

06, июнь 2016

УДК 681.7.062.3

Разработка оптимального технологического процесса изготовления астрономического сферического зеркала с облегченной конструкцией

Погонышев А.О., студент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

Научные руководители: Денисов Д.Г., к.т.н., доцент

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

denisovdg@bmstu.ru

Семенов А.П., к.т.н., доцент,

ведущий инженер ОАО «ЛЗОС»

Россия, 105005, г. Москва, МИРЭА

Патрикеев В.Е., начальник бюро ОАО «ЛЗОС»,

Россия, 140080, г. Лыткарино, ОАО «ЛЗОС»

Крупные научно-технические достижения последнего времени в области астрономии, космической и лазерной технологий в значительной мере стали возможны благодаря появлению новых высокоточных оптических наземных и космических систем. От качества изготовления оптических компонентов, входящих в эти системы, напрямую зависят возможности инструмента при проведении научных исследований. В связи с этим возросли требования к качеству поверхностей оптических деталей, увеличился диапазон их габаритов.

Целью данного исследования является разработка оптимального технологического процесса изготовления астрономического вогнутого сферического зеркала для оптико-электронного комплекса космического базирования, целью которого является стереоскопическая и обзорная съёмка поверхности Земли из космоса, с борта космического аппарата. Изготовление требуемого зеркала представляет большую техническую трудность из-за больших размеров оптической поверхности при высоких требованиях к ее качеству. Форма его поверхности должна быть выражена с точностью, до сотых долей микрометра. Габаритные параметры зеркала приведены на рис. 1.

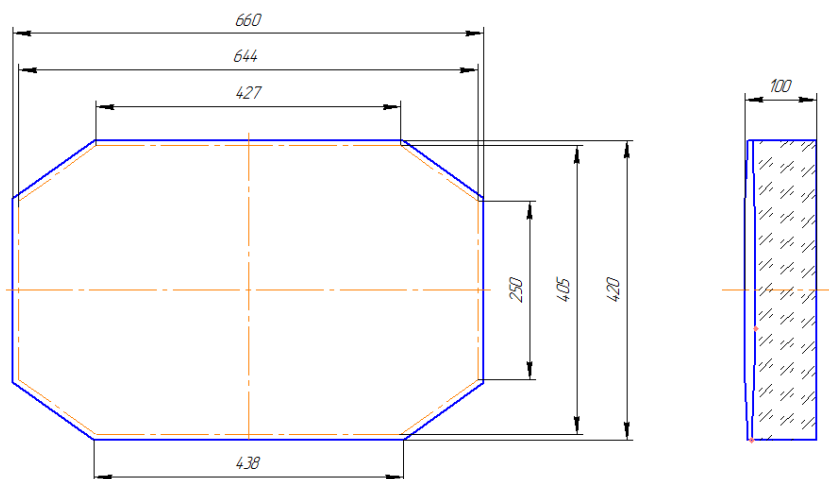


Рис. 1. Габаритные параметры астрономического сферического зеркала

Для успешного решения задачи изготовления астрономического сферического зеркала нужно выбрать материал для данного оптического изделия. К материалам для крупногабаритных зеркал предъявляются следующие требования, обусловленные жесткими допусками (сотые доли микрометра) на соответствие поверхности зеркала расчетной форме и сохранения этой формы во времени:

- высокая сопротивляемость внешним воздействиям (комбинация физических свойств, обеспечивающая малые механические и температурные деформации);
- стабильность свойств и размеров во времени;
- высокий класс шероховатости полированной поверхности;
- малая плотность.

Идеального материала, отвечающего всем перечисленным требованиям, не существует. Однако, вследствие таких свойств как высокая изотропность, стабильность, полируемость, близкий к нулю коэффициент термического расширения, ситалл является наилучшим выбором. Ситалл – стеклокристаллический материал, полученный объемной кристаллизацией стекла. Термическая устойчивость ситалла позволяет изготавливать зеркала высочайшей степени точности за гораздо более короткое время обработки, поскольку измерения можно производить не дожидаясь достижения термического равновесия. Твердость большинства ситаллов 6,5 – 7 единиц по Моосу, предел прочности на изгиб до 250 МПа. Для изготовления астрономических зеркал широко используется ситалл СО-115М [1].

При создании мобильных конструкций оптических систем или систем космического базирования требуется выполнять облегчение зеркал, но при этом необходимо выполнить условие сохранности деформаций зеркала в заданных пределах.

Облегчение конструкции выполняется с помощью фрезерования ячеек с тыльной стороны зеркала. В отдельных случаях, для увеличения прочности конструкции к тыльной поверхности зеркала припаивается плоская покровная пластина из ситалла методом электроадгезионного соединения.

