

05, май 2016

УДК 681.7.062.42

Проектирование технологических процессов изготовления внеосевых асферических зеркал с облегчённой конструкцией

Барышев С.А., студент

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

Пант Р.Р., студент

*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

Семенов А.П., ведущий инженер ОАО «ЛЗОС», к.т.н., доцент

Россия, 105005, г. Москва, МИРЭА

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

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

Введение

Асферические облегчённые зеркала используются в астрономической оптике в составе систем наземного и космического базирования. Структура облегчения необходима для уменьшения веса детали и обеспечения её стабильной работы в космических условиях (в невесомости) без потери своей формы. Особенность конструкции внеосевых зеркал состоит в том, что ось отражающей поверхности лежит за пределами самой детали. Поэтому изготовление внеосевого асферического зеркала с точки зрения технологии обработки и контроля считается наиболее сложным технологическим процессом. Для создания таких изделий можно использовать следующие технологические подходы.

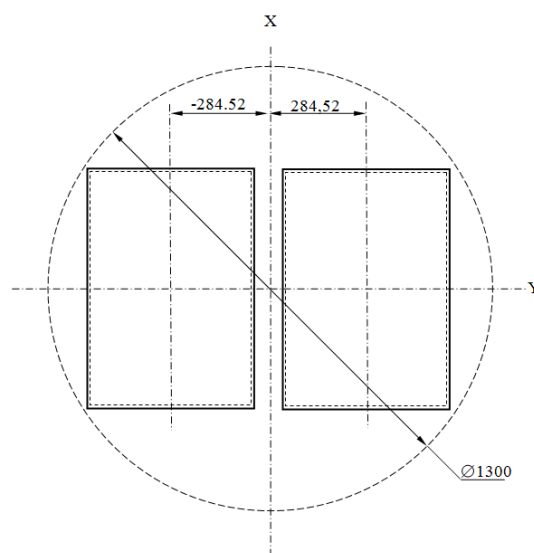


Рис. 2. Расположение зеркал относительно центра заготовки

Центральные и крепёжные отверстия и ячейки облегчения изготавливаются в заготовке сразу для обоих зеркал на координатно-расточном станке 2E450АФ30 различным алмазным инструментом (фрезами, сверлами и др.) (рис. 3,4). При создании структуры облегчения сначала осуществляется сверление отверстий по углам ячейки, затем высверливание по её контуру.

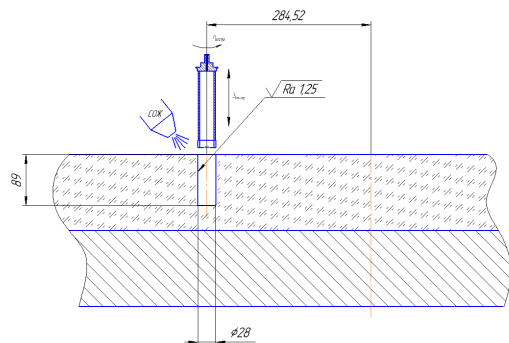


Рис. 3. Изготовление центрального отверстия

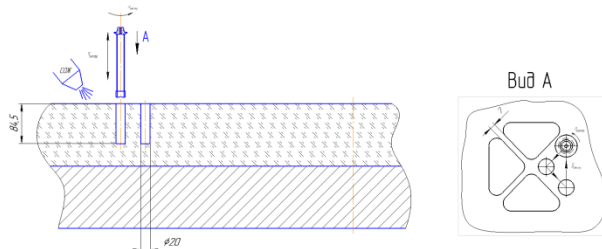


Рис. 4. Изготовление ячеек облегчения

Далее выполняется операция фрезерования вогнутой сферической поверхности на карусельном станке КУ-1540 алмазным инструментом. Станок работает в полуавтоматическом режиме. Рабочий-оператор устанавливает и механически крепит заготовку на планшайбе станка и снимает ее по окончании обработки. В автоматическом режиме происходит подвод шпинделя с инструментом к детали, рабочие перемещения до заданного размера обработки.

Угол наклона шпинделя инструмента рассчитывается по формуле [1]:

$$R_{\text{сф}} = \frac{D_{\text{ин}}}{2 \cdot \sin \alpha},$$

где $R_{\text{сф}} = 6987.9$ мм – радиус получаемой сферической поверхности;

$D_{\text{ин}} = 350$ мм – диаметр инструмента;

α – угол наклона оси инструмента к оси шпинделя заготовки.

Отсюда можно определить необходимый угол наклона инструмента:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{D_{\text{ин}}}{2R_{\text{сф}}}\right) = \arcsin\left(\frac{350}{2 \cdot 6987.9}\right) = 1^{\circ}26'6''$$

Примем значение $\alpha = 1^{\circ}26'$. Тогда радиус получившейся после шлифования сферы:

$$R'_{\text{сф}} = \frac{350}{2 \cdot \sin(1^{\circ}26')} \approx 6996 \text{ мм}$$

Операция фрезерования сферической поверхности изображена на рисунке 5.

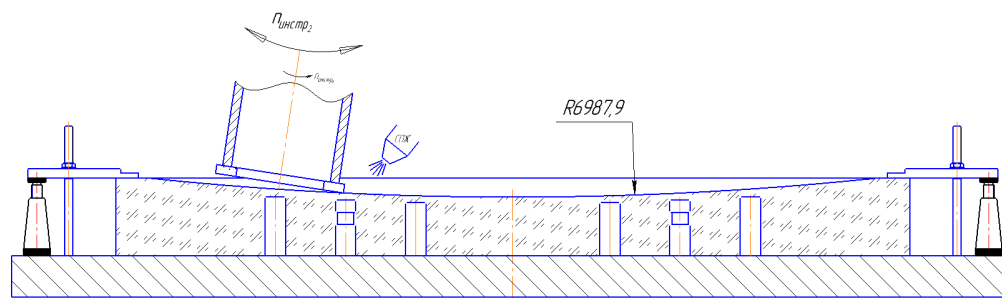


Рис. 5. Фрезерование радиуса ближайшей сферы

Асферизация поверхности осуществляется малоразмерным инструментом на шлифовально-полировальном станке СПА-1500. Необходимый съём материала осуществляется по формуле Престона [2]:

$$I_y = k P_y V_y S_y T_y,$$

где P_y – нагрузка на инструмент;

V_y – скорость изделия относительно инструмента;

S_y – коэффициент покрытия;

T_y – время обработки.

