

УДК 629.78

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО К ДЕЙСТВИЮ ГРАДИЕНТОВ ТЕМПЕРАТУР РАЗМЕРОСТАБИЛЬНОГО КОРПУСА КОСМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА

© 2013 Р. Н. Ахметов, Н. Р. Стратилатов, А. Н. Шайда,
А. С. Нонин, Ю. В. Потапова

ФГУП «ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс»», г. Самара

Изложен метод проектирования размерностабильных корпусов космических телескопов, позволяющий получить простые и надёжные корпуса телескопов, адаптивные к действию градиентов температур.

Размерностабильный корпус, криволинейная биметаллическая пластина, телескоп.

В современной космической технике при проектировании и создании космических телескопов, работающих при различных температурах, возникает термооптическая аберрация увеличения и расфокусировки оптической системы за счёт изменения размеров силового корпуса, связывающего оптическую систему.

Особенно актуальна эта задача при разработке корпусов космических телескопов дистанционного зондирования Земли.

Одним из путей уменьшения изменения размеров корпусов космических телескопов, обусловленных воздействием неравномерного поля температур, является использование конструктивных элементов, выполненных из материалов с низким коэффициентом линейного расширения, типа ИНВАР, $\alpha=0,8 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, $\gamma=8,2 \text{ г/см}^3$, высоко термостабильной композиционный материал на основе углепластиков типа КМУ-4Л, $\alpha=1 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$, $\gamma=1,6 \text{ г/см}^3$.

Уменьшить температурные деформации можно также за счёт создания требуемого теплового режима, обеспечивающего снижение перепадов температур на корпус телескопа, применяя активные и пассивные средства обеспечения теплового режима [2].

Однако указанные способы уменьшения изменения размеров приводят к усложнению конструкции, снижению её

надёжности и, как правило, к увеличению массы космического аппарата. Применение неметаллических материалов на основе углепластиков не позволяет в полной мере обеспечить достаточную геометрическую стабильность корпуса конструкции телескопа, поскольку эта характеристика напрямую зависит от значения коэффициента линейного расширения, применяемого полимерного композитного материала, который является нестабильным, хотя и имеет малую величину.

Таким образом, существует потребность в простом и надёжном способе обеспечения размерной стабильности корпусов космических телескопов.

Рассматриваемый в настоящей статье метод проектирования адаптивных к действию градиентов температур корпусов телескопов апробирован в конструкциях КА ДЗЗ, разрабатываемых ГНПРКЦ «ЦСКБ-Прогресс».

В перспективном космическом аппарате предполагается изготовление силового корпуса фотоприёмного устройства (ФПУ ИК) и поворотного корпуса радиатора – излучателя в виде рамы из биметаллических пластин, что позволит снизить массу конструкции и для ФПУ ИК улучшить целевой параметр (разрешение).

