

УДК 678.02:621.365

В.Г. Тихий, канд. техн. наук,
В.В. Гусев, канд. техн. наук,
А.М. Потапов, канд. техн. наук,
Е.И. Шевцов,
И.А. Гусарова,
Т.А. Манько, д-р техн. наук

ПЕРСПЕКТИВНАЯ ТЕПЛОЗАЩИТНАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВОЗВРАЩАЕМЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ С МЕТАЛЛИЧЕСКИМ СИЛОВЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Введение

В большинстве стран, располагающих ракетно-космической техникой, проводится значительное количество исследовательских работ по созданию возвращаемых космических аппаратов (КА) и транспортно-космических систем (ТКС). Одной из основных задач при создании многогоразовых ТКС является разработка надежной теплозащиты, имеющей приемлемые габаритно-массовые параметры и стоимость [1].

Первые возвращаемые космические корабли-самолеты (ККС) СПЕЙС ШАТТЛ и БУРАН были оснащены неразъемными керамическими плиточными теплозащитными конструкциями (ТЗК) из неметаллических материалов. Колоссальный объем работ при установке и межполетном обслуживании таких теплозащитных плиток на ККС СПЕЙС ШАТТЛ и БУРАН, а также неразъемность соединения теплозащиты с силовой оболочкой обязали проектировщиков создавать металлические ТЗК, которые могут быть сравнительно легко установлены и сняты. Кроме того, установлен ряд преимуществ металлов по сравнению с керамикой. Механизм разрушения металлов изучен значительно лучше, чем других жаростойких материалов. Производство металлов высоко стандартизировано, их качество гарантируется в пределах малых допусков. При этом чрезвычайно важным является то обстоятельство, что накоплен большой опыт переноса результатов испытаний металлических образцов на натурные детали конструкций. К недостаткам металлических материалов следует отнести большое тепловое расширение и высокий удельный вес.

Первая завершенная конструкция металлической ТЗК была разработана в начале 70-х годов прошлого столетия и выполнена из рифленых панелей из суперсплава René-41, представляющего собой никель-хром-кобальт-молибденовый сплав на гибких опорах и расположенной под ними теплоизоляции. Данная ТЗК предназначалась для КА X-20 Dyna-Soar (США) [2]. Рабочая температура этих панелей ограничивалась 820 °С [3].

Позже специалистами NASA Langley Research Center была сформулирована концепция ТЗК, выполняющей одновременно роль теплозащиты и обшивки в условиях входа в атмосферу [4]. Дальнейшее развитие металлических теплозащитных систем велось в соответствии с данной концепцией.

Впервые такая ТЗК была реализована в многоразовом КА ВЕНЧУРСТАР. Силовые элементы ТЗК изготавливались из сплавов ИНКОНЕЛЬ 670 и РМ-1000. Разработанная теплозащита состоит из ромбовидных металлических сотовых панелей теплозащитного экрана с волоконной изоляцией, помещенной в фольгу и прикрепленной к внутренней стороне панелей теплозащитного экрана [5].

Между панелями находятся уплотнения металл – металл (рис. 1) для обеспечения герметичного соединения панелей и предотвращения попадания потока горячих газов во внутреннюю полость летательного аппарата и компенсации значительной разности давлений на внешней поверхности и во внутренней области аппарата. При испытаниях ТЗК в исследовательском центре ЛЕНГЛИ НАСА было повреждено уплотнение и сломалась крепежная деталь.

При проектировании транспортных многоразовых космических систем (ТМКС) ВЕНЧУРСТАР (рис. 2), Х-33, ГЕРМЕС используется метод механического соединения его теплозащитных плиток с металлической обшивкой [5].

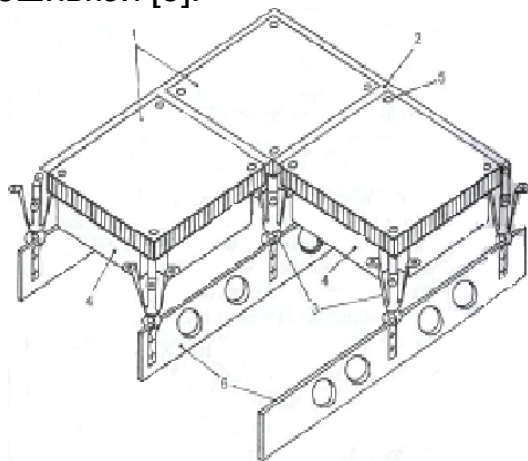


Рисунок 1 – Схема конструкции металлической теплозащиты для корабля ВЕНЧУРСТАР:

1 – металлическая сотовая панель; 2 – уплотнение между панелями; 3 – стойки с розетками крепления панелей; 4 – завернутая в фольгу изоляция; 5 – пробки на крепежных элементах панели; 6 – внешний силовой элемент

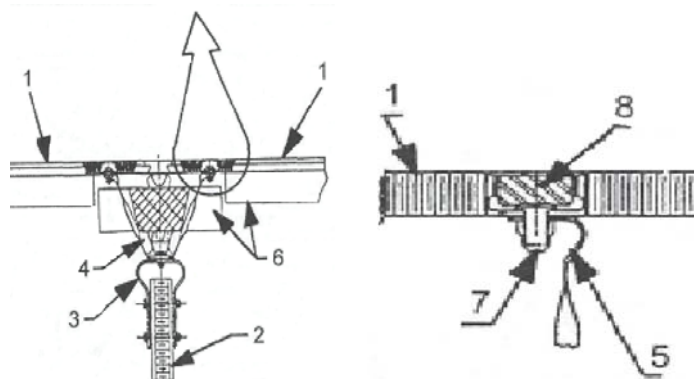


Рисунок 2 – Схема установки теплозащитных панелей на обшивку кораблей Х-33 и ВЕНЧУРСТАР:

1 – теплозащитная панель; 2 – силовой элемент; 3 – кронштейн; 4 – розетка; 5 – лепесток розетки; 6 – поддон с волоконной теплоизоляции; 7 – винт; 8 – теплоизоляционная пробка

Для Х-34 была разработана ТЗК с силовым элементом в виде изорешетчатой панели, изготовленной из листа толщиной 4 мм из сплава РМ-1000 (рис. 3). Панель разработана фирмой Alenia Spazio, произведена компанией Plansee и протестирована при температуре до 1200 °С фирмой Alenia Spazio [6].

