МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ УНИКАЛЬНЫХ КРУПНОГАБАРИТНЫХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ ТЕЛЕСКОПОВ В ОАО ЛЗОС

Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев В.Е., Придня В.В.

OAO «Лыткаринский завод оптического стекла», г. Лыткарино, Московская обл. E-mail: <u>lastro@lzos.ru</u> ; <u>lastro-am@lzos.ru</u>

Рассмотрены методы формообразования асферических поверхностей крупногабаритных астрономических и космических зеркал от стадии шлифования до финишной полировки с использованием программно-управляемых систем обработки и контроля на всех стадиях изготовления.

Ключевые слова: астрономические и космические зеркала, формообразование асферических поверхностей, шлифование и финишная полировка.

METHODS OF MANUFACTURING AND CONTROL OF UNIQUE LARGE-SIZE ASTRONOMY AND SPACE TELESCOPE MIRRORS IN JSC LZOS

Semyonov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Patrikeev V.E., Pridnya V.V.

"Lytkarino Optical Glass Factory", JSC, Lytkarino, Moscow Region. E-mail: <u>lastro@lzos.ru</u>; <u>lastro-am@lzos.ru</u>

The issues of methods of forming of aspherical surfaces of large-scale astronomical and space mirrors from the stage of grinding to end up polishing with use of software-controlled processing systems and control at all stages of manufacturing are considered. The modelling of the material removal process during the refinement of optical part surface was carried out. It was developed a technology of automated shaping of large aspheric optics with diameter up to 6000 mm, that is including a complex computer-controlled machines and control devices.

Keywords: astronomical and space mirrors, shaping into the aspheric surfaces, grinding and finish polishing.

Введение

В ОАО ЛЗОС за последние два десятилетия разработаны компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, которые позволили изготовить зеркала для крупных российских и международных проектов, включая зеркала для сети телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network)¹ с диаметром главных зеркал до 2 м, телескопа TNT (Thai National telescope, Australia – Thailand)¹ с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркало телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhatta Research Institute of Observational Sciences, ARIES)² с зеркалом диаметром 3.7 м, оптику обзорных телескопов VST (VLT Survey Telescope)^{3.4} и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy)^{5.6,7}. Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает значительные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле. Для успешного изготовления таких оптических элементов необходим контроль процесса производства оптики на всех стадиях обработки, начиная с предварительного шлифования и кончая финишной доводкой.

В процессе шлифования поверхности выполняется контроль ее набором сферометров и ИК-интерферометром, затем в видимом диапазоне с линзовыми корректорами и корректорами на базе дифракционных оптических элементов (ДОЭ-корректорами или CGH-correctors, Computer-generated hologram)^{1,2}. При этом выполняются измерения радиуса обрабатываемой поверхности с лазерным трекером. Такие методы позволили получить высокоточные зеркала, которые сейчас успешно функционируют в действующих телескопах.

Изготовление геометрии оптических деталей и облегченной структуры

В настоящее время в оптической промышленности для изготовления астрономических зеркал используются различные материалы, такие как Zerodur[®], Astrositall[®], ULE[®], карбид кремния и его модификации, бериллий и др. Но все же стеклокерамические материалы Zerodur[®], Astrositall[®], ULE[®] являются наиболее распространенными. Именно из данных материалов изготовлены зеркала крупнейших в мире телескопов.

ОАО ЛЗОС имеет значительный запас заготовок из Астроситалла[®] для изготовления как отдельных зеркал, так и составных сегментированных зеркал. Современное оборудование и инструменты позволяют создавать все основные геометрические формы заготовки (форму эллипса, многогранника и др.), могут выпускаться заготовки с заложенными сферическими поверхностями с двух сторон заготовки.

Технологический процесс обработки заготовок включает в себя изготовление окончательных геометрических параметров заготовки, шлифование задней базовой поверхности, фрезерование пазов, фасок, фрезерование центрального отверстия и облегченной структуры. Точность изготовления геометрической структуры достигает величины 20 мкм на диаметре до 4000 мм (рис. 1).



