



СОВРЕМЕННЫЕ СПОСОБЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ И КОСМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ

М.Абдулкадыров, А.Семенов,
ОАО "Лыткаринский завод оптического стекла",
lastro@lzos.ru; <http://www.lzos.ru>,
Лыткарино, Московская обл.

Описана технология изготовления астрономических и космических зеркал из Астроситалла CO-115M. Рассмотрены свойства этого материала и их стабильность во времени. Приведены результаты долгосрочных испытаний Астроситалла. Представлены компьютерно-управляемые методы обработки и контроля крупногабаритной оптики на примерах изготовления зеркал для крупных международных астрономических проектов.

Современные высокоразрешающие оптико-электронные системы наземного, воздушного и космического базирования используют различную линзовую и зеркальную оптику. Линзовая оптика имеет ограничения по диаметру примерно до 1 метра, поскольку собственные деформации линз приводят к значительным искажениям изображения, а разгрузить их не представляется возможным. Поэтому для объективов большего диаметра используются зеркала, формой поверхности которых можно управлять с тыльной поверхности для создания отраженного пучка дифракционного качества.

В настоящее время габариты сплошных зеркал дошли до 8 метров, созданы телескопы с составными зеркалами до 11 метров и проектируются сверхбольшие телескопы с зеркалами диаметром до 40 метров. С развитием технологии изготовления и контроля зеркал рождаются все более сложные проекты, которые требуют решения еще более амбициозных задач. Уже изготовлены монолитные тонкие и облегченные зеркала диаметром до 4-8 м с апертурой 1:1 и меньше (апертура - отношение фокусного расстояния зеркала к диаметру), соответственно, высокоасферичные зеркала (отклонение от сферы достигает нескольких миллиметров), сверхтонкие зеркала (отношение толщины зеркала к диаметру 1:50-1:100),

MODERN WAYS OF PRODUCTION OF ASTRONOMICAL AND SPACE MIRRORS

M.Abdulkadyrov, A.Semenov,
Lytkarino Optical Glass Factory, JSC,
lastro@lzos.ru; <http://www.lzos.ru>, Lytkarino, Moscow
Region

A technology of manufacturing of astronomical and space mirrors from Astrocytall CO-115M is hereby described including its properties and stability of the properties in the course of time, and results of the material long-term tests are given. Computer-operated large-sized optics processing and control techniques are described based on the experience of mirrors manufacturing for large international astronomical projects.

Modern high resolution optical and electronic systems of ground, air and space basing use different lens and mirror optics. Lens optics has diameter restrictions of about up to 1 m as the own lens deformations cause significant image distortions, and it's obviously impossible to release them. Therefore for the lens of bigger diameter one uses the mirrors the surface shape of which can be operated from the back surface to create a reflected beam of diffraction quality.

Nowadays the sizes of monolithic mirrors have reached 8 meters, telescopes with composite mirrors up to 11 meters are created and extra-large telescopes with mirrors diameter of up to 40 meters are designed. Due to development of mirrors manufacturing and control technology more and more complex projects are created requiring solution of even more ambitious tasks. Monolithic thin and light-weight mirrors with diameter of up to 4-8 m with aperture 1:1 and less (an aperture is the ratio of the mirror focal length to the diameter), respectively, highly aspherical mirrors (the sphere deviation reaches several millimeters), extra thin mirrors (the mirror thickness ratio to the diameter is 1:50-1:100), light-weight mirrors (lightening is up to 90%), mirrors with extra-axial surface and with non-round external perimeter, the most complicated ones in manufacture and control in which all the technological optical achievements of telescope builders are shown to the full extent have already been manufactured. The required accuracy of aspherical surfaces deviation from the set form reaches 10-20 nm under the mean square deviation (RMS). Besides, the surface quality is to be



облегченные (облегчение до 90%), зеркала с внеосевой асферической поверхностью и с некруглым внешним периметром, наиболее сложные в производстве и контроле, где в полной мере проявляются все технологические достижения оптиков телескопостроителей. Требуемая точность отклонений асферических поверхностей от заданной формы достигает 10–20 нм по среднеквадратичному отклонению (СКО, RMS). Кроме того, данное качество поверхности должно сохраняться в течение срока эксплуатации зеркала, достигающего до 50 лет. Изготовить все это "оптическое" многообразие стало возможным благодаря созданию соответствующих технологий обработки и развитию средств контроля на всех этапах производства. Особое место в этом процессе занимает изготовление астрономических и космических зеркал, поскольку именно с ними можно построить самые крупногабаритные оптические системы и осуществлять глобальный мониторинг Земли и околоземного пространства, заглядывать в далекие уголки нашей Солнечной системы и в многомиллиардное прошлое нашей Вселенной.

Остановимся более подробно на процессе изготовления астрономического зеркала. Он начинается с выбора материала. В настоящее время для таких зеркал используются стеклокерамические материалы, обладающие низким коэффициентом теплового расширения – Астроситалл, Zerodur, ULE (многочисленные наземные телескопы с зеркалами до 11 м, и космические с зеркалом до 2.4 м), бериллий – легкий и очень прочный (например, составное зеркало телескопа James Webb Space Telescope – орбитальной инфракрасной обсерватории с зеркалом диаметром 6,5 м, которая предположительно заменит космический телескоп "Хаббл"), различные металлические сплавы, модификации карбида кремния (телескоп "Гершель", Herschel Space Observatory, с зеркалом диаметром 3,5 м и телескоп Gaia – Global Astrometric Interferometer for Astrophysics с зеркалами до 1,5 м). В конечном итоге выбор материала зависит от целей и задач, которые будут решаться с данным наземным или космическим телескопом, в каком оптическом диапазоне работает телескоп, каковы требования к его массогабаритным и деформационным характеристикам оптического прибора, температурному режиму, стойкости к радиационному воздействию, к динамическим характеристикам и т.д. Физические характеристики ряда материалов, используемых для производства зеркал, представлены в табл.1.

В ОАО ЛЗОС уже много лет ведутся работы по изготовлению облегченных и тонких зеркал

kept within mirror operation timeframe reaching 50 years. It became possible to produce all this "optical" variety due to creation of appropriating processing technologies and control methods development on all the production phases. A special place in this process is taken by manufacturing of astronomical and space mirrors as exactly with them it is possible to construct the largest optical systems and to carry out global monitoring of the Earth and near-earth space, to look into distant areas of our Solar system and into the multi-billion past of our Universe.

Let's stop more precisely on process of astronomical mirror production. It begins with selecting a material for it. Nowadays glass-ceramic materials with low thermal expansion coefficient are applied for such mirrors, e.g., Astrocytall, Zerodur, ULE (numerous ground-based telescopes with mirrors up to 11 m, and space ones with mirrors up to 2.4 m), beryllium that is easy and very hard (for example, a composite mirror of James Webb Space Telescope that is an orbital infra-red observatory with a mirror with diameter of 6.5 m which will presumably replace "Hubble" space telescope), various metal alloys, silicon carbide modifications ("Herschel" telescope, Herschel Space Observatory, with a mirror with diameter of 3.5 m and "Gaia" telescope that is a Global Astrometric Interferometer for Astrophysics with mirrors of up to 1.5 m). Material selection finally depends on the aims and tasks which will be solved with the ground-based or space telescope, in which optical range the telescope works, what requirements are to mass and dimensions and deformation characteristics of the optical unit, temperature mode, radiating influence, dynamic characteristics, etc. Physical characteristics of the materials range applied for mirrors production are specified in Table 1.

For many years "Lytkarino Optical Glass Factory", JSC has carried out production of light-weight and thin mirrors of various configurations with diameter of up to 4000 mm from Astrocytall which is most frequently used for mirrors manufacturing though some works have recently been performed to produce mirrors from silicon carbide. Astrocytall has high strength characteristics and low thermal expansion coefficient (TEC) quite lower than other materials (Table 1) that is its basic advantage. Astrocytall CO-115M has the thermal expansion coefficient $\alpha = 0 \pm 1.5 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, tensile strength 78 MPa, elastic modulus 92 hPa. On polished surface of the material it is possible to reach a roughness <1 nm (mean square deviation, RMS). Due to such unique characteristics it has successfully been used for manufacturing of ground-based and space mirrors for many years.