Операция асферизации поверхности представлена на рис. 6.

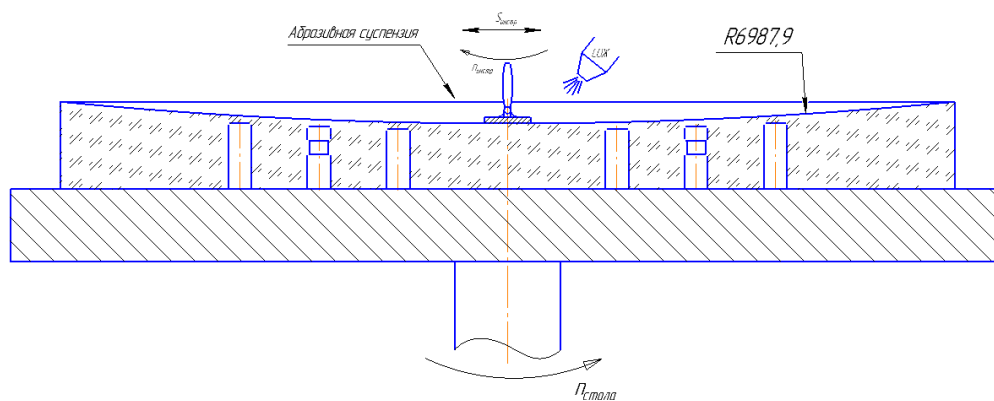


Рис. 6. Асферизация поверхности шлифованием

Контроль поверхности зеркал осуществляется с помощью интерферометра, построенного по схеме Тваймана-Грина. Как было упомянуто выше, необходимо проводить контроль в паре, поскольку в оптической системе прибора разнорADIUSность обоих компонентов должна быть менее 0,2 мм. Ещё одной особенностью метода контроля является использование голографического корректора волнового фронта, который преобразует сферический фронт в асферический. Оптическая схема интерферометра с корректором изображена на рис. 7.

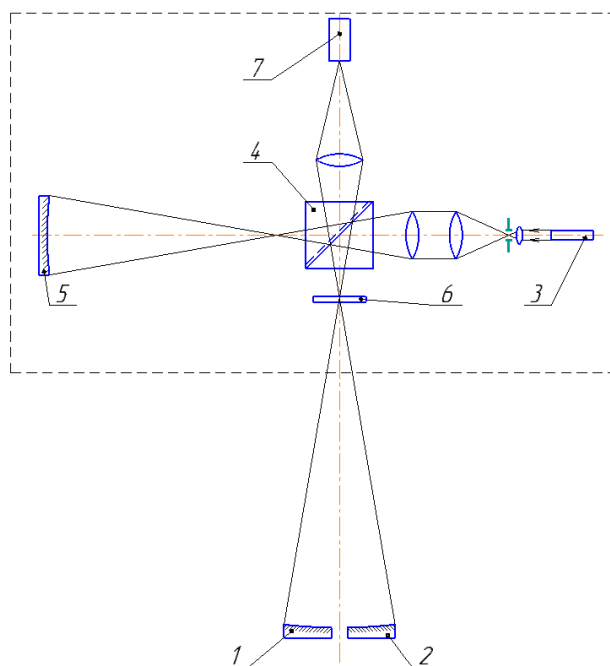


Рис. 7. Оптическая схема интерферометра Тваймана-Грина:

- 1 – контролируемое зеркало; 2 – парное зеркало; 3 – He-Ne лазер;
- 4 – светоделительный куб; 5 – эталонное зеркало; 6 – ДОЭ-корректор;
- 7 – матричный фотоприёмник

Интерферометр работает следующим образом. Пучок лазера расширяется микрообъективом. Затем он коллимируется и преобразуется в сходящийся сферический пучок. Далее он разделяется на два расходящихся пучка в светоделительном кубике. Опорный пучок отражается от сферического зеркала. Объектный пучок преобразуется дифракционным оптическим элементом (ДОЭ) в расходящийся асферический пучок, лучи которого падают и отражаются по нормали от контролируемого асферического зеркала и парного с ним. На обратном пути два пучка (объектный и опорный) интерферируют в плоскости светоделительного кубика, а интерференционная картина в виде набора интерференционных полос проецируется оптической системой в плоскости фотоприёмника. Если контролируемое зеркало имеет дефекты, то это проявится в искривлении интерференционных полос.

Для правильной юстировки детали относительно оптической оси системы контроля на ДОЭ расположены специальные оптические элементы [4]. Схема ДОЭ и расположение его в оптической системе представлены на рисунках 8 и 9.