OAO ЛЗОС может производить как заготовки ИЗ материала Астроситалл[®], так И готовые зеркала, причем не только из Астроситалла[®], но и из других материалов, включая

Рисунок 1. Пример облегченного космического зеркала диаметром 1200 мм. Облегчение около 70%.

нетрадиционные. Обработка геометрических параметров заготовок ведется с применением станков с компьютерным управлением в декартовой и полярной системах координат, с использованием набора алмазных инструментов. Облегчение заготовок выполнялось на

деталях диаметром до 2 м. Также выполняется закладка сферической поверхности фрезерованием с компьютерным управлением.

Шлифование и асферизация рабочих поверхностей с контролем формы поверхности сферометрами и ИК-интерферометрами

При шлифовании рабочей поверхности и асферизации шлифованием, если асферичность поверхности достаточно велика, используются как классические методы, так и асферизация малым инструментом на станках с компьютерным управлением. Для компьютерного управления шлифованием И полированием используется целая серия станков, произведенных специально для данной цели: АД-1000, АД-2000, АД-4000, КУ-168АМД и их модификации (рис. 14,15,17), которые предназначены для шлифования и полирования деталей, соответственно диаметром до 1000 мм, 2000 мм, 4000 мм и 6000 мм. Эти станки портального типа управляют инструментом либо в декартовой системе координат, либо в полярной.



Для создания управляющей программы обработки необходима информация о топографии поверхности. Ее можно получить тремя разными способами.

- Для деталей диаметром до 1400 мм механическим способом с помощью 6-координатной измерительной машины КІМ-1400, российского производства (Саратов), дающей точность отклонений от требуемой асферической поверхности в 2-3 мкм (рис. 2). Использование такой машины для измерений и построение карты поверхности весьма эффективно для процесса шлифования и особенно для асферизации внеосевых оптических деталей. Такая технология опробована и оправдала себя в конкретном производстве.

Рисунок 2. Измерительная машина КИМ-1400

Данным методом достигаются отклонения от требуемой формы поверхности менее 2-3 мкм.

- Известны способы определения формы оптической поверхности с измерением отклонений от сферической^{8,9}. Для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод трехточечного линейного сферометра. В основе методики использовано свойство асферических поверхностей: различный радиус кривизны на различных зонах поверхности. При установке линейного сферометра на асферическую поверхность между краевыми и центральной ножками измеряется стрелка прогиба, величина которой изменяется при перемещении сферометра. На рисунке 3 отрезками прямых линий показано положение линейного сферометра с определенной базовой длиной, ножки которого установлены в точки зональных окружностей. Сферометр устанавливается последовательно

таким образом, чтобы центральная измерительная ножка стояла на одной окружности, а внешние ножки - на следующей. Исходя из этого, рассчитывается переменный шаг перемещений сферометра вдоль радиального направления. Для калибровки измерений используется эталонное зеркало с точно измеренным радиусом, чтобы получить абсолютные измерения профиля сферометром.



По результатам измерений на основании геометрических соотношений строится профиль асферической поверхности. Измерения сферометром выполняются на предварительной стадии обработки до тех пор, пока не будет получено интерференционное изображение волнового фронта с использованием зеркальнолинзового линзового корректоров И точно или измерен кривизны фактический радиус поверхности. Погрешность отклонений зонального профиля от теоретического также достигает 2-3 мкм. Данный метод позволяет также с высокой точностью получить заданный вершинный радиус (менее 2-3 мм на радиусе до 15 м и менее 1-2 мм на радиусе менее 10 м для деталей диаметром более 1 м.

Рисунок 3. Положение сферометра на детали

С использованием данного метода была выполнена асферизация всех крупных оптических деталей, включая главные и вторичные зеркала проектов VST, TNT, ARIES, VISTA и т.д. При этом для высокоапертурных деталей при измерении сферометром учитываются поправки, связанные с наклоном сферометра. Точность измерений профиля по размаху в таком методе может достигать величины 2-3 мкм.

