

УДК 535.4: 681.7.02-04:681.787

Автоматизированная асферизация внеосевых высокоасферичных поверхностей крупногабаритных оптических деталей

© 2017 г. **А. П. СЕМЕНОВ, КАНД. ТЕХН. НАУК; М. А. АБДУЛКАДЫРОВ, КАНД. ТЕХН. НАУК;
Н. С. ДОБРИКОВ; А. Н. ИГНАТОВ; В. Е. ПАТРИКЕЕВ; А. Ю. ПАПАЕВ;
А. В. ПОЛЯНЩИКОВ; В. В. ПРИДНЯ**

Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.

E-mail: lastro@lzos.ru

Поступила в редакцию 01.02.2017

Развитие технологии формообразования, в том числе с использованием автоматизированной системы с программным управлением и набором специальных инструментов, позволяет выполнять асферизацию внеосевых крупногабаритных оптических элементов астрономических и космических телескопов с отклонением от ближайшей сферы более 1 мм. Рассмотрен пример автоматизированного формообразования внеосевого зеркала диаметром 560 мм с асферичностью 200 мкм с контролем формы поверхности с дифракционным оптическим элементом. Рассмотрен способ предварительной асферизации внеосевого сегмента составного зеркала диаметром 1520 мм с использованием упругой деформации сегмента и последующей автоматизированной доводкой. Представлены результаты асферизации с использованием автоматизированного процесса фрезерования, шлифования и полирования внеосевых выпуклых элементов из Астроситалла с асферичностью более 1 мм для проекта телескопа «Миллиметр».

Ключевые слова: телескопы, стеклокерамика, Астроситалл, астрономические зеркала, облегченное зеркало, временная и деформационная стабильность.

Коды OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНЕОСЕВЫХ АСФЕРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С КОНТРОЛЕМ КОНТАКТНЫМ МЕТОДОМ И С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИФРАКЦИОННОГО ОПТИЧЕСКОГО ЭЛЕМЕНТА

За последние 15 лет в АО ЛЗОС изготовлено большое количество крупногабаритной астрономической и космической оптики для крупных российских и зарубежных телескопов с использованием автоматизированной технологии доводки рабочих поверхностей. Главная особенность последних лет — существенное увеличение асферичности и апертуры изготавливаемых оптических элементов. Наиболее важные проекты — это главное и вторичное зеркала крупнейших в мире обзорных телескопов VST (VLT Survey Telescope, 2,6 м) [1, 2] и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, 4 м) [3–5], которые установлены в обсерватории Паранал в Чили, сеть 17-ти телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network, США) с главными зеркалами

диаметром 1 м и вторичными диаметром 345 мм, телескоп TNT (Thai National telescope, США, Австралия, Таиланд) с главным зеркалом диаметром 2,4 м [6], зеркала телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences, Бельгия, Индия) с главным зеркалом диаметром 3,7 м [7, 8].

По заказу Астрокосмического центра ФИАН (Физический институт Академии наук) АО ЛЗОС изготовил первую экспериментальную матрицу из Астроситалла в виде трапецевидного сегмента с диаметром описанной окружности 1290 мм. Характерная особенность — высокая асферичность (1,3 мм) и отклонение от требуемой параболической формы менее 10 мкм.

Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность (до 1 мм, градиент асферичности до 10 мкм/мм, рис. 1) и апертуру до 1:1 и выше, некруглый внешний периметр, внеосевые асферические поверхности, что создает существенные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при

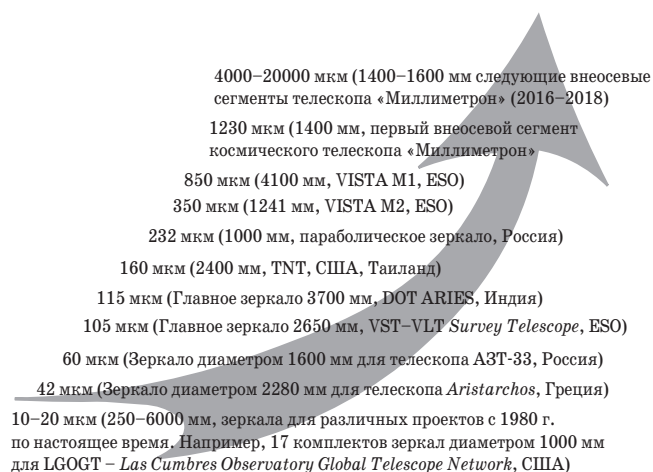


Рис. 1. Увеличение асферичности зеркал за последние 15 лет.

