

# 05, май 2016

УДК 681.7.062.4

**Разработка оптимального технологического процесса изготовления внеосевого асферического сегмента 10-метрового зеркала радиотелескопа «Миллиметрон»**

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

*Научный руководитель: 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](mailto:denisovdg@bmstu.ru)*

*Семенов А.П., ведущий инженер АО «ЛЗОС», к.т.н., доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МИРЭА  
[laastro@lzos.ru](mailto:laastro@lzos.ru)*

*Патрикеев В.Е., начальник бюро АО «ЛЗОС»  
Россия, 140080, г. Лыткарино, АО «ЛЗОС»  
[ktb-3@lzos.ru](mailto:ktb-3@lzos.ru)*

**Введение**

Астрофизические исследования всегда были важной частью изучения космоса и представляли немалый интерес для учёных. На сегодняшний день с целью их проведения разрабатываются воспринимающие излучение космических объектов космические обсерватории, такие как Радиоастрон и Спектр-РГ. В настоящее время воплощается в жизнь проект российского космического телескопа «Миллиметрон», включённый в Федеральную космическую программу. Данный телескоп будет работать в миллиметровом и инфракрасном спектральных диапазонах. Главное зеркало телескопа, составляющее 10 м в диаметре, имеет параболическую форму и конструктивно реализуется в виде отдельных прецизионных панелей, которые устанавливаются на подвижных опорах – актуаторах. Однако производство панелей с заданной точностью из астроситалла было бы чрезвычайно дорогостояще и невыгодно с технологической точки зрения.

Решение данной проблемы состоит в том, чтобы использовать сильные стороны астроситалла и углепластика и нивелировать их недостатки. Это достигается тем, что углепластиковые конструкции будут формироваться на прецизионных матрицах из

астроситалла, при этом среднеквадратичное отклонение поверхности матрицы от теоретической поверхности должно составлять менее 10 микрон, что вполне достижимо. Таким образом, из дорогостоящей ситалловой матрицы возможно получать сравнительно дешевые углепластиковые прецизионные поверхности, которые имеют ключевые конкурентные преимущества по стоимости, интегральной деформативности, массе, жесткости и трудоемкости изготовления как по сравнению с астроситаллом, так и тем более по сравнению с карбидом кремния и бериллием. Эти преимущества должны обеспечить наилучшее соотношение цена/качество и успех на рынке космических антенн инфракрасного миллиметрового диапазона.

В данной статье будем рассматривать технологический подход к изготовлению вышеупомянутой астроситалловой матрицы с внеосевой выпуклой параболической поверхностью, имеющей максимальную асферичность 1,3 мм.

### **Общая характеристика поверхности матрицы**

Основные габаритные размеры детали приведены на рис.1. Видно, что контур матрицы является трапецией, малое основание которого составляет 88,6 мм, большое – 405,2 мм, длина достигает 1223,6 мм. Фокусное расстояние параболоида  $F = 2400,0$  мм. Центр параболоида смещен относительно левого края детали на 295,0 мм, а ось параболоида наклонена относительно детали на угол  $\varphi = 10^{\circ}43'35'' = 10,726388888888...^{\circ} = 0,187210803$  радиан.

Радиус ближайшей базовой сферы для заданных параметров внеосевого параболоида и габаритов детали составляет 4923,799 мм. Центр сферы находится на оси параболоида.

Припуск на асферизацию оценивается как отклонение поверхности параболоида от ближайшей базовой сферы. Распределение припуска носит стандартный характер, максимальное значение припуска располагается на расстоянии 1095,045 от оси параболоида и составляет 1337,75 мкм.