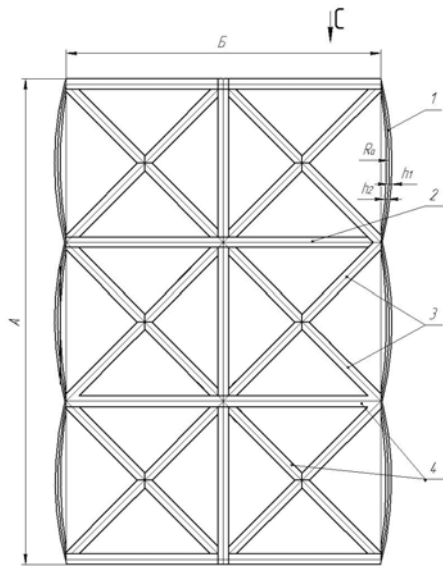


Рис. 1. Корпус космического телескопа

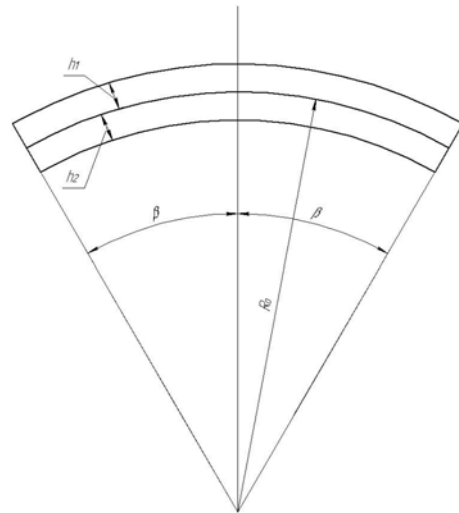


Рис.3

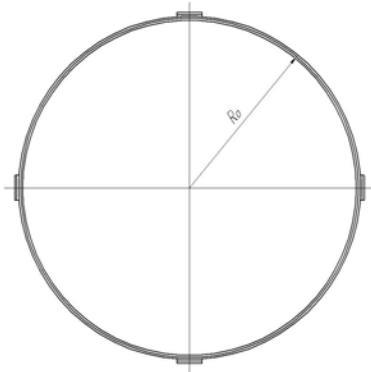


Рис. 2. Корпус космического телескопа

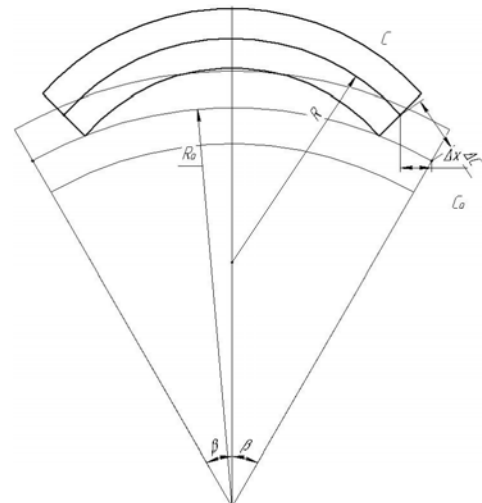


Рис.4

На рис. 1, 2 изображён общий вид фермы космического телескопа (КТ) с высокой геометрической стабильностью по длине B и диаметру D при действии неравномерного поля температур.

Силовой корпус состоит из продольных, поперечных и диагональных криволинейных биметаллических пластин 1, 2, 3, соединённых между собой в узлах пересечения 4.

На рис. 3 изображён общий вид размеростабильной биметаллической пластины силового корпуса КТ.

На рис. 4, 5 изображён процесс деформирования размеростабильных биметаллических пластин от действия положительных и отрицательных перепадов температур соответственно.

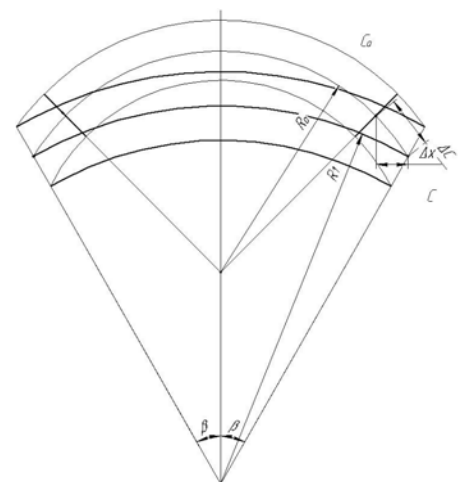


Рис.5

На рис. 6, 7 изображён элементарный участок длиной d_x криволинейной биметаллической пластины.

