



ПЛИТОЧНЫЕ ТЕПЛОЗАЩИТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ МНОГОРАЗОВЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С РАЗЛИЧНЫМИ НАРУЖНЫМИ СИЛОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В.Г. ТИХИЙ¹, В.В. ГУСЕВ¹, А.М. ПОТАПОВ¹, Е.И. ШЕВЦОВ¹, И.А. ГУСАРОВА¹,
Т.А. МАНЬКО², Ю.В. ФАЛЬЧЕНКО³

¹ КБ «Южное» им. М.К. Янгеля. 49008, г. Днепропетровск, ул. Криворожская, 3. E-mail: info@Juzhnoye.com

² Днепропетровский нац. ун-т им. О.Гончара. 49050, г. Днепропетровск, просп. Ю. Гагарина, 72.

³ ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Теплозащитные плиточные конструкции, изготовленные из жаростойких материалов, широко применяются для защиты корпусов космических аппаратов. В качестве высокотемпературных, жаростойких материалов для изготовления плиток теплозащитной конструкции могут использоваться углерод-углеродные композиционные материалы, жаростойкие металлические сплавы и конструкционная керамика. В представленной работе проведена расчетно-теоретическая оценка прочностных свойств комбинированных плиток теплозащитных конструкций возвращаемых космических аппаратов, имеющих металлический наружный силовой элемент и корпус из углерод-углеродного композиционного материала, а также плиток из углерод-углеродных и керамических материалов. Рассмотрены преимущества и недостатки каждой из исследуемых плиточных теплозащитных конструкций. На основе прочностных расчетов определены размеры силовых элементов для корпусов теплозащитных конструкций, удовлетворяющие требованиям прочности, устойчивости и стойкости к флаттеру, и масса каждой конструкции. Установлено, что самые лучшие массовые и прочностные характеристики имеют теплозащитные плитки с корпусом из углерод-углеродных композиционных материалов и плитки с наружной трехслойной сотовой панелью из сплава ЮИПМ-1200. Библиогр. 6, табл. 5, рис. 9.

Ключевые слова: возвращаемые космические корабли, теплозащитные плиточные конструкции, напряженно-деформированное состояние, углерод-углеродные композиционные материалы, жаростойкие металлические сплавы

В возвращаемых космических кораблях-самолетах «Спейс Шаттл» и «Буря» для теплозащиты участков, нагреваемых до 1200 °С, использовали плитки на основе кварцевого волокна. Серьезным недостатком кварцевых керамических плиток является их чрезвычайная хрупкость и низкая прочность, а также неразъемное соединение плиточной теплозащиты с обшивкой планера. Более перспективной является концепция съемных теплозащитных плиточных конструкций с корпусом из жаростойких материалов и внутренней теплоизоляции. Такая конструкция обеспечивает более надежное крепление плиток теплозащиты механическим путем и удобство их межполетного обслуживания.

В качестве высокотемпературного, жаростойкого материала плиток теплозащитной конструкции (ТЗК) могут служить углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ), жаростойкие металлические сплавы и конструкционная керамика. Приемлемыми являются конструкции теплозащиты, поверхностная плотность которых не превышает 10 кг/м² [1].

Каждый из жаростойких материалов имеет свои преимущества и недостатки. К преимуществам металлов относится то, что их производство высокостандартизировано и их качество гаран-

тируется в пределах малых допусков. При этом чрезвычайно важным является то обстоятельство, что накоплен богатый опыт переноса результатов испытаний металлических образцов на натурные детали конструкций. Основными жаростойкими материалами, применяемыми для работы в высокотемпературных конструкциях, являются сплавы на основе железа и никеля. К основным недостаткам металла относится их высокий удельный вес и недостаточная коррозионная стойкость при рабочих температурах.

Керамические материалы по многим эксплуатационным параметрам (термостойкости, твердости, коррозионной стойкости, плотности, доступности и дешевизне сырья) существенно превосходят металлы и сплавы. Основные проблемы, возникающие при выборе керамики для плиток ТЗК — ее естественная хрупкость и возможность катастрофического разрушения за счет развития трещин Гриффитса [2, 3].

