

УДК 620.171:629.13:537.525

ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ В ГИПЕРЗВУКОВОМ ПОТОКЕ ПЛАЗМЫ¹

© Б. Е. Жестков, В. В. Штапов²*Статья поступила 10 июля 2015 г.*

Исследованы свойства высокотемпературных аэрокосмических материалов, находящихся в гиперзвуковом потоке плазмы. Исследования проводили в аэродинамической трубе ВАТ-104 ЦАГИ, позволяющей моделировать условия полета с большой гиперзвуковой скоростью в верхних слоях атмосферы (60 – 100 км). Приведены основные условия моделирования взаимодействия высокосубзвукового потока с поверхностью. Определены термохимическая устойчивость, ресурс, каталитическая активность, излучательная способность ряда образцов, рассмотрено влияние механической нагрузки на интенсивность окисления углеродных композиционных материалов в потоке воздушной плазмы.

Ключевые слова: воздействие потока плазмы; термохимическая устойчивость; каталитическая активность; излучательная способность; ресурс углеродных композиционных материалов.

Испытания образцов аэрокосмических материалов в условиях, моделирующих условия полета — один из основных этапов разработки гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА) [1 – 9]. Важность испытаний и высокие требования, предъявляемые к материалам гиперзвукового летательного аппарата, связаны с тем, что на поверхность аппарата одновременно воздействуют агрессивный плазменный поток воздуха, предельно высокие тепловые и механические нагрузки. В сильной головной ударной волне происходят практически полная диссоциация молекул воздуха, возбуждение электронных уровней частиц и ионизация. Воздействие этой химически очень активной среды наряду с высокими тепловыми и механическими нагрузками приводит к катастрофическому разрушению теплозащиты. Основным механизмом разрушения материала — окисление его компонентов атомами кислорода. Определенный вклад вносят эрозия материала за счет сил трения и градиентов давления у поверхности модели, а также процессы сублимации, оплавления и испарения материала, сопровождающиеся уносом продуктов деструкции потоком [8].

В 60 – 80-е годы в СССР интенсивно исследовались индукционные разряды, в частности в ИМЕТ РАН. В 1968 г. в ЦАГИ была создана установка с индукционным подогревателем газа для исследования взаимодействия разреженного гиперзвукового потока газа с поверхностью [10]. В 70-е и начале 80-х годов в ИПМ РАН, ЦНИИМаш и ЦАГИ начали работать мощные установки для исследования воздействия высокотемпературного потока газа на аэрокосмиче-

ские материалы. На основании советских плазматронов в Европе в 90-е годы были созданы три плазматрона, позднее подобные разработки начаты в Японии, США и Китае. Эта область исследований интенсивно развивается. Следует отметить, что практически все плазматроны являются дозвуковыми. В ЦАГИ с целью более полного моделирования взаимодействия потока газа с поверхностью ГЛА созданы более сложные гиперзвуковые аэродинамические трубы ВАТ-104 и ВТС с подогревателями газа мощностью соответственно 240 и 680 кВт.

В настоящее время исследования проводят в более дешевой аэродинамической трубе ВАТ-104. С 2000 г. она имеет сертификат РФ в составе Испытательного центра «Аэротермодинамика» ЦАГИ. Аттестат аккредитации в Реестре Авиарегира МАК № ИЛ-083 действителен на период 20.05.2011 – 30.05.2016 гг. Принципиальная схема аэродинамической трубы ВАТ-104 представлена на рис. 1. Подогрев газа осуществляется с помощью высокочастотного индукционного подогревателя, который позволяет получать спектрально чистый высокосубзвуковой поток газа [8, 11]. Подогреватель характеризуется высокой стабильностью и повторяемостью режимов (отклонения параметров от заданных значений не превышают 3 %) [8]. Индуктор питается от высокочастотного генератора ВЧИ-4-160/1.76, частота которого $f = 1,76$ МГц, колебательная мощность $W \leq 160$ кВт. Плазма разряда имеет вид веретена, отжатого от стенок разрядной камеры слоем относительно холодного несветящегося газа. Рабочий газ нагревается бесконтактным способом, обеспечивающим отсутствие загрязнений, высокую стабильность и повторяемость режимов, что крайне важно при исследовании материалов [11].

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 14-08-00976-а).

² Центральный аэрогидродинамический институт им. проф. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), г. Жуковский Московской области, Россия; e-mail: bzhestkov@mail.ru, shtapovvv@mail.ru

Штатное зажигание разряда осуществляется в среде аргона при вакуумировании разрядной камеры до давления $P_0 = 5 - 30$ Па. Затем подается рабочий газ, расход которого и мощность подогревателя плавно увеличиваются. Расход рабочего газа регулируется при помощи системы дросселей вручную или задается программой. Время выхода на режим составляет от 10 до 60 с. В качестве рабочего газа служит в основном воздух. Газ, нагретый в подогревателе, истекает через сопло Лавала в рабочую камеру, образуя недорасширенную струю. Давление в рабочей части ВАТ-104 в зависимости от количества и типов подключенных вакуумных насосов и величины расхода газа может составлять $P_{рч} = 1 - 1000$ Па. На различных расстояниях от среза сопла в струе могут быть реализованы числа Маха $M = 4 \div 8$. Диаметр струи обычно составляет 0,1 м, расстояние от среза сопла до диска Маха — 0,25 м.