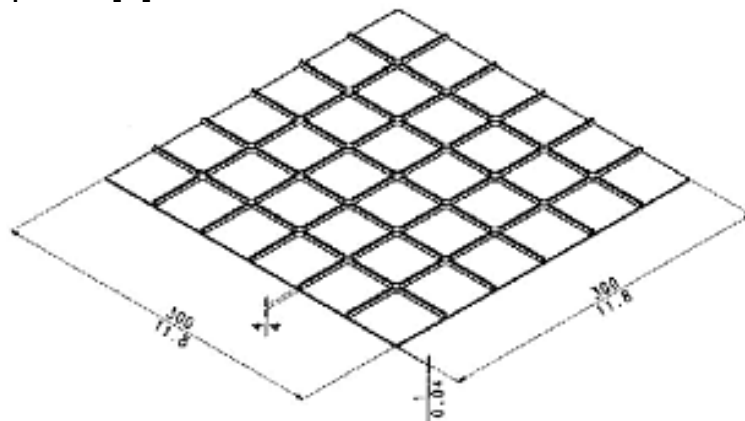


Рисунок 3 – Наружная изорешетчатая панель ТЗК фирмы Alenia Spazio

На демонстраторе IXV (ESA, Dutch Space) для летных испытаний и для европейского возвращаемого КА Х-38 (EADS, Astrium) для температур до 1100 °С предполагалось использовать многослойную ТЗК с наружной металлической трехслойной панелью с сотовым наполнителем (СЗ) и внутренней теплоизоляцией [7].

Основными сложностями при проектировании многослойных ТЗК с наружным металлическим силовым слоем (металлическими ТЗК) являются большие термические расширения наружной панели при нагреве, для компенсации которых наружные обшивки должны быть выполнены с перекрытием (Х-38) или разнесены, а между ними установлено металлическое уплотнение (Х-33). Это в свою очередь вызывает необходимость герметизации зазоров и снижает надежность конструкций. Несмотря на то, что разработка МТЗК ведется с начала 70-х годов прошлого столетия, ТЗК для малых КА, обеспечивающая все требования к ним, не существует. Особо важной является разработка теплозащиты нижней наветренной поверхности возвращаемого КА, т.к. температуры 800 – 1100 °С реализуются по всей площади ее поверхности, что составляет порядка 43 % поверхности многоразовых КА.

Одним из основных требований, предъявляемым к металлическим ТЗК, работающим при температурах до 1100 °С, являются жесткие весовые ограничения, необходимые для обеспечения экономической эффективности, т.е. вес 1 м² покрытия не должен превышать 10 кг.

В работе представлены результаты разработки перспективной ТЗК с металлическим силовым элементом для многоразовых КА и расчетно-теоретический анализ различных вариантов конструкций.

Многослойная металлическая ТЗК, состоящая из отдельных плиток с индивидуальным креплением к силовой конструкции аппарата для

многоразовых КА должна иметь поверхностную плотность не более 10 кг/м^2 , способность многократно выдерживать длительные полеты и обеспечивать:

- снижение температуры от 1100°C (на внешней стенке) до 200°C (на внутренней стенке) в течение 20 минут за один цикл штатного использования аппарата, при этом выдерживать 100-кратное повторение таких циклов в течение 15 лет;

- эрозионную устойчивость к песку, дождю, граду, частицам пыли;
- ремонтпригодность при повреждениях.

Анализ существующих многоразовых металлических ТЗК и требований к ним показали, что съемная ТЗК должна быть выполнена по следующей схеме:

- наружный слой, изготовленный из высокотемпературного, жаростойкого металла, с высокой степенью черноты ($> 0,8$);
- радиационный экран с низким значением A_s ($< 0,07$);
- теплоизоляция с низкой теплопроводностью, расположенная под наружным слоем;
- система крепления для установки теплозащиты конструкции на корпус многоразовых КА;
- межплиточное теплоизоляционное уплотнение для предотвращения просачивания плазмы на корпус многоразовых КА;
- легкое теплозащитное покрытие (фетр, войлок), предохраняющее обшивку многоразовых КА от прогара в случае разрушения или повреждения одной плитки при сохранении смежных.

Выбор конструкции наружного металлического слоя проводился на основе расчетов на прочность и устойчивость, анализа моделей силовых элементов одной плитки ТЗК.

Поверхностная плотность ТЗК с наружным металлическим слоем определяется в основном массой этого слоя, т.к. удельный вес существующих жаропрочных сплавов на основе Ni-Cr составляет $8,0 - 8,5 \text{ г/см}^3$. Поэтому первоочередной задачей при создании многоразовой ТЗК является выбор оптимальной конструкции наружного слоя, обеспечивающей нормальное ее функционирование при минимальной массе. Наружный металлический слой может быть выполнен в виде силового элемента листового типа с ребрами, аналогично разработке [2] или в виде трехслойных конструкций с различными заполнителями аналогично конструкциям [1, 3]. При проведении прочностного анализа рассмотрены следующие варианты:

1. Силовой элемент листового типа с ребрами.
2. Трехслойный силовой элемент с гофрированным заполнителем.
3. Трехслойный силовой элемент с СЗ.