УУКМ характеризуются малой массой, высокой прочностью и жесткостью, низким коэффициентом термического расширения. Более того, прочность этого материала увеличивается с увеличением температуры. УУКМ сохраняют свои механические свойства при температурах до



Рис. 1. Панели из УУКМ-SiC фирмы «DLR» с внутренней теплоизоляцией

500 °С в неокислительной среде лучше любого другого материала. При использовании в конструкциях теплозащиты космических аппаратов (КА) все внешние поверхности конструкций из УУКМ должны быть защищены жаростойким эрозионно-стойким покрытием, предотвращающим унос материала на атмосферном участке полета [1]. Фирмой «DLR» (ESA) разработаны наружные термостойкие панели из композита УУКМ-SiC (рис. 1) [4].

Панели из таких материалов используются в теплозащитных конструкциях МКА SHEFEX, PH NIFIRE 8, демонстраторе IXV [5]. Изготовление конструкций из УУКМ является длительным и дорогостоящим процессом.

Цель данной работы — сравнительный анализ теплозащитных плиток с наружным несущим слоем из различных термостойких материалов и пакетом внутренней теплоизоляции на основе расчетно-теоретической оценки их прочностных и массовых характеристик.

Объектом исследования являются плитки теплозащитных конструкций для многоразовых КА с силовым элементом из металлических, углерод-углеродных и керамических материалов и внутренней теплоизоляцией. Исследуемые теплозащитные конструкции должны иметь поверхностную плотность не более 10 кг/м², обеспечивать снижение температуры от 1100 °С на внешней стенке до 200 °С на внутренней стенке в течение 20 мин за один цикл штатного использования аппарата, при этом выдерживать 100-кратное повторение таких циклов в течение 15 лет.

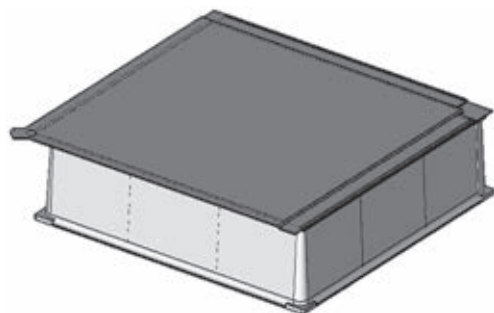


Рис. 2. Конструкция комбинированной теплозащитной плитки

Анализ существующих многоразовых теплозащитных конструкций показал, что основными элементами съемных теплозащитных плиток являются наружный силовой элемент из жаростойкого материала, внутренняя легковесовая волокнистая теплоизоляция и система крепления теплозащитной плитки к силовой оболочке КА. Несущий силовой элемент должен иметь конструкцию, в которой при нагружении возникают минимальные внутренние напряжения, что позволяет уменьшить толщины, а следовательно, его массу.

Для анализа вариантов наружного силового элемента различных конструкций из ряда жаропрочных материалов была разработана расчетно-теоретическая методика оценки влияния аэродинамических воздействий на съемные теплозащитные плитки многоразовых КА на основе пакета программ MSC Nastran. Сравнительный анализ вариантов конструкции проводили для плитки с размерами в плане 300×300 мм и высотой полезного объема для размещения легкого теплоизоляционного элемента 50 мм. Спроектировано и проанализировано шесть различных вариантов плиток с корпусами из УУКМ и конструкционной керамики, с металлическим листовым, трехслойным гофрированным и сотовым силовыми элементами, а также комбинированная плитка с корпусом из УУКМ и металлическим листовым силовым элементом.

Конструкции плиток с металлическим листовым, трехслойным гофрированным и сотовым силовыми элементами и результаты расчетов их напряженно-деформированного состояния (НДС) приведены в работе [6].

Комбинированная плитка ТЗК состоит из корпуса из УУКМ и наружного металлического силового элемента, который крепится в восьми точках к ребрам корпуса в местах их пересечения с боковыми стенками (рис. 2).

