

## ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ ГЛАВНЫХ ЗЕРКАЛ КОСМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2009 г. А. М. Савицкий; И. М. Соколов

ОАО “ЛОМО”, Санкт-Петербург

Рассмотрены основные требования к главным зеркалам космических телескопов, особенности их проектирования и изготовления. Приведены результаты расчетов главных зеркал, изготовленных из различных материалов и имеющих различную структуру облегчения. Приведен вариант конструкции опоры крепления зеркала.

*Ключевые слова:* космические телескопы, облегченные зеркала.

Коды OCIS: 230.0230.

*Поступила в редакцию 15.06.2009.*

В настоящее время все разработчики космических телескопов стремятся к увеличению апертуры, определяемой, прежде всего, диаметром главного зеркала (ГЗ). При этом важнейшей проблемой, определяющей не только стоимость, но и саму возможность создания телескопа, становится уменьшение массы ГЗ, при сохранении высокого качества формы его рабочей поверхности.

Основными требованиями к конструкции ГЗ являются:

– качество рабочей поверхности зеркала, характеризующееся среднеквадратическим отклонением волнового фронта  $\sigma_{\text{СКО}}^{\text{ВФ}}$ , отраженного от зеркала, в интервале  $(0,03\text{--}0,05)\lambda$  (где  $\lambda = 0,6328 \text{ мкм}$  – длина волны видимого спектра), которое должно быть обеспечено при изготовлении, контроле в составе телескопа и при штатной эксплуатации на орбите;

– минимальная масса конструкции зеркала, при обеспечении достаточной жесткости и прочности к эксплуатационным нагрузкам, действующим на этапе выведения на орбиту;

– собственная частота колебаний ГЗ, закрепленного штатно на платформе, должна быть не ниже 40–50 Гц.

Основным отличием ГЗ космического телескопа от ГЗ наземного телескопа является то, что оно изготавливается и контролируется в условиях силы тяготения, а эксплуатируется в условиях невесомости.

При изготовлении зеркало разгружается с помощью системы торцевых технологических

разгрузок, расположенных на тыльной поверхности зеркала. Количество и места расположения разгрузок определяются при проектировании так, чтобы  $\sigma_{\text{СКО}}^{\text{ВФ}}$  по расчету находилось в пределах  $(0,01\text{--}0,015)\lambda$ .

В связи с трудностями создания вакуумной камеры с коллиматором для вертикальной схемы контроля телескопа юстировка и контроль телескопов осуществляются при горизонтальном положении оптической оси. Поэтому для обеспечения минимальной массы телескопа желательно, чтобы конструкция ГЗ позволяла проводить данные работы без дополнительной системы разгрузок, т. е. качество рабочей поверхности зеркала, закрепленного штатно на платформе при горизонтальном положении оптической оси, должно быть не хуже  $\sigma_{\text{СКО}}^{\text{ВФ}} \leq 0,05\lambda$ .

Важным этапом в начале проектирования ГЗ является выбор материала зеркала. Основными материалами, применяемыми для изготовления зеркал, являются ситалл СО-115М, церодур, карбид кремния и бериллий [1, 2]. В табл. 1 приведены их физико-механические характеристики.

Материал ГЗ должен обладать высокими прочностными свойствами: модулем упругости ( $E$ ), модулем сдвига ( $G$ ), пределом прочности ( $\sigma_b$ ); он должен иметь малую плотность ( $\rho$ ) и низкий коэффициент температурного расширения (КТР) ( $\alpha$ ).

Как видно из таблицы, наилучшим соотношением прочностных свойств и массы обладает бериллий, однако он имеет большой КТР, что

Таблица 1. Физико-механические характеристики материалов для изготовления ГЗ

Материал	Характеристика				
	$E$ , МПа	$G$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\alpha$ , К <sup>-1</sup>
Ситалл СО-115М	93900	38000	78,4	2460	$1,5 \times 10^{-7}$
Церодур	90300	36300	70	2530	$1,5 \times 10^{-7}$
Карбид кремния	$3,94 \times 10^5$	$1,64 \times 10^5$	465	3220	$2,5 \times 10^{-7}$
Бериллий	$3,1 \times 10^5$	$1,5 \times 10^5$	316	1860	$11,2 \times 10^{-6}$

может привести к необходимости создания сложной, дорогостоящей системы обеспечения теплового режима (СОТР) на борту космического аппарата. Кроме того, недостатком бериллия является токсичность при изготовлении. Должен быть также решен вопрос, связанный с нанесением стекла с необходимыми свойствами на рабочую поверхность зеркала.

