

Из композиционных материалов (КМ) различных классов, прежде всего из углерод-углеродных (УУКМ) и углерод-керамических (УККМ), по современным технологиям изготавливаются прочные тонкостенные оболочки больших размеров. Целый ряд достоинств УУКМ и УККМ делают их весьма перспективными для использования в элементах проточных трактов ЖРД. Американская компания Pratt & Whitney и французская SEP разрабатывают крупногабаритные сопла из УУКМ CarboSEP для двигателя 3-й ступени РН "Дельта-3". В России комплексные работы в этом направлении ведутся по заказам РКА на ведущих предприятиях отрасли — в Центре Келдыша, КБХА, КБХМ, РКК "Энергия".

Композиционные материалы на основе углерода обладают небольшой удельной массой. Наряду с этим они имеют значительную эрозионную стойкость и высокую прочность (σ_p и $\sigma_{сж}$ более 100 МПа), которая с ростом температуры до 2500 К даже возрастает. В настоящее время разработаны технологии изго-

— совместимость КМ стационарных и сдвигающихся сверхзвуковых сопловых насадок с металлическими элементами сопел.

Проблема химической стойкости УУКМ и УККМ обусловлена взаимодействием углерода с окисляющими компонентами продуктов сгорания. Следует отметить особенность керамических материалов, у которых при высокой температуре происходит формирование на огневой поверхности оксидных пленок. Эти пленки предотвращают диффузию окислителя к углероду и его унос. Для ЖРД, работающих на компонентах кислород-водород, кислород-метан, кислород-керосин существует минимальная величина расширения $r_{a \min}$ (размер, определяющий взаиморасположение стыка охлаждаемой части сопла и неохлаждаемого насадка), начиная с которой процессы теплообмена и химического уноса не отражаются на работе сопла. При этом температура огневой стенки сопла из КМ не превышает 2100 К, а ско-

ОПРАВА ДЛЯ ОГНЯ

Вадим Миронов,

начальник отделения Центра Келдыша РКА, д.т.н., профессор

Юрий Кочетков,

начальник отдела Центра Келдыша РКА, д.т.н.

Николай Давыденко,

начальник сектора Центра Келдыша РКА

товления каркасов УУКМ из углеродных нитей или тканей с последующим их насыщением и созданием углеродной или углерод-карбидной матрицы. Промышленность освоила производство сравнительно недоро-

гих двумерных и объемных (3D) образцов с уникальными физико-механическими свойствами и, в частности, сопел диаметром до 3 м, длиной до 2,6 м и толщиной стенки 1,5...2 мм.

В настоящее время новейшие технологии, нашедшие широкое применение в области ракетных твердотопливных двигателей, активно вторгаются в сферу создания ЖРД. Сравнительно недорогие неохлаждаемые сопла из композиционных материалов жидкостных реактивных двигателей почти в два раза легче металлических охлаждаемых сопел.

Однако возникли новые проблемы. Требовалось обеспечить:

- химическую стойкость углеродсодержащих КМ;
- механическую прочность и устойчивость оболочек сопел, в том числе при нестационарных и циклических силовых и тепловых нагрузках;

Проведенные в Центре Келдыша исследования подтвердили, что углекомпозиаты и углерод-керамические материалы, широко используемые для изготовления элементов конструкций носителей, газогенераторов и топливных баков, могут применяться также и в соплах современных ракетных двигателей, в том числе и ЖРД.

рость эрозии меньше наперед заданной критической величины V_{\min} .

Величину $r_{a \min}$ следует минимизировать. При этом, во-первых, увеличится длина легкой неохлаждаемой части сопла из

КМ, и, во-вторых, узел стыка и коллектор подачи охлаждающего компонента будут иметь меньший диаметр, что также снизит вес конструкции.

Добиться уменьшения величины $r_{a \min}$ можно прежде всего за счет применения УККМ. Однако в этом случае остаются ограничения по температуре (2100 К). Второй способ уменьшения $r_{a \min}$ основан на использовании эффекта завесного охлаждения. Для этого перед узлом крепления насадка организуется подача небольшого количества горючего вдоль образующей сопла. Это приводит, с одной стороны, к охлаждению корневого участка насадка, с другой стороны, к уменьшению концентрации окисляющих компонентов на огневой стенке, причем уменьшение $r_{a \min}$ пропорционально расходу горючего.