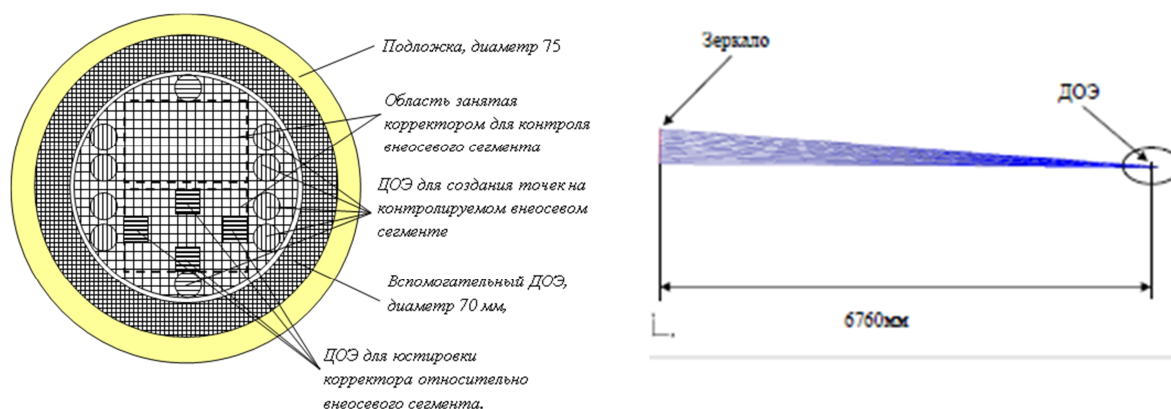


Рис. 8. Схема дифракционного корректора для контроля внеосевого сегмента

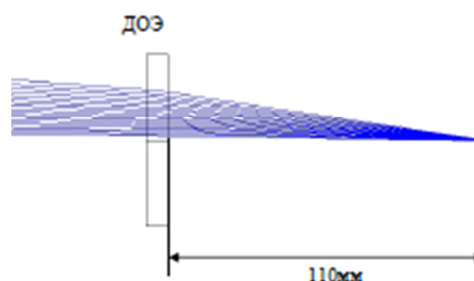


Рис. 9. Схема расположения ДОЭ-корректора для контроля внеосевого сегмента

Конструкция контрольно-измерительного стенда изображена на рисунке 10.

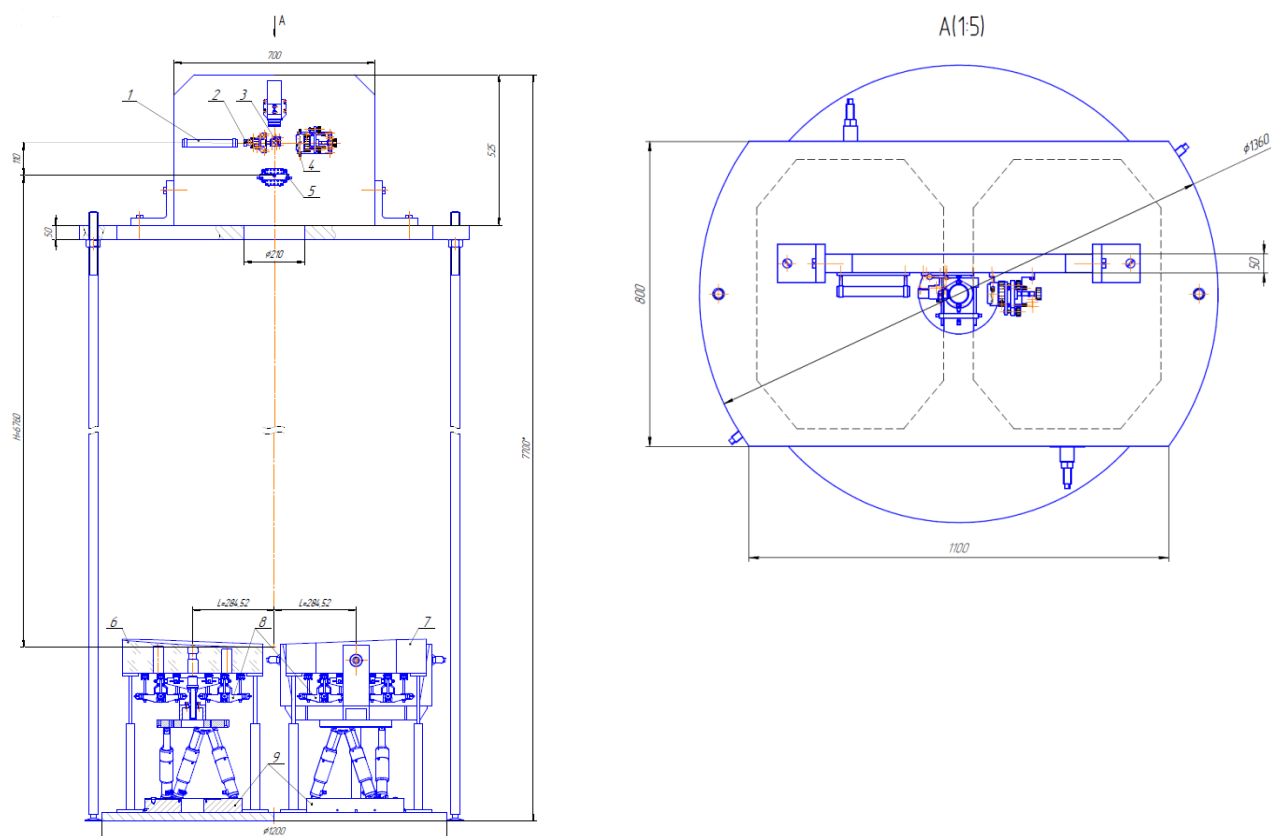


Рис. 10. Стенд для контроля асферической поверхности

Зеркала устанавливаются на оправу Гребба, необходимую для создания условий, минимизирующих остаточную деформацию зеркала, и имитирующую будущую работу зеркал в невесомости. Система стабилизации положения зеркала обеспечивает сохранение его пространственного положения относительно оправы [3]. Оправы с зеркалами устанавливаются на шестиосевые гексаподы, которые обеспечивают движение оправы с зеркалом по всем 6-ти степеням свободы. Положение контролируемого зеркала надёжно закрепляется, второе зеркало юстируется относительно первого с использованием гексапода. Телескопическая система и микрообъектив располагаются на стойке и могут двигаться относительно неё вдоль оптической оси. Узел светоделительного кубика жёстко закреплён на плате, подвижек не имеет. Все остальные узлы выставляются относительно кубика. Продольная подвижка узла эталонного сферического зеркала предназначена для совмещения автоколлимационной точки вдоль оптической оси. Узел голографического корректора имеет подвижки.