их контроле. Например, телескоп «Миллиметрон» с зеркалом 10 м состоит из 4-х рядов сегментов, внешние из которых диаметром 1967 мм имеют асферичность 19,2 мм.

Для успешного изготовления таких оптических элементов необходим контроль процесса производства оптики на всех стадиях обработки, начиная с предварительного шлифования и кончая финишной доводкой.

Рассмотрим асферизацию внеосевого зеркала диаметром 560 мм с асферичностью 200 мкм и расстоянием от центра детали до оптической оси 480 мм. Асферизация такой детали выполнялась шлифованием от ближайшей сферы с использованием гибкого шлифующего инструмента [9], в данном случае диаметром 80 мм. Специально разработанная конструкция инструмента позволяет осуществлять постоянный контакт всей его поверхности с поверхностью обрабатываемой детали при перемещении инструмента по ее поверхности. Инструмент эластичен и в любой части детали принимает рабочую форму, соответствующую форме обрабатываемой поверхности в данной области, и создает постоянный профиль съема материала с поверхности детали. Профиль съема под инструментом определяется экспериментально. Форма профиля имеет вид гауссоиды с максимумом съема в центре. Скорость съема зависит от фракции шлифовального порошка, давления и скорости обработки на начальных стадиях шлифования и может достигать съема до 60 мкм/мин. Этот профиль съема вводится в программу для расчета сеанса обработки асферической поверхности. Контроль формы поверхности при асферизации выполнялся на 6-координатной измерительной машине КИМ-1400 производства фирмы «Лапик» (Саратов) [10], которая позволяет выполнять построение карты отклонений от сферической поверхности с точностью 3–5 мкм. Программное обеспечение

для сканирования рабочей поверхности создано специалистами АО ЛЗСО.

Для первого сеанса определялся припуск на обработку, который соответствует теоретическим отклонениям асферической поверхности от ближайшей сферы для внеосевой поверхности. В первом сеансе устранялась часть этого припуска. Затем проводился сеанс контроля на КИМ-1400, определялись отклонения от сферической поверхности и проводилось вычитание полученной карты из карты теоретических отклонений. Была получена новая карта припуска для нового сеанса обработки. Таким образом, последовательное устранение припуска на обработку приводит к минимизации отклонений формы поверхности от требуемого внеосевого параболоида. Затем выполнялось предварительное полирование поверхности.

Финишная доводка осуществлялась с контролем в схеме с корректором волнового фронта на базе дифракционного оптического элемента (ДОЭ), изготовленного Институтом автоматики и электрометрии (Новосибирск) [11–14].