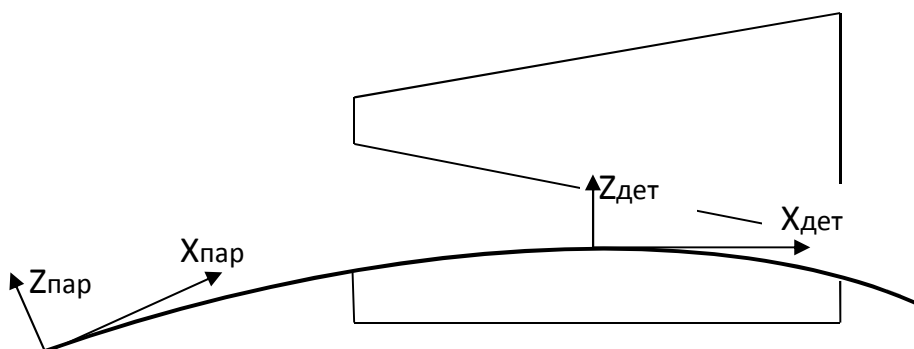


Рис. 1. Контур изделия и схема ориентации параболоида

Центр ближайшей базовой сферы не совпадает с центром детали. Следовательно, в соответствии с техническими требованиями сегмент ближайшей базовой сферы должен быть незначительно наклонен относительно нижней плоскости. Из оценочных данных видно, что левый край ниже правого примерно на 1,8 мм. На рис. 2 приведена топографическая карта припуска от ближайшей базовой сферы в СКД. Размах припуска 1337 мкм, СКО припуска 388 мкм.

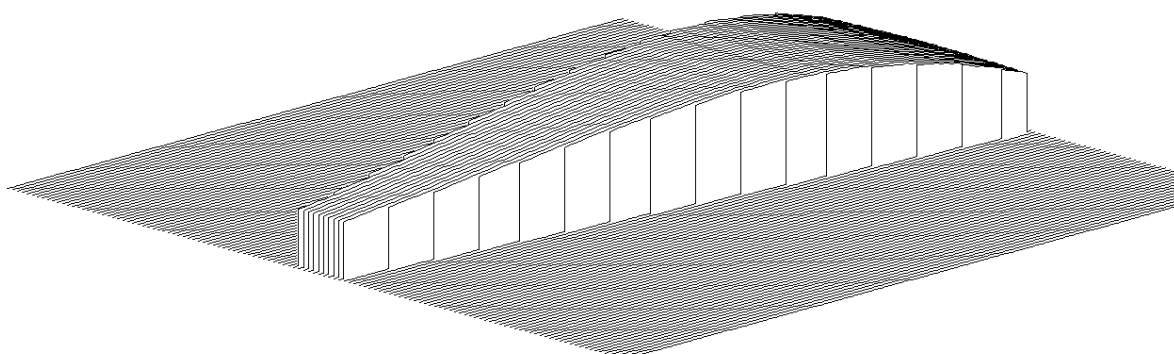


Рис. 2. Топографическая карта припуска в СКД

### План технологического процесса

По конфигурации заготовка представляет собой диск диаметром 1270 мм и толщиной 100 мм, с припусками на последующее кругление, шлифование и полирование. Этот диск распиливается по разметке (рис. 3) и затем шлифуется по плоскости с двух сторон.

