерод-углеродного композиционного материала включает следующие операции: изготовление углепластиковой заготовки; механическая обработка торцов и посадочных поверхностей; высокотемпературная обработка - получение углерод-углеродной заготовки; нанесение герметизирующих покрытий.

Углепластиковые заготовки насадка изготавливали методом выкладки на металлическую формообразующую оправку с заданным профилем углеродного волокнистого материала, предварительно пропитанного фенолформальдегидным связующим. В отличие от известных аналогов, новая технология базируется на использовании в каче-

стве сырья более дешевой низкомолекулярной углеродной ткани. Толщина заготовки регулировалась количеством слоев углеродного материала. Формование полуфабриката осуществляли вакуум-автоклавным методом в печи аэродинамического подогрева при $160-5^\circ\text{C}$. Давление формования $4...5 \text{ кгс/см}^2$. Использование углеродного наполнителя специальной объемной структуры позволило обеспечить достаточную межслоевую прочность материала насадка при невысоком давлении формования и исключило необходимость поперечной прошивки слоев материала. Предварительная пропитка наполнителя обеспечила изготовление углепластиковой заготовки более высокого качества, без расслоений, из-за низкого содержания летучих в полуфабрикате.

Механической обработке подвергали углепластиковые заготовки насадка, при этом обрабатывались только торцы деталей и цилиндрический участок для монтажа присоединительного кольца. После высокотемпературных переделов детали не обрабатывали. Внутренний профиль деталей обеспечивается благодаря использованию специальных технологических оправок на стадии изготовления углепластика и углеродного-углеродного материала.

Высокотемпературные переделы включают в себя: карбонизацию углепластиковых заготовок, термообработку при $1800^{+50} \text{ }^\circ\text{C}$, предварительное пироуплотнение, окончательное пироуплотнение.

Карбонизацию углепластиковых заготовок, термообработку и предварительное уплотнение проводили на формостабилизирующих оправках за один цикл в электровакуумной печи. Формостабилизирующая оправка имеет определенный профиль наружной поверхности, что позволяет обеспечить заданную геометрию заготовки. Материал оправки имеет близкий к материалу заготовки коэффициент термического расширения. Карбонизация осуществляется при температуре 850°C , термообработка – при $1850^{+50} \text{ }^\circ\text{C}$, предварительное пироуплотнение – при $950 \text{ }^\circ\text{C}$. Во время этих стадий материал заготовки предварительно насыщается пироуглеродом и приобретает достаточную жесткость для сохранения формы. Для окончательного уплотнения предварительно

уплотненные заготовки помещаются в электровакуумную печь в свободном состоянии. Процесс насыщения пироуглеродом проводится при температуре 1000^{+50} °С.

Повышение окислительной стойкости УУКМ достигнуто герметизацией открытой пористости путем послойной пропиткой температуростойкими композициями до полного насыщения с последующей термообработкой. Содержание герметизирующего состава в углерод-углеродном материале составило от 4,24% до 5,13%.

После герметизации коэффициент удельной газопроницаемости УУКМ составляет $(0,18-0,19) \cdot 10^{-14} \text{ м}^2$, удельная негерметичность материала – $0,0045 \frac{\text{см}^3 / \text{с}}{\text{см}^2}$.

Краткая характеристика испытательного стенда.

Для обеспечения безотрывного истечения продуктов сгорания из сопла экспериментальной камеры огневые испытания проходят на стенде, оснащенный барокамерой, газодинамической трубой и газоежекторной установкой. Газоежекторная установка обеспечивает предварительное разрежение до величины 50...60 мм.рт.ст. в барокамере перед запуском испытываемой камеры ЖРД. После запуска испытываемой камеры ЖРД давление в барокамере снижается до 5...6 мм.рт.ст., таким образом на основном режиме работы обеспечивается имитация высотных условий эксплуатации. Суммарная продолжительность огневого испытания ограничена технологическими причинами и составляет - не более 400...420 секунд. Огневые испытания выполнялись с многократными включениями для уменьшения их ко-

личества и снижения стоимости их подготовки.

Результаты огневых испытаний.

Максимальные температуры, замеренные в процессе испытаний, представлены в таблице 1, где обозначения ТПНС1 и ТПНС2 максимальным соответствуют температурам наружной поверхности насадка на срезе сопла и вблизи механизма крепления, соответственно.

На первом испытании по стендовым причинам не был выдержан режим испытания, что привело к нерасчетному тепловому состоянию экспериментального узла. На первых включениях замер ТПНС выполнялся по традиционной технологии путем приклейки клеем К-800 (в таблице 1 отмечены символом *), в дальнейшем для получения достоверных температур использовались специально разработанные упругие прижимы. Эти прижимы обеспечили надежное прижатие термомпар к насадку и существенно более точный замер температур на протяжении всего испытания, в том числе и с многократными включениями. Так, по сравнению со старым способом крепления термомпар, уровень измеряемых температур насадка на схожих режимах возрос на 150...200 °С.