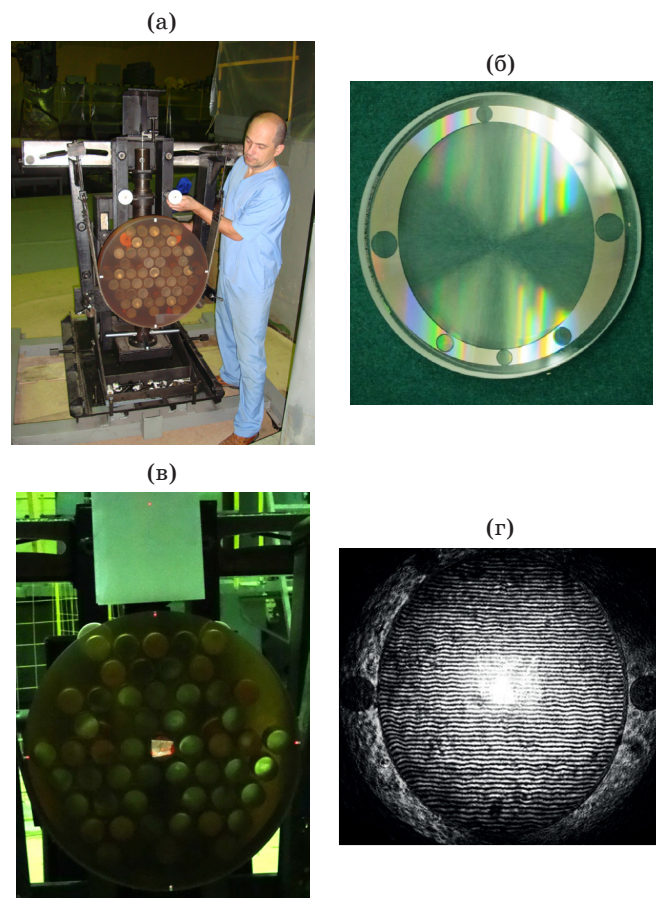


Рис. 2. Облегченное внеосевое зеркало диаметром 560 мм в стенде контроля (а), ДОЭ для контроля формы его поверхности (б), светящиеся реперные точки, создаваемые фокусирующими элементами (в), интерферограмма его отраженного волнового фронта, контролируемого с использованием ДОЭ (г).

Дополнительные фокусирующие элементы на подложке, где нанесен ДОЭ, создают светящиеся точки в краевой области детали, в центре и в положении вершины оптической оси, по которым осуществляется юстировка детали относительно корректора. На рис. 2 представлена фотография облегченного внеосевого зеркала диаметром 560 мм в стенде контроля, приведена интерферограмма отраженного волнового фронта зеркала, вид ДОЭ и светящиеся точки от фокусирующих элементов для юстировки внеосевой поверхности относительно интерферометра. Достигнутое среднеквадратическое отклонение (СКО) параболоида от теоретического $0,05\lambda$ (длина волны $\lambda = 632,8$ нм) соответствует требованиям технического задания.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНЕОСЕВОГО ПРОТОТИПА СЕГМЕНТА ЗЕРКАЛА ТЕЛЕСКОПА E-ELT

В настоящее время в Европе и в США ведутся работы по созданию сверхбольших телескопов. В Европе создается телескоп E-ELT (*European Extremely Large Telescope*) с 39-метровым главным зеркалом, в США телескоп TMT (*The Thirty Meter Telescope*) с 30-метровым главным зеркалом. Данные зеркала являются составными, состоящими из внеосевых шестигранных сегментов и являются наиболее сложными в изготовлении, поскольку здесь неприменимы классические методы формообразования и требуются иные, которые позволяют осуществлять асферизацию поверхности за короткое время для обеспечения изготовления большой партии сегментов в ограниченный временной период. Например, главное 39-метровое зеркало телескопа E-ELT состоит из 798 сегментов с размером 1,4 м, которые необходимо изготовить за 10 лет.

Один из способов асферизации оптической поверхности шестигранника — асферизация малым инструментом с дополнительными вспомогательными элементами (рис. 3). При этом сегмент базируется на подложке, деформации которой на порядок меньше той точности формы поверхности сегмента, которую необходимо получить. Асферизация выполняется на станке с программным управлением, контроль формы поверхности осуществляется с использованием 3D измерительной машины. Для производства большой серии сегментов этот способ оказался достаточно трудоемким и малоэффективным, поскольку такая обработка может длиться до 2-х месяцев.

Для этого производства разработан метод шлифования поверхности детали в упруго-деформированном состоянии, использующий новые конструкторско-технологические приемы деформации заготовки. А для финишной доводки используются только методы формообразования с использованием программно управляемого малого инструмента или ионного пучка.