Рабочая камера представляет собой камеру Эйфеля и имеет форму цилиндра диаметром 1,6 м и длиной 4 м. К переднему торцу рабочей камеры подсоединен подогреватель газа с водоохлаждаемым соплом, ее задний торец соединен через вакуумный затвор с вакуумной емкостью. В рабочей камере размещены механизм ввода модели в поток и теплообменник, охлаждающий высокотемпературную струю газа после обтекания образца. Плазмотрон обеспечивает нагрев рабочего газа до температуры $T_0 = 5000 - 10\,000$ К, при расходе до $G = 5$ г/с и полном давлении до $P_0 = 0,5$ бар. Максимальная продолжительность опыта ограничена нагреванием рабочей камеры и составляет 20 мин. Скорость потока равна 4–4,5 км/с, тепловой поток к модели $Q = 0,1 - 10$ МВт/м². При испытаниях образцов материалов и элементов теплозащиты размером менее 70 мм удается выполнить все основные условия моделирования термохимического воздействия потока на элементы спускаемого аппарата, летящего со скоростью 4–8 км/с на высоте 60–100 км. Условия моделирования взаимодействия высокоскоростного потока с поверхностью следующие [8]:

- 1) числа Рейнольдса, отнесенные к размеру модели, $Re_1 \geq 100$ и числа Маха $M \geq 4$, что обеспечивает газодинамическое подобие обтекания;
- 2) натурное теплосодержание потока, состав и давление газа у поверхности испытываемого образца, тепловой поток и температура поверхности испытываемого образца такие, как и в условиях полета;
- 3) стабильные, воспроизводимые условия испытаний, отсутствие каких-либо загрязнений и примесей в потоке;
- 4) величины скорости, градиентов скорости и давления газа у поверхности испытываемого образца, близкие к их значениям в условиях полета;
- 5) механические нагрузки такие, каким подвергается элемент ГЛА в полете;

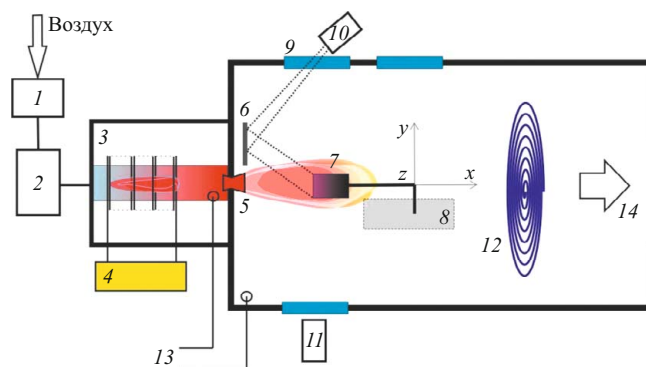


Рис. 1. Схема АДТ ВАТ-104: 1 — расходомер; 2 — система дросселей; 3 — индукционный подогреватель; 4 — ВЧ генератор; 5 — сопло; 6 — зеркало; 7 — модель; 8 — координатный механизм; 9 — оптическое окно; 10 — CCD камера; 11 — бытовая видеокамера; 12 — теплообменник; 13 — датчики давления; 14 — направление в вакуумную камеру

6) длительность испытания соответствует или превышает продолжительность полета.

Все перечисленные условия моделирования выполняются при испытаниях в АДТ ВАТ-104 [8].

Для автоматизированного сбора и машинной обработки измеряемых величин используется ПК с аналого-цифровыми (АЦП) и цифроаналоговыми (ЦАП) преобразователями. На вход системы подаются сигналы от датчиков давления, термопар, установленных на модели, показания анодного напряжения генератора U_a и анодной мощности. Давление в подогревателе P_0 измеряется датчиками ИКД-200 и ИКД-780. Величина расхода газа определяется с помощью датчиков, основанных на балансе температуры трубки, через которую подается газ. Для измерения давления в рабочей камере используются датчики ИКД-10, «Сапфир» и вакуумметр ВИТ-3.

Распределения температуры поверхности модели регистрируются яркостными пирометрами с интерференционными фильтрами (максимумы пропускания 648,890 нм) и CCD камерами в качестве приемника излучения [6]. Применяется также инфракрасный фильтр ИКС-6, который с учетом спектральной чувствительности CCD матрицы обеспечивает регистрацию излучения в спектральном диапазоне 950–1000 нм. Пирометры градуируются по эталону черного тела. Для улучшения ракурса наблюдения исследуемой поверхности модели использовалось металлическое зеркало. Направление наблюдения составляло угол $\gamma = 36^\circ$ с нормалью в критической точке к поверхности модели. Чувствительность CCD камеры регулируется персональным компьютером Pentium. Дополнительно ведется запись испытаний на бытовую видеокамеру Sony.

В испытаниях образцов материалов использовался ряд конструкций моделей (образец на поддерживающем устройстве) [8]. При выборе материалов поддерживающих устройств учитывались их термостойкость, прочность и совместимость с испытываемым



Рис. 2. Образец в державке из штатной плитки ОК «Буран»



Рис. 3. Модель для исследования покрытий

материалом. Некоторые из моделей представлены на рис. 2 – 4. В течение 30 лет в лаборатории используются поддерживающие устройства в виде цилиндров из высокотемпературных теплоизоляционных материалов ВИАМ ТЗМК-10, ТЗМК-25, ТЗМК-1700, ВТНК и штатных плиток ОК «Буран» (см. рис. 2). Образец плотно вставляется в углубление в державке. Зазоры между державкой и образцом заделываются SiC ватой. При подготовке моделей к испытаниям на незащищенные силицированием участки образцов углеродных композиционных материалов (УКМ) наносятся эрозионно стойкие ремонтные покрытия МАИ [12, 13], что позволяет обеспечить надежную защиту не только образцов, установленных в державки, но и элементов конструкции, испытывающихся без державок. Исследуемые покрытия наносятся на диски. Для определения каталитической активности покрытий использовались модели в виде цилиндров, выточенных из штатных теплозащитных плиток ОК «Буран». Половина торцевой поверхности цилиндра (см. рис. 3) покрывалась поверх штатного покрытия ЭВЧ-4М-1УЗ исследуемым покрытием (например, ремонтным покрытием МАИ Д5-Р).