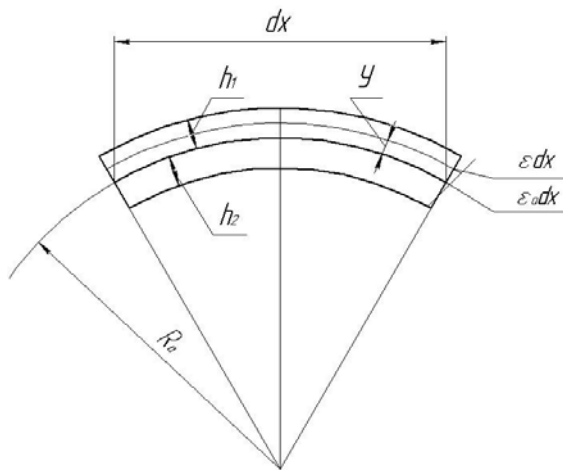


Рис.6

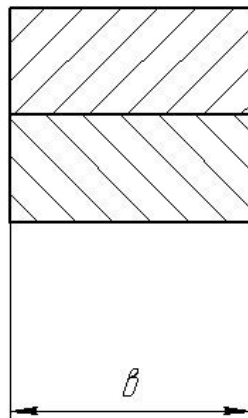


Рис.7

Внешний слой каждой криволинейной биметаллической пластины 1, 2, 3 толщиной h_1 имеет коэффициент линейного расширения α_1 (например, алюминиевый сплав АК4-1) и называется активным в отличие от инертного слоя толщиной h_2 с меньшим коэффициентом линейного расширения α_2 (например, титановый сплав ОТ-4). При действии положительного или отрицательного ($T > T_0$ или $T < T_0$) перепада температуры $t = T - T_0$ на биметаллическую пластину она изгибается или расправляется, изменяя нормальную кривизну поверхности $\frac{1}{R_0}$ (рис. 4, 5).

При этом её края удлиняются или укорачиваются по оси X на величину ΔX . Проекция деформации слоя спая от действия перепада температур равна ΔC_x , направлена в противоположную сторону и может быть равной по величине значению ΔX .

Для определения значений ΔX и ΔC_x выделим из криволинейной биметаллической пластины элементарный участок длиной d_x и номинальной кривизной $\frac{1}{R_0}$ (рис. 6).

Относительное удлинение волокна, отстоящего на расстоянии Y от поверхности спая, складывается из двух величин: из удлинения в спае ϵ_0 и удлинения обусловленного изгибом пластины:

$$y \cdot \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right),$$

где $\frac{1}{R}$ – новая кривизна.

Таким образом, суммарное относительное удлинение волокна равно

$$\epsilon = \epsilon_0 + y \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right),$$

Напряжения от действия температуры t , действующие в волокне расположенном на расстоянии Y от поверхности спая, для активного слоя толщиной h_1 пластины равно

$$\sigma_1 = E_1 \left[\epsilon_0 + y \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) - \alpha_1 \cdot t \right] \quad (0 \leq y \leq h_1),$$

для инертного слоя толщиной h_2 пластины равно

$$\sigma_2 = E_2 \left[\epsilon_0 + y \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right) - \alpha_2 \cdot t \right] \quad (-h_2 \leq y \leq 0),$$

где E_1, E_2 – модули упругости первого рода материалов слоёв биметаллических пластин.

Нормальное усилие N и изгибающий момент M в сечении биметаллической пластины, подверженной только тепловому воздействию, равны нулю. Поэтому

$$N = \int_0^{h_1} \sigma_1 \cdot b \cdot dy + \int_{-h_2}^0 \sigma_2 \cdot b \cdot dy = 0,$$

Подставляя в выражение для N и M выражение для σ_1 и σ_2 и интегрируя, получим:

$$\varepsilon_0(E_1 h_1 + E_2 h_2) - (\alpha_1 E_1 h_1 + \alpha_2 E_2 h_2) \cdot t + \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right)(E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2) = 0,$$

$$\frac{1}{2} \varepsilon_0(E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2) - \frac{1}{2}(\alpha_1 E_1 h_1^2 - \alpha_2 E_2 h_2^2) \cdot t + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right)(E_1 h_1^3 + E_2 h_2^3) = 0.$$