- И, наконец, для деталей произвольной формы, на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта¹⁰. Зеркальный корректор для ИК-диапазона (λ=10.6 μm), например, использовался для автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST³(рис. 4) и VISTA^{2,4}.





Рисунок 4. Контроль формы поверхности VST с ИК- интерферометром

Рисунок 5. СGH-корректор для контроля главного зеркала в ИК-диапазоне

Корректор на базе CGH использовался для контроля шлифованной поверхности зеркала проекта ARIES M1 диаметром 3700 мм (рис. 5). Он имеет диаметр 136 мм и центральное отверстие для прохождения сферического волнового фронта от интерферометра. Волновой фронт дважды отражается от поверхности зеркала, в результате чего ошибки волнового фронта удваиваются. На рис. 6 показан процесс управляемого шлифования рабочей поверхности, а на рис. 7 ИК-интерферометр для контроля зеркала ARIES M1 и интерферограмма волнового фронта.



Рисунок 6. Автоматизированное шлифование поверхности с контролем ИКинтерферометром



Рисунок 7. ИК-интерферометр с СGH-корректором

Контроль и обработка оптических поверхностей на стадии полирования

Как на стадии шлифования, так и на стадии полирования, и особенно на стадии финишной доводки зеркала, оно базируется либо на штатной разгрузке, на которой будет использоваться в телескопе, либо на мембранно-пневматической технологической разгрузке. Так, например, зеркало TNT диаметром 2.4 м обрабатывалось на штатной механической разгрузке, а зеркала VST, VISTA на мембранно-пневматической.

Мембранно-пневматическая оправа (рис. 8) позволяет производить как формообразование зеркала на шлифовально-полировальном и доводочном станке, так и контроль формы оптической поверхности в вертикальном стенде^{2,3}. Она является частью стенда вертикального контроля и входит в состав контрольно-технологического оборудования для обработки и контроля формы поверхности оптической детали. Система технологической разгрузки зеркала должна обеспечить деформационные изменения формы поверхности зеркала в процессе технологического и аттестационного контроля в допустимых пределах, меньших по амплитуде, чем требуемый размах ошибок поверхности обрабатываемого зеркала.

Мембранно-пневматические элементы оправы несут нагрузку на опору до 100 кг и погрешность разгружающих усилий торцевой разгрузки не более ±10г. Разгрузочная оправа снабжена системой автоматической стабилизации положения зеркала на оправе при изменении внешних условий (атмосферного давления, влажности) во время контроля формы поверхности, что обеспечивает неизменное состояние формы поверхности с необходимой точностью.

Вторичные зеркала разгружаются, как правило, в штатной оправе, в которой они будут использоваться в телескопе. Выпуклые вторичные зеркала телескопов контролируются в ОАО ЛЗОС с использованием сфер Хиндла, которые изготавливаются из Астроситалла[®]. Контроль выполняется, как правило, в вертикальном стенде, когда вторичное зеркало в своей разгрузке располагается рабочей поверхностью вниз над сферой Хиндла. Ось зеркала и



Рисунок 8. Зеркало М1 на технологической оправе в процессе контроля и обработки

сферы Хиндла вертикальные^{2,7}.

контроля Для вогнутых асферических поверхностей используются линзовые или зеркально-линзовые корректоры волнового фронта или CGH-корректоры (CGH-Computer Generated Hologram) с СGН-имитаторами зеркала. Причем CGH-имитаторы зеркала проконтролировать и позволяют линзовый корректор волнового фронта. Такой

перекрестный контроль оптической поверхности позволяет избежать ошибок при изготовлении зеркала и получить правильные значения вершинного радиуса и эксцентриситета рабочей поверхности¹.

Так, например, при изготовлении зеркала VISTA М1 для контроля использовались два корректора разной конструкции – линзовый и зеркально-линзовый⁶. Асферичность зеркала диаметром 4100 мм около 850 мкм.