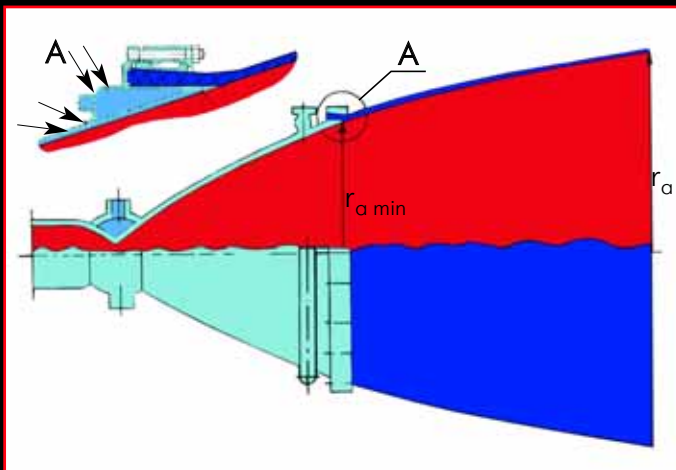
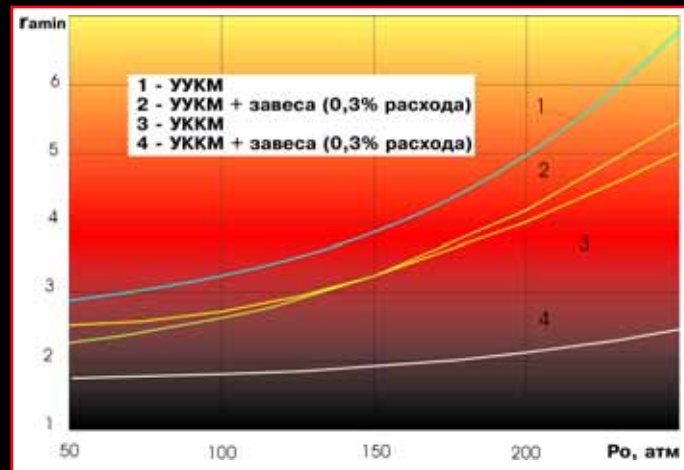
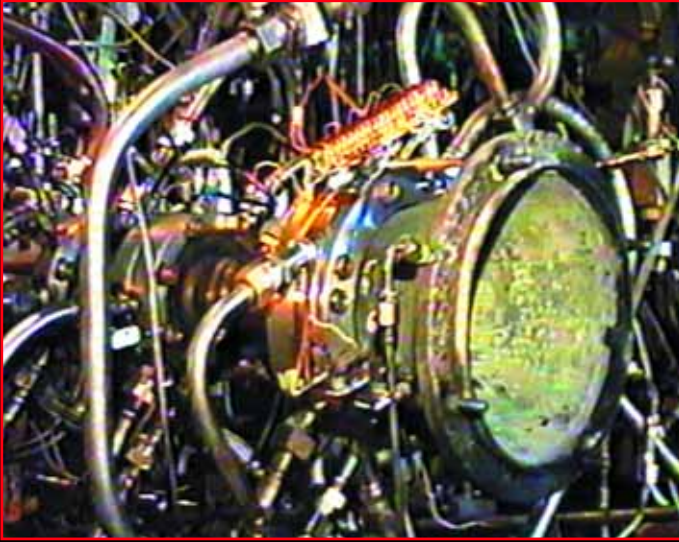


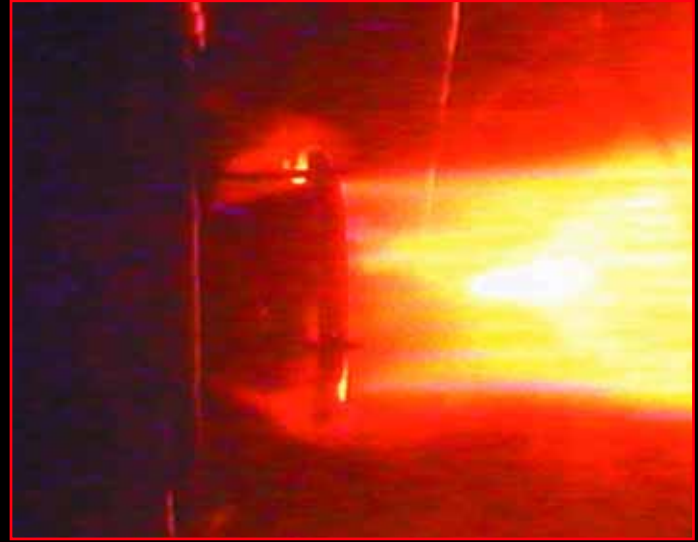
Схема сопла ЖРД, оснащенного насадкой из КМ



Зависимость $r_{a \min}$ сопла с неохлаждаемым насадком из УУКМ и УККМ от давления в камере при $V_{\min} = 5 \cdot 10^4$ мм/с



Сопло из УККМ в сборе (с технологической оснасткой, выходной диаметр 650 мм)



Фрагмент видеозаписи огневого испытания экспериментального сопла из УККМ (давление в камере сгорания 80 атм, температура продуктов сгорания 3560 К, температура огневой стенки 2100 К). Сопло выдержало 7 включений ЖРД без механических повреждений

Наилучшие результаты достигаются при совместном использовании завесы и материала УККМ. Расход горючего для организации завесы до 0,3 % от суммарного практически не влияет на энергетические характеристики двигателя.