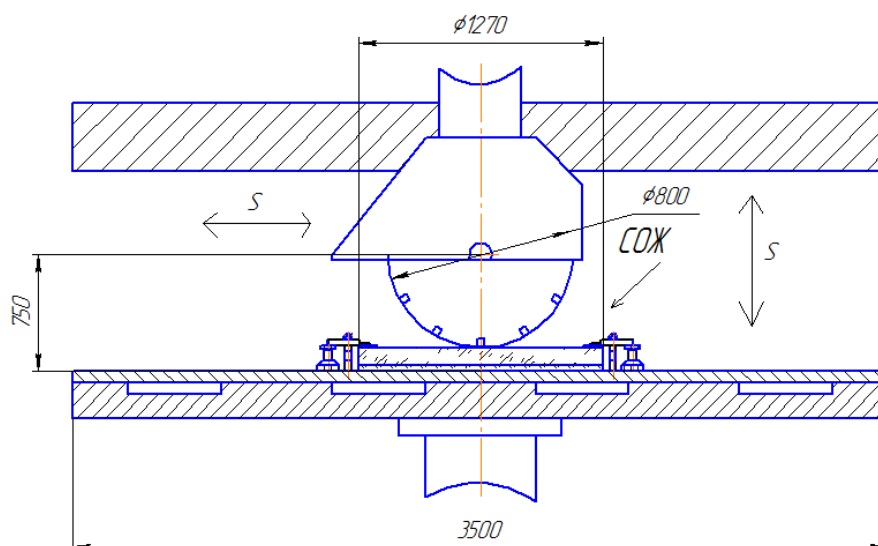


Рис. 3. Распиловка пластины по разметке

Тыльная поверхность заготовки шлифуется шлифпорошками №12, №5, далее просверливаются технологические отверстия и фрезеруются пазы (рис. 4). По окончании данных операций приступают к созданию рабочей асферической поверхности, состоящему из этапов предварительного формообразования, последующего шлифования и полирования.

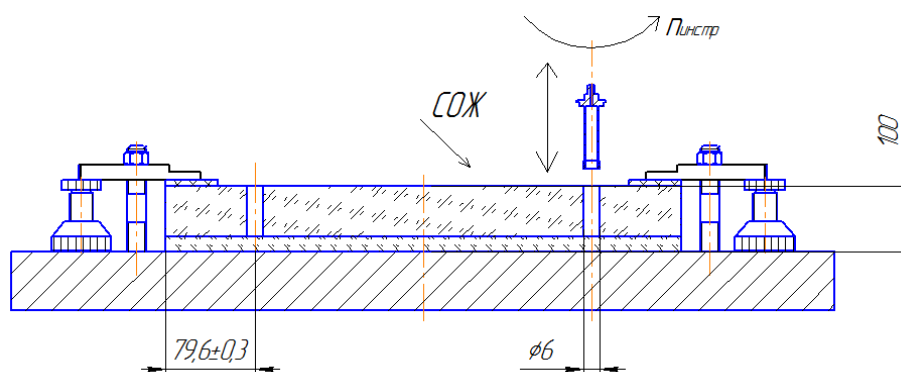


Рис. 4. Сверление сквозных отверстий диаметром 6мм в количестве 2 штук

### Предварительное формообразование

Стандартная технология асферизации предполагает формирование на поверхности детали ближайшей базовой сферы с последующим снятием припуска на асферизацию. Припуск, как правило, устраняется шлифованием детали малым инструментом по программируемой траектории. Процедура носит итерационный характер, каждая итерация сопровождается системой контроля промежуточных поверхностей, анализом оставшегося припуска и назначением сеанса для следующего приближения.

Однако оценки показали, что устранение шлифованием припуска величиной более одного миллиметра на протяженной детали крайне непроизводительно и займет несколько месяцев. По этой причине для ускорения работы была выбрана другая технология, когда на поверхности детали сразу формировалась асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом с помощью станка с числовым программным управлением (ЧПУ). На рис. 5 приведён эскиз данной операции.