На рис. 4 показана модель, в которой образец поддерживается с помощью корундовой соломки. За образцом установлен диск для снижения потерь образца на излучение. Корундовая соломка вставлена в графитовый насадок с покрытием МАИ Д5-Р, который, в свою очередь, установлен на водоохлаждаемой державке АДТ. Температура образца составляет 2230 К. Из-за большой яркости свечения образца видны только области течения газа повышенной плотности.

Конструкции поддерживающих устройств (см. рис. 2 – 4) позволяют обеспечить достаточно хорошую теплоизоляцию образца и дают возможность

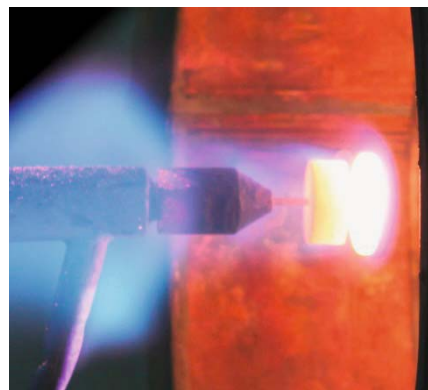


Рис. 4. Фотография диска высокотемпературной керамики на корундовой соломке в процессе испытаний

определить тепловой поток к образцу. Погрешность определения теплового потока при многократных испытаниях составляет 5 – 10 % [3, 8].

Перед испытаниями проводится осмотр образцов материалов с помощью микроскопов с целью обнаружения дефектов, фотографирование (в том числе и с помощью электронного микроскопа) и взвешивание. Степень черноты образцов материалов измеряется в лаборатории ЦАГИ с помощью спектрофотометра SPECORD M40 при комнатной температуре. Затем образец с помощью поддерживающего устройства устанавливается в рабочей камере на оси потока на расстоянии от среза сопла $L = 0 - 150$ мм в зависимости от того, какие тепловой поток и температуру образца необходимо обеспечить. Поверхность модели (образец на поддерживающем устройстве) очищается путем вакуумирования рабочей камеры. Затем модель тщательно очищается в потоке разреженной плазмы в течение 10 мин при давлении в подогревателе $P_0 = 20 - 50$ кПа. Температура поверхности модели при этом составляет 800 – 1300 К в зависимости от типа материала и формы модели.

После очистки модели подогреватель переводится на рабочий режим, определенный с учетом формы образца и известных характеристик материала. Затем режим испытаний несколько корректируется для получения точного значения заданной температуры образца. Погрешность реализации заданного значения температуры образца составляет ± 20 К. Режим и продолжительность испытаний задаются программой испытаний. В случае начала интенсивного разрушения образца испытания прекращаются. Все вопросы проведения исследований предварительно согласовываются с заказчиком. В качестве примера на рис. 5 представлены параметры испытания трех пластин УКМ, установленных на державке из плитки ОК «Буран». Испытания образцов носят комплексный характер. В эксперименте одновременно определяются практически все основные свойства материала. Результаты испытаний протоколируются.