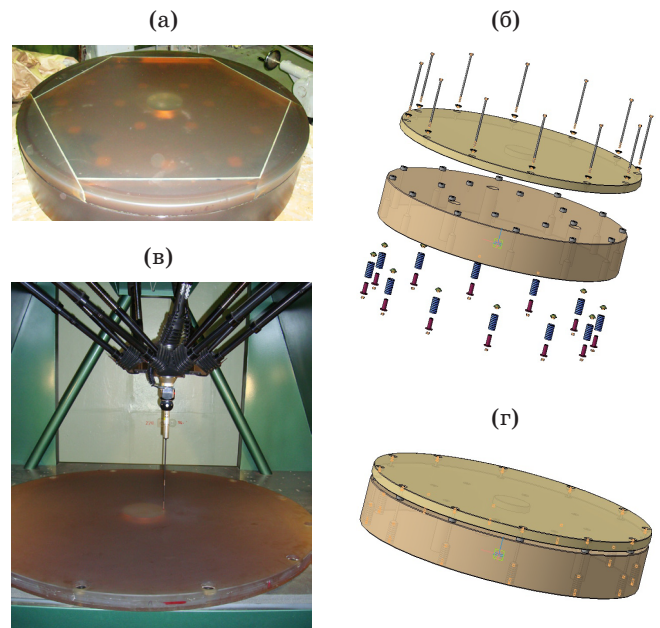


Рис. 3. Асферизация оптической поверхности шестигранника малым инструментом с дополнительными вспомогательными элементами (а), принципиальная схема механизма воздействия на заготовку оптической детали методом упругой деформации (б), прототип на координатно-измерительной машине (в), заготовка в деформированном состоянии, готовая для выполнения операции шлифования (г).

Метод обработки зеркала в упруго-деформированном состоянии используется со времен изготовления пластин Шмидта и описан в литературе. В настоящее время он применялся, например, при изготовлении сегментов зеркал телескопа *Keck I* и *Keck II* [15].

Для отработки технологии асферизации сегмента был асферизован и прополирован прототип внеосевого сегмента зеркала круглой формы диаметром 1520 мм и толщиной 50 мм из Астроситалла. Работа проводилась в рамках эксперимента по изготовлению прототипа, наиболее удаленного от центра 39-метрового зеркала телескопа E-ELT. Отклонение данной поверхности от ближайшей сферы составляет 203 мкм.

Предварительно была сформирована сферическая поверхность на круглой заготовке диаметром 1520 мм с ближайшим к асферической поверхности радиусом кривизны и отклонением от сферы до 1 мкм. Далее сегмент был изогнут таким образом, чтобы он имел форму, обратную требуемой асферической. Затем поверхность шлифовалась полноразмерным инструментом, чтобы снова получить сферическую поверхность с тем же радиусом кривизны. После снятия деформаций была получена требуемая асферика, которую затем довели до требований спецификации программно управляемым шлифованием малым инструментом с последующим полированием.

Внутренние эквивалентные напряжения, возникающие при таком изгибе (200 мкм), составляют 1,68 МПа в центре — напряжения, вполне допустимые для заготовок из Астроситалла с соответствующими геометрическими параметрами, поскольку экспериментально определено, что напряжения в Астроситалле и Zerodur до 5 Мпа допустимы и не приводят к возникновению пластических деформаций. Деформация заготовки осуществляется регулируемым по высоте микрометрическими упорами с помощью прижимных механизмов (рис. 3). Толщина подложки, изготовленной из Астроситалла, выбиралась такой, чтобы ее собственные деформации были малы по сравнению с деформацией рабочей детали — это 220 мм.