Исключая ε_0 , определим изменение кривизны биметаллической пластины:

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{6t(\alpha_1 - \alpha_2)}{\frac{(E_1 h_1^2 - E_2 h_2^2)^2}{E_1 \cdot E_2 \cdot h_1 \cdot h_2 \cdot (h_1 + h_2)} + 4(h_1 + h_2)}$$

Очевидно, что изменение кривизны будет наибольшим, если

$$E_1 \cdot h_1^2 = E_2 \cdot h_2^2.$$

Биметаллические пластины 1, 2, 3, удовлетворяющие этому условию, называются нормальными.

Тогда наибольшее изменение кривизны для нормальной биметаллической пластины 1, 2, 3 равно

Подставляя в выражение для ΔX выражение наибольшего изменения кривизны, получим:

$$\Delta X = -\frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{t}{h_1 + h_2} \int_0^\beta 1 \cdot R_0^2 [\cos(\beta - \varphi) - \cos \beta] \cdot d\varphi,$$

где β – угол полураствора криволинейной биметаллической пластины радиусом R_0 .

Интегрируя данные выражения, определим:

$$\Delta X = -\frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) \frac{t \cdot R_0^2}{h_1 + h_2} (\sin \beta - \beta \cos \beta)$$

Проекция деформации слоя спая на ось X при действии температуры t равна

$$M = \int_0^{h_1} \sigma_1 \cdot b \cdot y \cdot dy + \int_{-h_2}^0 \sigma_2 \cdot b \cdot y \cdot dy = 0,$$

где b – ширина биметаллической пластины.

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} = \frac{3}{2}(\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \frac{t}{h_1 + h_2}$$

Зная изменение кривизны, определим перемещение края пластины (точка C) (рис. 4, 5) за счёт её изгиба с помощью интеграла Мора:

$$\Delta X = - \int_l \left(\frac{1}{R} - \frac{1}{R_0}\right) M_1 \cdot ds$$

где M_1 – изгибающий момент от единичной нагрузки, приложенной в направлении искомого перемещения точки C , l – длина биметаллической пластины по дуге радиуса R_0 .

$$\Delta C_x = (\alpha_1 \cdot h_1 + \alpha_2 \cdot h_2) \cdot \frac{t \cdot R_0 \sin \beta}{h_1 + h_2}$$

и направлена в противоположную сторону перемещения биметаллической пластины за счёт её изгиба (перемещение ΔX).

Таким образом, из условия $\Delta X = \Delta C_x$ определим соотношение геометрических размеров нормальных биметаллических пластин и физико-механические характеристики применяемых материалов обес-

печивающее равенство нулю перемещение краев пластин:

$$\frac{\alpha_1 \cdot h_1 + \alpha_2 \cdot h_2}{\alpha_1 - \alpha_2} = K \cdot R_0 (1 - \beta \operatorname{ctg} \beta);$$

$$E_1 \cdot h_1^2 = E_2 \cdot h_2^2,$$

где K – коэффициент, учитывающий упругость пластин корпуса в местах их соединения в узлах.

Для шарнирного соединения пластин можно принять $K = \frac{3}{2}$.

Определённый интерес представляет неметаллический корпус космического телескопа, в котором активный слой пластины толщиной h_1 с коэффициентом линейного расширения α_1 выполнен из стеклопластика, а инертный слой толщиной h_2 с меньшим коэффициентом линейного расширения α_2 – из углепластика.

Поскольку корпус состоит из множества размеростабильных от действия температуры биметаллических пластин, то и в целом он будет размеростабильным по длине и по ширине.

Предложенный метод проектирования позволяет создать размеростабильный адаптивный к действию температур силовой корпус, обеспечивающий минимальную дефокусировку телескопа при действии температур, которая определяется точностью измерения деформаций с помощью лазерного трекара APJ-Radian и фотограмметрической системы V-STARS – 7 и 10 микрон, соответственно.