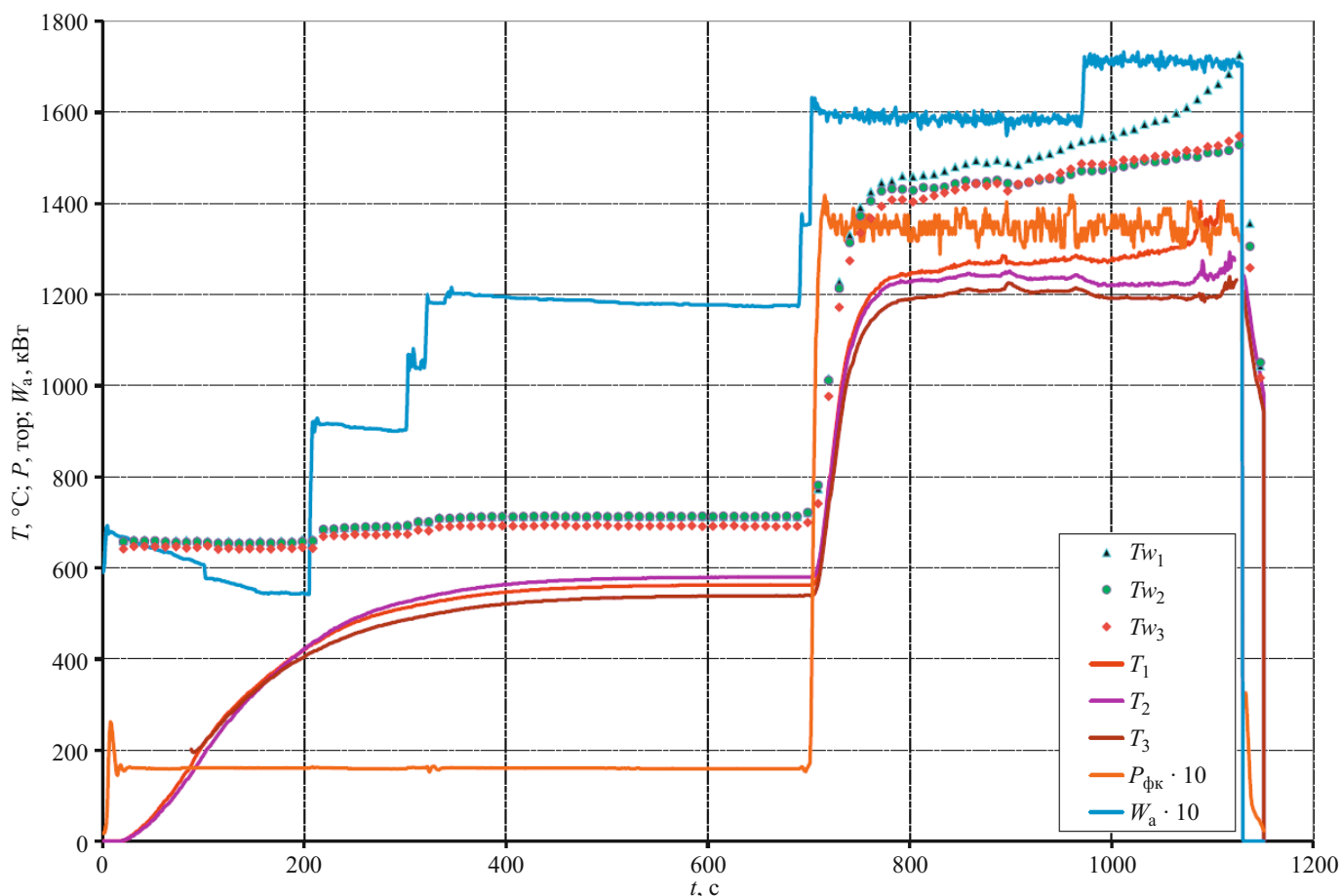


Рис. 5. Изменения температуры трех пластин УКМ при испытании: T_{w_i} и T_i — значения температуры пластины, измеряемые соответственно пирометром и термопарой; $P_{фк}$ — давление газа в форкамере; W_a — мощность по анодной цепи ВЧ генератора (разница температур на лицевой и тыльной сторонах пластин связана с перепадом температур на теплозащитном материале)

После испытания образец фотографируется, осматривается на предмет наличия трещин, отслоившихся участков, очагов деструкции, оплавленных зон, участков изменения цвета и фактуры материала. На рис. 6 в качестве примера представлена фотография пластин после испытаний. Результаты осмотра протоколируются. Образец материала для одноразовых изделий считается прошедшим испытания, если потери массы не превышают $1 - 5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, а очаги разрушения занимают менее $2 - 10 \%$ рабочей площади образца. Для материалов многоразовых аппаратов допустимые потери массы в $10 - 100$ раз ниже, а очаги разрушения образцов отсутствуют. Значения уноса массы нескольких типов образцов УКМ приведены в табл. 1. Повышение уровня температур, при которых проводились испытания, связано с постепенным усовершенствованием материалов. Видно, что покрытие МАИ-Д5 позволяет существенно уменьшить унос.

Специально разработанные поддерживающие устройства способствуют теплоизоляции образца при испытании. Это дает возможность проводить комплексные испытания, определять ряд основных свойств — интегральную и спектральную излучательную способность, каталитическую активность. Использование материалов с низкой каталитической

активностью позволяет избежать последующей рекомбинации атомов на поверхности. Высокие величины интегральной излучательной способности и низкие значения каталитической активности рабочей поверхности существенно снижают тепловой поток и температуру корпуса гиперзвукового аппарата.

Испытания в АДТ ВАТ-104 сопровождаются многопараметрическими расчетами [7, 9, 15]. Теоретическое сопровождение, численное моделирование режимов и условий испытаний являются необходимыми условиями высокой информативности испытаний и выбора оптимальных программ исследований [1]. Результаты численного моделирования необходимы,

Таблица 1. Унос массы образцов УКМ

Температура, К	Продолжительность испытаний, с	Унос, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	Образцы
1500	800	$0,19 \pm 0,06$	29 дисков
1700	200	$1,2 \pm 0,4$	6 пластин
1790	500	$0,35 \pm 0,15$	14 пластин
1910	90	$0,026 \pm 0,011$	4 пластины с покрытием МАИ-Д5



Рис. 6. Фотография пластин УKM после испытаний

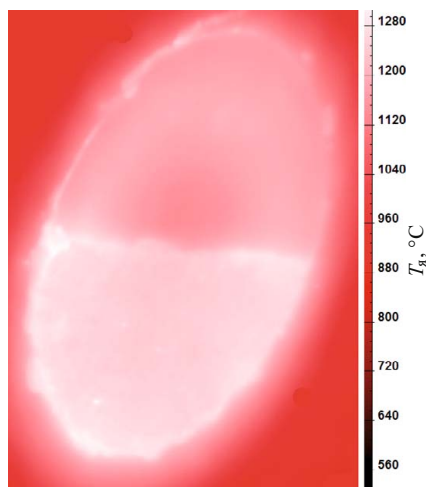


Рис. 7. Распределение температуры модели с эталонным (вверху) и исследуемым (внизу) покрытиями

в частности, для моделирования обтекания и теплообмена, оценки каталитической активности [7, 9, 15].