На рис. 2 показана конструкция монолитного зеркала, в которой для облегчения конструкции выполнены полости с тыльной стороны зеркала (ячейки облегчения). Технология, существующая на сегодняшний день, обеспечивает ширину стенки между ячейками облегчения не менее 5 мм. Схема расположения и форма ячеек облегчения, приведенная на рис. 2, в данном случае позволяет произвести облегчение наиболее оптимальным образом. Недостатком такой конструкции является уменьшение жесткости и стабильности формы зеркала, но, тем не менее, конструкция зеркала такова, что в космических условиях форма поверхности будет сохраняться в заданных пределах.

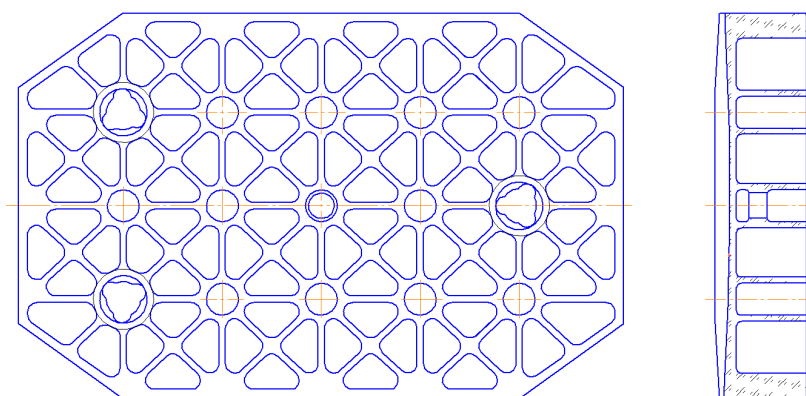


Рис. 2. Конструкция облегченного зеркала с ячейками облегчения

На рис. 3 показана конструкция облегченного зеркала, в которой части слоистого зеркала из оптического ситалла соединяют между собой электроадгезионным способом. Суть электроадгезионного соединения (ЭАС) деталей из оптического ситалла СО-115М состоит в том, что при нагреве до высокой температуры в ситалле возникает электропроводность, что позволяет использовать электрическое поле для активизации процесса диффузии между контактирующими полированными поверхностями пластин [2]. Облегченное зеркало состоит из трех пластин 1, 2, 3 (рис. 3). В средней пластине 2 для облегчения выполнены ячейки облегчения. Составляющие изделие пластины вырезают из монолитной заготовки. Создание замкнутой конструкции позволяет значительно повысить жесткость конструкции облегченного зеркала.

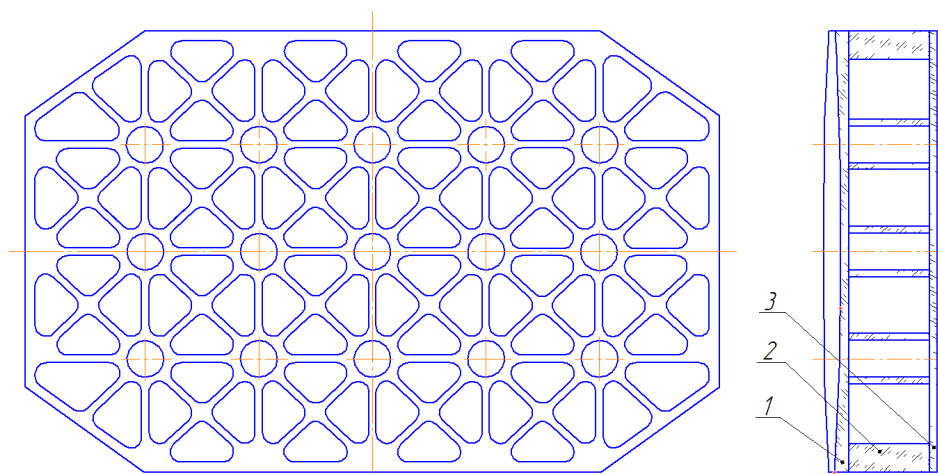


Рис. 3. Конструкция облегченного слоистого зеркала

Для изготовления облегченной конструкции данного астрономического сферического зеркала применяем метод фрезерования ячеек облегчения с тыльной стороны зеркала. Для изготавливаемого зеркала данная технология позволяет обеспечить все необходимые параметры, в том числе и весовые характеристики. По причине относительного маленького размера требуемого зеркала, полученная конструкция будет обладать достаточной жесткостью и стабильностью формы в космических условиях. А так как данная технология облегчения астрономических зеркал менее дорогая и обладает меньшей длительностью изготовления облегченных оптических изделий, по сравнению с технологией, использующей ЭАС, то ее применение наиболее оптимально.