Высокими прочностными свойствами обладает карбид кремния, но его плотность выше, чем у ситалла и церодура, к тому же для его обработки требуется дорогостоящий инструмент. В настоящее время при изготовлении ГЗ для космических телескопов в основном используется ситалл СО-115М.

После выбора материала определяется вариант облегчения конструкции зеркала [3]. На рис. 1 показаны 4 схемы конструкции облегченных зеркал.

**Рисунок 1а.** Двухслойная конструкция зеркала, материал зеркала – ситалл СО-115М. Основная деталь 1 и тыльная пластина 2 соединяются методом электроадгезии. За счет замкнутой структуры конструкция зеркала имеет очень высокие жесткостные характеристики.

**Рисунок 1б.** Конструкция зеркала облегчается с тыльной стороны выборками трапециoidalной или треугольной формы. Наружный и внутренний края зеркала подкреплены ребрами.

Опыт конструирования на “ЛОМО” показывает, что при прочих равных условиях вариант облегчения выборками треугольной формы (б – 2) предпочтительнее, так как кольцевые ребра обладают недостаточной жесткостью. Материал зеркала может быть любой из приведенных в табл. 1.

**Рисунок 1в.** Этот вариант облегчения в основном может быть применен для зеркал с наружным диаметром  $D_h$  менее 0,8 м для СО-115М и не более 1,5 м – для зеркал из бериллия.

**Рисунок 1г.** Конструкция выполнена виде монолитного блока с отражающей рабочей и

тыльной поверхностями с одинаковыми профилями, а облегчающие отверстия выполнены в виде многоступенчатых отверстий, равномерно размещенных внутри монолита, при этом их оси расположены в плоскости, проходящей через центр масс зеркала перпендикулярно оптической оси зеркала. Эта конструкция с успехом может быть применена при малом радиусе кривизны рабочей поверхности ( $R$ ).

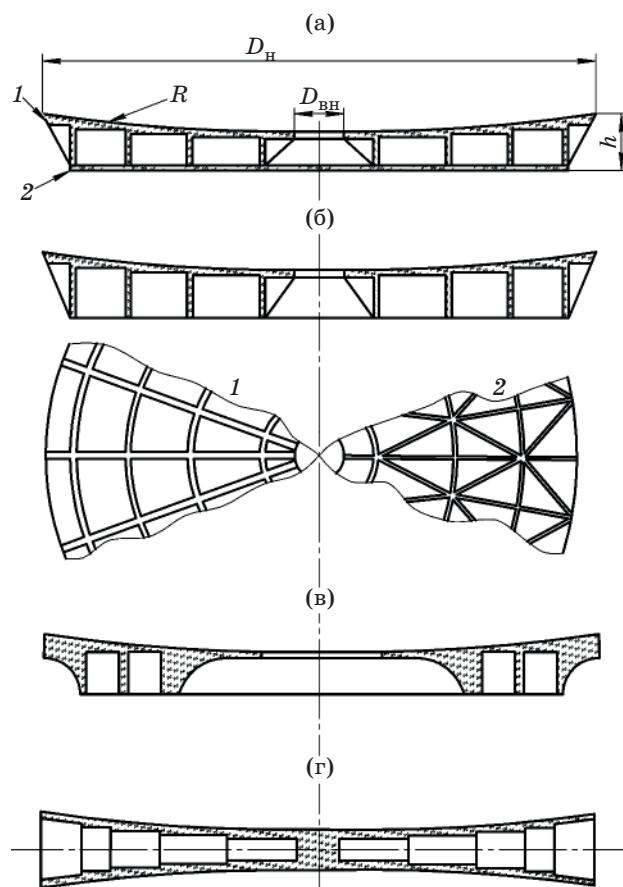


Рис. 1. Конструкции облегченных зеркал.

На “ЛОМО” в основном рассматривались варианты изготовления таких зеркал из ситалла СО-115М.

После выбора варианта облегчения зеркала проводится оптимизация его геометрических размеров с целью получения максимальной жесткости конструкции при ее минимальной массе. Варьируемыми параметрами являются высота зеркала, толщина рабочей поверхности, количество и толщина ребер. При выборе толщины ребер необходимо учитывать технологические возможности изготовления. Так, толщина ребра из ситалла и церодура не должна быть менее 4 мм. Оптимизация размеров проводится при расчете конечно-элементной модели зеркала. (Авторы использовали пакет конечно-элементного анализа “NASTRAN” [4, 5].)