Корпуса теплозащитных плиток из УУКМ и керамики выполняют по идентичной схеме и проектируются в виде цельноформованного короба (рис. 3).

Корпус плитки подкреплен четырьмя ребрами, разделяющими его внутренний объем на 9 ячеек с размерами в плане 100×100 мм и снизу замкнут плоским днищем из титановой полированной фольги, которое соединено с коробом по торцам стенок и ребер методом склейки. Корпус имеет отбортовки для крепления к силовой оболочке КА. Так как керамические и углерод-углеродные материалы не допускают значительных изгибных деформаций, которые возникают под воздействием внешних нагрузок, то их закрепление осуществляется через промежуточный элемент — демпфирующую подложку. Последняя должна иметь опре-

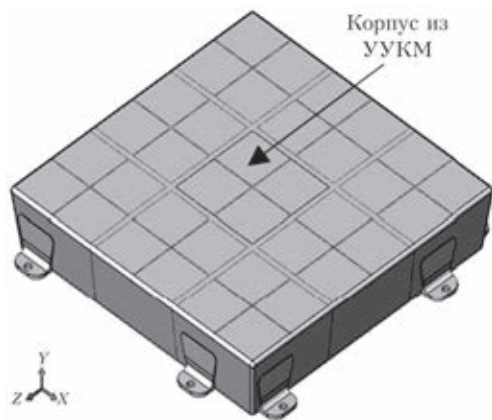


Рис. 3. Конструкция теплозащитной плитки с корпусом из УУКМ или керамики

деленную эластичность и выполнять роль мягкой пружинящей прокладки (фетр), компенсирующей, во-первых, все неровности внешней металлической поверхности планера, а, во-вторых, все изгибные деформации обшивки, и одновременно служить аварийным теплозащитным покрытием (ТЗП), предохраняющим силовую оболочку от перегрева при разрушении одной плитки.

Корпус опирается непосредственно на аварийное ТЗП, установленное на силовую оболочку КА, и закреплен в четырех углах, при этом в одном из углов крепление жесткое, а в остальных трех допускает перемещение в плоскости стыка по направлению прямой, связывающей эту точку с жестко закрепленной. Все точки крепления допускают поворот в диагональной плоскости ТЗК. Крепление плиток осуществляется винтами, которые ввинчиваются в гайки, закрепленные на корпусе многоразового КА. В зоне установки винтов располагаются бобышки-термомосты из стеклопластика (рис. 4).

За счет низких коэффициентов линейного температурного расширения УУКМ и керамических элементов возможно минимизировать межплиточные зазоры, в которые устанавливается межплиточная теплоизоляция (ТИ) из кварцевого волокна, уплотняемая кварцевыми шнурами. После этого межплиточные швы закрываются уплотнением из жаропрочного сплава.

Принятые для расчета значения свойств материалов приведены в табл. 1. В качестве жаропрочного металлического сплава выбрали порошковый

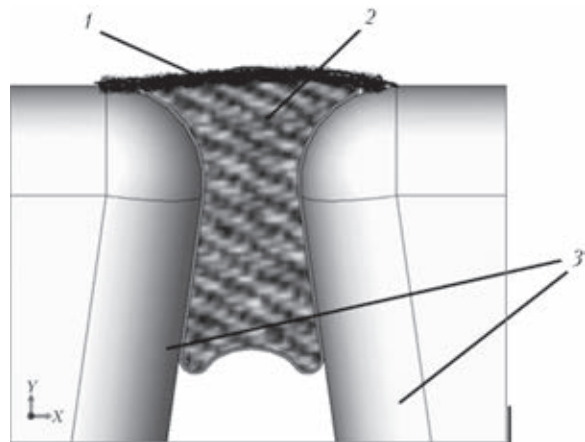


Рис. 4. Вариант межплиточного уплотнения: 1 — уплотнение из жаропрочного сплава; 2 — внутренняя забивка типа кварцевого шнура; 3 — плитка ТЗК

сплав на основе Ni-Cr — ЮИПМ-1200, специально разработанный для использования в теплозащитных конструкциях многоразовых КА (МКА). Для сравнения была выбрана силикатная керамика со свойствами, представленными в табл. 1.