Необходимые толщины силового элемента и условия его связи с оболочкой КА определялись из условий обеспечения прочности и устойчивости при двух основных случаях нагружения:

- действию максимального расчетного внешнего давления $P_p = 0,065$ МПа при нормальной температуре;
- температурном нагружении корпуса при линейном распределении температуры по высоте ТЗК.

Кроме того, из условия предотвращения флаттера при больших скоростных напорах требовалось, чтобы частота низшего тона собственных колебаний силового элемента ТЗК была не менее 100 Гц.

При разработке ТЗК возвращаемых КА европейские специалисты используют специально разработанный порошковый сплав РМ-1000 на основе нихрома, упрочненный оксидными дисперсными добавками. Такой сплав обладает повышенной стойкостью к окислению по сравнению с обычными нихромами в рабочем диапазоне температур. Поэтому он был выбран в качестве материала силового элемента при проведении расчетно-теоретических исследований (табл. 1).

Таблица 1 – Механические свойства сплава РМ-1000

Температура, °С	Материал	Плотность, г/см ³	Теплофизические свойства		σ_b , МПа	Удлинение δ , %	Коэффициент температурного расширения $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹
			λ , Вт/(мК)	c_p , кДж/(кг·К)			
20	РМ-1000	8,2 – 8,4	29 – 62	0,44 – 0,5	660 – 1000	15	16
1100					100		21

Проектируемые ТЗК имеют металлический корпус, состоящий:

- из плоского силового элемента с размерами в плане (300 x 300) мм, контактирующего с наружной средой и непосредственно воспринимающего внешние нагрузки;
- основания высотой 50 мм, передающего эти нагрузки на силовую оболочку КА и являющегося объемом для размещения в нем легкого теплозащитного материала.

Корпус закреплен на силовой оболочке КА по его углам, при этом в одной из точек крепление жесткое, а в остальных трех точках допускается перемещение в плоскости стыка по направлению прямой, связывающей эту точку с жестко закрепленной. Все точки крепления допускают поворот в диагональной плоскости ТЗК.

Анализ проводился на основе расчетов на прочность и устойчивость, модального анализа, выполненных с помощью пакета программ MSC. Nastran для соответствующих конечно-элементных моделей (КЭ-

Запас устойчивости корпуса при температурном нагружении равен 3,62. Характер потери устойчивости приведен на рис. 8.

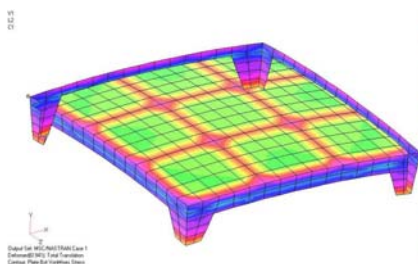


Рисунок 7 – НДС корпуса ТЗК при температурном нагружении

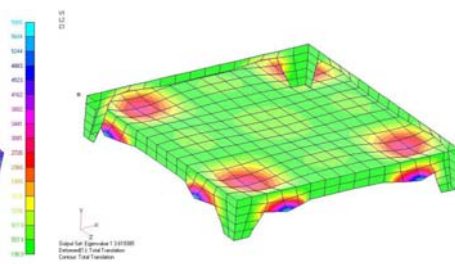


Рисунок 8 – Характер потери устойчивости корпуса при температурном нагружении

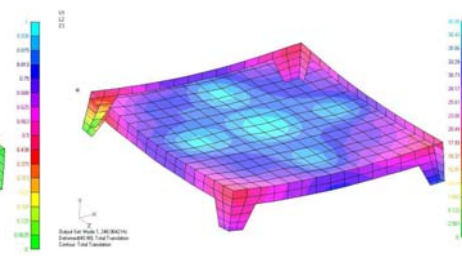


Рисунок 9 – Форма первого тона собственных колебаний корпуса

По результатам модального анализа частоты первых трех тонов собственных колебаний корпуса составляют: 246, 413, 457 Гц. Форма низшего тона собственных колебаний корпуса показана на рис. 9.

Рассмотренная конструкция удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости при толщине силового элемента 0,85 мм. Масса данного варианта корпуса ТЗК составляет 1,1 кг.

Прочностной анализ корпуса плитки ТЗК с трехслойным силовым элементом с гофрированным заполнителем

Трехслойная конструкция с трехслойным силовым элементом с гофрированным заполнителем имеет большую жесткость и позволяет исключить ребра основания. «Шаг» гофров равен 20 мм, толщина трехслойного пакета – 10 мм.

Трехслойная панель с гофрированным заполнителем из сплава РМ-1000 имеет различную жесткость в направлении оси и поперек гофров. Соответственно, стороны основания, на которые опираются гофры, усилены по сравнению со сторонами, параллельными гофрам. На рис. 10 – 12 приведены общий вид корпуса и его основные детали – силовой элемент (без наружного листа и боковой облицовки) и основание (с обозначениями свойств элементов).

НДС корпуса при нагружении давлением $P = 0,065$ МПа показано на рис. 13. Максимальные напряжения по Мизесу достигаются в боковых стенках основания и равны 531,8 МПа, максимальные перемещения в плоскости ТЗК равны 2,0 мм, перпендикулярно плоскости – 4,25 мм.

Запас устойчивости корпуса при нагружении давлением равен 1,007. Характер потери устойчивости приведен на рис. 14.