различной конфигурации диаметром до 4000 мм из Астроситалла, который наиболее часто используется для изготовления зеркал, хотя в последнее время выполняются работы и по изготовлению зеркал из карбида кремния. Астроситалл обладает высокими прочностными характеристиками и малым коэффициентом теплового линейного расширения (КТЛР), на порядок ниже, чем у других материалов (табл.1), в чем его основное достоинство. Для Астроситалла СО-115М установлены: коэффициент теплового линейного расширения $\alpha=0\pm 1,5\cdot 10^{-7}$ К⁻¹, предел прочности 78 МПа, модуль упругости 92 ГПа. На полированной поверхности данного материала можно достичь шероховатости со среднеквадратическим отклонением (СКО, RMS) <1 нм. Благодаря таким уникальным характеристикам он много лет с успехом используется для изготовления наземных и космических зеркал.

Астроситалл имеет высокую размерную стабильность, т.е. сохранение с заданной точностью рабочей формы поверхности с течением времени в процессе эксплуатации в различных климатических условиях, которая проверена в течение нескольких десятилетий изготовления и эксплуатации оптических приборов [1].

Размерная стабильность пяти сортов стеклокерамики с низким КТЛР, использующихся в производстве астрономических и космических зеркал, измерялась в диапазоне от -40°C до 90°C и представлена

Astrocytall has high dimensional stability, i.e. it keeps the working surface shape with the set accuracy in the course of time in the operation process under different climatic conditions as proved within several decades of manufacturing and operation of optical devices [1].

Dimensional stability of five grades of glass ceramics with low thermal expansion coefficient used in production of astronomical and space mirrors was measured within a range from -40°C up to 90°C and introduced in an article of D.B.Hall [2]. Materials Zerodur, Zerodur M, Astrocytall, Clearceram 55, Clearceram 63 were tested.

Detailed comparison of three various Astrocytall brands, two various Zerodur brands and one Zerodur M brand has shown that within a temperature range -40°C - 90°C the dimensional stability and uniformity characteristics of two Astrocytall brands are a bit better than of two other materials. The results prove some advantage of Astrocytall especially from the point of view of lowered isothermal deformability within a range from -40°C up to 90°C. Isothermal deformability observed at all the temperatures is mostly expressed at lowered temperatures.

Modern thermal expansion coefficient requirements for example for preparation of extra-large TMT (Thirty Meter Telescope) and E-ELT (European Extremely Large Telescope) telescopes with composite mirrors with diameters of 30 and 39 m establish an

Таблица 1. Физические характеристики ряда материалов для астрономических зеркал

Table 1. Physical Characteristics of the Materials Range for Astronomic Mirrors

Параметр Characteristic	Единицы измерения	Measure Units	Церодур Zerodur	Астроситалл Astrocytall	Be I-70A	SiC
КТЛР при t=20°C, α Thermal Expansion Coefficient at t=20°C, α	10 ⁻⁶ К ⁻¹	10 ⁻⁶ К ⁻¹	0,05	0±0,05	11	2,0
Теплопроводность, k Thermal Conductivity, k	Вт/м·К	W/m·K	1,64	1,71	194	125
Удельная теплоемкость, c Specific Thermal Capacity, c	Дж/кг·К	J/kg·K	821	920	1820	700
Модуль Юнга, E Junga Module, E	ГПа	hPa	90,6	93,9	289	270
Предел прочности, σ _B Tensile Strength, σ _B	МПа	MPa	70,0	78,4	316	465
Плотность, ρ Density, ρ	Кг/м ³	Kg/m ³	2530	2460	1860	3220
Удельная жесткость Specific Elasticity	МПа·м ³ /кг	MPa·m ³ /kg	35,8	38,1	155	84
Удельная прочность Specific Strength	Па·м ³ /кг	Pa·m ³ /kg	27,7	31,9	170	144,4

в статье D.V.Hall [2]. Были протестированы материалы Zerodur, Zerodur M, Астроситалл, Clearceram 55, Clearceram 63.

Детальное сравнение трех различных марок Астроситалла, двух различных марок Zerodur и одной марки Zerodur M показало, что в диапазоне температур от -40 до 90°C размерная стабильность и характеристики однородности у двух марок Астроситалла несколько лучше, чем у двух остальных материалов. Результаты выявляют небольшое преимущество Астроситалла особенно с точки зрения пониженной изотермальной деформируемости в диапазоне от -40°C до 90°C . Изотермальная деформируемость, наблюдаемая при всех температурах, наиболее выражена при пониженных температурах.

Современные требования по КТЛР например для заготовок сверхбольших телескопов TMT (Thirty Meter Telescope) и E-ELT (European Extremely Large Telescope) с составными зеркалами диаметром 30 и 39 м, устанавливают абсолютное значение КТЛР всех заготовок по всем измеренным образцам $\leq 100 \cdot 10^{-9} \text{K}^{-1}$, а среднее значение КТЛР заготовок при эксплуатационной температуре (-10 – 20°C) должно быть порядка $0 \pm 50 \cdot 10^{-9} \text{K}^{-1}$.

Для проведения исследований на изменение КТЛР с течением времени ускоренным испытаниям подвергались 20 образцов для измерения КТЛР (40 циклов, соответствующие 40 годам), а для определения изменений формы поверхности в процессе эксплуатации использовались заготовки диаметром 500 и 450 мм и толщиной, соответственно, 70 и 55 мм с полированной поверхностью ($\text{RMS} < 20 \text{ нм}$), и для них определялась форма отраженного волнового фронта и механические параметры. По результатам проведенных испытаний были получены следующие данные:

- КТЛР меняется в пределах $\pm 1 \cdot 10^{-8} \text{C}^{-1}$ (рис.1), погрешность измерений $5 \cdot 10^{-9} \text{C}^{-1}$, видна общая тенденция сохранения КТЛР, на рис.2 представлен график среднего значения КТЛР по образцам верхнего и нижнего слоя и виден градиент КТЛР в пределах $5 \cdot 10^{-9}$ на толщине заготовки в 250 мм;
- форма оптической поверхности не изменяется в пределах погрешности измерений $\text{RMS} < 6 \text{ нм}$.

С целью проверки упругих свойств материала Астроситалл СО-115М проводились испытания при деформациях с натяжениями в диапазоне от -10 МПа до $+10$ МПа и при воздействии температуры в диапазоне от -40°C до $+105^{\circ}\text{C}$.

Для этого выполнялись операции по деформации образца диаметром 350 мм и толщиной 10 мм

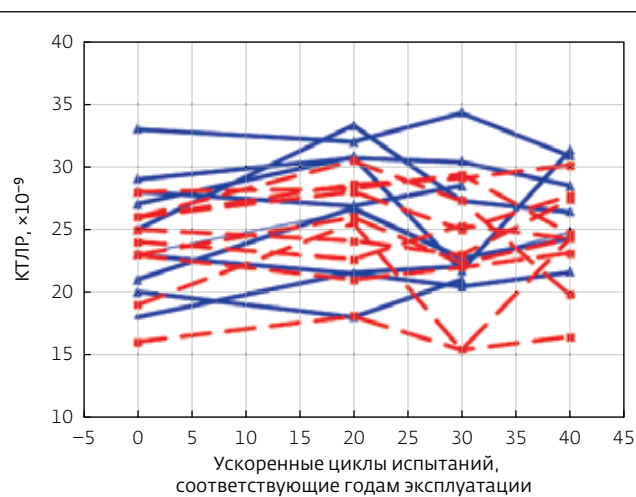


Рис. 1. Суммарное изменение КТЛР образцов в процессе 40 циклов испытаний

Fig. 1. Total change of thermal lineal expansion coefficient of the samples within 40 test cycles

absolute value of thermal expansion coefficient at all the measured samples $\leq 100 \times 10^{-9} \text{K}^{-1}$, and an average value of thermal expansion coefficient of the sample pieces at operational temperature (-10°C – 20°C) should be about $0 \pm 50 \times 10^{-9} \text{K}^{-1}$.