Предварительная юстировка осуществляется по следующим этапам:

1. Установка зеркал производится в соответствии с инструкцией по работе с технологической оправой.
2. Закрепить на каждой контролируемой поверхности несимметричные репера.
3. Установить диафрагмы с отверстием диаметром 1 мм в углах сегмента (рис. 10) с точностью ± 0.5 мм.

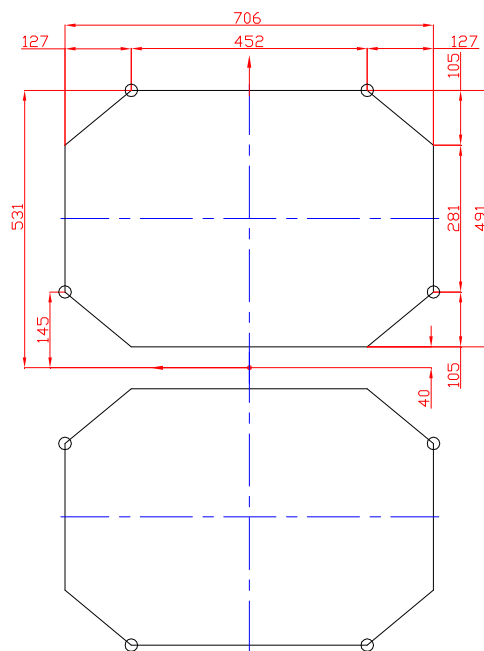


Рис. 10. Схема расположения диафрагм на углах сегментов

4. Установить вблизи центра кривизны главного зеркала (ГЗ) интерферометр.
5. Произвести юстировку интерферометра согласно паспорту на данный прибор.
6. Произвести предварительное совмещение изображений контролируемого и эталонного зеркал за светоделительным блоком интерферометра. Настройка выполняется на контролируемое ГЗ (ГЗ 1).
7. Закрыть эталонную ветвь непрозрачным экраном.
8. Произвести настройку интерферометра относительно ГЗ 1. При настройке интерферометра на контролируемое ГЗ путём продольных и угловых перемещений интерферометра добиться попадания 4-х фокусирующихся на поверхности зеркала пучков в отверстия диафрагмы (при этом они должны полностью исчезнуть в отверстиях диафрагмы).
9. Произвести настройку ГЗ 2 относительно интерферометра. При настройке ГЗ 2 путём его продольных и угловых перемещений с помощью гексапода добиться попадания 4-х фокусирующихся на поверхности зеркала пучков в отверстия

диафрагмы (при этом они должны полностью исчезнуть в отверстиях диафрагмы). При этом следует проверить расстояние между сегментами, которое должно удовлетворять требованиям спецификации.

10. Проверить положение изображений от сегментов. Открыть эталонную ветвь интерферометра. Совместить блики от сегментов и от эталонного зеркала, используя подвижки гексапода для ГЗ 2.
11. Проверить расфокусировку. Установить за интерферометром CCD-камеру, и провести фокусировку её объектива на установленные репера.
12. В поле зрения наблюдать интерференционную картину от основного ГЗ 1 и от ГЗ 2 (рис. 11). В случае если имеются искривления картин, провести подъюстировку интерферометра относительно ГЗ 1 и подъюстировку ГЗ 2 относительно интерферометра с использованием гексапода.

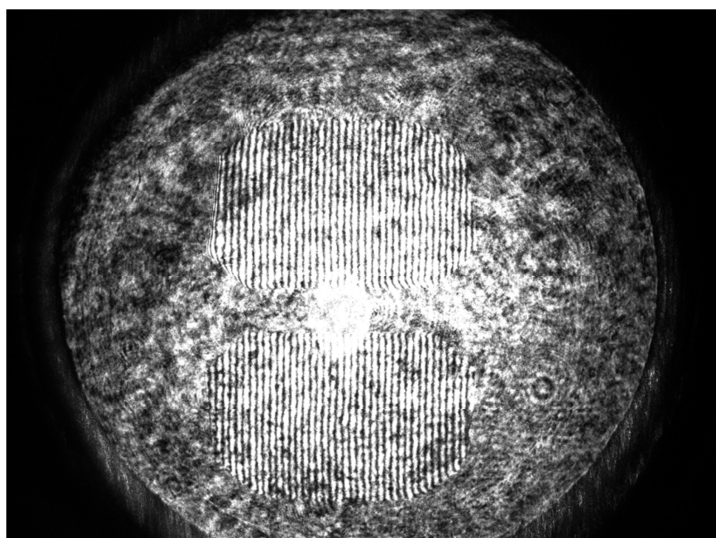


Рис. 11. Аттестационные интерферограммы

Метод изготовления и контроля асферического зеркала круглой формы

Второй пример изготовления крупногабаритного внеосевого зеркала – асферизация, доводка и контроль зеркал с уже готовым внешним круглым периметром, когда оптическая ось поверхности зеркала находится вне детали. Классические приёмы финишной обработки поверхности зеркала здесь неприменимы, потому что на зеркале внеосевая асимметрия, и только в начальной стадии ближайшая сфера может быть изготовлена классическим способом. При установке такой детали (рис. 12) на станок для шлифования сферы изготавливается специальный клин, чтобы обрабатываемая поверхность находилась в горизонтальном положении.