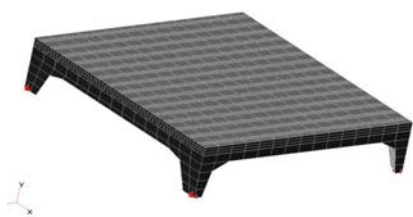


Рисунок 10 – Корпус с трехслойным силовым элементом (гофрированный наполнитель)

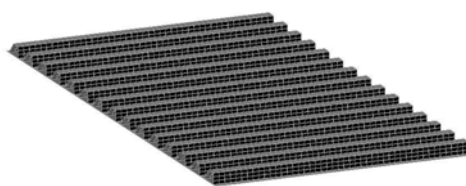


Рисунок 11 – Трехслойная панель с гофрированным наполнителем (без наружного листа и боковой облицовки)

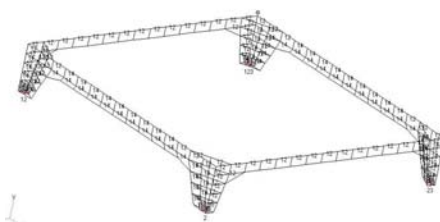


Рисунок 12 – Основание корпуса (с обозначениями свойств элементов)

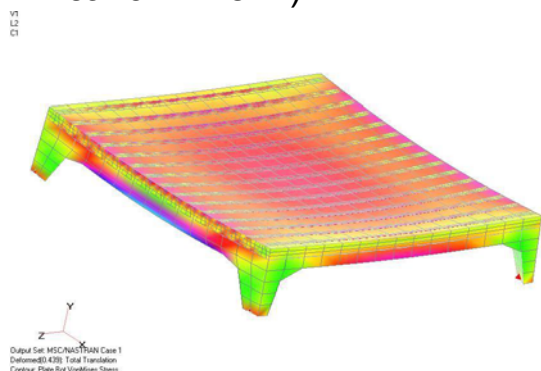


Рисунок 13 – НДС корпуса при нагружении максимальным давлением $P = 0,065$ МПа

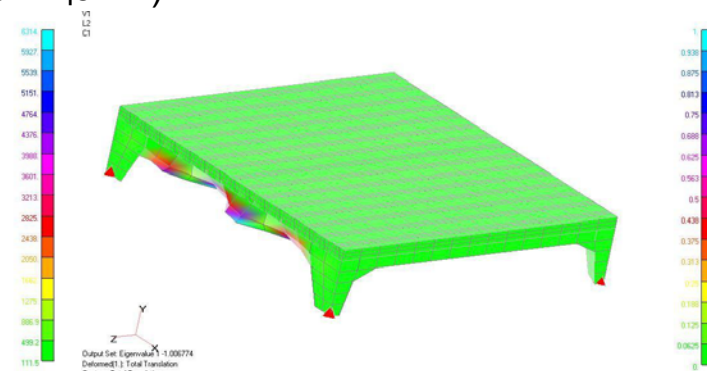


Рисунок 14 – Характер потери устойчивости корпуса при нагружении давлением

НДС корпуса при температурном нагружении показано на рис. 15. Максимальные напряжения по Мизесу достигаются в боковых стенках основания и равны 226,3 МПа (в элементах с температурой от 600 °С до 800 °С), максимальные перемещения в плоскости ТЗК равны 3,53 мм, перпендикулярно плоскости – 5,06 мм.

Запас устойчивости корпуса при температурном нагружении равен 1,42. Характер потери устойчивости приведен на рис. 16.

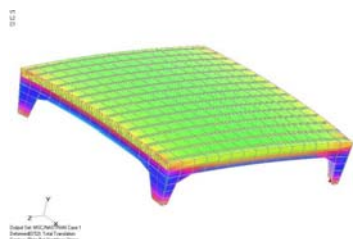


Рисунок 15 – НДС корпуса ТЗК при температурном нагружении

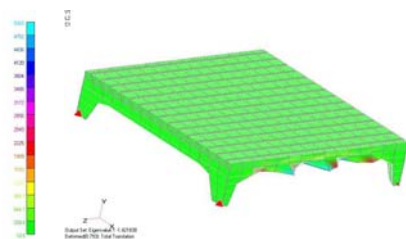


Рисунок 16 – Характер потери устойчивости корпуса при температурном нагружении

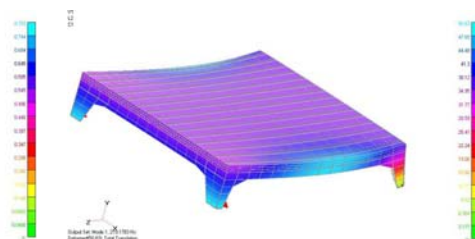


Рисунок 17 – Форма первого тона собственных колебаний корпуса

Частоты первых трех тонов собственных колебаний корпуса составляют: 219, 256, 390 Гц. Форма низшего тона собственных колебаний корпуса показана на рис. 17.

Рассмотренная конструкция удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости. Масса данного варианта корпуса составляет 0,76 кг.

Толщины наружного листа и гофров панели равны 0,2 мм, а внутреннего листа – 0,1 мм. Листы облицовки боковых сторон панели, к которым крепится основание, имеют различную толщину: 0,5 мм в направлении, перпендикулярном к гофрам и 0,2 мм в направлении, параллельном гофрам.

Элементом конструкции с номером 12 (рис. 12) соответствует толщина 0,5 мм, с номером 14 – 1,0 мм.

Прочностной анализ корпуса плитки ТЗК с трехслойным силовым элементом с сотовым заполнителем

Трехслойная конструкция имеет СЗ на основе квадратных сот. Стороны ячеек сот равны 20 мм, толщина трехслойного пакета – 10 мм.

На рис. 18 – 20 показаны общий вид корпуса и его отдельные детали – СЗ силового элемента и основание. Толщина элементов основания равна 0,9 мм.