Для проектных расчетов в качестве основной нагрузки принято внешнее давление и воздействие температуры. Все расчеты проводили с учетом нагружения наружным расчетным давлением 0,065 МПа при температурах до 1100 °С. Кроме того, с целью предотвращения флаттера (самовозбуждающихся незатухающих изгибающих и крутящих автоколебаний элементов конструкции летательного аппарата, которые могут привести к его разрушению) при максимальных скоростных напорах на участке спуска от конструкции требовалось, чтобы частота первого тона собственных колебаний составляла не менее 100 Гц.

Выбор размеров силовых элементов корпуса и способа закрепления на оболочке КА проводили на основе расчетов НДС, запасов прочности, устойчивости и модального анализа конечно-элементных (КЭ) моделей соответствующих конструкций, выполненных с помощью пакетов программ Nastran.

Коэффициент запаса прочности (устойчивости) определяли как отношение предела прочности материала (критической нагрузки для конструкции) к максимальному напряжению (расчетной нагрузке). Прочность конструкции считалась достаточной, если коэффициент запаса прочности был не менее единицы.

Таблица 1. Физические и механические свойства применяемых материалов

Температура, °С	Материал	Плотность, г/см ³	E, МПа	σ_b , МПа	δ , %	$\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹
20	УУКМ	1,8...2,0	24000...45000	90...140	15	3,0...4,7
1100				130...160		
20	Конструкционная керамика	2,4	5000	50	-	5,0
20	ЮИПМ-1200	8,2...8,4		660...1000	15	16
1100				100		

Примечание. σ_b — предел прочности материала при сжатии; E — модуль упругости материала; α — коэффициент температурного расширения; δ — удлинение.

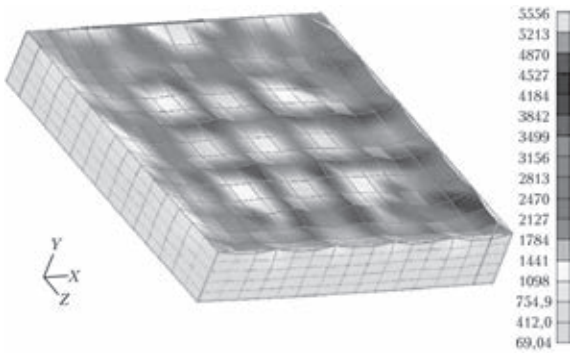


Рис. 5. НДС комбинированного корпуса ТЗК при нагружении максимальным давлением $P^p = 0,065$ МПа

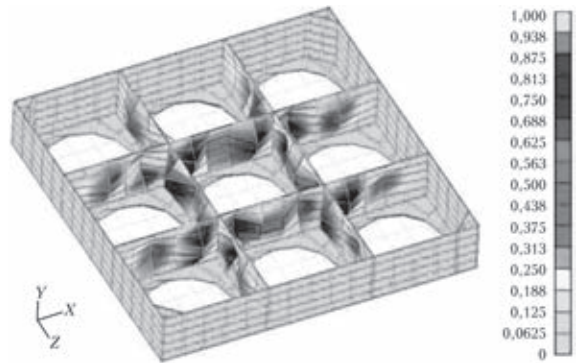


Рис. 8. Характер потери устойчивости корпуса при температурном нагружении

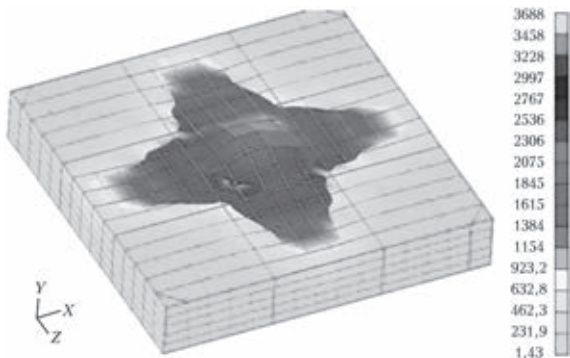


Рис. 6. Характер потери устойчивости дна комбинированного корпуса при нагружении давлением

Результаты расчетов получаются в виде визуализации каждого конструкционного элемента. Результаты прочностного расчета на примере комбинированной плитки ТЗК приведены на рис. 5–9.