Большое значение в конструкции зеркала имеет способ его закрепления на платформе. Наиболее предпочтительным является способ закрепления на трех жестких опорах, расположенных на оптимальном, с точки зрения минимума деформаций, радиусе [6]. Так как обычно КТР материалов зеркала и платформы не совпадают, конструкция опор должна обеспечивать температурную развязку зеркала и платформы. Крепление опор к зеркалу должно осуществляться таким образом, чтобы не вызывать дополнительных монтажных деформаций. На рис. 2 приведена одна из возможных конструкций опор ГЗ.

Опора собирается отдельно от зеркала. Установка и закрепление плоских пружин производится под нагрузкой, обеспечивающей нераскрытие стыка при воздействии внешних нагрузок,

действующих при эксплуатации телескопа. Предварительная нагрузка выбирается с учетом податливости элементов конструкции опоры. На зеркале закрепляются инваровые втулки. Крепление опор к втулкам производится таким образом, чтобы центр шарика находился в плоскости центра масс зеркала. Это достигается с помощью прокладок. Температурная развязка

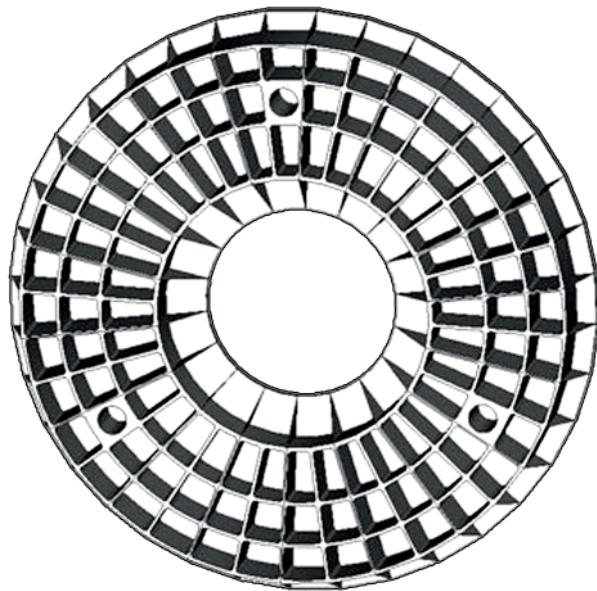


Рис. 3. Конструкция зеркала из ситалла СО-115М.

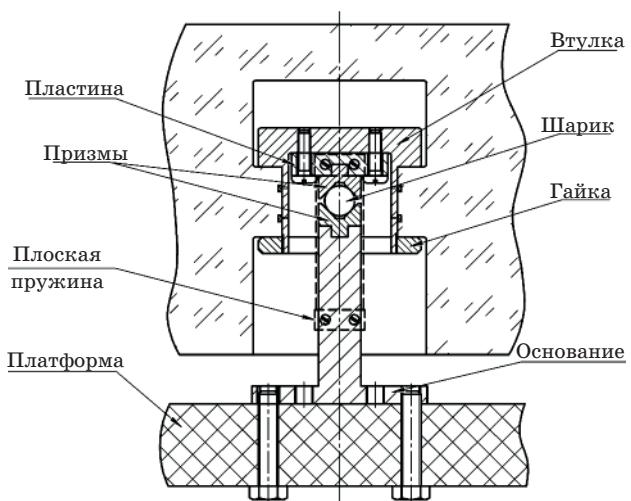


Рис. 2. Конструкция опоры крепления зеркала.

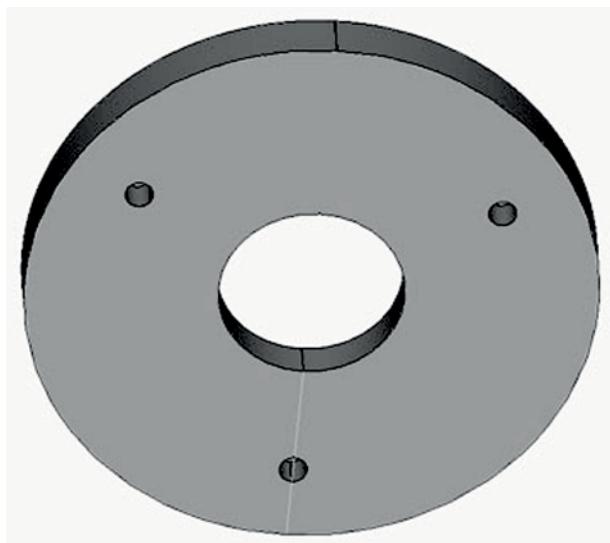


Рис. 4. Конструкция двухслойного зеркала из карбида кремния.

обеспечивается за счет малой жесткости плоских пружин.

При моделировании опор в расчетной модели зеркала задаются ограничения перемещений соответствующих узлов, причем перемещения в радиальном направлении не ограничиваются. Для задания ограничений создаются две дополнительные системы координат.