На рис. 4 приведен эскиз требуемого астрономического сферического зеркала, где показаны его основные параметры. К данному зеркалу предъявлены следующие требования:

- среднеквадратичное значение σ полной ошибки поверхности сферического зеркала в пределах рабочей световой зоны (РСЗ) размером 405×644 не должно быть более $0,02\lambda$ ($\lambda = 632,8$ нм – длина волны He-Ne лазерного источника света интерферометрического средства контроля);
- отклонение радиуса кривизны зеркала от номинального значения не должно быть больше 1 мм;
- отклонение центра РСЗ зеркала от геометрического центра, определяемого габаритными размерами поверхностей, на которых расположена РСЗ, не более $\pm 0,5$ мм.

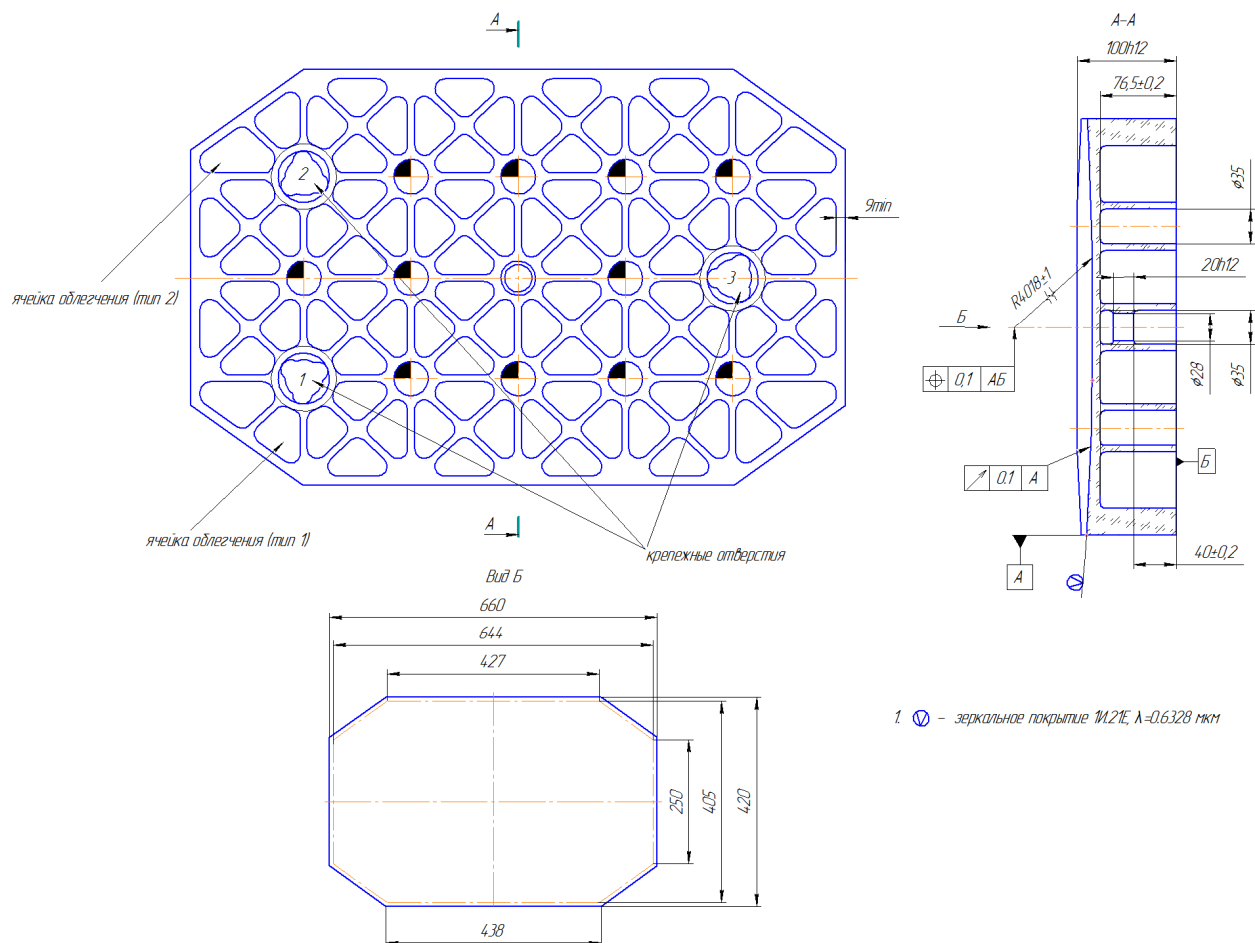


Рис. 4. Эскиз астрономического сферического зеркала

На основании вышеперечисленных требований составляется технологический процесс изготовления требуемой оптической детали. Он включает в себя следующие основные этапы:

1. Изготовление плоско-плоской заготовки $\varnothing 880 \times 111$ мм. Эскиз заготовки показан на рис. 5. Осуществляется подбор заготовки с требуемым качеством согласно спецификации. Заготовка обрабатывается до достижения заданных размеров. Контроль параметров заготовки согласно конструкторской документации на оптическое изделие. Наносятся технологические пропилы по разметке, соответствующей габаритным размерам зеркала.

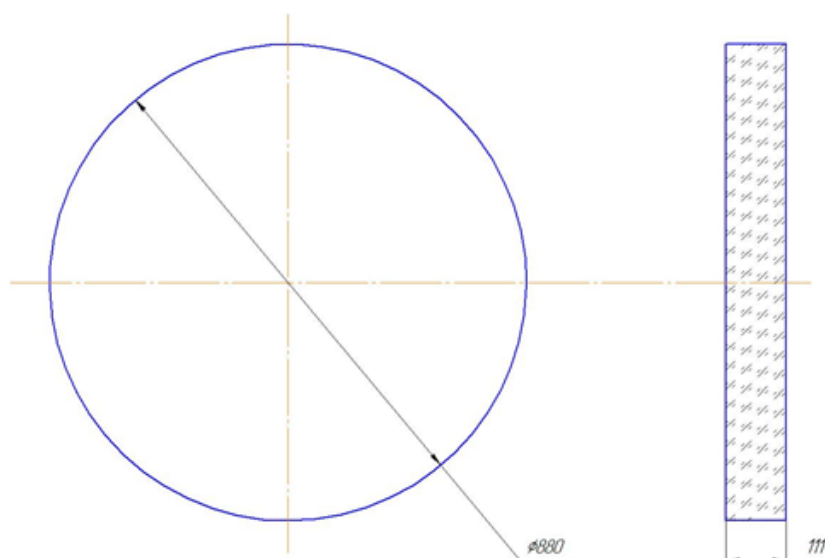


Рис. 5. Эскиз плоско-плоской заготовки

2. Изготовление центрального отверстия. Контроль его параметров согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
3. Изготовление крепежных отверстий 1, 2, 3 (рис. 4). Контроль их параметров согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
4. Изготовление ячеек структуры облегчения типа 1 в количестве 84 штук и типа 2 в количестве 4 штук (рис. 4). Контроль их параметров согласно конструкторской документации.
5. Изготовление отверстий $\varnothing 35$ мм в количестве 11 штук (рис. 4). Контроль их параметров согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
6. Химическая полировка структуры облегчения зеркала методом травления. Травление осуществлять методом заливки. Контроль качества травления.
7. Фрезерование сферической поверхности $R\ 4018 \pm 10$ мм. Контроль ее параметров согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
8. Шлифование сферической поверхности зеркала $R\ 4018 \pm 1$ мм. Контроль ее параметров согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
9. Изготовление габаритных размеров зеркала по технологическим пропилам. Контроль параметров зеркала согласно конструкторской документации на оптическое изделие.
10. Финишное полирование поверхности детали с использованием программно-управляемой автоматизированной технологии.

11. Нанесение покрытия 1И.21Е на деталь (алюминирование испарением с защитой анодным оксидированием в фосфорнокислом аммонии). Контроль покрытия согласно конструкторской документации на оптическое изделие.

Приведенный выше технологический процесс изготовления астрономического сферического зеркала является наиболее оптимальным. Он позволяет обеспечить все заданные в конструкторской документации к зеркалу показатели качества.

После получения готового изделия производится интерферометрический контроль формы рабочей поверхности зеркала. Контроль сферического зеркала проводится с помощью интерферометра ИТ-172, построенного по схеме неравноплечего интерферометра Тваймана-Грина [3].

Функциональная схема интерферометра представлена на рис. 6. Прибор работает следующим образом. Пучок света от лазера 1, отражается от юстировочной пластины 2, расширяется телескопической системой 3 и преобразуется в пучок света со сферическим волновым фронтом микрообъективом 4. Далее пучок света расщепляется светоделительным кубиком 5 на два пучка. Опорный пучок падает и отражается от эталонного зеркала 8. Объектный пучок падает и отражается контролируемого зеркала 9. На обратном пути два сферических пучка (объектный и опорный) пересекаются на рабочей грани светоделительного кубика 5 и формируют интерференционную картину в виде набора кольцевых полос. Оптическая система ПЗС-камеры 6 переносит интерференционную картину на ПЗС-матрицу. ПЗС-камера 7, в свою очередь, переносит информацию на монитор. Если исследуемое зеркало имеет дефекты геометрии, то это проявится в искривлении интерференционных полос.