20 samples were subjected to accelerated tests to measure the thermal expansion coefficient to research changes of the thermal expansion coefficient in the course of time (40 cycles corresponding to 40 years), and sample pieces with diameters of 500 and 450 mm and thickness of 70 and 50 mm respectively with

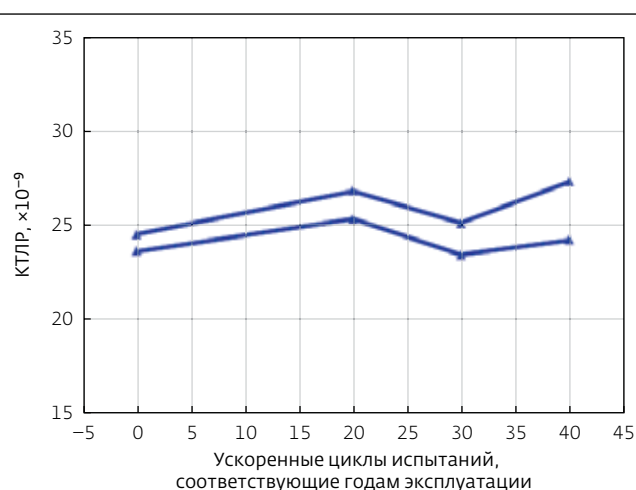


Рис. 2. Среднее значение КТЛР по образцам верхнего и нижнего слоев, показывающее наличие градиента

Fig. 2. Average value of thermal lineal expansion coefficient based on samples of upper and lower layers showing gradient availability

поочередно с рабочей и с тыльной поверхности. В результате расчетов проведенным методом конечных элементов с использованием ПО ANSYS было установлено, что натяжения ± 10 МПа возникают в материале объекта испытаний в результате приложения в центр силы равной, 333 Н при закреплении в двух противоположных крайних точках. Результаты деформационных испытаний приведены на рис.3а. На графике показаны отклонения формы поверхности от начального значения ($D_{RMS} = RMS_i - RMS_0$, где RMS_i – текущее значение среднеквадратичного отклонения, RMS_0 – исходное среднеквадратичное отклонение) для каждого цикла испытаний. Линии сверху и снизу отражают диапазон допустимых отклонений по современным требованиям.

Испытания с изменением температурного режима проводились в термокамере. Охлаждение до -40°C со скоростью не более 20°C в час. Образец выдерживался при температуре $-40 \pm 2^\circ\text{C}$ 1 час. Затем температура в камере повышается до $105 \pm 2^\circ\text{C}$ со скоростью не более 20°C в час. Образец выдерживался при температуре $+105 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 1 час. Затем температура в камере понижается до нормальной со скоростью не более 20°C в час. Такие циклы повторялись несколько раз. По результатам контроля построен график рисунка 3б.

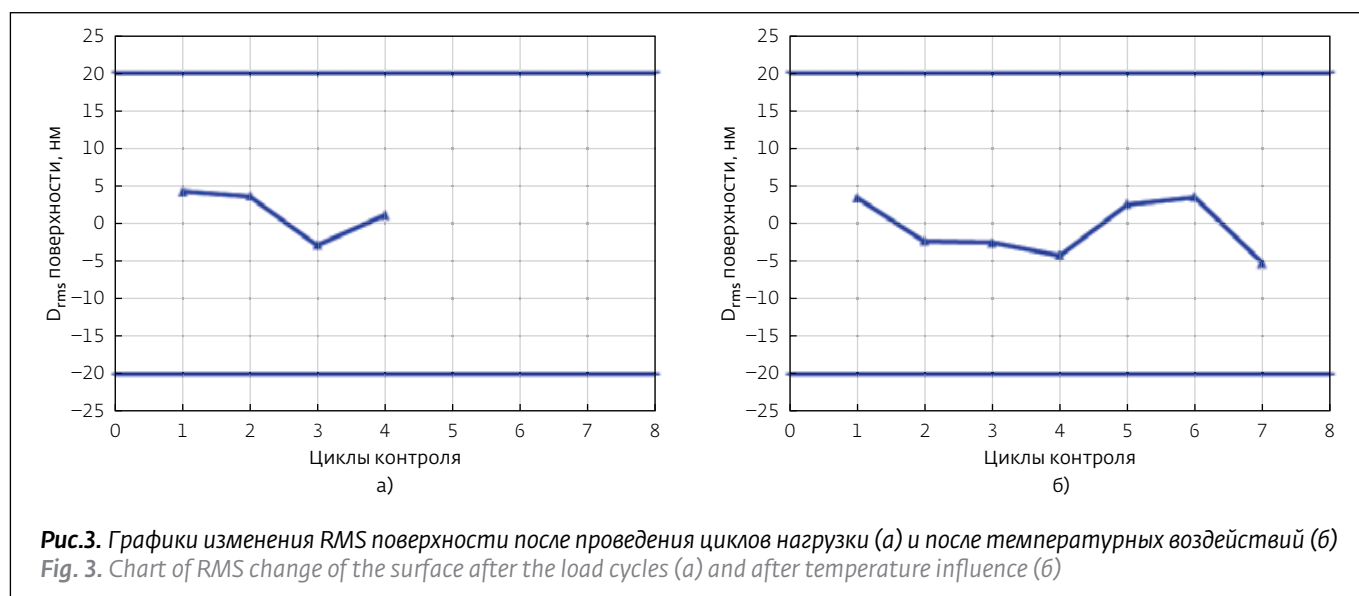
Результаты проведенных испытаний показали, что материал Астроситалл СО-115М при деформациях с натяжениями в диапазоне от -10 МПа до $+10$ МПа и при воздействии температуры в диапазоне от -40°C до 105°C остается упругим и форма поверхности изменяется в пределах 10 нм RMS поверхности (см.рис.3).

polished surface ($RMS < 20$ nanometers) were used in the operation process to define changes in the surface shape, and the shape of the reflected wave front and mechanical parameters were defined for them. The following data were obtained based on the tests results:

- thermal expansion coefficient changes within the range $\pm 1 \cdot 10^{-8} \text{C}^{-1}$ (fig. 1), the measuring error is $5 \cdot 10^{-9} \text{C}^{-1}$, general tendency of keeping the thermal expansion coefficient is observed, on fig. 2 there is a chart of average value of thermal expansion coefficient based on samples of higher and lower layers and gradient of the thermal expansion efficient is observed in the range 5×10^{-9} at the depth of 250 mm of the sample pieces;
- the optical surface shape does not change within the measuring error range $RMS < 6$ nanometers.

Some tests under tensile deformations within a range from -10 МПа to $+10$ МПа and under temperature influence within a range from -40°C to $+105^\circ\text{C}$ were carried out for the purpose of checking elasticity characteristics of Astrocytall CO-115M material.

For this purpose some operations on deformation of the sample with diameter of 350 mm and thickness of 10 mm were carried out by turns from the working and back surface. As a result of calculations with the applied method of final elements with ANSYS PO usage it's been established that ± 10 МПа tension arises in the tested material based on force application into the center equal to 333N while fixing at two opposite extreme points. Deformation tests results are specified in fig. 3a. On the chart there are surface shape deviations from the initial value ($D_{RMS} = RMS_i - RMS_0$, where RMS_i is the current value of the mean square deviation, RMS_0



Наглядным примером влияния длительных внешних воздействий на астрономические зеркала из Астроситалла являются два облегченных зеркала диаметром 1500 мм, изготовленные в 1992 году (облегчение 55%). Исходное значение ошибки волнового фронта $RMS(W)=0,030\lambda$. После 17 лет хранения первого зеркала его ошибка составила $RMS(W)=0,042\lambda$ (декабрь 2009 года). На втором зеркале после 18 лет хранения ошибка составила $RMS(W)=0,044\lambda$ (октябрь 2010). Можно считать, что качество формы поверхности за длительный срок практически не изменилось.