При определении спектральной $\varepsilon(\lambda, T)$ и интегральной $\varepsilon(T)$ излучательной способности диски материалов толщиной 3–5 мм устанавливались в углублениях на торцах цилиндров из теплоизоляторов ТЗМК-10, ТЗМК-1700, ВТНК. При этом практически устранялись потери тепла, связанные с теплопроводностью державки. Яркостная температура T_y поверхности модели регистрировалась пирометром. Температура T образца измерялась с помощью термопары ПР 30/6, установленной под образцом. В стационарном режиме нагрева можно пренебречь перепадом температуры на теплоизолированном образце и получить

$$\varepsilon(\lambda, T) = \left(\frac{T_y}{T} \right)^{1/4}.$$

Таблица 2. Значения константы скорости гетерогенной рекомбинации покрытия МАИ Д5-Р

Диаметр модели, мм	T_2 , К ($\varepsilon = 0,72$)	$T_2 - T_1$, К ($\varepsilon = 0,8$)	ΔK_w , м/с	K_w , м/с
70	1417	16	0,80	1,60
40	1653	20	0,98	1,78
	1893	41	2,05	2,85
50	1730	20	0,98	1,78
	1950	36	1,80	2,80

Для образца УKM с эрозионно-стойким покрытием получено $\varepsilon(\lambda) = 0,87 \pm 0,03$ на длине волны $\lambda = 5,1$ мкм при $T = 1300$ К [2].

Если при испытаниях начинается оплавление образца или элементов поддерживающего устройства, излучательную способность определяют с помощью T_y и справочного [14] значения температуры плавления T . Для случая теплоизолированного образца с известной теплоемкостью интегральную излучательную способность ε получают, используя регулярный режим нагрева [8] (охлаждения) образца. При скачкообразном повышении давления (мощности нагрева), сопровождающемся увеличением температуры образца $T - T_1$,

$$\varepsilon = \frac{\rho h C_p}{\sigma(T^4 - T_1^4)} \frac{dT}{dt},$$

где ρ , h , C_p — соответственно плотность, толщина и теплоемкость образца; dT/dt — темп нагрева образца в момент скачка. Величина теплопроводности для оценки числа Фурье может быть определена в эксперименте. Для образца УKM с покрытием МАИ Д5 при нагреве получено $\varepsilon = 0,67 \pm 0,02$ при $T = 1400$ К. При выключении нагрева образец охлаждается за счет излучения. В этом случае

$$\varepsilon(T) = -\frac{\rho h C_p}{\sigma T^4} \frac{dT}{dt}.$$

Для образцов материала на базе Si_3N_4 при выключении нагрева получено $\varepsilon = 0,70 \pm 0,03$ при $T = 1200$ К. Во всех случаях излучательную способность определяют путем усреднения результатов пяти измерений.

Каталитическая активность находилась из сопоставления данных численных параметрических исследований обтекания и теплообмена [7, 9, 16], а также измерений температуры теплоизолированного диска [7, 8, 13]. Константа скорости гетерогенной рекомбинации K_w изучаемого покрытия определяется по разности теплового потока к эталонному и исследуемому покрытиям. Потери тепла в державку не превышали 1–5 %. Оба покрытия исследуются в идентичных условиях. С помощью параметрического численного моделирования обтекания и теплообмена модели рассчитывается производная dK_w/dT_w [7]. Параметр K_w исследуемого образца определяется по известному значению K_{ws} для эталонного образца, величине производной dK_w/dT_w и разности температур ΔT_w исследуемого и эталонного образцов [7]:

$$K_w = K_{ws} + \frac{dK_w}{dT_w} \Delta T_w.$$

В качестве примера на рис. 7 показано распределение яркостной температуры на модели с эталонным (ЭВЧ-4М1У-3) и исследуемым покрытиями (МАИ

Д5-Р). В табл. 2 приведены данные для определения значений K_w эрозионно-стойкого покрытия МАИ Д5-Р.

В общем случае используются комбинированные модели, где в углублении на оси цилиндра из высокотемпературного теплоизоляционного материала устанавливаются образцы изучаемого и эталонного материалов в виде полудисков, препарированных термopами.

Термохимическая устойчивость определялась путем измерения потери массы образца и анализа состояния его поверхности. Образцы взвешивались на электронных аналитических весах Vibra HT-120CE, Vibra AF-R220CE, Vibra AJH-620CE. Состояние поверхности образцов исследовалось с помощью электронных микроскопов. На рис. 8 представлена электронная фотография образца УКМ.

В связи с тем, что механическая нагрузка растяжения приводит к повышению интенсивности окисления образцов углеродных материалов [6, 8], необходимо продолжать эти исследования. Увеличение интенсивности коррозии образцов УКМ при наличии механической нагрузки растяжения связано, по-видимому, с тем, что под действием нагрузки «раскрываются» поры и микротрещины в УКМ и идет окисление внутренних слоев материала, не защищенных при силицировании. На рис. 9. представлены значения температуры в центре пластины на передней (T_1) и тыльной (T_2) ее сторонах в процессе испытания.