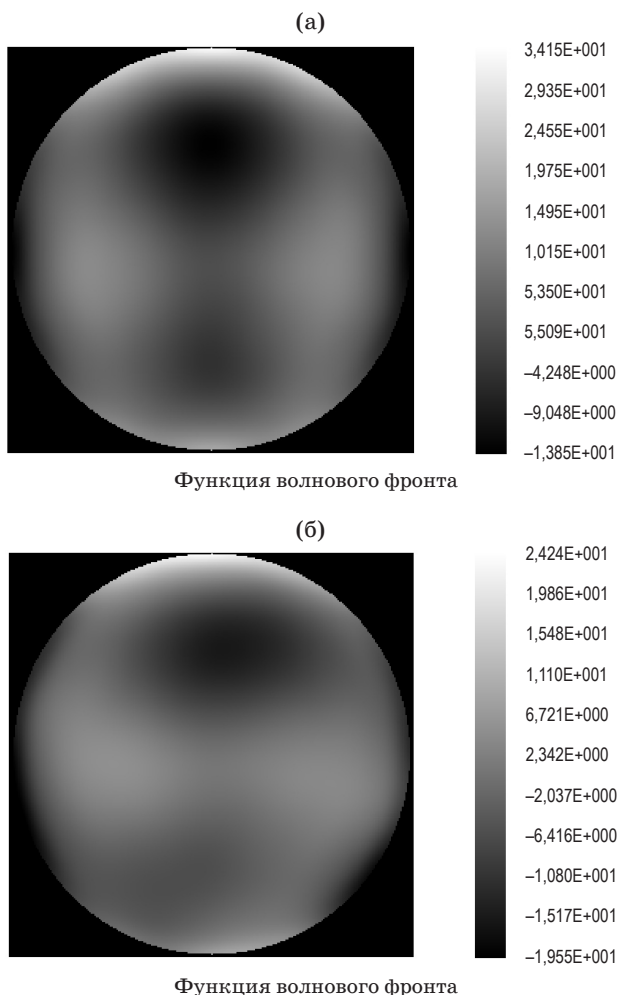


Рис. 4. Карты волнового фронта отклонений от требуемой формы поверхности. Остаточная карта предполагаемого волнового фронта отклонений формы поверхности детали от теоретической после снятия напряжений, отклонение профиля от заданного — размах 15 мкм, СКО = 2,2 мкм (а), остаточная карта волнового фронта отклонений после снятия напряжений и контроля на КИМ-1400, отклонение профиля от заданного — размах 13,8 мкм, СКО = 1,8 мкм (б).

Использовались два способа крепления круглой заготовки к подложке — через отверстия в краевой области заготовки, как показано на рис. 3, и с помощью вспомогательных стальных элементов, приклеенных к задней поверхности, чтобы не было отверстий. В обоих случаях круглый сегмент притягивался к подложке, осуществляя необходимую расчетную деформацию. Расчеты деформаций в сегменте рассчитывались методом конечных элементов.

Измерения формы поверхности проводились на координатно-измерительной 3D машине КИМ-1400, которая используется для контроля формы асферических поверхностей. По результатам измерений строилась карта отклонений формы поверхности и данные отклонения сопоставлялись с теоретическими отклонениями от ближайшей сферы для детали диаметром 1520 мм. На рис. 3 проиллюстрирован процесс измерения координат точек на поверхности детали. По выполненным измерениям строится карта волнового фронта для $\lambda = 632,8$ нм, из которой вычитается требуемая теоретическая карта волнового фронта, и в результате получаем карту волнового фронта отклонений от требуемой поверхности. Как видно из сравнительного анализа (рис. 4), реально полученная форма прототипа отличается от теоретически предсказанного результата на 5 мкм (при асферичности 200 мкм), что свидетельствует о сохранении размерной стабильности Астроситалла при таких нагрузках и показывает работоспособность конструкторско-технологических приемов обработки сегмента. Данный цикл обработки был выполнен в течение недели, что существенно ускорило процесс асферизации.

В дальнейшем выполнялась финишная доводка поверхности малым шлифующим инструментом на станке АД-2000 с размахом ошибки в 15 мкм до требуемого заказчиком значения размаха ошибки менее 6 мкм, что было осуществлено за 4 сеанса обработки.

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ВНЕОСЕВОГО НЕКРУГЛОГО ВЫПУКЛОГО ВЫСОКОАСФЕРИЧНОГО ЭЛЕМЕНТА

Первую экспериментальную матрицу из Астроситалла в виде сегмента АО ЛЗС изготовил с размером описанной окружности 1290 мм. Характерные особенности — высокая асферичность (1,3 мм) и отклонение от требуемой параболической формы менее 10 мкм. Эта матрица служит для прессования элемента главного зеркала из углепластика космического телескопа «Миллиметрон». Допускаемые отклонения формы поверхности всего главного зеркала обсерватории «Миллиметрон» диаметром 10 м составляют менее 100 мкм при асферичности 140 мм.

Основные габаритные размеры детали приведены на рис. 5. Видно, что контур матрицы являет-

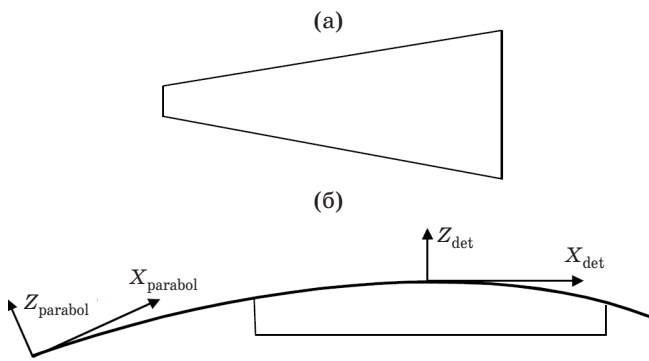


Рис 5. Контур изделия (а) и схема ориентации параболоида (б).