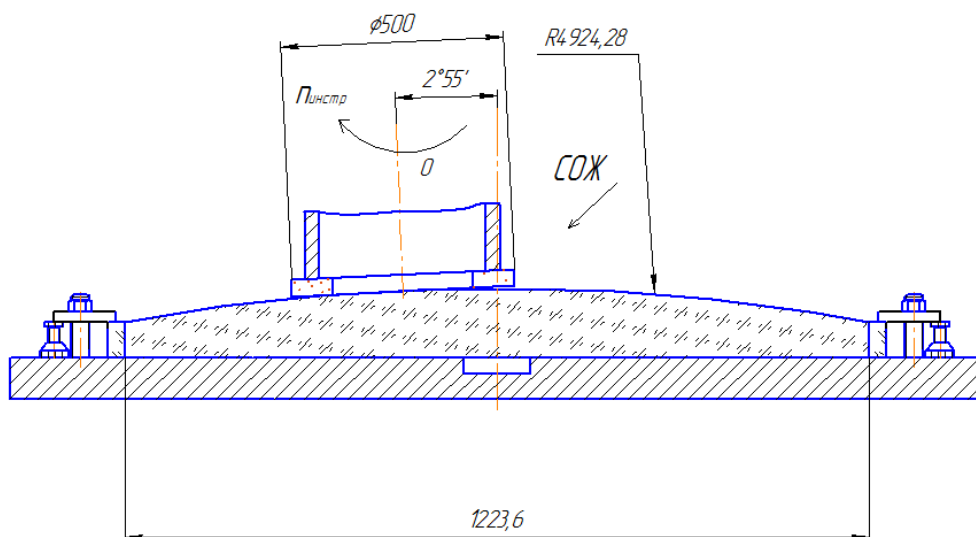


Рис. 5. Фрезеровка асферической поверхности

Фрезерование проводилось в два этапа – грубый съём, когда инструмент снимал до 5 мм за проход, и тонкая обработка, когда съём не превышал 0,5 мм. Такой подход позволил также снизить глубину нарушенного слоя.

Как показали дальнейшие измерения, была получена асферическая поверхность, отличающаяся от номинальной не более чем на 100 микрон. Общее время фрезерования асферической поверхности детали составило 2 недели.

### **Шлифование и полирование**

Шлифование поверхности детали решало две задачи: устранение следов обработки и трещиноватого слоя после фрезерования, и доводка формы поверхности до требований спецификации – среднеквадратичное отклонение (СКО) должно быть меньше 1 мкм.

Устранение следов обработки фрезой и дальнейшее шлифование выполнялось с использованием набора малых гибких инструментов на резиновой подложке с латунными пятками на станке с программным управлением [1,2]. Диаметры инструментов не более 80 мм. Специально разработанная конструкция инструмента позволяет осуществлять

постоянный контакт всей его поверхности с поверхностью обрабатываемой детали при перемещении инструмента по поверхности детали. Инструмент в любой части детали обладает необходимой эластичностью и принимает форму поверхности, соответствующей форме обрабатываемой поверхности в данной области и создает максимально возможное давление на деталь для осуществления съема материала, в том числе и краевыми областями инструмента. При этом будет сохраняться постоянный вид профиля съема под инструментом. Кроме того, возможен выход такого инструмента за край детали для обработки краевых зон. Профиль съема под инструментом определяется экспериментально. Этот профиль съема вводится в программу для расчета сеанса обработки асферической поверхности. Эскиз операции показан на рис. 6.

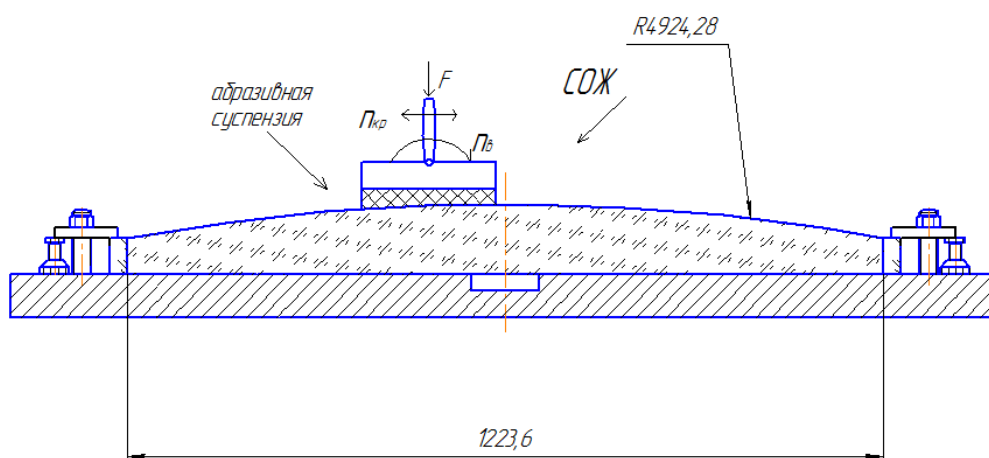


Рис. 6. Шлифование асферической поверхности шлифпорошками М14, М10

На первоначальной стадии обработка велась в режиме заглаживания по траекториям так, что инструменты с одинаковой скоростью проходил по всей поверхности детали, реализуя равномерный съем. Для устранения остаточного рельефа после фрезерования применялась более крупная фракция абразива, а затем все более мелкая для устранения остаточных ошибок и получения требуемой для полировки шероховатости.