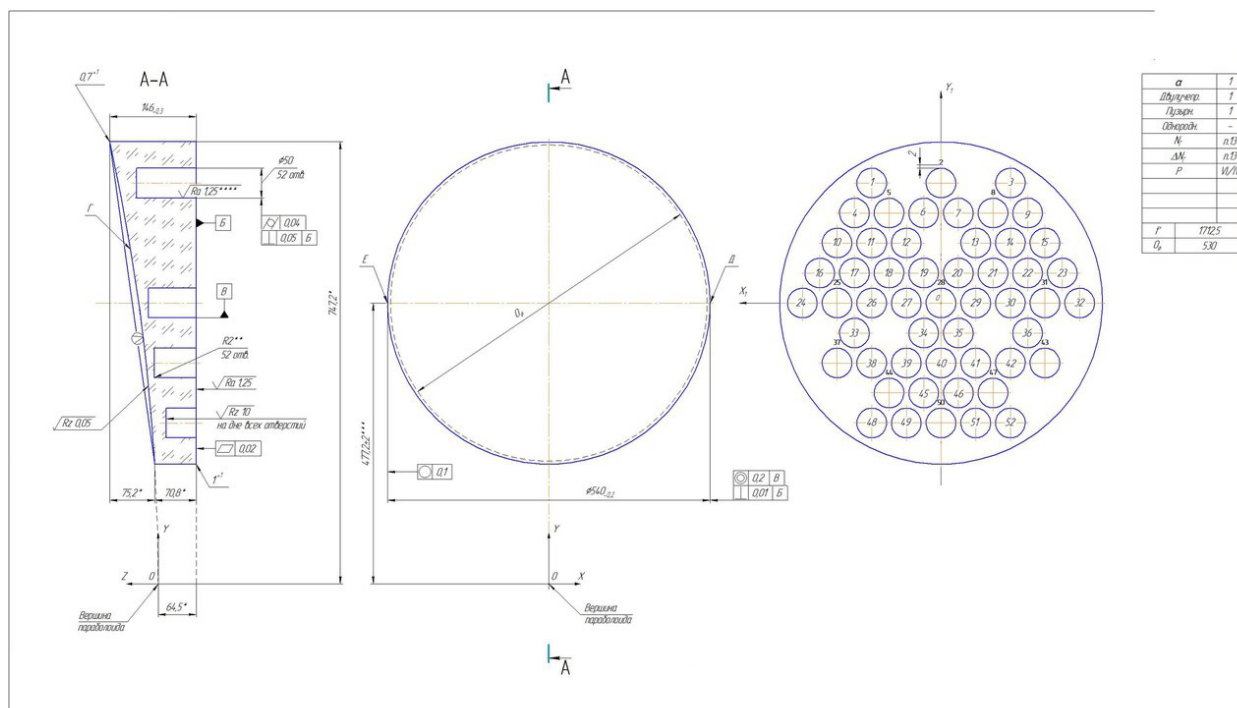


Рис. 12. Чертёж внеосевого параболического зеркала

Для изготовления клина разрабатывается свой технологический процесс, в ходе которого обеспечиваются важнейшие параметры – угол наклона клина, максимальная и минимальная толщины по краям.

Заготовка самого зеркала (рис. 13) отдельно проходит набор операций перед соединением с клином, включающий в себя: шлифование поверхностей на станке "ШП-1000" (рис. 14), кругление заготовки (рис. 15) и сверление отверстий структуры облегчения (рис. 16) на станке "2Д-450".