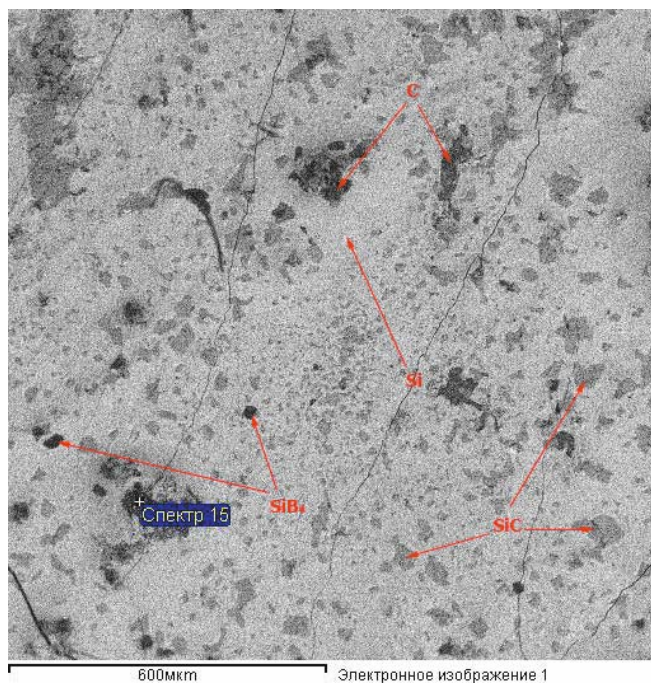


Рис. 8. Структура поверхности образца УКМ до испытания

В табл. 3 для сравнения представлены потери массы пластин силицированного УКМ при наличии нагрузки и без нее. Видно, что при наличии нагрузки и более низкой температуре унос массы значительно выше.

Ресурс определяется с учетом всех основных характеристик материала: уноса массы, наличия и вели-