Первый корректор является линзовым и содержит три линзы, преобразующие плоский волновой фронт в сферический. Интерферометр типа Тваймана-Грина (рис. 9) содержит корректор, плоскую пластину с эталонным клином и объектив. Максимальный размер линз - около 300 мм.

Второй корректор - зеркально-линзовый, состоит из четырех зеркальных поверхностей и фокусирующей линзы (рис. 10). Диаметр наибольшего из зеркал равен 430 мм.



Рисунок 9. Линзовый корректор волнового фронта

Наибольшая сложность при изготовлении корректоров состояла в том, чтобы обеспечить изготовление и измерение параметров линз и зеркал с точностью 2-5 мкм (короткие радиусы поверхностей, толщины линз, разнотолщинность), выставить с такой же точностью воздушные промежутки, убрать наклоны поверхностей в процессе юстировки и получить высокую точность изготовления самих поверхностей. Важность всех параметров корректора, влияющих на результирующее оптическое качество, настолько высока, что неоднородности в материале линз могут существенно исказить форму получаемого волнового фронта. Поэтому в заготовках линз исследовалась однородность стекла. Результаты определения однородности в заготовках показали, что она лучше, чем $0.3 \cdot 10^{-6} \div 0.5 \cdot 10^{-6}$, что достаточно для выполнения требований спецификации на корректоры волнового фронта, с учетом всех остальных допусков на конструктивные параметры корректора, чтобы получить требуемую точность оценки формы волнового фронта главного зеркала.

Несмотря на тщательное измерение всех параметров и выставление воздушных промежутков в корректорах, необходимо было проверить форму создаваемого ими волнового фронта, поскольку все параметры корректора изготавливались на пределе технологических возможностей. Для проверки корректоров Институтом автоматики и электрометрии (Новосибирск, Россия) был успешно изготовлен CGH-имитатор зеркала диаметром 159 мм. Изготовление такого имитатора само по себе является весьма непростой задачей.

Таким образом, комбинированное использование корректоров волнового фронта и измерительных машин на стадии управляемого процесса шлифования оптических деталей ускоряет процесс асферизации крупногабаритной оптики, а использование линзовых корректоров и CGH-корректоров волнового фронта для полированных поверхностей в дополнении с CGH-имитаторами зеркала позволяет гарантированно получить требуемые параметры асферической поверхности (вершинный радиус, коническая константа и т.д.) с требуемыми допусками в соответствии со спецификацией.



Рисунок 10. Зеркально-линзовый корректор волнового фронта

Совершенствование технологии формообразования в настоящее время идет по ряду направлений. Но наиболее эффективными для крупногабаритной оптики в настоящее время являются три способа: компьютерное управление смоляным или синтетическим полирующим инструментом, ионно-лучевая полировка и магнитореологическая полировка. А для деталей диаметром более 2-х метров только первая. Все остальные способы требуют своего дальнейшего развития.

Основные направления в развитии технологий полирования в последнее время направлены на то, чтобы обработать высокоапертурное и, соответственно, высокоасферическое зеркало или линзу, получив при этом малую мелкоструктурную ошибку, которая определяется среднеквадратичным наклоном отраженных от зеркала лучей (RMS Slope), измеряемым в угловых секундах.

Программный комплекс содержит комплект подпрограмм различного назначения, обеспечивающих проведение автоматизированного технологического процесса, расчет топографии оптической поверхности по результатам интерференционного контроля, расчет съема материала заданным набором полировальников, расчет траектории движения

полировальников по детали, расчет корректирующих технологических параметров, оптимизацию процесса формообразования, вывод управляющих программ для компьютерного управления движением полирующего инструмента.

В ОАО ЛЗОС в технологическом процессе формообразования малыми инструментами используются полировальники различного диаметра в одном сеансе обработки (рис. 14,15,17). Комбинированное использование серии инструментов позволяет устранять последовательно ошибки от низкочастотных до высокочастотных.