ся трапецией, малое основание которой составляет 88,6 мм, большое — 405,2 мм, длина достигает 1223,6 мм. Фокусное расстояние параболоида $F = 2400,0$ мм. Радиус ближайшей базовой сферы при заданных параметрах внеосевого параболоида и габаритов детали составляет 4923,799 мм. Максимальная асферичность — 1337,75 мкм.

Стандартная технология асферизации предполагает формирование на поверхности детали ближайшей базовой сферы с последующим снятием припуска на асферизацию. Как правило, устранение припуска на несимметричной детали ведется шлифованием 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 очевидно, что устранение шлифованием припуска более одного миллиметра на протяженной детали крайне непроизводительно и займет много времени. Поэтому для ускорения работы была выбрана другая технология, когда на поверхности детали сразу формировалась асферическая поверхность. Работа выполнялась путем фрезерования кольцевым алмазным инструментом с числовым программным управлением.

Фрезерование проводилось в два этапа — грубый съем, когда инструмент снимал до 1–2 мм за проход, и тонкая обработка, когда съем не превышал 0,1 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 мкм.

Известны различные способы контроля оптики контактными методами [16–18]. В данном случае контроль формы поверхности после стадии фрезерования и на этапе шлифования выполнялся на координатно-измерительной машине КИМ-1400 [6]. Для измерения асферической поверхности детали была разработана оригинальная управляющая

программа. Измерения проводились непосредственно в узловых точках сетки, соответствующих требованиям управляемого программно 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. Основным результатом программы было получение топографической карты припуска для дальнейшей обработки поверхности.

Шлифование поверхности детали решало две задачи: устранение следов обработки и трещиноватого слоя после фрезерования и доводка формы поверхности до требований спецификации — СКО должно быть меньше 1 мкм.

Устранение следов обработки фрезой и дальнейшее шлифование выполнялись с использованием набора малых гибких инструментов на резиновой подложке с латунными цилиндрическими шлифующими элементами на станке с программным управлением так же, как при обработке внеосевой детали диаметром 560 мм. На первоначальной стадии обработка велась в режиме заглаживания по траекториям так, что инструменты с одинаковой скоростью проходили 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. Когда была достигнута асферическая поверхность соответствующего качества, она отполировывалась. Полировка так же проводилась набором малых инструментов (рис. 6).



Рис. 6. Финишная доводка матрицы.

После завершения формообразования поверхности аттестационный контроль ее формы проводился альтернативным методом. Для измерений использовался измерительный комплекс ATOS III. Система основана на проецировании на измеряемое изделие (измеряемую поверхность) линейных растровых картин. На неплоской поверхности линейные полосы становятся нелинейными. Оптико-электронная система оцифровывает наблюдаемую картину и, используя встроенное программное обеспечение, позволяет восстановить форму измеряемой поверхности.

Система является достаточно универсальной, применимой для самых разнообразных деталей, специальных требований к предварительной ориентации детали для измерений не предъявляется. Допустимо измерение протяженных деталей: система, используя набор реперных точек на измеряемой поверхности, в автоматическом режиме выбирает нужную комбинацию и состыковывает друг с другом фрагменты независимых измерений.

Особенностью системы является очень большой объем измеряемых точек: на поверхности детали выборка достигала 2,5 миллионов. Для обработки такого объема данных система оснащена специализированным сервером с распараллеливанием вычислений, а также высокопроизводительной графической подсистемой. Поверхность строится как результат триангуляции измеренных точек. Система позволяет сопоставлять полученные результаты измерений с заданной моделью, вычисляя значения отклонений фактической формы поверхности