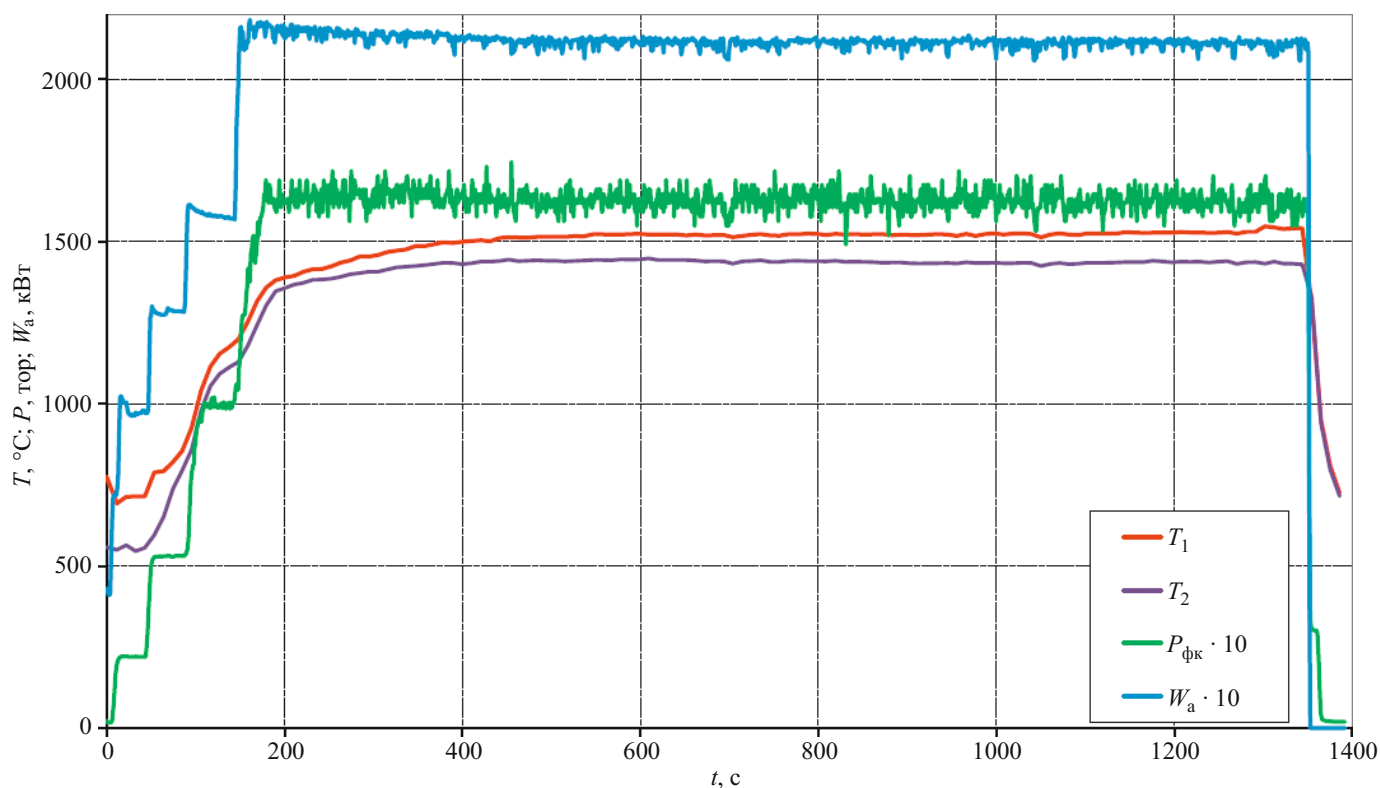


Рис. 9. Режим испытаний пластины УКМ с нагрузкой растяжения 69 МПа

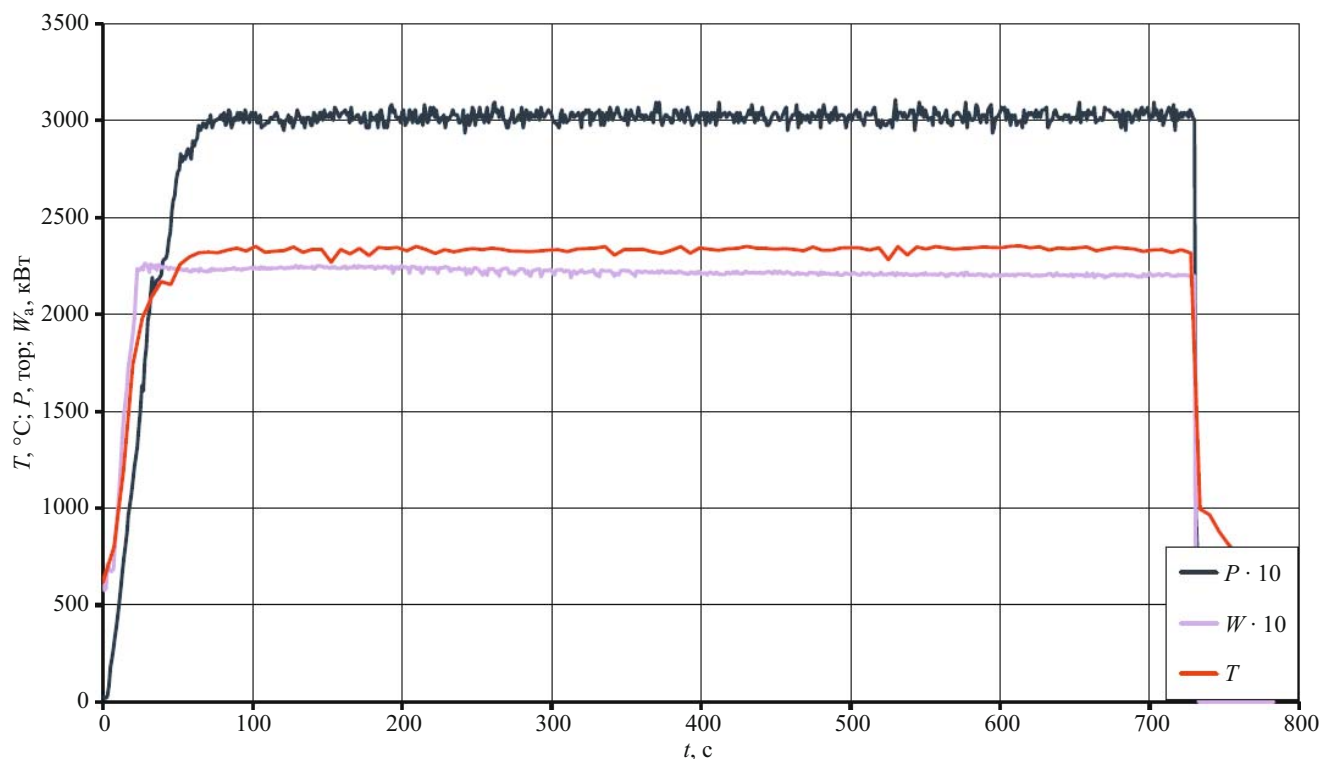


Рис. 10. Режим испытаний образца высокотемпературной керамики

чины очагов деструкции, изменения каталитической активности, излучательной способности. Случается, что материал имеет низкий унос массы, но его каталитическая активность превышает допустимое значение или излучательная способность понижается ниже заданной величины.

В настоящее время в АДТ ВАТ-104 проводятся испытания современных высокотемпературных материалов. На рис. 10 приведен режим работы аэродинамической трубы с температурой на поверхности образца, равной 2350 °C.

Таким образом, при исследовании материалов в гиперзвуковом потоке плазмы определяются его основные свойства: термохимическая устойчивость, ресурс, каталитическая активность, излучательная способность, влияние механической нагрузки на интенсивность окисления. В результате исследований могут быть дополнительно получены предельные температуры эксплуатации материалов, выявлены особенности поведения материалов при прогреве до предельных температур, определено максимальное время работы материала при температурах поверхности, близких к температуре разрушения. По результатам испытаний проводится сравнительный анализ свойств

материалов и определяются наиболее перспективные из них.

ЛИТЕРАТУРА

1. Полежаев Ю. В., Шишков А. А. Газодинамические испытания тепловой защиты. — М.: Промедэк, 1992. — 248 с.
2. Zhestkov B., Shvedchenko V. Evaluation of materials oxidation in induction plasmatron under simulated re-entry conditions / Proc. of the Second European Workshop on thermal protection systems. Stuttgart, Germany, October 25 – 27. 1995. P. 204 – 215. — ESA-WPP-103.
3. Gülhan A., Vennemann D., Yakushin M., Zhestkov B. Comparative Oxidation Tests on Reference Material in Two Induction Heated Facilities / Proc. 46-th International Astronautical Congress. 1995, Oslo, Norway. — IAF-95-1.3.03.
4. Zhestkov B. E., Ivanov D. V., Shvedchenko V. V., et al. Calculated and Experimental Flat and Wavy Surface Temperature Distributions / AIAA Paper 99-0733.
5. Астапов А. Н., Терентьева В. С. Высокотемпературные микрокомпозиционные тонкослойные покрытия с микро-, субмикро- и наноразмерной структурой оксидных слоев / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2010. Т. 76. № 7. С. 24 – 32.
6. Жестков Б. Е., Мугалев А. П., Радченко В. Н., Шарков В. Б. Термолпрочностные испытания образцов композиционных материалов при нагреве в высокотемпературном газовом потоке / Труды ЦАГИ. 2009. Вып. 2683. С. 96 – 101.
7. Егоров И. В., Жестков Б. Е., Шведченко В. В. Определение каталитической активности материалов при высоких температурах в гиперзвуковой трубе ВАТ-104 / Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 1. С. 3 – 13.
8. Жестков Б. Е. Исследование термохимической устойчивости теплозащитных материалов / Ученые записки ЦАГИ. 2014. Т. XLV. № 5. С. 62 – 77.