Жесткостные характеристики опор должны гарантировать собственную частоту колебаний зеркала не ниже 40–50 Гц.

На “ЛОМО” разработан целый ряд облегченных главных зеркал различных типоразмеров для перспективных оптических систем. Степень облегчения конструкции зеркала выражается через коэффициент облегчения

$$\eta = \frac{M_c - M_o}{M_c},$$

где  $M_c$  – масса “сплошного” зеркала, определяемая внешними размерами  $D_h$ ,  $D_{bh}$ ,  $h$ ,  $R$ ;  $M_o$  – масса облегченного зеркала.

В качестве примера на рис. 3–5 приведены три варианта конструкции облегченных главных зеркал, а в табл. 2 – их основные характеристики.

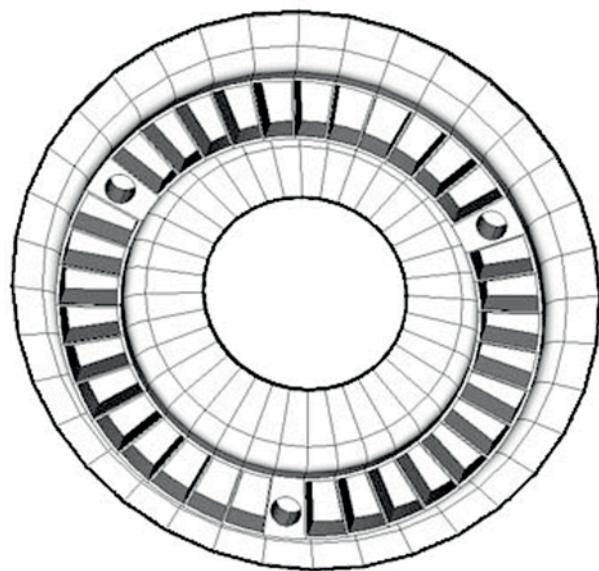


Рис. 5. Конструкция зеркала из берилля.

### Заключение

Опыт проектирования облегченных главных зеркал для космических телескопов на “ЛОМО” показывает, что, используя современные методы

Таблица 2. Основные характеристики облегченных зеркал

Характеристика	Вариант конструкции и схема облегчения		
	I (рис. 3), схема (1б) (рис. 4)	II (рис. 4), схема (а) (рис. 1)	III (рис. 5), схема (в) (рис. 1)
Материал	Сигнал СО-115М	Карбид кремния	Бериллий
Наружный диаметр, мм	1230	1230	1540
Диаметр центрального отверстия, мм	400	400	540
Высота, мм	150	120	150
Толщина рабочей поверхности, мм	15	7	20
Толщина ребер, мм			
– радиальных	7	1,5 (24 шт.)	7 (30 шт.)
– кольцевых	7	1,5 (24 шт.)	10
Масса зеркала, кг	98	72	106
Коэффициент облегчения, $\eta$	0,72	0,74	0,75
Среднеквадратическое отклонение волнового фронта, отраженного от зеркала			
– на торцевых разгрузках, $\sigma_{\text{СКОТ}}^{\text{ВФ}}$	0,01 $\lambda$ *	0,01 $\lambda$	0,01 $\lambda$
– при горизонтальном положении оптической оси и штатном закреплении, $\sigma_{\text{СКОТ}}^{\text{ВФ}}$	0,05 $\lambda$	0,03 $\lambda$	0,016 $\lambda$
Толщина тыльной пластины, мм	—	3	3

\* $\lambda = 0,6328$  мкм.

проектирования, можно изготавливать зеркала, имеющие коэффициент облегчения  $\eta = 0,7-0,75$ . Кроме того, в настоящее время больше внимания надо уделять технологии изготовления зеркал, особенно из карбида кремния и бериллия.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Любарский С.В., Химич Ю.П.* Оптические зеркала из нетрадиционных материалов // Оптический журнал. 1994. № 1. С. 76–83.
  2. *Мирошников М.М., Любарский С.В., Химич Ю.П.* Зеркала оптических телескопов // Оптический журнал. 1990. № 9. С. 3–18.
  3. *Vukobratovich D.* Lightweight Mirror Design. Optomechanical Engineering Handbook. 1999.
  4. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979.
  5. *Шимкович Д.Г.* Расчет конструкций в MSC/NASTRAN for Windows. М.: Проектирование, 2001.
  6. *Маламед Е.Р., Петров Ю.Н., Соколов И.М.* Конструкции главных зеркал космических телескопов // Оптический журнал. 2002. № 9. С. 26–30.
-