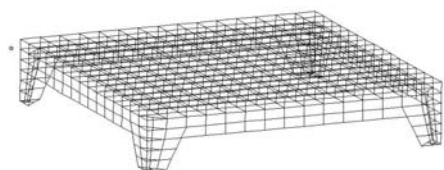


Рисунок 18 – Корпус с трехслойным силовым элементом

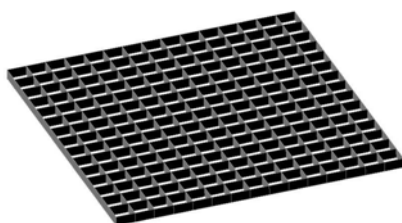


Рисунок 19 – СЗ трехслойной панели

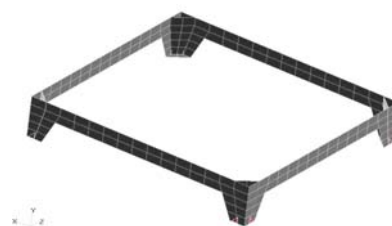


Рисунок 20 – Основание корпуса

НДС корпуса при нагружении давлением $P = 0,065$ МПа показано на рис. 21. Максимальные напряжения по Мизесу достигаются в боковых стенках основания и равны 321,4 МПа, максимальные перемещения в плоскости ТЗК равны 0,77 мм, перпендикулярно плоскости – 2,3 мм.

Запас устойчивости корпуса при нагружении давлением равен 1,17. Характер потери устойчивости приведен на рис. 22.

НДС корпуса при температурном нагружении показано на рис. 23. Максимальные напряжения по Мизесу достигаются в боковых стенках основания и равны 253,4 МПа (в элементах с температурой от 600 °С до 800 °С), максимальные перемещения в плоскости ТЗК равны 3,04 мм, перпендикулярно плоскости – 5,06 мм.

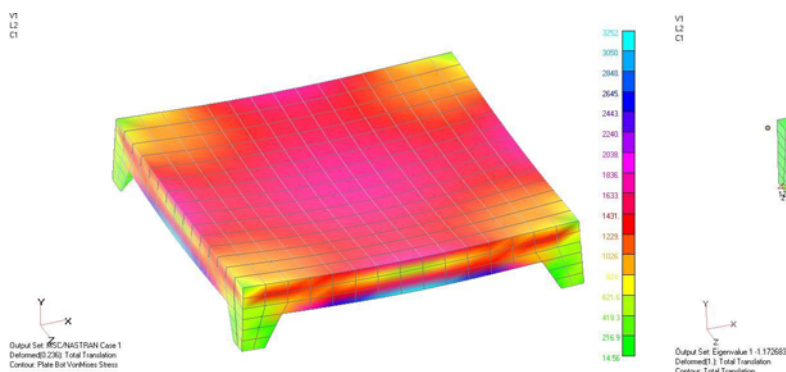


Рисунок 21 – НДС корпуса ТЗК при нагружении максимальным давлением $P = 0,065$ МПа

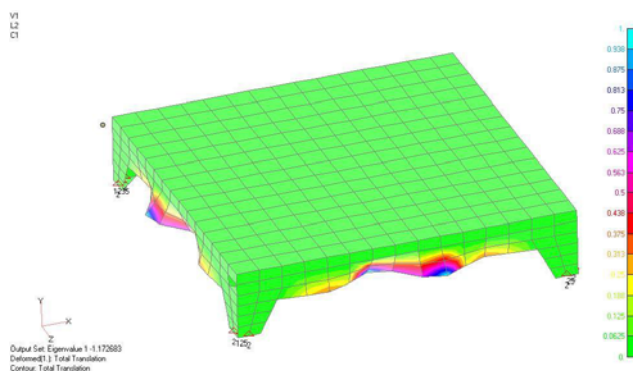


Рисунок 22 – Характер потери устойчивости корпуса при нагружении давлением

Запас устойчивости корпуса при температурном нагружении равен 2,45. Характер потери устойчивости приведен на рис. 24.

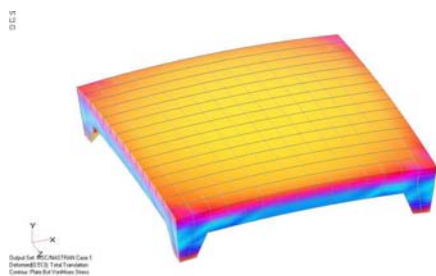


Рисунок 23 – НДС корпуса при температурном нагружении

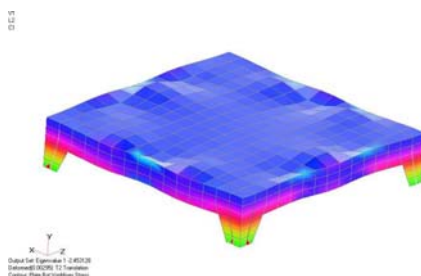


Рисунок 24 – Характер потери устойчивости корпуса при температурном нагружении

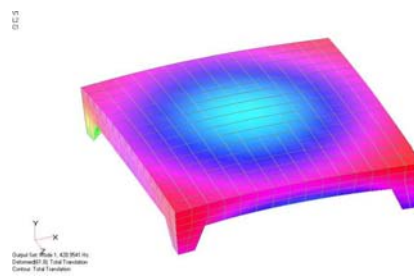


Рисунок 25 – Форма первого тона собственных колебаний корпуса

Частоты первых трех тонов собственных колебаний корпуса составляют: 428, 632, 696 Гц. Форма низшего тона собственных колебаний корпуса показана на рис. 25.

Рассмотренная конструкция удовлетворяет требованиям прочности и устойчивости. Масса данного варианта корпуса равна 0,612 кг. Толщина наружного листа панели – 0,2 мм, внутреннего листа и сот – 0,1 мм.

Результаты прочностного анализа корпусов одиночной плитки ТЗК и их обсуждение

В результате расчетов определены размеры силовых элементов для корпусов ТЗК из сплава типа РМ-1000 с силовым элементом листового типа и с трехслойными силовыми элементами с гофрированным и сотовым заполнителями, которые удовлетворяют требованиям прочности, устойчивости, стойкости к флаттеру и массы каждой конструкции.