Всего было проведено 10 сеансов обработки под управлением ЧПУ. Когда была достигнута асферическая поверхность требуемого качества, она была отполирована для устранения мата после шлифования. Полировка также проводилась набором малых инструментов.

## Контроль формы поверхности

Существуют различные методы контроля оптики контактными методами [3,4,5]. В данном случае контроль формы поверхности после стадии фрезерования и на этапе шлифования выполнялся на координатно-измерительной машине КИМ-1400 [6]. Машина имеет гексаподовый механизм перемещения каретки, на которой крепится контактный щуп. Тяги гексапода оснащены лазерными измерителями перемещений, что гарантирует высокую точность позиционирования. Точность измерения координат КИМ-1400 составляет 0,5 мкм. Поле измерений – 1400 мм, что обеспечивает измерения детали.

КИМ-1400 оснащен компьютерной системой управления SamISO, позволяющей реализовывать измерения в автоматическом режиме. В состав библиотеки системы входит большое количество стандартных подпрограмм для измерения простых поверхностей типа плоскости, сферы, цилиндра, конуса и др.

Для измерения асферической поверхности детали была разработана оригинальная управляющая программа. Измерения проводились непосредственно в узловых точках сетки, соответствующих требованиям программно-управляемого комплекса. Шаг сетки задавался в качестве параметра программы, система вычисляла координаты с учетом геометрии и габаритов детали и проводила измерения.

Результаты измерений система записывала в виде унифицированного файла топографии. Это позволило практически напрямую включить результаты измерений в технологическую систему.

При измерении формы асферической поверхности шариком контактного щупа, необходимо было учитывать, что КИМ-1400 фактически измеряет координату центра шарика. Для получения реальных результатов необходимо вводить компенсацию на радиус шарика. Это нетрудно сделать для простых поверхностей, где компенсация линейна, и значительно труднее для асферической поверхности, где компенсация зависит от координаты измеряемой поверхности. По оценкам, величина компенсации достигает 19 мкм.

Учет компенсации проводился двумя путями. Во-первых, распределение компенсационной поправки по поверхности было аппроксимировано полиномом, по которому вычислялись значения смещения центра шарика в процессе измерения на КИМ-1400 в каждом узле сетки. Измеренные значения с поправкой записывались в файл топографической карты отклонений фактической поверхности от модели. Точность аппроксимации полиномом составляла 2 мкм.

Для реализации второго пути была разработана специальная программа. Исходными данными для нее была топографическая карта поверхности детали,

полученная по измерениям на КИМ-1400. Фактически файл содержал значения координат центра шарика от плоскости измерительной машины, полученные при касании в узлах сетки. Программа вычисляла такую точку (точку касания) на поверхности модели, нормаль к которой на расстоянии радиуса шарика щупа попадала на координату измеряемого узла сетки. Отсюда вычисление поправки на смещение центра шарика по Z не составляло труда.

Основным результатом программы было получение топографической карты припуска для дальнейшей обработки поверхности.

Дополнительно в программе был заложен вариационный механизм, позволяющий менять некоторые параметры поверхности модели. Составлялся функционал по фактическим и модельным данным, и дальше производился поиск его минимума. Можно было установить, какому значению фокуса, или какому значению внеосевого параметра параболической поверхности лучше отвечает фактическая поверхность. Можно было также проанализировать варианты пространственной ориентации параболоида относительно осей детали.

На рис. 7 приведен результат расчета после пятого сеанса шлифования малым инструментом и топография оставшегося припуска.