Еще пример деформационного воздействия на заготовку из Астроситалла - изготовление внеосевого сегмента зеркала диаметром 1520 мм, и толщиной 50 мм методом упругой деформации. Работа проводилась в рамках эксперимента по изготовлению модели прототипа наиболее удаленного сегмента зеркала телескопа E-ELT. Отклонение данной поверхности от ближайшей сферы составляет 203 мкм. Для быстрой асферизации такого сегмента удобно изогнуть заготовку таким образом, чтобы места съема материала были выпуклыми. Затем поверхность шлифуется полноразмерным инструментом, чтобы получить сферическую поверхность, и наибольший съем материала будет в тех местах, которые приподняты. После снятия деформаций будет получена асферика, которую затем надо довести до требований спецификации программно-управляемым шлифованием малым инструментом. Внутренние эквивалентные напряжения, возникающие при таком изгибе, составляют величину 1,68 МПа в центре. Напряжения вполне допустимые для заготовок из Астроситалла с соответствующими геометрическими параметрами. Деформация заготовки осуществляется регулируемые по высоте микрометрическими упорами с помощью прижимных механизмов. Толщина подложки выбиралась такой, чтобы ее собственные деформации были малы по сравнению с деформацией рабочей детали. Как видно из сравнительного анализа (рис.4,5), реально полученная форма модели прототипа похожа на теоретически предсказанный результат, что свидетельствует о достаточно надежном поведении материала Астроситалл по сохранению упругости деформации.

Следующий важный этап - выбор модели зеркала: монолитное зеркало, тонкое или облегченное зеркало. Остановимся более подробно на конструкции облегченного зеркала, поскольку здесь возможны различные варианты структуры облегчения, требующие специальных расчетов на прочность.

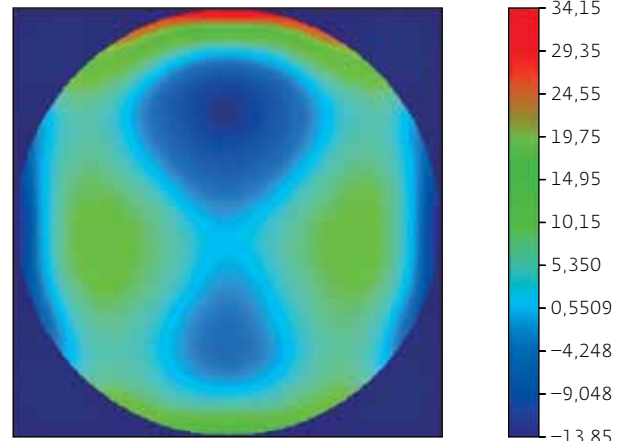


Рис.4. Остаточный предполагаемый волновой фронт отклонений формы поверхности детали от теоретической после снятия напряжений (размах 15 мкм, RMS поверхности = 2,2 мкм)

Fig. 4. Remanent supposed wave front of deviations of the part surface shape from the theoretical one after pressure release (range of 15 microns, surface $RMS = 2.2$ microns)

is the initial mean square deviation) for each cycle of the tests. The lines above and below show the tolerance range under modern requirements.

Tests with temperature mode changes were carried out in a thermal vacuum chamber. Cooling to -40°C was performed with a speed not more than 20°C per hour. The sample was kept at the temperature $-40^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{C}$

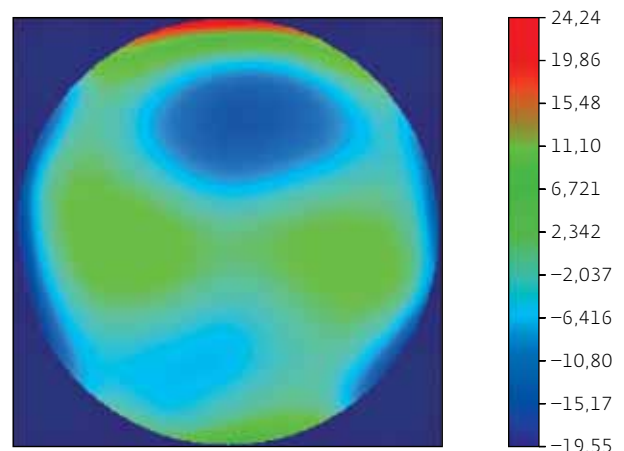


Рис. 5. Остаточная карта волнового фронта после снятия напряжений и контроля на КИМ-1400 (отклонение профиля от заданного размаха 13,8 мкм, RMS поверхности = 1,8 мкм)

Fig. 5. Final map of wave front after pressure release and control on KIM-1400 (profile deviation from the set one in the range of 13.8 microns, surface $RMS = 1.8$ microns)

Облегчение зеркал используется как для наземных оптико-электронных приборов, так и для космических объективов, чтобы снизить вес конструкции. Но в любом случае необходимо учитывать деформации облегченного зеркала, чтобы оно сохранило форму рабочей поверхности в заданных пределах в процессе эксплуатации.

Как правило, зеркала облегчаются с тыльной стороны выборками трапецеидальной или треугольной формы. Наружный и внутренний края зеркала подкреплены ребрами жесткости. Облегчение зеркал может быть более 80% при условии сохранения требуемой жесткости данной конструкции.

После выбора варианта облегчения зеркала проводится оптимизация его геометрических размеров с целью получения максимальной жесткости конструкции при ее минимальной массе. Варьируемыми параметрами являются высота зеркала, толщина подповерхностного слоя до структуры облегчения, количество и толщина ребер. При выборе толщины ребер необходимо учитывать технологические возможности изготовления. Оптимизация размеров проводится при расчете конечно-элементной модели зеркала с использованием пакета конечно-элементного анализа.

Например, для детали диаметром 1900 мм оптимальным по жесткости вариантом является треугольная структура (табл.2). Использование треугольной структуры облегчения при изготовлении – наиболее сложный процесс. По результатам исследований выявлено, что наиболее оптимальным выбором будет зеркало с треугольной структурой с размером ячейки 120 мм, коэффициентом жесткости $K_w=1,43$ и коэффициентом облегчения 82.7%.

Точность изготовления геометрической структуры достигает величины 20 мкм на диаметре до 4000 мм. Фрезерование заготовок проводится на станках с программным управлением. Пример изготовления заготовки зеркала диаметром 1200 мм с треугольной структурой приведен на рис.6.

Следующий важнейший этап – формообразование рабочей поверхности зеркала. Причем, с совершенствованием технологии формообразования разработчики оптических систем усложняют требования как по сложности изготовления оптики, так и по точности изготовления формы поверхности. В настоящее время отклонения формы поверхности от сферы измеряются в миллиметрах, а не в микронах, как раньше (например, внеосевое зеркало телескопа "Магеллан" диаметром 8 м имеет асферичность около 17 мм). Существенно увеличилась апертура зеркал, что усложнило технологию

for an hour. Then the temperature in the chamber was raised up to $105\pm 2^\circ\text{C}$ with a speed not more than 20°C per hour. The sample was kept at the temperature $105^\circ\text{C}\pm 2^\circ\text{C}$ for 1 hour. Then the temperature in the chamber was lowered up to normal one with a speed not more than 20°C per hour. Such cycles were repeated for several times. A chart was made based on the control results, fig. 3б.

The tests results have showed that Astrocytall CO-115M material keeps its elasticity under tensile deformations within the range from -10 MPa to $+10$ MPa and under the temperature influence within the range from -40°C to 105°C and that the surface shape changes within 10 nm of the surface RMS (fig. 3).