Для увеличения производительности съема на поверхностях с высокой асферичностью используется принудительное сдерживание инструмента от вращения вокруг своей оси, чтобы профиль съема соответствовал требуемому в меридиональном и сагиттальном сечениях. В этом случае можно использовать инструмент достаточно большого размера, который притирается к асферическому профилю переменного радиуса на всей поверхности инструмента.

Для создания съема материала на поверхностях со значительной кривизной используется станок с наклонной полирующей головкой для обеспечения прижима полирующего инструмента по нормали к рабочей поверхности (рис. 17).



Рисунок 11. Расчет съема материала в процессе обработки поверхности оптической детали

Моделирование процесса съема материала с поверхности выполняется таким образом, чтобы материал снимался co всей поверхности пропорционально величинам отклонений профиля от самой глубокой ямы на поверхности (рис. 11). Т. е. там, где максимальный бугор, там И максимальный съем. Такой способ распределения работы по съему материала с поверхности позволяет получать гладкие оптические поверхности с минимальным RMS Slope, включая и краевые области на детали. В

качестве примера на рис. 12 приведены интерферограммы двух сегментов из 40 изготовленных для составного сферического зеркала M_B телескопа LAMOST¹¹. Размеры сегментов по диагонали 1100 мм. Зеркала изготовлены из материала Zerodur[®]. Контроль сегментов выполнялся в вертикальном стенде с линзой Физо диаметром 1200 мм. Высота контрольного стенда – 11 метров, а радиус кривизны сегментов – 40 метров.



Рисунок 12. Прямой контроль первых сегментов в камере высотой 70 м. Точка контроля располагается на расстоянии 40 м от сегмента зеркала



Рисунок 13. Интерферограммы волнового фронта: слева - с выделением регулярных ошибок и собственной ошибки корректора волнового фронта, справа - реальная интерферограмма на малом количестве полос

Ha 13 рис. приведены интерферограммы волнового фронта главного VISTA зеркала телескопа диаметром 4100 мм и асферичностью около 850 мкм⁶: слева - с выделением регулярных ошибок, дисторсионного искажения изображения корректора и собственной ошибки корректора волнового фронта, полученной по результатам построения

топографической карты поверхности, а справа - реальная интерферограмма на малом количестве полос. На ней видна остаточная расфокусировка и зональная ошибка, эквивалентная остаточной зональной ошибке линзового корректора волнового фронта, которая вычиталась из суммарного волнового фронта.

Для измерений вершинного радиуса оптической поверхности используется лазерный трекер. Принципиальная схема представлена на рис. 18. Радиус R₀ зеркала определяется по формуле:

$R_0=C+h$ - S'F', где

С - линейный размер, измеряемый трекером между площадкой на штоке имитатора вершины и первой линзы корректора, или голограммой ДОЭ-корректора;

h – измеренное значение штока имитатора вершины;

S'F' – расчетное значение отрезка от вершины последней линзы 0-корректора до точки пересечения параксиального луча с оптической осью (определяется в программе "ZEMAX").

Таким образом, ОАО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включающие машины 3D, лазерный трекер, системы позиционирования с использованием гексаподов, комплект интерферометров с элементами микроподач, интерферометры с линзовыми корректорами производства ОАО ЛЗОС и ДОЭ-корректорами производства Института автоматики и электрометрии СО РАН, современное программное обеспечение для обработки интерферограмм и для оптических расчетов, включая программу ZEMAX. И это лишь краткий перечень имеющегося оборудования и технологий.



Рисунок 14. Процесс полировки зеркала диаметром 6 метров БТА на станке КУ-168АДМ



Рисунок 15. Финишная полировка зеркала диаметром 3700 мм на станке с компьютерным управлением



Рисунок 16. Юстировка оптических элементов с внеосевой асферикой с использованием гексапода и лазерного трекера APIT3



Рисунок 17. Финишная полировка зеркала с наклоном стола для обеспечения работы инструмента по нормали к зеркалу





 нуль-корректор; 2 - верхняя марка; 3 - нижняя марка на
подставке; 4 - имитатор вершины;
- шток (в составе имитатора);
- измеряемое зеркало; 7 - оправа,

8 - лазерный трекер.