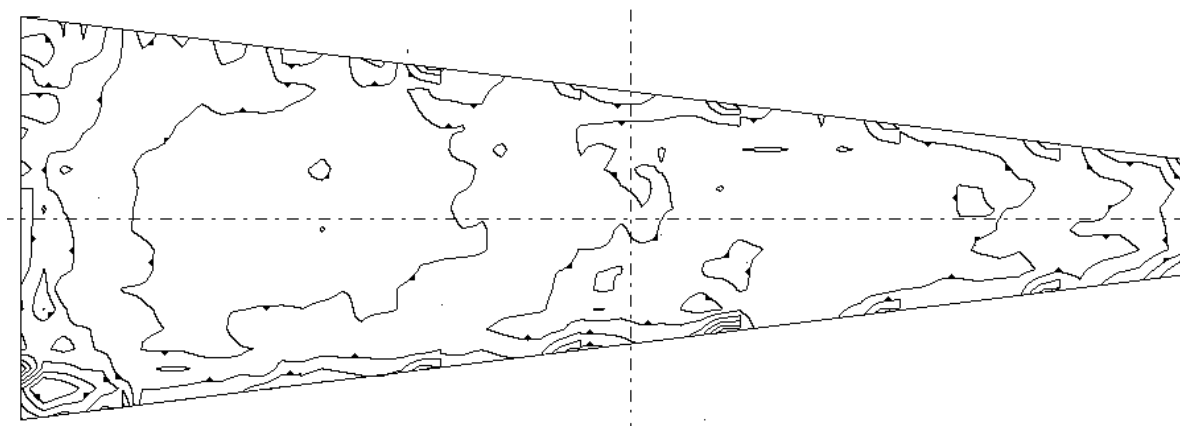


Рис. 7. Результат расчета и топографическая карта припуска (градация изолиний 5 мкм).

Размах топографии 48 мкм, СКО – 5,3 мкм

Как видно из результатов расчета, практически нет смещения параболоида по Y и нарушения ориентации по C – сказывается тщательная установка детали при измерении на КИМ-1400. Отмечается несколько больший угол B и вершинный радиус. Вершинный радиус варьировался исключительно для получения оценки величины – фиксирование значения вершинного радиуса при расчете приводят к топографии припуска с



присутствием расфокусировки. Устранение такого припуска сопровождается коррекцией вершинного радиуса поверхности детали.

### **Заключение**

Разработана технология изготовления крупногабаритных высокоасферических выпуклых внеосевых поверхностей оптических деталей (более 1 мм) с произвольной конфигурацией внешних границ, со средствами контроля на стадии изготовления контактными методами, позволяющими достичь отклонений формы поверхности от заданной менее 10 мкм и после прополирования поверхности получить интерференционную картину в видимой области.

Измерения формы поверхности контактными и бесконтактными методами показали, что получена поверхность высокого качества, СКО отклонений которой не превышает 1 мкм.

### **Список литературы**

- [1]. Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев А.П., Патрикеев В.Е., Шаров Ю.А. Технологические особенности изготовления главных зеркал телескопов // Оптический журнал. 2013. Т. 80, №4. С. 8-17.
- [2]. Лямин Ю.Б. Автоматизированные станки с компьютерным управлением по 5-ти координатам для формообразования высокоапертурных поверхностей крупногабаритных зеркал // Оптический журнал. 2011. Т. 78, №4. С. 21-24.
- [3]. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres // Proceedings of SPIE. 1996. Vol. 2871. P. 362-373. DOI: 10.1117/12.269059.
- [4]. Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes // Proceedings of SPIE. 1997. Vol. 3134. P. 51-61. DOI: 10.1117/12.295151.
- [5]. Burge J. H., Su P., Zhao C. Optical metrology for very large convex aspheres// Proceedings of SPIE. 2008. Vol.7018. P.701818-1 - 701818-12. DOI: 10.1117/12.790063.
- [6]. ООО «Лапик». Производство координатно измерительных машин (КИМ). Режим доступа: <http://www.lapic.ru/> (дата обращения 01.03.2016).