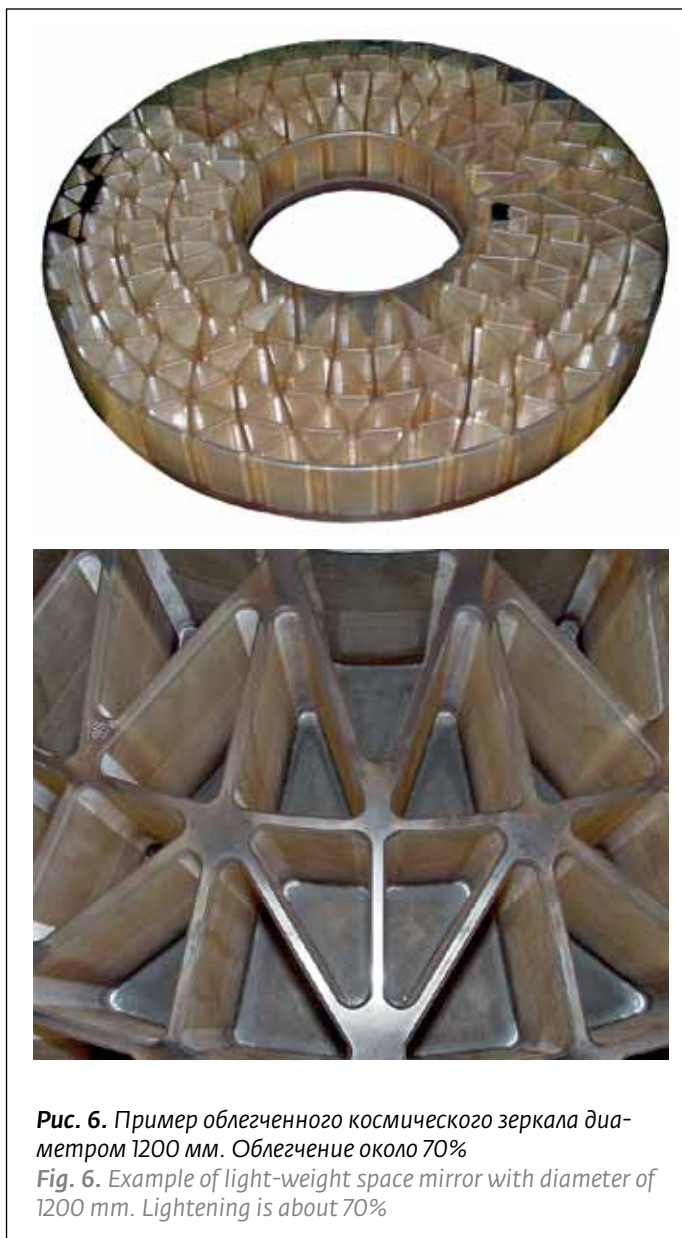


Рис. 6. Пример облегченного космического зеркала диаметром 1200 мм. Облегчение около 70%

Fig. 6. Example of light-weight space mirror with diameter of 1200 mm. Lightening is about 70%



изготовления. Самые сложные зеркала – это зеркала с внеосевыми асферическими поверхностями и произвольным внешним контуром, которые можно изготовить только с использованием специальных компьютерных программно-управляемых способов, успешно развивающихся в настоящее время.

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 зарубежных телескопов. Это главное и вторичное зеркала крупнейших в мире обзорных телескопов VST (VLT Survey

A graphic example of long-term external influence upon astronomical mirrors from Astrocytall can be considered two light-weight mirrors with diameter of 1500 mm made in 1992 (55% weight reduction). The initial wave front error value was $RMS(W)=0.030\lambda$. 17 years later after storage of the first mirror its error was $RMS(W)=0.042\lambda$ (December, 2009). The error of the second mirror after 18 years of storage was $RMS(W)=0.044\lambda$ (October, 2010). One can consider that the surface shape quality has remained practically unchanged within a long period of time.

Another example of deformation influence upon the Astrocytall sample piece was manufacturing of an extra-axial mirror segment with diameter of 1520 mm

Таблица 2. Выбор оптимальной структуры облегчения
Table 2. Selection of Reasonable Lightening Structure

	Структура облегчения Lightening Structure	Размер ячейки, мм Cell Size mm	Коэффициент облегчения Lightening Coefficient				Коэффициент жесткости Stiffness Coefficient		
			M_F , кг M_F , kg	M_L , кг M_L , kg	$K_M = M_L/M_F$	Процент облегчения % lightening	W_F , мкм W_F , μm	W_L , мкм W_L , μm	$K_W = W_L/W_F$
1	Треугольная Triangle	60	1842	532	0,289	71,1	1,1386	1,5995	1,40
2		78	1842	420	0,228	77,2	1,1386	1,624	1,43
3		100	1842	330	0,179	82,1	1,1386	1,6753	1,47
4		120	1842	319	0,173	82,7	1,1386	1,6329	1,43
5		140	1842	283	0,154	84,6	1,1386	1,7208	1,51
6	Шестиугольная Hexagonal	60	1842	484	0,263	73,7	1,1386	1,7228	1,51
7		78	1842	390	0,212	78,8	1,1386	1,7877	1,57
8		100	1842	346	0,188	81,2	1,1386	1,7632	1,55
9		120	1842	316	0,172	82,8	1,1386	1,785	1,57
10		140	1842	281	0,153	84,7	1,1386	1,92	1,69
11	Круглая Round	60	1842	589	0,320	68,0	1,1386	1,6045	1,41
12		78	1842	524	0,284	71,6	1,1386	1,7167	1,51
13		100	1842	458	0,249	75,1	1,1386	1,8255	1,60
14		120	1842	446	0,242	75,8	1,1386	1,8793	1,65
15		140	1842	422	0,229	77,1	1,1386	1,8633	1,64

Диаметр $D=1900$ мм, толщина $H=300$ мм, $H/D=1/6,3$, $R=7600$, $D/f=1/2$, толщина ребра $d=6$ мм, толщина подповерхностного монолитного слоя до структуры облегчения $t=10$ мм, базировка по краевой окружности.

M_F – масса сплошного зеркала, кг

M_L – масса облученного зеркала, кг

W_F – прогиб сплошного зеркала, мкм

W_L – прогиб облученного зеркала, мкм

Diameter $D=1900$ mm, thickness $H=300$ mm, $H/D=1/6.3$, $R=7600$, $D/f=1/2$, ribs thickness $d=6$ mm, thickness of undersurface monolithic layer before the lightening structure $t=10$ mm,

Edge Circle Basing

M_F – Mass of monolithic mirror, kg

M_L – Mass of light weight mirror, kg

W_F – Deflection of monolithic mirror, μm

W_L – Deflection of light weight mirror, μm



Telescope, 2,6 м) и VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, 4 м) [3-8], установленные в обсерватории Паранал в Чили, сеть 17 телескопов LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network, США) с диаметром главных зеркал 1 м и вторичных диаметром 345 мм [5,9], телескоп TNT (Thai National telescope, США, Австралия, Таиланд) с главным зеркалом диаметром 2,4 м [9-10], зеркала телескопа DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences, ARIES, Бельгия, Индия) с главным зеркалом диаметром 3,7 м [11], зеркала телескопов SALT (Southern African Large Telescope - Большой южноафриканский телескоп) и LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope, Большой многоцелевой спектроскоп для наблюдения обширных районов неба, Китай) [12,13]. Зеркала этих телескопов имеют значительную асферичность и высокую апертуру, что создает существенные трудности не только при обработке 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.

Для создания управляющей программы обработки рабочей поверхности на стадии шлифования необходима информация о топографии поверхности. Ее можно получить тремя различными способами:

- контроль механическим способом с помощью 3-координатной или 6-координатной измерительной машины, например КИМ-1400 российского производства, обеспечивающий точность отклонений от требуемой асферической поверхности 2-3 мкм [5];
- для деталей любых размеров, выпуклых и вогнутых, но осесимметричных, применим метод контроля формы поверхности трехточечным линейным сферометром, который успешно используется в настоящее время;
- для деталей произвольной формы, на стадии шлифования может быть использован ИК-интерферометр [14, 15] в сочетании с зеркальным корректором волнового фронта. Зеркальный корректор для ИК-диапазона ($\lambda=10,6$ мкм) использовался для контроля формы обрабатываемой поверхности при автоматизированной асферизации главных зеркал проектов VST и VISTA [5].

Как на стадии шлифования, так и на стадии полирования, и особенно на этапе финишной доводки зеркала, оно базируется либо на штатной

and thickness of 50 mm under the elastic deformation technique. The work was carried out within the experiment of manufacturing of the prototype model of the most remote mirror segment of E-ELT telescope. Deviation of this surface from the nearest sphere was 203 μm . For fast aspherisation of such a segment it's convenient to bend the sample piece in a way to make the material removal sites bulged. Then the surface is polished with a full-size tool to obtain a spherical surface and the biggest material sampling will be on the sites which are elevated. After deformation sampling one obtains the aspherics that is to be brought in line with the specification requirements by means of program-operated polishing with a fine tool. The internal equivalent tensions arising out of such bending amount to 1.68 MPa in the centre. The tensions are quite admissible for sample pieces from Astrocytall with the corresponding geometric parameters. Deformation of the sample piece is performed with the height regulated micrometric supports with the help of clamping mechanisms. The padding thickness is selected in such a way that its own deformations are small comparing with working deformation of the part. As seen from the comparative analysis (fig. 4.5) a prototype model shape obtained in reality looks like theoretically predicted result proving quite a reliable behavior of Astrocytall as for keeping deformation elasticity.

Next important stage is selecting of a mirror model, either a monolithic mirror, a thin or a light-weight one. Let's stop in more details on construction of a light-weight mirror as different variants of lightening construction are available here requiring special tensile calculations.