Таблица 3. Значения уноса массы пластин силицированного УКМ при наличии нагрузки растяжения и без нее

Образцы	Температура образцов, К	Напряжение нагрузки, МПа	Унос, г/(м ² · ч)	Длительность испытаний, с
4 пластины	1670	69	410 ± 198	1400
20 пластин	1850	0	280 ± 82	1200

9. Sakharov V. I., Shtapov V. V., Vasilevskiy E. B., Zhestkov B. E. A blunted cone in a supersonic high enthalpy nonequilibrium air flow / Proc. of the 5th European Conference for Aerospace Sciences. July 1 – 5 2013. Munich, Germany (EUCASS 2013). P. 1 – 11.
10. Баринов И. С., Жестков Б. Е., Омелик А. И., Орлова З. Т. Аэродинамическая установка со свободномолекулярным потоком и высокой температурой торможения / Теплофизика высоких температур. 1973. Т. 11. № 3. С. 602 – 608.
11. Жестков Б. Е. Комплекс стендов с индукционными подогревателями газа / Вестник Казанского технологического университета. 2011. Т. 14. № 19. С. 63 – 69.
12. Жестков Б. Е., Терентьева В. С. Исследование многофункционального покрытия МАИ Д5, предназначенного для защиты жаропрочных материалов / Металлы. 2010. № 1. С. 39 – 48.
13. Пат. 2437961 РФ, МПК C23C 10/26 (2006.01), C23C 24/08 (2006.01). Способ восстановления высокотемпературного кремнийсодержащего защитного покрытия на жаропрочных конструктивных материалах / Терентьева В. С., Еремина А. И., Жестков Б. Е., Астапов А. Н.; заявитель и патентообладатель Московский государственный авиационный институт. — № 2010132004; заявл. 29.07.10; опубл. 27.12.11, Бюл. № 36.
14. Физические величины: Справочник / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 1232 с.
15. Башкин В. А., Егоров И. В., Жестков Б. Е., Шведченко В. В. Численное исследование поля течения и теплообмена в тракте высокотемпературной аэродинамической установки / Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 5. С. 771 – 783.
5. Astapov A. N., Terent'eva V. S. High-temperature microcomposite thin-layer coatings with the micro-, submicro-, and nanoscale structure of oxide layers / Inorg. Mater. 2010. Vol. 76. N 7. P. 24 – 32.
6. Zhestkov B. E., Mugalev A. P., Radchenko V. N., Sharkov V. B. Termoprochnostnye ispytaniya obraztsov kompozitsionnykh materialov pri nagreve v vysokotemperaturnom gazovom potoke [Heat-strength tests of composite material samples with the sample heating in the high-temperature gas flow] / Trudy TsAGI. 2009. Issue 2683. P. 96 – 101 [in Russian].
7. Egorov I. V., Zhestkov B. E., Shvedchenko V. V. Determination of material catalyticity at high temperatures in the VAT-104 hypersonic wind tunnel / TsAGI Sci. J. 2014. Vol. 45. N 1. P. 3 – 20.
8. Zhestkov B. E. Investigation of Thermochemical Stability of Thermoprotective Materials / TsAGI Sci. J. 2014. Vol. 45. N 8. P. 781 – 802.
9. Sakharov V. I., Shtapov V. V., Vasilevskiy E. B., Zhestkov B. E. A blunted cone in a supersonic high enthalpy nonequilibrium air flow / Proc. of the 5th European Conference for Aerospace Sciences. July 1 – 5 2013. Munich, Germany (EUCASS 2013). P. 1 – 11.
10. Barinov I. S., Zhestkov B. E., Omelik A. I., Orlova Z. T. High-temperature wind tunnel with free molecular flow / High Temperature. 1973. Vol. 11. N 3. P. 602 – 608.
11. Zhestkov B. E. Kompleks stendov s induktsionnymi podogrevatelyami gaza [Complex of facilities with the induction gas heaters] / Vestn. Kazan. Tekhnol. Univ. 2011. Vol. 14. N 19. P. 63 – 69 [in Russian].
12. Zhestkov B. E., Terent'eva V. S. Multifunctional coating MAI D5 intended for the protection of refractory materials / Russ. Metallurgy. 2010. N 1. P. 33 – 40.
13. RF Pat. N 2437961, MPK S23S 10/26 (2006.01), S23S 24/08 (2006.01). Sposob vosstanovleniya vysokotemperaturnogo kremniisoderzhashchego zashchitnogo pokrytiya na zharoprochnykh konstruktivnykh materialakh [Method to restore high-temperature silica protective coating for refractory design materials] / Terent'eva V. S., Eremina A. I., Zhestkov B. E., Astapov A. N.; applicant and owner Moskovskii gosudarstvennyi aviatsionnyi institut. — N 2010132004; appl. 29.07.10; opubl. 27.12.11, Byull. Otkryt. Izobret. N 36.
14. Grigor'ev I. S. and Meilikhov E. Z. (eds.). Fizicheskie velichiny: Spravochnik [Physical quantities: reference book]. — Moscow: Énergoatomizdat, 1991. — 1232 p. [in Russian].
15. Bashkin V. A., Egorov I. V., Zhestkov B. E., Shvedchenko V. V. Numerical investigation of the flow field and heat transfer in the circuit of a high-temperature wind-tunnel facility / High Temperature. 2008. Vol. 46. N 5. P. 705 – 717.

REFERENCES