Достижение требуемых прочностных характеристик насадка из КМ и динамической устойчивости оболочки может быть обеспечено несколькими способами. Первый заключается в выборе структуры КМ и способа его армирования высокопрочными углеродными нитями. В этом отношении могут быть рекомендованы:

- УУКМ, изготавливаемые по тканевой технологии с попеременной прошивкой слоев для повышения межслоевой прочности каркаса ($\sigma_p = 65$ МПа, $\sigma_{сж} = 94$ МПа);
- объемносилицированные УУКМ и УККМ, изготавливаемые методом круглого ткачества 3D структуры ($\sigma_p = 102$ МПа, $\sigma_{сж} = 120$ МПа);
- УККМ сэндвичной структуры, изготавливаемые по комбинированной тканевой технологии с послойным объемным силицированием поверхностных слоев ($\sigma_p = 160$ МПа, $\sigma_{сж} = 316$ МПа).

Второй способ может быть основан на разработанных в Центре Келдыша методах оптимального профилирования тонкостенных оболочек (насадка) при определенном выборе контура проточной части сопла. Сочетание обоих способов обеспечивает возможность многократного применения сопел из КМ, обладающих большим временным ресурсом и высокой надежностью при циклических нагрузках.

Огневые испытания сопел из УУКМ и УККМ проводились в составе ЖРД (кислород-метан и кислород-водород) тягой 0,4 и 3,0 тс. Исследовались работоспособность изготовленных по перечисленным выше технологиям неохлаждаемых сопел при максимальных тепловых нагрузках (температура нагрева $2 \cdot 10^3$ К/с) и высотных условиях работы (давление 0,06...0,1 атм), а также эффективность завесного охлаждения.

Анализ нагружения сопел из КМ показал, что максимальные сжимающие и растягивающие тепловые напряжения в оболочке

возникают в первые 3...7 с работы двигателя и их амплитуда не превышает 40...60 % от допустимого значения. Суммарное время наработки на каждом сопле превышало 400 с, причем максимальная скорость эрозии огневой стенки была не выше 10^{-4} мм/с (УУКМ) и 10^{-5} мм/с для УККМ. Отличные результаты по эрозийной стойкости продемонстрировали сопла из УККМ сэндвичной структуры.

В экспериментальных исследованиях завесного охлаждения расход водорода составил 0,2...0,3 % от суммарного, температура стенки уменьшилась на 400...500 К, а эрозия УУКМ полностью отсутствовала.

В целом экспериментальные исследования подтвердили работоспособность и эффективность сопел ЖРД из углеродных и углерод-керамических КМ, стойкость к циклическим нагрузкам, длительным тепловым и химическим воздействиям. В полной мере это относится к линейным, тарельчатым соплам (с внешним или внутренним расширением), а также к соплам с промежуточной угловой точкой большой степени расширения для двигателей нетрадиционных компоновок.

Неохлаждаемые сопла из КМ могут быть внедрены и на уже разработанных двигателях. Примером может служить кислород-водородный ЖРД (на базе маршевого крупногабаритного двигателя разработки КБХА), работающий при переменном атмосферном давлении. Применение выдвигающегося неохлаждаемого насадка из КМ позволит обеспечить высотные условия, уменьшить массу сопла (на 160 кг) и увеличить среднетраекторный удельный импульс тяги (на 4...5 с). Разработанные сопла могут быть также эффективно использованы на многих ЖРД зарубежного производства для улучшения их энергетических характеристик и значительного уменьшения веса.

Внедрение существующих и создание перспективных КМ позволяют надеяться на значительное улучшение энерго-массовых характеристик новых двигателей, отвечающих самым высоким требованиям по эффективности и надежности.

DIGEST

A lot of advantages of carbon-carbon and carbon-ceramic composite materials (CM) make them very promising in components of liquid-propellant rocket engine flow passages. The complex works in this area are placed by the orders of RKA (Russian Space Agency) at several leading companies: Keldysh' Center, KBKhA design bureau, KBKhM design bureau, "Energy" RCC. The following problems have been successfully solved: chemical stability of carbon-containing composite materials, mechanical strength and stability of nozzle casings including non-stationary and cyclic force and heat loadings. The CM offer strong opportunities for designing of structures with moveable or flap-type nozzles, supermodel petal-type nozzles as well as engines of a non-traditional layout. The implementation of existing and development of advanced composite materials will provide significant improvement of power-mass characteristics of new engines meeting the most severe requirements to efficiency and reliability. The designed nozzles could be efficiently used abroad in many liquid-propellants rocket engines.

HOLDER FOR FIRE