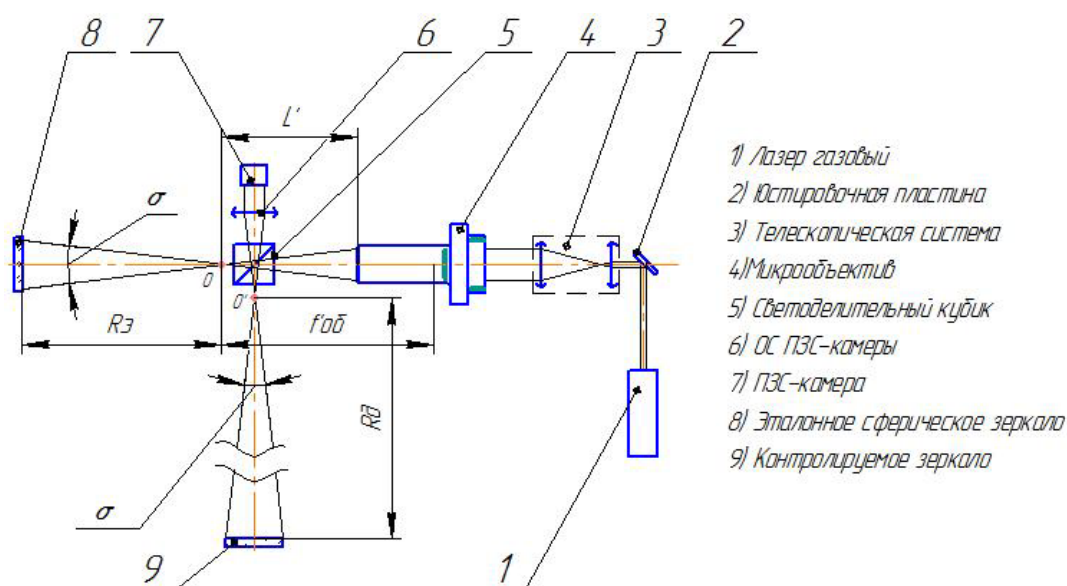


Рис. 6. Функциональная схема интерферометра ИТ-172

В связи с тем, что оптическое изделие ориентировано вертикально, стенд контроля также проектируется согласно вертикальной контрольной схеме. При вертикальной контрольной схеме контролируемое зеркало располагается горизонтально. Наиболее простой и достаточно эффективной разгрузкой для данного случая является разгрузка на мембранно-пневматическую оправу, показанную на рис. 7.



Рис. 7. Мембранно-пневматическая оправа

На основании всего вышесказанного проектируется прибор контроля для данного зеркала. На рис. 8 показан внешний вид спроектированного стенда контроля. Конструктивно прибор собран из отдельных узлов, оснащенных отдельно взятыми юстировочными механизмами.



Рис. 8. Стенд контроля астрономического сферического зеркала

Заключение

Разработанный технологический процесс изготовления астрономического сферического зеркала является наиболее оптимальным в плане стоимости и продолжительности изготовления. При этом он позволяет обеспечить все показатели качества, заданные в конструкторской документации к данному оптическому изделию. Разработанный прибор контроля позволяет измерить среднеквадратичное значение σ полной ошибки поверхности сферического зеркала с требуемой степенью точности (σ не должно быть более $0,02\lambda$ согласно техническому заданию). Таким образом, в данной статье показан полный процесс изготовления астрономического сферического зеркала от заготовки до контроля оптического изделия.

Список литературы

- [1]. Самуйлов А.В., Румянцев В.В., Молев В.И., Аннушкин С.И. Физико-химические свойства оптического ситалла СО-115М // Контенант. 2002. № 4. С. 24-31.
- [2]. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Rumyantsev V.V. Non-traditional technologies to fabricate lightweighted astronomical mirrors with high stability of surface shape // SPIE. 1999. Vol. 3786. P. 468-473.
- [3]. Малакара Д. Оптический производственный контроль: пер. с англ. / под ред. А.Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 400 с. [Daniel Malacara. Optical Shop Testing. John Wiley and Sons Inc., 1978].
- [4]. Окатов М.В., Антонов Э.А., Байгожин и др. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 864 с.