Mirror lightening is used both for the ground-based optical electronic devices and space objects to reduce the construction weight. But anyway it's necessary to take into consideration deformations of light-weight mirror so that it keeps working surface shape within the set range during the operation process.

As a rule, mirrors are reduced in weight from the back side with trapezoid or triangle samples. The outer and inner edges of the mirror are fixed with stiffening plates. Mirrors lightening can be over 80% provided that the construction keeps the required stiffness.

After the selection of a mirror lightening variant, optimization of its geometrical sizes takes place with the purpose of reaching the construction maximum stiffness at its minimal mass. Variable parameters are the mirror height, thickness of undersurface layer before the lightening structure, number and thickness of ribs. While selecting the ribs thickness, one should take into consideration technological



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 [5] на мембранно-пневматической, где мембраны имитировали штатную разгрузку и располагались в тех же позициях, где располагаются штатные разгрузки. При этом выполняются расчеты разгрузки зеркала на штатной и на технологической оправе, определяется карта разности в форме поверхности и обработка и контроль ведутся с учетом этой карты. Следует отметить, что в настоящее время зеркала делают в виде менисков меньшей толщины, чем классическое соотношение между толщиной и диаметром 1:10, 1:8. Так, толщина зеркала VISTA 165 мм при диаметре 4100 мм, т.е. 1:25. Это связано с тем, что зеркала имеют активную систему разгрузки, т.е. управляемую форму поверхности в процессе наблюдений.

Для контроля вогнутых асферических поверхностей на этапе полирования используются линзовые или зеркально-линзовые корректоры волнового фронта [10–11]. Они преобразуют сферический или плоский волновой фронт в асферический, соответствующий контролируемой поверхности. Конструкции корректоров существенно усложнились, поскольку зеркала стали высокоапертурными и высокоасферичными. И параметры линз и расстояния между линзами должны быть выдержаны с микронной точностью. Но в последнее время все более успешно используются корректоры волнового фронта в виде дифракционных оптических элементов или ДОЭ-корректоры (CGH-корректоры-Computer Generated Hologram) с CGH-имитаторами зеркала [10–11, 16–17]. Причем CGH-имитаторы зеркала позволяют проконтролировать и линзовый корректор волнового фронта. Они позволили существенно повысить точность и расширить диапазон функциональных возможностей контроля оптики, особенно внеосевых зеркал, повысить точность юстировки. С усложнением изготавливаемой оптики, особенно крупных и дорогостоящих зеркал, возникла необходимость перекрестного контроля оптической поверхности двумя корректорами различной конструкции, что позволяет избежать ошибок при изготовлении зеркала и получить требуемые значения вершинного радиуса и эксцентриситета рабочей поверхности. При этом выполняются измерения радиуса обрабатываемой поверхности с лазерным трекером, что позволяет получить точность в измерениях радиуса до 0,1–0,3 мм на длине до 15–30 метров. Такие методы

production capacities. The size optimization is carried out at calculation of the mirror model of the final element with application of a package of final element analysis.

For example, for a part with diameter of 1900 mm a reasonable variant as for stiffness is a triangle structure (Table 2). Application of a triangle lightening structure during production is the most complicated process. Based on the tests results it's found out that the most reasonable choice will be a mirror with triangle structure with cell size 120 mm, stiffness coefficient $K_w=1.43$ and lightening coefficient 82.7%.

Geometrical structure production accuracy reaches the value of 20 μm at diameter up to 4000 mm. Milling of the sample pieces is carried out on program controlled machines. An example of manufacturing of a mirror sample piece with diameter of 1200 mm with triangle structure can be seen in fig. 6.

Next important stage is forming working surface of the mirror. Moreover with improvement of shaping technology the designers of optical systems make more complicated requirements both for optics production complexity and for surface shape production accuracy. Nowadays time of the surface shape deviation from the sphere is counted in millimeters and not in microns like before (for example, extra-axial mirror of Magellan telescope with diameter of 8 m has asphericity about 17 mm). Mirror aperture is also significantly increased. The production technology of such mirrors has become more complicated due to this. The most complicated mirrors are the ones with extra-axial aspheric surfaces and random outer contour which can be manufactured only with application of special computer programmed techniques developing successfully at the present time.

Within the last two decades "Lytkarino Optical Glass Factory", JSC has developed computer-programmed techniques of large-scale astronomical and space optics processing that allow producing mirrors for large Russian and foreign telescopes. These are the main and secondary mirrors of the world hugest survey telescopes VST (VLT Survey Telescope, 2.6 m) and VISTA (Visible and Infrared Survey Telescope for Astronomy, 4 m) [3–8], installed in Paranal Observatory, Chile, a network of 17 telescopes LGOGT (Las Cumbres Observatory Global Telescope Network, USA) with diameter of main mirrors of 1 m and secondary ones of 345 mm [5,9], telescope TNT (Thai National telescope, USA, Australia, Thailand) with the main mirror with diameter of 2.4 m [9–10], mirrors of the telescope DOT ARIES (Devasthal Optical Telescope, DOT, for Aryabhata Research Institute of Observational Sciences, ARIES, Belgium, India) with

контроля позволили получить высокоточные зеркала, которые сейчас успешно функционируют в действующих телескопах.

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

Для формообразования используются станки с программным управлением серии "АД", "СД", "АПД" [18,19], "КУ168-АДМ".

Основные направления в развитии технологий полирования в последнее время направлены на то, чтобы обработать высокоапертурное и, соответственно, высокоасферичное 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 технологическом процессе формообразования малыми инструментами используются полировальники различного диаметра в одном сеансе обработки. Комбинированное использование серии инструментов с сеансами сглаживания локальных ошибок позволяет устранять последовательно ошибки от низкочастотных до высокочастотных.

Для повышения производительности съема на поверхностях с высокой асферичностью используется принудительное сдерживание инструмента от вращения вокруг своей оси, гибкие инструменты определенной жесткости, чтобы профиль съема соответствовал требуемому в меридиональном и сагиттальном сечениях на поверхности детали. В этом случае можно использовать инструмент достаточно большого размера, который



Рис. 7. Процесс полировки зеркала диаметром 6 метров БТА на станке КУ-168АДМ

Fig. 7. Polishing process of a mirror with diameter of 6 meter BTA on KU-168ADM machine

the main mirror with diameter of 3.7 m [11], mirrors of the telescopes SALT (Southern African Large Telescope – Large South African Telescope) and LAMOST (Large Sky Area Multi-Object Fibre Spectroscopic Telescope, large multipurpose spectroscope to observe extensive sky areas, China) [12,13]. Mirrors of these telescopes have significant asphericity and high aperture creating substantial difficulties not only within processing of these mirrors but also within their control. For successful production of such optical elements, an optics production process control is required on all the stages of processing starting with the preliminary polishing and finishing with the final fitting.

To create an operating program for the working surface processing on the stage of polishing one needs the surface topography information. It can be obtained in three ways.

- mechanical control with the help of 3-grid or 6-grid measuring machine, e.g., KIM-1400 of Russian production providing accuracy of deviations from the required aspheric surface of 2–3 μm [5];
- three-point lineal spherometer successfully applied at the present time can be used as a surface shape control technique for the parts of any sizes both convex and concave but axisymmetric;
- for the parts of non-fixed shape on the polishing stage one can apply Infrared Interferometer [14, 15] in combination with a mirror corrector of the wave front. A mirror corrector for IR-range ($\lambda=10.6 \mu\text{m}$) was used to control the processed surface shape at automated asphericity of the main mirrors of VST and VISTA [5] projects.

притирается к асферическому профилю переменного радиуса на всей поверхности инструмента.

Для съема материала на поверхностях со значительной кривизной используется станок типа АПД-600 с наклоном стола с деталью [19] для обеспечения притира инструмента к рабочей поверхности детали по нормали в вертикальном положении (рис.10). На нем можно обрабатывать детали диаметром до 1000 мм.

Моделирование процесса съема материала с поверхности выполняется таким образом, чтобы материал снимался со всей поверхности пропорционально величинам отклонений профиля от самой глубокой ямы на поверхности. То есть 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.