Массы корпусов, минимальные запасы прочности (или устойчивости) и частоты 1-го тона собственных колебаний при температурах корпуса 20 °С и 1100 °С приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Расчетные характеристики металлических силовых элементов одиночной плитки ТЗК

Конструкция наружного слоя корпуса ТЗК	Масса, кг	Запас прочности (или устойчивости)	Частота 1-го тона при температуре 20 (1000) °С
Основание с листовым силовым элементом с ребрами	1,100	1,03	246 (54)
Основание с трехслойной гофрированной панелью	0,760	1,00	219 (48)
Основание с трехслойной сотовой панелью	0,612	1,17	428 (94)

Результаты проведенного расчетно-теоретического анализа КЭ-моделей различных вариантов корпуса ТЗК показали, что наружный силовой элемент металлической ТЗК должен быть выполнен в виде трехслойной конструкции с СЗ, т.к. он обладает наименьшими массовыми характеристиками. Это подтверждается существующими разработками американских и европейских специалистов [5 – 7].

Проектирование общей ТЗК

Следующий этап проектирования – разработка соединения отдельных плиток в общую ТЗК и крепления их к силовой оболочке – является самым критичным, т.к. основными проблемными вопросами всех существующих ТЗК является герметизация зазоров между плитками и выходящих на поверхность отверстий для крепления.

Рассмотрено несколько схем сборки плиток в цельную конструкцию и систем крепления.

Первый вариант сборки – ТЗК-1, выполненная из двух типов плиток, отличающихся исполнением наружной обшивки. Часть плиток выполняется с подштамповками на верхнем листе (плитка рядовая), а часть с отбортовками, которые перекрывают зазоры между плитками, герметизируя их (рис. 26). Плитка укладывается с опиранием по контуру на опоры из керамики, которые служат термомостом и монтированы на корпус МКА. Углы четырех плиток крепятся винтом, который прижимает их через специальную тарельчатую пружину с лепестками. Винт ввинчивается в самоконтрящуюся гайку, приклепанную к кронштейну из керамики (рис. 27). Теплоизоляция низкой плотности помещается в поддон из фольги, прикрепленный к внутренней обшивке трехслойного силового элемента.

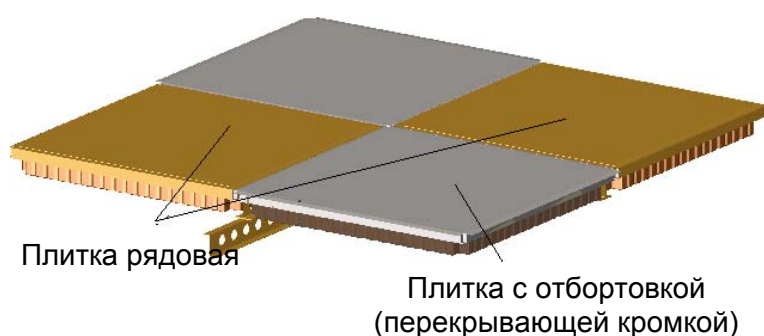


Рисунок 26 – Схема установки плиток ТЗК-1

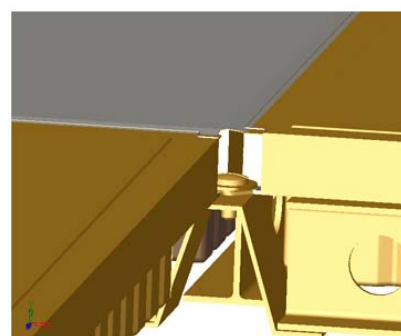


Рисунок 27 – Узел крепления плитки

При монтаже ТЗК-1 сначала устанавливаются четыре рядовые плитки с подштамповками на верхнем листе, а затем плитка с четырьмя отбортовками, которые перекрывают зазоры между плитками. Зазоры заполняются межплиточной теплоизоляцией из фетра. После установки плиток отверстия, через которые осуществляется доступ к винтам крепления плиток, закрываются пробками или завариваются накладками. Зона отбортовок герметизируется герметиком. Под слоем установленных плиток располагается аварийное ТЗП из фетра.

Преимуществами настоящей схемы являются достаточная прочность и жесткость металлической структуры, возможность применения теплоизоляции очень малой плотности, опирание плитки по контуру, что позволяет минимизировать вес металлической структуры и прогибы плитки при действии внешнего давления. Данная схема позволяет достаточно просто проводить замену плиток в случае необходимости и обеспечивать необходимую стойкость ТЗК к внешним воздействующим факторам.

К недостаткам рассмотренной схемы установки плиток следует отнести то, что одна из отбортовок замыкающей плитки, хотя и утоплена в углубление, все же располагается против набегающего потока плазмы (или дождя), что требует обеспечения надежной герметизации стыка. Конструкция плитки достаточно сложная, что требует применения точных штампов. Металлические элементы имеют большой коэффициент линейного температурного расширения, что накладывает ограничения на размер плитки и размеры межплиточных швов. Очень высокий уровень виброударного и акустического воздействия на теплоизоляцию в поддоне может приводить к разрушению теплоизоляции малой плотности. Отсутствует возможность визуального осмотра ТИ после полета, что требует разработки специальных методик и средств контроля.

В целом схема ТЗК-1 близка к схеме ТЗК многоразового КА Х-33, однако существенно отличается креплением и способом защиты стыков плиток.

Второй вариант сборки – ТЗК-2, в котором используется плиточная теплоизоляция, устанавливаемая вплотную друг к другу, позволяет исключить поддон и межплиточную теплоизоляцию, соответственно уменьшить массу и упростить конструкцию. Однако необходимость герметизации стыков в ТЗК-2 еще сохраняется. Такой вариант ТЗК показан на рис. 28 и 29.