НДС плитки ТЗК при нагружении давлением 0,065 МПа показано на рис. 5, 6. Данная конструкция сохраняет устойчивость при нагружении внешним давлением 0,065 МПа, наиболее критичным местом является наружный силовой элемент. Характер потери устойчивости приведен на рис. 6.

НДС плитки ТЗК при температурном нагружении показано на рис. 7. Запас устойчивости корпуса при температурном нагружении равен 6,12.

Характер потери устойчивости приведен на рис. 8. Частоты первых трех тонов собственных колебаний корпуса составляют 294, 302, 310 Гц (рис. 9).

Для исключения флаттера собственная частота должна быть не ниже 100 Гц, т.е. данная конструкция отвечает требованиям по стойкости к флаттеру. Основные результаты расчетов комбинированной плитки представлены в табл. 2. Конструкция удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости. Масса данного варианта корпуса равна 670 г. Толщина переднего листа короба, контактирующего с пластиной РМ-1000, равна 1 мм, толщины боковых стенок и ребер — 0,8 мм.

Аналогично были проанализированы модели плиток ТЗК из УУКМ и силикатной керамики. Основные результаты расчетов плитки ТЗК из УУКМ приведены в табл. 3.

По условиям прочности толщина листа короба, контактирующего с наружной средой и непосредственно воспринимающего внешние нагрузки, равна 1,6 мм, толщины боковых стенок и ребер 0,9 мм. Масса плитки 371 г. Следует отметить достаточно низкую деформативность конструкции из УУКМ как при действии механических нагрузок, так и при нагреве.

Основные результаты расчетов плитки ТЗК из силикатной керамики приведены в табл. 4.

Толщина наружного листа короба, воспринимающего внешние нагрузки, равна 2 мм, толщины боковых стенок и ребер 1 мм. Масса корпуса 920 г.

Анализ результатов расчета. В результате расчетов определены размеры силовых элементов

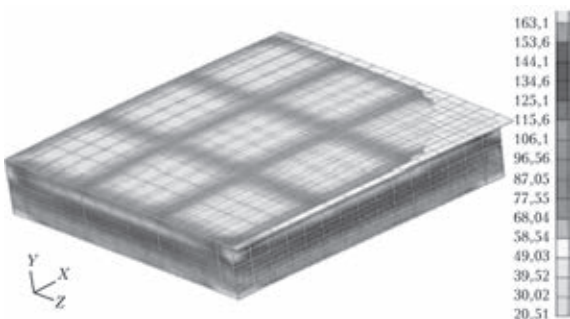


Рис. 7. НДС комбинированного корпуса при температурном нагружении

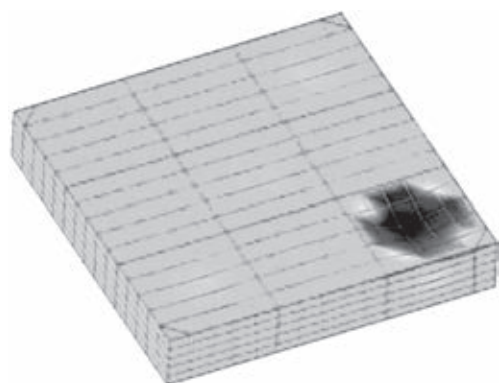


Рис. 9. Форма первого тона собственных колебаний комбинированного корпуса



Таблица 2. Результаты расчетов комбинированной плитки

Параметр	Исследуемый фактор	σ_{\max} , МПа	V , мм	W , мм	η	F , Гц
Расчетное давление	Прочность УУКМ ЮИПМ	85,4 215,5	0,59	2,68	1,05	-
	Устойчивость	-	-	-	1,08	-
Температурное нагружение	Прочность УУКМ ЮИПМ	11,1 9	4,73	1,5	>>1	-
	Устойчивость	-	-	-	6,12	-
Частотный анализ	Образец 1	-	-	-	-	294
	Образец 2	-	-	-	-	302
	Образец 3	-	-	-	-	310