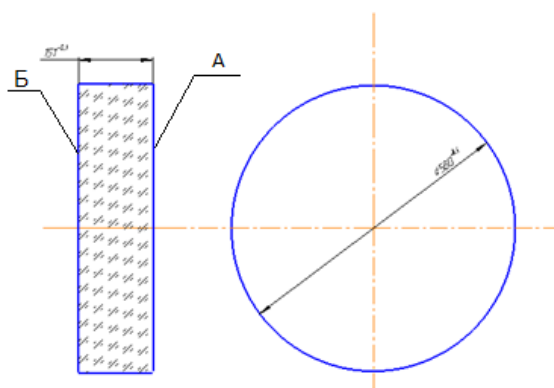


Рис. 13. Заготовка зеркала

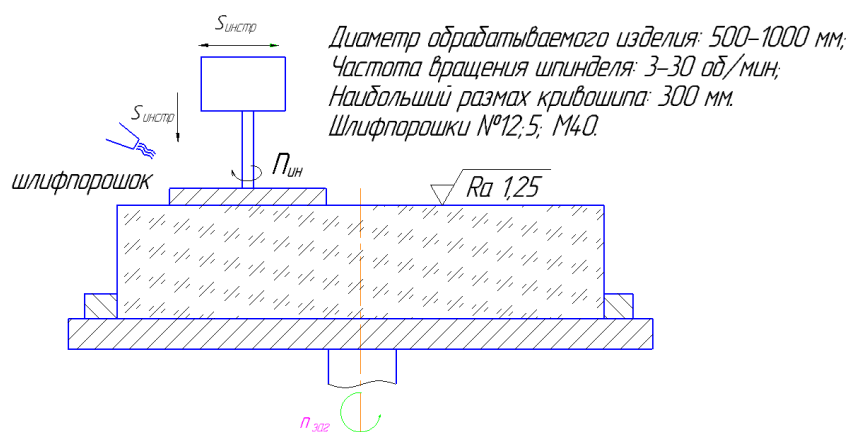


Рис. 14. Шлифование поверхностей заготовки

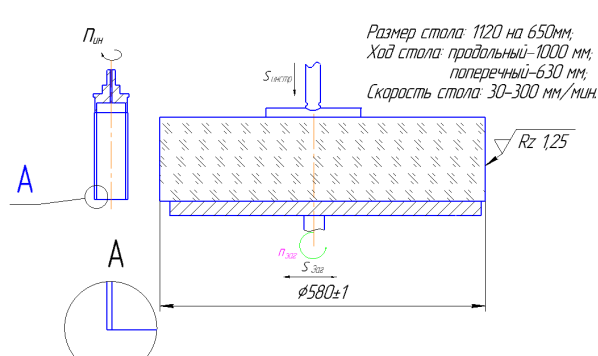


Рис. 15. Кругление заготовки

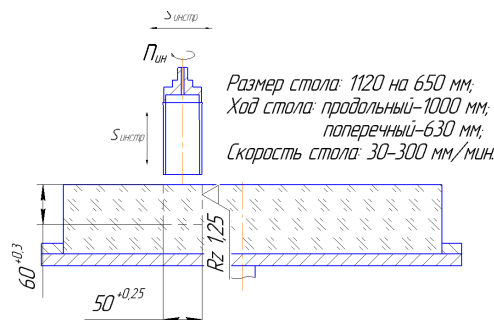


Рис. 16. Изготовление отверстий

Следующий этап процесса изготовления требуемого зеркала – создание клина на заготовке и установка заготовки на клин (рис. 17). Этап фрезерования ближайшей сферы на рабочей поверхности осуществляется на станке "Алмаз-800" (рис.17). Асферизация рабочей поверхности выполняется на станке "АПД-600", выдерживая отклонение профиля поверхности от расчётного не более 0,001 мм (рис. 18).

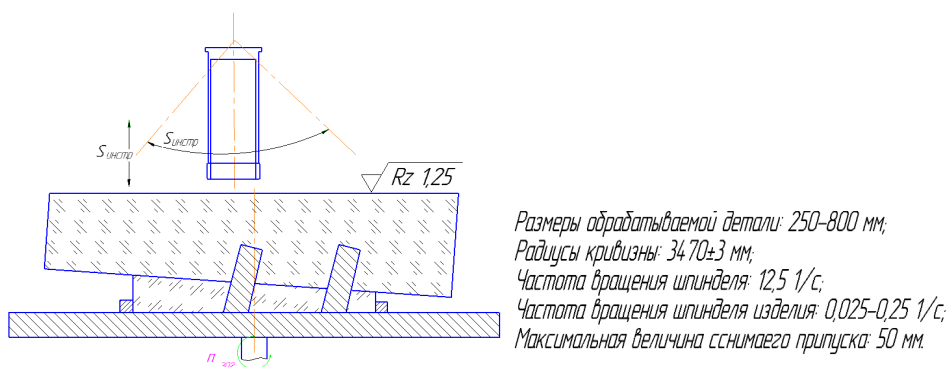


Рис. 17. Фрезерование рабочей поверхности

*Наружный диаметр обрабатываемой детали, не более: 600 мм;
Частота вращения шпинделя инструмента: 5-250 об/мин;
Усилие нажатия на инструмент: 4-250 Н.*

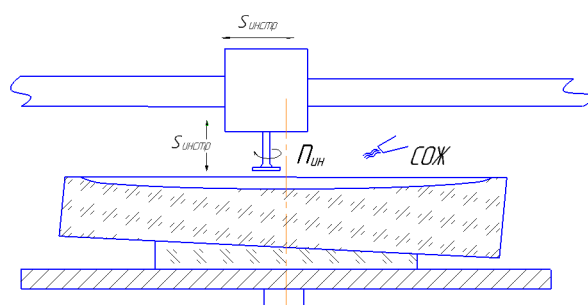


Рис. 18. Асферизация рабочей поверхности

Методика съема материала при асферизации отличается тем, что в этом случае, поскольку деталь асимметрична, формообразование выполняется малым инструментом на станке АПД-600 с программным управлением.

Контроль поверхности выполняется с внеосевым корректором волнового фронта. Функциональная схема интерферометра Тваймана-Грина с корректором в объектной ветви изображена на рисунке 19.

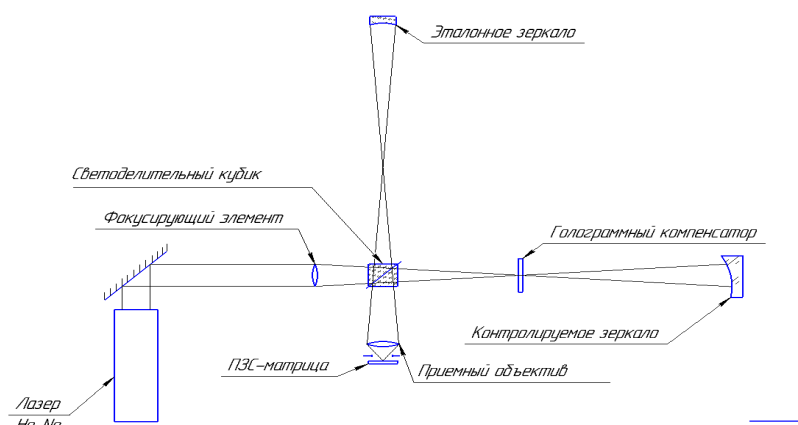


Рис. 19. Функциональная схема интерферометра

Положение голограммы-корректора относительно контролируемого зеркала показано на рисунке 20. Дифракционная структура обращена к контролируемому зеркалу.