Дальнейшие поиски привели к наиболее удачному, на наш взгляд, конструкторскому решению, позволяющему обеспечить полную герметизацию стыков. Таким решением является разработка ТЗК-3 с металлической наружной трехслойной панелью с U-образным стыком и плиточной теплоизоляцией [8].

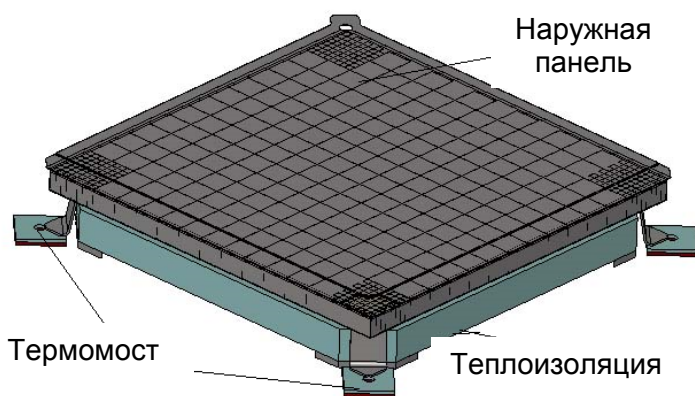


Рисунок 28 – Общий вид плитки ТЗК-2

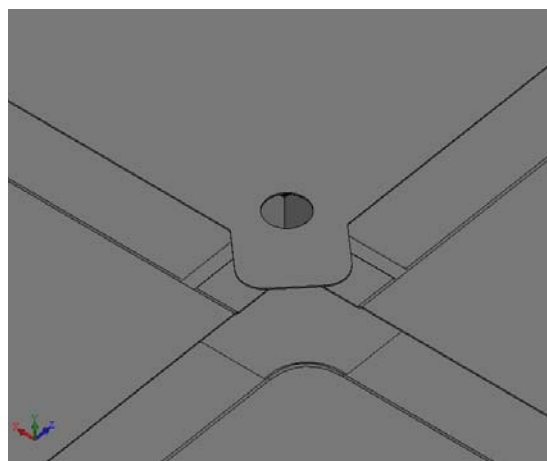


Рисунок 29 – Расположение перекрывающих кромок в зоне стыка плиток

Схема ТЗК-3 с металлической наружной трехслойной панели с U-образным стыком и плиточной ТИ показана на рис. 30. Металлическая наружная трехслойная панель с размерами в плане ~ (300 x 300) мм состоит из верхней обшивки, СЗ с размерами (20 x 20) мм, в котором углы усилены ячейками (5 x 5) мм и нижней обшивки.

Монтируется ТЗК-3 следующим образом (рис. 31): на корпус многоразового КА при сборке устанавливается вплотную друг к другу плиточная теплоизоляция из керамики на фетровой подложке (крепится по углам плитки и в центральной части). Затем на металлических опорах крепится металлическая наружная трехслойная панель через термомост из керамики и термостойкой резины. Опоры четырех панелей фиксируются одним винтом. Стык между плитками закрывается U-образным профилем, который обваривается по контуру, выполняя роль межпли-

точного уплотнения, и служит для компенсации температурных расширений плиток. Возможно исполнение штампованной верхней обшивки единой для нескольких плиток, что позволит в несколько раз снизить количество сварных швов.

Наружная металлическая обшивка выполняется из специального порошкового жаростойкого сплава ЮИПМ-1200 [9] с требуемым уровнем излучательной способности и стойкого в окислительной среде при сверхвысоких температурах. Непрерывная наружная поверхность ТЗК-3 исключает проникновение внутрь потока плазмы и влаги. Вес 1 м² ТЗК-3 составляет 9,8 кг.

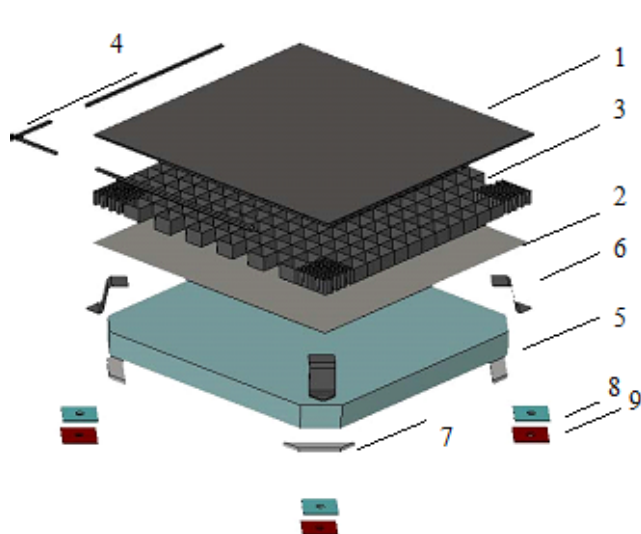


Рисунок 30 – Общий вид плитки ТЗК-3:

1 – 3 – наружная металлическая структура, выполненная из жаростойкого сплава, состоящая из верхнего (поз.1) и нижнего (поз.2) листов и СЗ (поз.3); 4 – U-образные профили на наружном листе; 5 – теплоизоляция; 6 – Z-образные металлические стойки системы крепления; 7 – фетровая подложка; 8 – термомосты; 9 – демпфирующая прокладка из термостойкой резины