Примечание. σ_{\max} – максимальные напряжения в конструкции по Мизесу; V_{\max} – максимальные перемещения в плоскости плитки (в направлении осей X и Z); W_{\max} – максимальные перемещения в направлении, перпендикулярном плоскости плитки; η – коэффициент запаса прочности (устойчивости); F – частота собственных колебаний при нормальной температуре; σ_b – предел прочности материала при сжатии.

Таблица 3. Результаты расчетов плитки из УУКМ

Параметр	Исследуемый фактор	σ_b , МПа	σ_{\max} , МПа	V_{\max} , мм	W_{\max} , мм	η	F , Гц
Расчетное давление	Прочность	90	70,3	0,4	1,4	1,28	-
	Устойчивость	-	-	-	-	1,16	-
Температурное нагружение	Прочность	130	10,7	0,63	1,48	12,1	-
	Устойчивость	-	-	-	-	36,6	-
Частотный анализ	Образец 1	-	-	-	-	-	742
	Образец 2	-	-	-	-	-	762
	Образец 3	-	-	-	-	-	808

Таблица 4. Основные результаты расчетов плитки ТЗК из силикатной керамики

Параметр	Исследуемый фактор	σ_b , МПа	σ_{\max} , МПа	V , мм	W , мм	η	F , Гц
Расчетное давление	Прочность	50	27,8	0,85	4,0	1,8	-
	Устойчивость	-	-	-	-	2,38	-
Температурное нагружение	Прочность	50	25,2	1,1	0,23	1,98	-
	Устойчивость	-	-	-	-	1,03	-
Частотный анализ	Образец 1	-	-	-	-	-	271
	Образец 2	-	-	-	-	-	293
	Образец 3	-	-	-	-	-	314

Таблица 5. Расчетные значения параметров плиток

Материал, тип конструкции	Масса, г	Запас прочности	F , Гц при температуре 20 (1000) °С
УУКМ	371	1,16	742 (742)
Конструкционная (силикатная) керамика	920	1,03	271 (271)
ЮИПМ-1200, основание с листовым силовым элементом	1100	1,03	246 (54)
ЮИПМ-1200, основание с трехслойной гофрированной панелью	760	1,00	219 (48)
ЮИПМ-1200, основание с трехслойной сотовой панелью	612	1,17	428 (94)
Комбинированная плитка из УУКМ и ЮИПМ-1200	670	1,05	294 (64)

комбинированной плитки ТЗК и плиток из УУКМ и керамики, которые удовлетворяют требованиям прочности, устойчивости и стойкости к флаттеру, и массы каждой конструкции (табл. 5). Самыми лучшими массовыми и прочностными характеристиками характеризуется теплозащитная плитка с корпусом из УУКМ. Масса корпуса 371 г, коэффициент запаса прочности 1,16, частота первого тона при температуре 20 и 1000 °С составляет 742 Гц. Однако плитки из УУКМ требуют специальной защиты наружной поверхности от уноса при высоких температурах, а также созда-

ния экономически эффективных технологий изготовления тонкостенных конструкций, что при современном уровне развития техники практически нереализуемо.

Масса теплозащитной плитки с наружной трехслойной сотовой панелью из сплава ЮИПМ-1200 составляет 612 г, что хотя и выше, чем у плитки с корпусом из УУКМ, но позволяет использовать эту конструкцию для создания ТЗК перспективных МКА. При этом чрезвычайно важным является то обстоятельство, что имеется обширный опыт изготовления металлических кон-



струкций, позволяющий разработать технологию изготовления плитки с наружной трехслойной сотовой панелью. Основной задачей является изготовление жаропрочной трехслойной сотовой панели. Клеевые соединения в эксплуатационном диапазоне температур не обеспечивают надежную работу конструкции, поэтому необходимо разработать технологию сварного изготовления сотового заполнителя и его соединения с обшивками панели.