На рис.7, 8 приведены примеры формообразования оптических деталей малыми инструментами с компьютерным управлением. Для юстировки и согласования положения зеркал в пространстве



Рис.8. Финишная полировка зеркала ARIES диаметром 3700 мм на станке с компьютерным управлением
Fig. 8. Final polishing of ARIES mirror with diameter of 3700 mm on computer managed machine

Both on grinding and on polishing stages and especially on the stage of the mirror final fitting it's based either on nominal release on which it will be used in a telescope or on membranous and pneumatic technological release. Thus for example a TNT mirror with diameter of 2.4 m was processed on a nominal mechanic release, and VST, VISTA [5] mirrors on a membranous and pneumatic one where the membranes imitated nominal release and were located in the same places as for nominal release. Hence calculations of the mirror release on nominal and technological frame are carried out, the card of a difference in the surface shape is defined and processing and control are conducted taking this card into consideration. It is necessary to point out that nowadays mirrors are made in form of meniscuses of smaller thickness than a classical ratio between the thickness and diameter 1:10, 1:8. So thickness of VISTA mirror is 165 mm at diameter of 4100 mm, i.e. 1:25. It is due to the fact that mirrors have active release system, i.e. manageable surface shape within the observation process.

Lens and mirror-lens wave front correctors [10-11] are used to control concave aspheric surfaces on the polishing stage. They modify spherical or flat wave front into aspheric corresponding to the controllable surface. Constructions of correctors have become significantly more complicated as they have become highly apertured and highly aspheric. Both lens parameters and distances between the lenses must be kept with micron accuracy. But wave front correctors in form of diffraction optical elements or CGH-correctors (CGH-correctors-Computer Generated



Рис. 9. Юстировка оптических элементов с внеосевой асферикой с использованием гексапода и лазерного трекера АПИТЗ

Fig. 9. Adjusting of optical elements with extra-axial asphericity with application of hexapod and laser tracker АПИТЗ



Рис. 10. Финишная полировка зеркала с наклоном стола для обеспечения работы инструмента по нормали к зеркалу
Fig. 10. Final polishing of a mirror with table slope to provide functioning of the tools in nominal to the mirror

Hologram) with CGH mirror imitators [10-11, 16-17] have recently been used more and more successfully. CGH mirror imitators allow controlling also the wave front lens corrector. They allowed increasing accuracy significantly and extending the range of functional possibilities of optics control especially of extra-axial mirrors, and increasing adjustment accuracy. Upon complication of optics under production especially large and expensive mirrors it became necessary to provide cross check of optical surface with two correctors of different construction that allowed avoiding mistakes during mirror production and receiving the required values of apical radius and eccentricity of the working surface. Thus measurements of the processed surface radius are carried out with a laser tracker that allows receiving accuracy in radius measurements up to 0.1-0.3 mm at the length of up to 15-30 meters. Such control techniques have allowed receiving precise mirrors which are successfully used now in operating telescopes.

во время контроля используются гексаподы и лазерный трекер (рис.9).

В качестве примера результатов обработки крупногабаритного астрономического зеркала на рис. 11 приведены интерферограммы волнового фронта главного зеркала телескопа VISTA диаметром 4100 мм и асферичностью около 850 мкм: слева с выделением регулярных ошибок, дисторсионного искажения, создаваемого корректором, собственной ошибки корректора волнового фронта, полученная 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.

В ОАО ЛЗОС развиваются и ионно-лучевые методы обработки оптики (ИЛО). Создана вакуумная установка для ИЛО поверхностей крупногабаритных оптических деталей (установка "Луч-2,5", рис.12) для деталей диаметром до 2,5 м. Подобные установки для обработки сегментов составных зеркал созданы во Франции (фирма SAGEM), в США (ITT), они успешно использовались при изготовлении составных главных зеркал телескопов Keck I и Keck II (США), GRANTECAN (Испания) и т.д.,

При контакте полирующего инструмента с поверхностью детали появляются значительные ошибки в краевой зоне при выходе инструмента за край детали, поэтому задаются параметры

Nowadays there is improvement of shaping technology in a number of directions. But three techniques are the most effective for large-sized optics: computer management with a pitchy or synthetic polishing tool, ionic-beam polishing and magnetorheological polishing. And for the parts with diameter of over 2 meters only the first technique is applicable. All other techniques require further development.

Program managed machines of series "AD", "CD", "APD" [18,19], "KU168-ADM" are used for shaping.

Basic trends in polishing technology development have recently been directed at processing of highly apertured and highly aspheric mirrors or lens

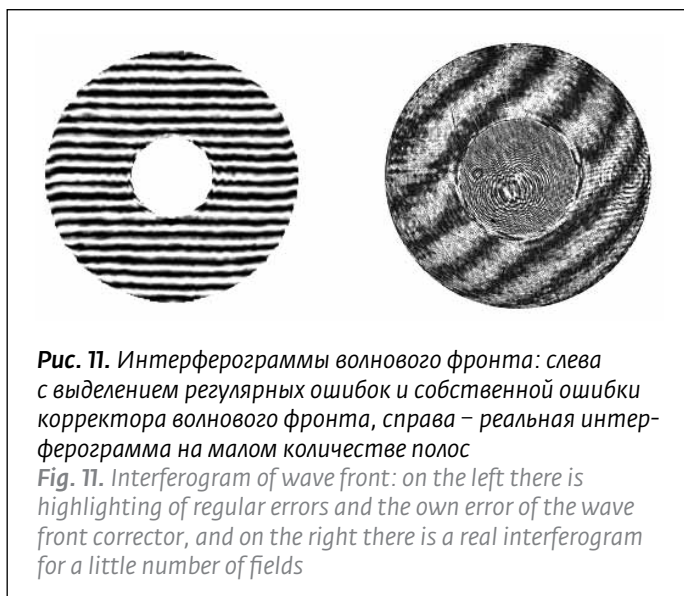


Рис. 11. Интерферограммы волнового фронта: слева с выделением регулярных ошибок и собственной ошибки корректора волнового фронта, справа – реальная интерферограмма на малом количестве полос
Fig. 11. Interferogram of wave front: on the left there is highlighting of regular errors and the own error of the wave front corrector, and on the right there is a real interferogram for a little number of fields