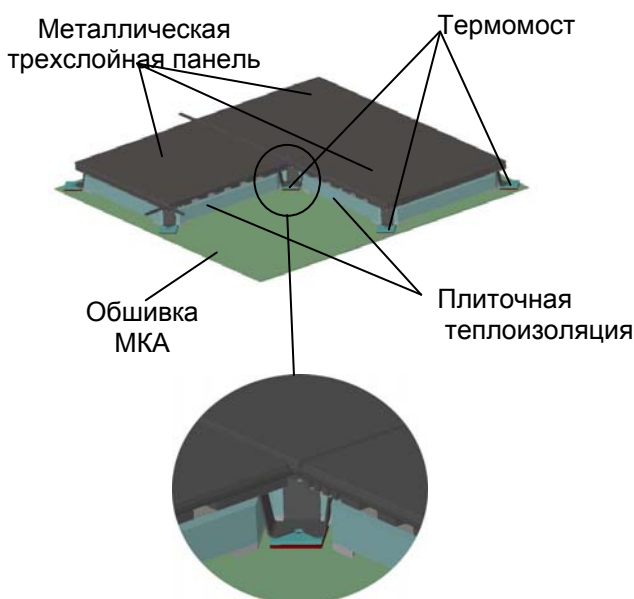


Рисунок 31 – Схема установки ТЗК-3 на корпус многоразового КА (силовой набор условно не показан)

В результате проектных разработок ТЗК многоразового КА, собранной из отдельных плиток, предложено новое конструкторское решение, позволяющее устранить следующие недостатки конструкций существующих металлических ТЗК: надежно герметизировать стыки, обеспечить требуемый уровень излучательной способности без применения покрытий, минимизировать вес конструкции, компенсировать тепловые

расширения конструкции при нагреве, а также обеспечить удобство и простоту обслуживания между пусками [8].

Техническое обслуживание ТЗК-3 сводится к внешнему осмотру и контролю ее состояния. В отдельных случаях может потребоваться замена поврежденных участков, например, в случае обнаружения мест прогара.

Выводы

Исследованы различные варианты съемных многослойных металлических ТЗК, состоящих из отдельных плиток с индивидуальным креплением к силовой конструкции КА с поверхностной плотностью не более 10 кг/м^2 , способных многократно выдерживать длительные полеты и обеспечивать снижение температуры от 1100°C на внешней стенке до 200°C на внутренней стенке в течение 20 минут за один цикл штатного использования аппарата.

Проведен расчетно-теоретический анализ отдельных плиток ТЗК с наружными металлическими элементами трех различных конструкций:

1. Силовой элемент листового типа с ребрами.
2. Трехслойный силовой элемент с гофрированным заполнителем.
3. Трехслойный силовой элемент с СЗ.

Результаты проведенного расчетно-теоретического анализа КЭ-моделей различных вариантов корпуса ТЗК показали, что наружный силовой элемент металлической ТЗК должен быть выполнен в виде трехслойной конструкции с СЗ, т.к. он обладает лучшими массовыми характеристиками.

Проанализировано несколько схем сборки отдельных плиток в цельную конструкцию и систем крепления. В результате проектных работ ТЗК многоразового КА, собранной из отдельных плиток, предложено новое конструкторское решение, позволяющее устранить недостатки конструкций существующих металлических ТЗК: надежно герметизировать стыки, обеспечить требуемый уровень излучательной способности без применения покрытий, минимизировать вес конструкции, компенсировать тепловые расширения конструкции при нагреве, а также обеспечить удобство и простоту обслуживания между пусками [8].

Список использованных источников

1. John, T. Dorsey Metallic Thermal Protection System Requirements, Environments, and Integrated Concepts [Текст] / John T. Dorsey, Carl C. Po-teet, Kathryn E. Wurster, Rogen R. Chen. – Journal of Spacecraft and Rock-ets, v.41, № 2.
2. Haynes International, Inc.; High temperature alloys and Hastelloy cor-rosion resistant alloys catalogues; Haynes Int.Inc., USA, 2000.

3. Deveikis, W.D. Aerothermal performance and structural integrity of a René-41 thermal protection system at Mach 6.6 [Текст] / W.D. Deveikis, R. Miserentino, I. Weinstein, J.L. Schideler. – NASA-TN-D-7943, NASA, Washington DC, 1975.

4. Dorsey, J.T. Metallic Thermal Protection System Requirement, Environments and Integrated Concepts [Текст] / J.T. Dorsey, C.C. Poteet, K.E. Wurster, R.R. Chen // Journal of Spacecraft and Rockets. – Vol.41, № 2, 2004. – P.162-172, also AIAA paper 2002-0502, Jan.2002.

5. Гофин, М.Я. Жаростойкие и теплозащитные конструкции многоразовых аэрокосмических аппаратов [Текст] / М.Я. Гофин. – Москва, 2003.

6. Материалы и конструкции / Предложения по рабочему пакету ГKB «ЮЖНОЕ» при возможном сотрудничестве с ESA, Европейское Космическое Агентство, Директорат РН Политики и Плановый Департамент, ESA, 28 ноября 2003.

7. European Directions for Hypersonic Thermal Protection Systems and Hot Structures/ David E. Glass NASA Langley Research Center, Hampton// 31st Annual Conference on Composites Materials and Structures Daytona Beach, FL, January 22, 2007.

8. Заявка на патент Украины № И 2013 13658 от 25.11.13г., Потапов А.М., Шевцов Е.И., Тихий В.Г., Гусарова И.А., Скороход В.В., Фролов Г.А., Солнцев В.П., «Багатошарова теплозахисна система багаторазового космічного апарату».

9. Заявка на патент Украины № И 2012 11691 от 09.10.12г., Скороход В.В., Солнцев В.П., Фролов Г.А., Потапов А.М., Тихий В.Г., Гусарова И.А., Литвиненко Ю.М. «Способ одержання жаростійкого сплаву на основі ніхрому».

Поступила в редакцию 01.10.2014.

*Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.П. Малайчук,
Днепропетровский национальный университет
имени Олеся Гончара, г. Днепропетровск.*