Экспериментальные исследования показали, что получение сотового заполнителя можно получить сваркой проходящим током отдельных полос. Наиболее сложной задачей является сварка сотового заполнителя с обшивками.

Такие технологии для жаропрочных сварных конструкций разрабатываются в Институте электросварки им. Е.О. Патона.

Перспективным также выглядит вариант теплозащитной плитки с комбинированным корпусом, имеющим наружную металлическую панель из сплава ЮИПМ-1200 и короб, изготовленный из УУКМ. Масса такого корпуса 670 г, однако для его практической реализации следует разработать технологию изготовления тонкостенного корпуса из УУКМ и технологию сварки его с металлом.

Масса теплозащитной плитки с керамическими корпусами выше, а коэффициент запаса прочности ниже, поэтому эти конструкции не представляют интереса для использования в теплозащите перспективных МКА.

Выводы

1. Исследовано влияние механического и теплового нагружения на теплозащитные плитки с различными наружными несущими слоями из термостойких материалов и пакетами внутренней теплоизоляции. Установлено, что самыми лучши-

ми массовыми и прочностными характеристиками характеризуются теплозащитные плитки с корпусом из углерод-углеродных композиционных материалов и плитки с наружной трехслойной сотовой панелью из сплава ЮИПМ-1200.

2. Теплозащитные плитки из УУКМ требуют специальной защиты наружной поверхности от уноса при высоких температурах, а также создания технологий изготовления тонкостенных конструкций, что делает их экономически неэффективными в настоящее время. Поэтому наиболее перспективными являются теплозащитные конструкции с наружной трехслойной сотовой панелью из сплава ЮИПМ-1200, который является стойким в окислительной среде при температурах эксплуатации. Необходимо также учесть имеющийся опыт изготовления металлических изделий и соединения их с помощью различных методов сварки, а также экономическую эффективность этих технологий.

1. *Гофин М.Я.* Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов. – М.: Мир, 2003. – 637 с.
2. *Теплозащитные элементы для многоразовых аэрокосмических летательных аппаратов / В.В. Коледа, С.Г. Положай, А.М. Потапов и др. // Первая междунар. конф. «Передовые космические технологии на благо человечества» 18–20 апреля 2007 г. – Днепропетровск: КБ «Южное».*
3. *Третьяков Ю.Д.* Керамика в прошлом, настоящем и будущем. – <http://www.pereplet.ru>.
4. *Krenkel W.* Ceramic Matrix Composites, ISBN 978-3-527-31361-7 – Wiley-VCH, Weinheim, 2008.
5. *Testing of DLR C/C-SiC for HIFiRE 8 Scramjet Combustor 7th European Workshop on Thermal Protection Systems and Hot Structures 8–10 April 2013 ESA/ESTEC, Noordwijk, The Netherlands / David E. Glass, Diego P. Capriotti, T. Reimer et al.*
6. *Перспективная теплозащитная конструкция возвращаемых космических аппаратов с металлическим силовым элементом / В.Г. Тихий, В.В. Гусев, А.М. Потапов и др. // Сб. науч. тр. Нац. космического ун-та им. Н.Е. Жуковского «ХАИ» «Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов». – Харьков: ХАИ, 2014. – с. 28–43.*

Поступила в редакцию 05.02.2015

Контакты:

тел./факс: (38044) 200-82-77; 200-54-84

E-mail: journal@paton.kiev.ua

Подписано к печати 08.04.2015. Формат 60×84/8. Офсетная печать.
Усл. печ. л. 20,02. Усл.-отг. 21,0. Уч.-изд. л. 30,00.
Печать ООО «Фирма «Эссе».
03142, г. Киев, просп. Акад. Вернадского, 34/1.