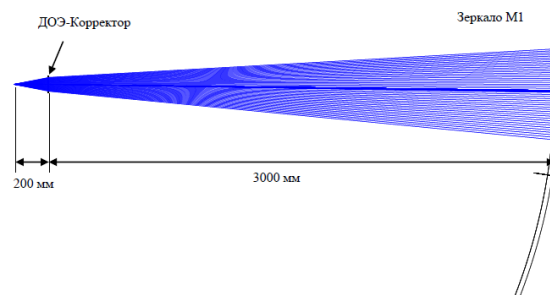


Рис. 20. Схема положения корректора

Для точной установки основной голограммы (рис. 21) относительно интерферометра используется юстировочная голограмма, которая состоит из двух частей: в центре и на краю, в виде кольца [4]. Эта вспомогательная голограмма рассчитана таким образом, что отражает свет точно в интерферометр, когда она установлена в требуемую позицию.

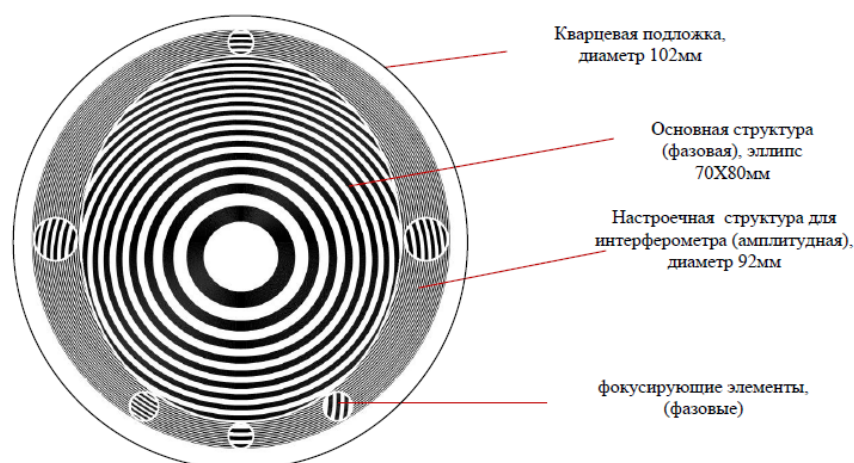


Рис. 21. Используемый голографический компенсатор

На основании рассмотренной выше функциональной схемы предложена конструкция стенда контроля заданной оптической детали (рис. 22) и конструкция узла интерферометра (рис. 23).