Рисунок 18. Контроль вершинного радиуса зеркала

Оценка степени сложности изготовленных оптических поверхностей

Для оценки степени сложности изготовленных поверхностей воспользуемся графиком (рис. 19), приведенным Р. Dierickx в 1999 году¹², дополним ее данными последнего десятилетия и укажем на ней положение обработанных в ОАО ЛЗОС главных и вторичных зеркал по основным проектам. График показывает степень сложности изготовленного зеркала в зависимости от параметра dy и достигнутого качества обработки RMS(W):

$dy=8N^3/k$

где N – апертура (afocal ratio) оптической поверхности, а k – коническая константа. Таким образом, получается, что чем ближе точка на графике находится к началу координат, тем сложнее изготовленная поверхность.

На графике представлены следующие обозначения.

♦ - зеркала телескопов, изготовленные до 1985 года (Wavefront RMS error (nm) Pre-1985),

■ – зеркала телескопов с пассивной оптикой (Wavefront RMS error (nm) Passive),

▲ – зеркала телескопов с активной оптикой (Wavefront RMS error (nm) Active),

сегменты телескопа Keck, включая сегменты, обработанные с использованием ионной полировки (Wavefront RMS error (nm) Segment, Wavefront RMS error (nm) Segment IB. All Keck data assume most difficult segment),

– зеркала наиболее важных телескопов, изготовленные в ОАО ЛЗОС за период с 1990 года.



Рисунок 19. Оптическое качество, полученное на крупногабаритных оптических зеркалах за последние 40 лет



Рисунок 20. Градиент асферичности для зеркал ряда

телескопов

Таким образом, развитие технологии формообразования оптических поверхностей с использованием новых технологических приемов и компьютерного моделирования процесса обработки, а также развитие контрольного оборудования, включающего линзовые корректоры и синтезированные голограммы, привело к существенному прогрессу в получении крупногабаритных оптических зеркал с фокальным отношением F/1 с диаметром зеркал до 8 м.

На рис. 20 представлен график максимального градиента асферичности в мкм/мм для главного (ось абсцисс) и вторичного (ось ординат) зеркал телескопов:Треугольники – ряд зарубежных проектов по изготовлению оптики телескопов Δ:

Zeiss-600 (0.06, 0.09), Астрон (0.10, 0.17), ZTSh (0.07, 0.11), 4-meter Kitt Peak National Obs. (0.19, 0.31), T-170M (0.34, 0.53), Hubble (0.32, 0.54), SDSS (0.45, 1.30), Pan-STARRS (0.57, 1.32), WIYN (0.78, 1.33).

Кружками обозначен ряд выполненных в ОАО ЛЗОС проектов по изготовлению оптики различных телескопов, в основном - в последнее время. Точки, лежащие на оси абсцисс – не изготавливали вторичное зеркало для данного проекта, только главное зеркало.

Как видно из данного графика, комплект оптики телескопа VISTA по сложности изготовления, по градиенту асферичности, существенно превосходит все предыдущие варианты главных и вторичных зеркал. В таблице 1 представлены параметры градиента для зеркал, изготовленных в ОАО ЛЗОС.

Таблица 1.

Параметры максимального градиента ряда изготовленных в ОАО ЛЗОС комплектов зеркал •

Телескоп/ диаметр главного зеркала	Параметры
	градиента
NOA (Astronomical Institute - National Observatory of Athens,	0.28 0,49
Греция)/ 2200 мм	
VST (VLT Survey Telescope, Osservatorio Astronomico di	0.65, 1.44
Capodimonte Napoli)/ 2650 мм	
23 комплекта для 1-метровых телескопов LCOGT (Las Cumbres	0.25 0.45
Observatory Global Telescope Network, США, Великобритания)	
Комплект оптики с главным зеркалом 1600 мм для COREX	0.45 0.65
Параболическое зеркало ОС диаметром 3190 мм	0.46 -
Комплект оптики для Мюнхенского телескопа, изготовленного	0.52 0.70
фирмой Кайзер Трейде	
TNT (Thai National Telescope – тайский национальный телескоп,	1.06 1.40
изготовленный фирмой EOS Technology, США и Австралия)/	
2400 мм	
Параболоид диаметром 1120 мм	3.3 -
Комплект оптики для индийского телескопа Devasthal Optical	0.45 0.73