Применение в корпусе космического телескопа криволинейных биметаллических пластин позволяет уменьшить массу корпуса и повысить его термическую стабильность.

Область применения предлагаемой конструкции не исчерпывается космической техникой. Простота, надёжность, технологичность и низкая стоимость позволяют предположить, что данная конструкция может найти широкое применение во всех случаях, когда нужно создать конструкцию с минимальным изменением её размеров от действия температур.

Библиографический список

1. Проектирование, адаптивный к действию градиентов температур размерно-стабильной силовой фермы космического телескопа [Текст] / Р.Н. Ахметов, Н.Р. Стратилатов, А.Н. Шайда, С.В. Максимов // Космическая техника и вооружение: науч.-техн. сб. Вып. 1. – Днепропетровск: ГП «КБ «Южное», – 2012.

2. Фомин, Г.Е. Проектирование адаптивных к действию градиентов температур размеростабильных силовых конструкций летательных аппаратов [Текст] / Г.Е. Фомин, А.Н. Шайда, В.Д. Байкин // Полет. – 2000. – №06. – С. 42-45.

3. Биткин, В.Е. Особенности проектирования стержневых размеростабильных крупногабаритных космических конструкций [Текст] / В.Е. Биткин, И.В. Сальников, А.Н. Шайда // Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике. – 1991. – С. 43-49.

4. Фомин, Г.Е. Проектирование размеростабильных стержневых конструкций рефлекторов антенн, адаптивных к действию градиентов температур [Текст] / Г.Е. Фомин, А.Н. Шайда // Сборник научно-технических статей по ракетно-космической тематике. – 1991. – С. 61-64.

DESIGN OF A DIMENSIONALLY STABLE SPACE TELESCOPE BODY ADAPTIVE TO TEMPERATURE GRADIENTS

© 2013 R. N. Akhmetov, N. R. Stratilatov, A. N. Shaida,
A. S. Nonin, Y. V. Potapova

Space Rocket Center “TsSKB-Progress”

A method of designing dimensionally stable space telescope bodies with is presented in the paper that makes it possible to produce simple and reliable telescope bodies adaptive to temperature gradients.

Dimensionally stable body, curvilinear bimetallic plate, telescope.

Информация об авторах

Ахметов Равиль Нургалиевич, доктор технических наук, генеральный конструктор, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: проектирование и испытания ракетно-космической техники.

Стратилатов Николай Ремирович, кандидат технических наук, главный конструктор, начальник отделения, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: проектирование ракетно-космической техники и систем.

Шайда Анатолий Николаевич, ведущий инженер-конструктор, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: проектирование адаптивных к действию градиентов температур и конструкций.

Нонин Александр Сергеевич, начальник сектора, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: прецизионные методы замера малых деформаций.

Потапова Юлия Валерьевна, инженер-конструктор, ФГУП «ГНПРКЦ “ЦСКБ-Прогресс”». E-mail: csdb@samspace.ru. Область научных интересов: радиаторы-излучатели, фотоприёмное устройство инфракрасного диапазона.

Akmetov Ravil Nurgalievich, Doctor of Sciences (Engineering), General Designer of Space Rocket Center «TsSKB Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: design of space-rocket systems.

Stratilatov Nicholay Remirovich, Candidate of Sciences (Engineering), Chief Designer, Head of the Design Division, Space Rocket Center «TsSKB Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: design of space-rocket systems.

Shaida Anatoly Nikolaevich, leading design engineer, Space Rocket Center «TsSKB Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: designing of structures adaptive to temperature gradients.

Nonin Aleksander Sergeevich: Head of sector, Space Rocket Center «TsSKB Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: high-precision methods of measuring small deformations.

Potapova Yulia Valerjevna, design engineer, Space Rocket Center «TsSKB Progress». E-mail: csdb@samtel.ru. Area of research: IR-range photodetector.