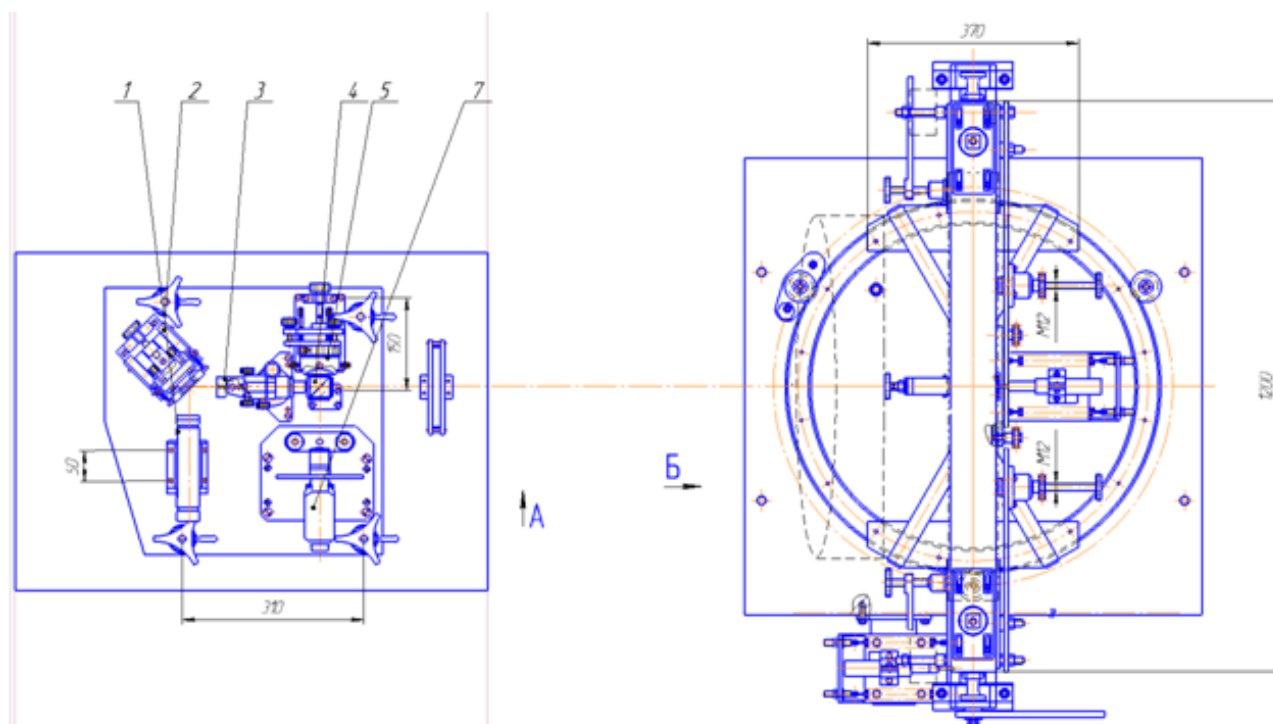


Рис. 22. Стенд контроля зеркала

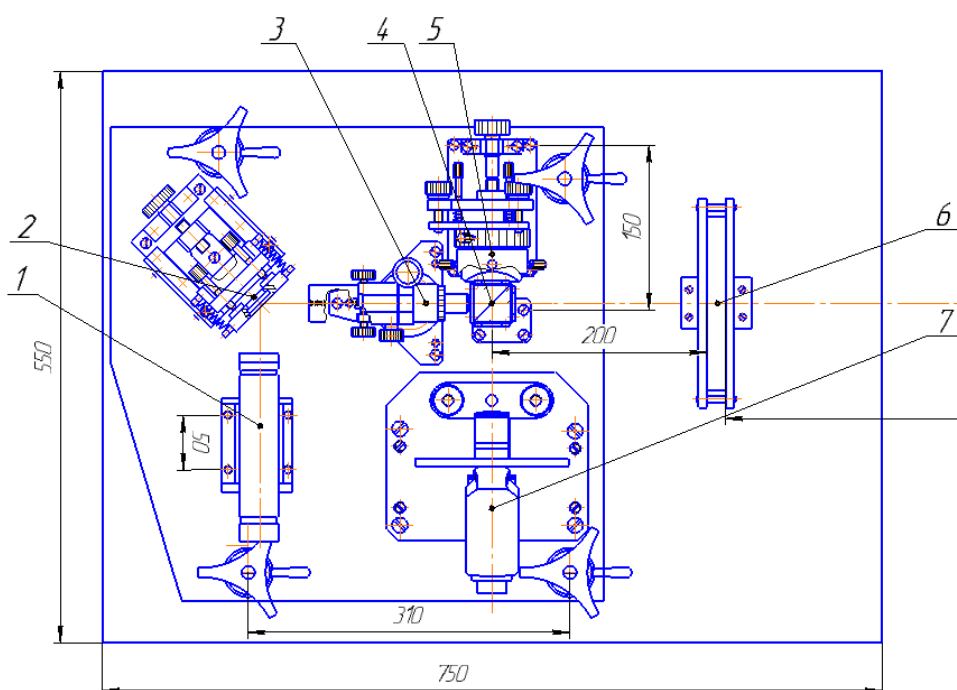


Рис. 23. Узел интерферометра

В состав конструктивных особенностей входят следующие узлы:

- 1.1. Узел зеркала имеет поворот вокруг оси и возможность качания зеркала.
- 1.2. Узел зеркала устанавливается на специальной оправе в виде ленты с опорными механизмами. Зеркало может смещаться по оси X и Y. Опорные винты удерживают зеркало в нескольких точках.
- 1.3. Телескопическая система и микрообъектив располагаются на стойке и могут двигаться относительно её вдоль оптической оси. Подъём и исправление наклона системы производится винтами.
- 1.4. Узел юстировочной пластины жестко укреплен на плате прибора, пластина имеет возможность быстрого подъёма и установки.
- 1.5. Узел кубика также жестко установлен на плате. Подвижек не имеет. Все остальные узлы выставляются относительно кубика.
- 1.6. Узел эталонного сферического зеркала. Его продольная подвижка предназначена для совмещения автоколлимационной точки вдоль оптической оси прибора. В перпендикулярном направлении автоколлимационная точка выставляется с помощью специальной сферической качающей оправы.
- 1.7. На интерферометре можно установить необходимую высоту панели при помощи подъёмного резьбового механизма.
- 1.8. С помощью установочных винтов весь интерферометр устанавливается в горизонтальной плоскости.
- 1.9. Наклон панели осуществляется винтом и фиксируется стопором.

Интерферограмма, получаемая при наложении двух пучков на приёмнике, характеризует качество поверхности (рис. 23). Полученная топограмма изображена на рисунке 24. Она используется для определения неровностей и ошибок на контролируемой поверхности с последующим вносом в компьютер для корректировки обрабатываемого станка.

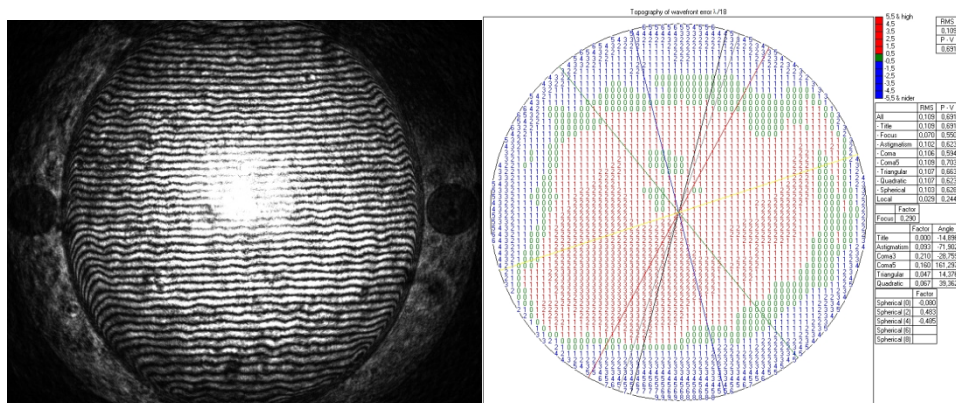


Рис. 23. Полученная интерферограмма Рис. 24. Топограмма поверхности

Выводы

Каждый из описанных методов обеспечивает оптимальный технологический процесс изготовления внеосевого асферического зеркала, а также подходящую конструкцию контрольно-измерительного стенда на основе неравноплечего интерферометра Тваймана-Грина. Использование данных подходов позволяет изготовить асферическую внеосевую деталь с высокой точностью.

Список литературы

- [1]. Быков Б.З., Перов В.А. Методическое руководство к курсовому проекту по «Технологии производства оптических элементов». М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 30 с.
- [2]. Окатов М.А., Антонов Э.А., Байгожин А. и др. Справочник технолога-оптика / под ред. М.А. Окатова. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Политехника, 2004. 679 с.
- [3]. 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.
- [4]. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. Manufacturing of primary mirrors from Sital CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // SPIE. 2001. Vol. 4451. P. 131-137. DOI: 10.1117/12.453611.