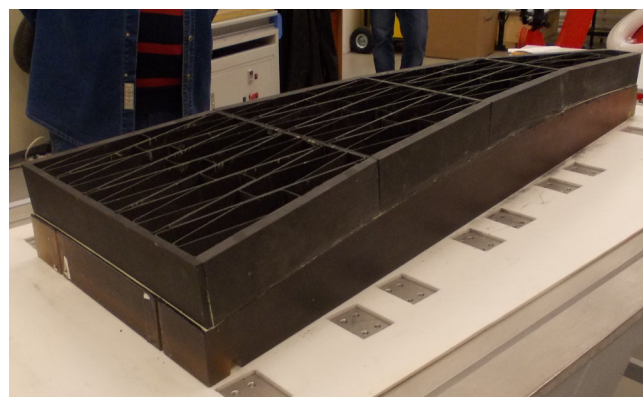


Рис. 7. Панель из углепластика на матрице.

от модели. При этом выполняется оптимизация по поиску лучшего пространственного соответствия модели и реальных данных. Для лучшей сравнимости приведем требуемые параметры детали и полученные результаты: после устранения выбросов, связанных с погрешностью измерений ATOS III, была проведена аппроксимация полиномами, размах отклонений составил 5,73 мкм, СКО — 1,07 мкм. Полученные значения совпадают с измеренными на приборе КИМ-1400. На рис. 7 — фотография панели из углепластика на матрице.

На следующем этапе предстоит изготовление следующих выпуклых внеосевых сегментов размерами до 1967 мм, находящихся на большем удалении от оптической оси полной асферической поверхности. Данные сегменты имеют асферичность 7,5 14 и 19 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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 Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 131–137.
2. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A. Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 138–144.
3. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Semenov A.P., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Pridnya V.V., Sharov Y.A., Poleshchuk A.G., Nasyrov R.K. M1 primary mirror manufacturing for VISTA project // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701804-1–701804-10.
4. Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P., Pridnya V.V., Patrikeev V.E., Ignatov A.N., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A. M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 70180B-1–70180B-9.
5. Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Semenov A.P. Interference testing methods of large astronomical mirrors base on lenses and CGH wavefront correctors // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 77390P-1–773903-10.
6. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. Methods of fabrication and testing of unique large size optics in LZOS, JSC (VST, VISTA and other projects) // Proc. SPIE. 2012. V. 8450. P. 84504T-1–84504T-12.
7. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V. M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: Current status // Proc. SPIE. 2010. V. 7739. P. 773907-1–773907-13.
8. Semenov A.P. Accomplished the task of production of the primary and secondary mirrors of Devasthal Optical Telescope under the project ARIES (India, Belgium, Russia): Fabrication features // Proc. SPIE. 2012. V. 8450. P. 84504R-1–84504R-14.

9. *Абдулкадыров М.А., Семенов А.П.* Инструмент для торцевого шлифования высокоасферической поверхности оптической детали // Патент России на полезную модель № 159232. 2015.
10. http://lapic.ru/catalog/Koordinatno_izmeritelnaya_mashina_KIM_1400/
11. *Poleshchuk A.G.* Fabrication and application of diffractive optical elements // Proc. SPIE. 2010. V. 7544. P. 75443L-1-75443L-12.
12. *Poleshchuk A.G.* Computer generated holograms for aspheric optics testing // Proc. SPIE. 2009. V. 7133. P. 713333-1-713333-9.
13. *Полющук А.Г., Маточкин А.Е.* Лазерные методы контроля асферической оптики // Фотоника. 2011. № 2. С. 38-43.
14. *Полющук А.Г., Хомутов В.Н., Маточкин А.Е., Насыров Р.К., Черкашин В.В.* Лазерные интерферометры для контроля формы оптических поверхностей // Фотоника. 2016. № 4. С. 38-50.
15. *Lubliner J., Jerry E., Nelson J.E.* Stressed mirror polishing. 1: Nonaxisymmetric mirrors // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 34. P. 8094-8100.
16. *Burge J.H.* Measurement of large convex aspheres // Proc. SPIE. 1996. V. 2871. P. 362-373.
17. *Smith B.K., Burge J.H., Martin H.M.* Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes // Proc. SPIE. 1997. V. 3134. P. 51-61.
18. *Burge J.H., Su P., Zhao C.* Optical metrology for very large convex aspheres // Proc. SPIE. 2008. V. 7018. P. 701818-1-701818-12.