Огневые испытания подвергались два сопловых насадка: первый экземпляр испытывался на испытаниях №№ 1 и 2, второй на испытаниях №№ 3, 4 и 5. Суммарная наработка на пяти огневых испытаниях составила 869 секунд при восьми включениях, в том числе насадка № 2 - 662 секунд при шести включениях.

Таблица 1. Результаты замеров температуры

№ исп	Параметр	τ , с	ТПФ, °С	ТФ, °С	ТПЛ, °С	ТпТл, °С	ТПНС1, °С	ТПНС2, °С
1	Пуск №1	79	20	-	30	-	526*	511*
2	Пуск №1	129	140	605	235	-	635*	961*
3	Пуск №1	123	120	603	190	540	821	882*
4	Пуск №1	119	180	636	240	505	972	1129
	Пуск №2	120	300	639	385	450	957	1070
5	Пуск №1	119	110	632	220	498	980	1012
	Пуск №2	120	295	668	400	622	979	1011
	Пуск №3	60	340	659	415	621	964	997

Потеря массы насадков после огневых испытаний составляет от 0,65% до 2,32 %, при этом эрозии и сколов материала не обнаружено. Геометрические характеристики сопловых насадков после огневых испытаний не изменились.

Торцевое уплотнение обеспечивает надёжную герметизацию стыка. Боковое уплотнение в холодном состоянии не герметично, но в процессе огневой работы оно герметизируется. Это явление объясняется радиальным термическим расширением металлического кольца, в котором установлено боковое уплотнение, вследствие чего оно поджимается и герметизируется. Анализ результатов испытаний показал также удовлетворительную стойкость материала соплового насадка из УУКМ и уплотнителя марки IZOLOCK C-200 допускающую многократное использование.

Механизм крепления обеспечивает надёжную фиксацию соплового насадка и необходимое для герметизации торцевого уплотнения стабильное во времени осевое сжимающее усилие. Все упругие элементы использовались многократно и не имели после огневых испытаний механических повреждений или видимых деформаций. Несмотря на то, что крепление соплового насадка осуществлялось упругими элементами, его фиксация в составе камеры была устойчивой и надёжной как в холодном состоянии, так и в процессе огневой работы. Несмотря на это, вопрос о выборе оптимального варианта материала для гибких элементов остаётся открытым. Поскольку материал 36НХТЮ не рекомендуется для изготовления высокотемпературных пружин, то его применимость для кратковременного использования в области температур 600-700 °С требует более тщательного исследования. В наших экспериментах мак-

симальная температура прижимного элемента на наиболее механически нагруженном участке не превышала 415 °С, при этом длительность работы при данной температуре составляла менее 2-х минут.

Выводы:

1. Разработана новая технология изготовления сопловых насадков из УУКМ, обеспечивающая среднеобъёмную плотность УУКМ ~1,35 г/см³. Технология изготовления предусматривает получение углепластиковых заготовок без поперечной прошивки слоёв и с использованием низкомолекулярного углеродного сырья, что обеспечивает значительное снижение производственных расходов.

2. Огневые испытания сопловых насадков из УУКМ в составе ЖРД подтвердили работоспособность новой технологии изготовления.

3. Огневые испытания подтвердили работоспособность концепции упругой фиксации и центровки соплового насадка в составе камеры ЖРД.

4. Уплотнительный углеродный материал марки IZOLOCK C-200 может быть рекомендован для герметизации стыков сопловых насадков в условиях ЖРД.

5. Необходимо проведение дальнейших исследований в области упругих элементов, работающих при температурах 600-700 °С.

Список литературы

1. Миронов В., Кочетков Ю., Давыденко Н. Оправа для огня // Двигатель, №2, 1999. с. 8-9.
2. Lacombe A., Pichon T., Ferrey M., Ellis R., Humbert S., Payne F. M. RL10B-2 - ground qualification of an improved C-C deployable nozzle extension assembly for Delta IV// AIAA-2002-3585, 10 p.

TESTS OF EXPERIMENTAL LRE CHAMBERS WITH NOZZLE'S EXTENSIONS FROM CCCM MATERIAL

© 2006 V.N. Shnyakin, A.M. Potapov, V.G. Pereverzyev, A.N. Kovalenko, R.A. Marchan

The paper presents results of firing tests of experimental LRE chambers with nozzle's extensions from carbon-carbon composite material (CCCM), as well as design-technological specificities at manufacture of CCCM extension. The results of experimental works are positive.