Telescope (DOT) for Aryabhatta Research Institute of Observational	
Sciences (ARIES) /3700 мм	
Телескоп VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for	3.74 4.02
Astronomy)/ 4100 мм	

Заключение

В ОАО ЛЗОС разработана технология автоматизированного формообразования крупногабаритной асферической оптики диаметром до 6000 мм, включающая комплекс компьютерно-управляемых станков и контрольную аппаратуру. Комбинированное использование корректоров волнового фронта и измерительных машин на стадии управляемого процесса шлифования оптических деталей ускоряет процесс асферизации крупногабаритной оптики, а использование линзовых корректоров и CGH-корректоров волнового фронта для полированных поверхностей в дополнении с CGH-имитаторами зеркала позволяет гарантированно получить требуемые параметры асферической поверхности (вершинный радиус, коническая константа и т.д.) с требуемыми допусками в соответствии со спецификацией.

ОАО ЛЗОС использует самые современные средства контроля оптики, включающие машины 3D, лазерный трекер, системы позиционирования с использованием гексаподов, комплект интерферометров с элементами микроподач, интерферометры с линзовыми корректорами производства ОАО ЛЗОС и ДОЭ-корректорами производства Института автоматики и электрометрии СО РАН, современное программное обеспечение для обработки интерферограмм и для оптических расчетов, включая программу ZEMAX. И это лишь краткий перечень имеющегося оборудования и технологий

Компьютерно-управляемые методы обработки крупногабаритной астрономической и космической оптики, позволили изготовить зеркала для крупных российских и международных проектов, зеркала для сети телескопов LGOGT с диаметром главных зеркал до 2 м, телескопа TNT с главным зеркалом диаметром 2.4 м, зеркало телескопа DOT ARIES с зеркалом диаметром 3.7 м, оптику обзорных телескопов VST и VISTA. Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает значительные трудности не только при обработке данных зеркал, но и при их контроле. Тем не менее, эти задачи были успешно решены.

Список литературы:

 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// Proceedings of SPIE 7739, 77390P (2010).

- 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// Proceedings of SPIE 7739, 773907 (2010).
- Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., RumyantsevV.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// Proceedings of SPIE 4451, 131-137 (2001).
- 4. 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// Proceedings of SPIE 4451, 138-144 (2001).
- Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A., Atad-Ettengui E., Egan I, Bennet R.J., Craig S.C. M1 and M2 mirrors manufacturing for VISTA telescope// Proceedings of SPIE 5494, 374-381 (2004).
- 6. 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// Proceedings of SPIE 7018, 701804 (2008).
- 7. 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// Proceedings of SPIE 7018, 70180B (2008).

- 8. Burge J.H. Measurement of large convex aspheres// Proceedings of SPIE 2871, 362-373 (1996).
- Smith B.K., Burge J.H. and Martin H.M. Fabrication of large secondary mirrors for astronomical telescopes// Proceedings of SPIE 3134, 51-61 (1997).
- Abdulkadyrov M.A., Semenov A.P., Sharov Y.A., Baryshnikov N.V., Denisov D.G., Zhivotovskii I.V. and Karasik V.E. An unequal-arm Twyman-Green IR interferometer for monitoring the shape and quality of the surfaces of large optical items at the grinding stage// J. Opt. Technol 77, 621-627 (2010)
- 11. Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Sharov Y.A.

Fabrication of blanks, figuring, polishing and testing of segmented astronomic mirrors for SALT and LAMOST project// Proceedings of SPIE **5494**, 31-38 (2004).

12. Dierickx P. Optical fabrication in the large// Workshop on Extremely Large Telescopes, Bäckaskog, Sweden, (1999).