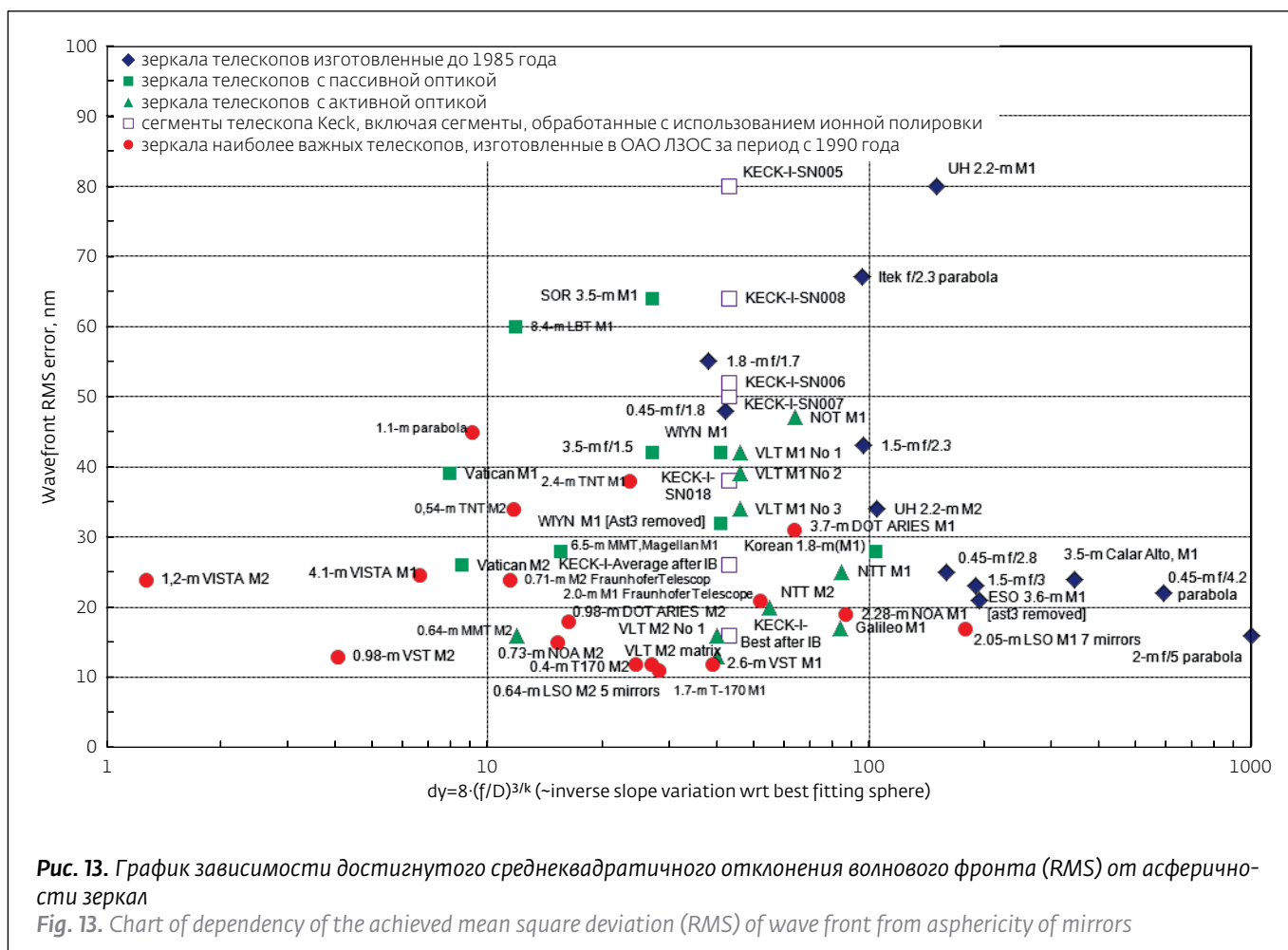


Рис. 12. Установка для ИЛО оптических деталей
Fig. 12. Installation of optical parts for IBP

световой области на рабочей поверхности. Метод ИЛО не имеет данного недостатка и особенно эффективен при обработке составных зеркал телескопов, состоящих, как правило, из шести-гранных сегментов, объединенных в единое зеркало, где требуется изготовить всю поверхность

respectively thus obtaining a small-structure error which is defined with mean square slope of the beams reflected from the mirror (RMS Slope) measured in angular seconds.

The program complex contains a set of subprograms of different purposes providing carrying out of automated



с оптическим качеством, включая краевые зоны детали. Технология обработки находится в стадии модернизации и дальнейшего развития.

Для измерений вершинного радиуса оптической поверхности используется лазерный трекер, который позволяет измерять отрезки между корректором волнового фронта и зеркалом с точностью в доли миллиметра, юстировать с высокой точностью положения оптических элементов схемы контроля.

Для оценки степени сложности изготовленных в ОАО ЛЗОС поверхностей воспользуемся графиком (рис.13), приведенным P.Dierickx в 1999 году [20], дополним эту работу данными последнего десятилетия и укажем на графике 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 $RMS(W)$:

$$dy = 8N^3/k,$$

technological process, topography calculation of optical surface under the results of interferential control, calculation of material sampling with an estimated set of polishing tools, calculation of movement trajectory of the polishing tools along the part, calculation of correcting technological parameters, optimization of shaping process, displaying of operating programs for computer management of the polishing tool movement. Polishing tools of different diameters are used in one processing cycle in a technological shaping process with small tools. Combined use of a set of tools with local errors smoothing sessions allows consistent eliminating of errors from low-frequency up to high-frequency ones.

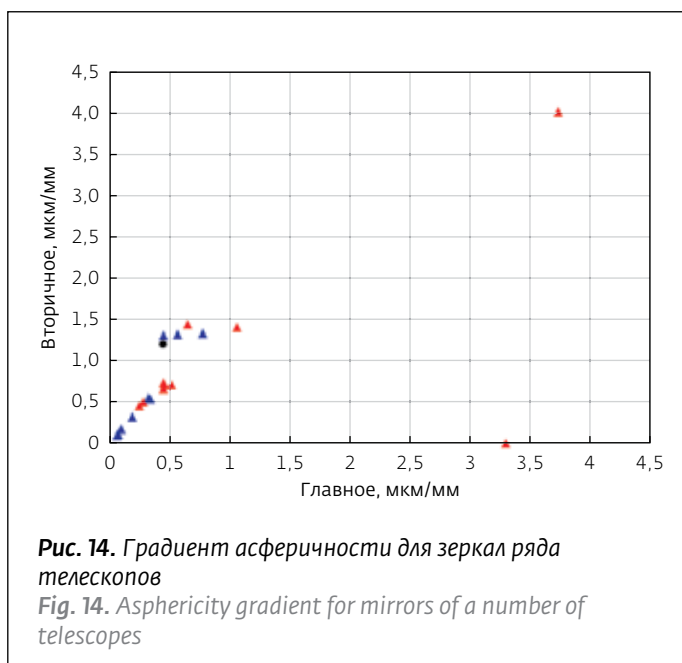
In order to increase sampling capacity on the surfaces with high asphericity forced restraint of the tool from rotation around its longitudinal axis is used, i.e., flexible tools of certain rigidity so that the sampling structure corresponds to the one in meridional and sagittal sections on surface of the part. In this case it is possible to use a tool of quite a big size

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 рис.14 представлен график максимального градиента асферичности в единицах размерности [мкм/мм] для главного (ось абсцисс) и вторичного (ось ординат) зеркал телескопов: треугольники – ряд зарубежных проектов по изготовлению оптики телескопов. Кружками обозначен ряд проектов по изготовлению оптики различных телескопов, выполненных в ОАО ЛЗОС 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 (3.74; 4.02) по сложности изготовления и по градиенту асферичности существенно превосходит все предыдущие изготовленные главные и вторичные зеркала, что подтверждает успешность разработанной технологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N., Patrikeev A.P., Semenov A.P., Sharov Y.A.



that gets adjusted to aspheric profile of variable radius on the whole surface of the tool.

In order to create material sampling on surfaces with significant curvature an APD-600-like machine with table slope with the part [19] is used to provide



- Astrositall application in astronomical and space optics production. – Proceedings of SPIE, 2012, v. 8450, p. 84502L.
2. **Hall D.B.** Dimensional stability tests over time and temperature for several low-expansion glass ceramics. – Applied optics, 1996, v. 35, № 10, p.1673-1678.
 3. **Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N. et al.** Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST. – Proceedings of SPIE, 2001, v.4451, p.131-137.
 4. **Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P. et al.** Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST. – Proceedings of SPIE, 2001, v.4451, p.138-144.
 5. **Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П. и др.** Технологические особенности изготовления главных зеркал телескопов. – Оптический журнал, 2013, т. 80, № 4, с.8-17.
 6. **Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P. et al.** M1 and M2 mirror manufacturing for ARIES project: current status. – Proceedings of SPIE, 2010, v.7739, p.773907.
 7. **Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P. et al.** M1 primary mirror manufacturing for VISTA project. – Proceedings of SPIE, 2008, v.7018, p.701804.
 8. **Abdulkadyrov M.A., Patrikeev A.P., Belousov S.P. et al.** M2 secondary mirror manufacturing for VISTA project. – Proceedings of SPIE, 2008, v.7018, p.70180B.
 9. **Семенов А.П., Абдулкадыров М.А., Патрикеев В.Е. и др.** Интерференционные методы контроля формы поверхностей крупногабаритных асферических деталей на основе линзовых и голограммных корректоров волнового фронта. – Оптический журнал, 2013, т. 80, № 4, с. 33-38.
 10. **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, 2010, v.7739, p.77390P.
 11. **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. – Proceedings of SPIE, 2012, v. 8450, p. 84504R.
 12. **Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Ignatov A.N. et al.** Fabrication of blanks,

adjusting of the tool to the working surface of the part in normal in vertical position (fig. 10). It is possible to process the parts on it with diameter of up to 1000 mm.

Modelling of process of material sampling from the surface is carried out in such a way that the material is taken from the whole surface proportionally to the sizes of deviations of a profile from the deepest hole on the surface. I.e., where the maximal bump is, there the maximal sampling is taken. Such way of processing distribution within material sampling from surface allows obtaining smooth optical surfaces with minimal RMS Slope including also edge areas on the part.

On fig. 7.8 there are examples of optical part shaping with small tools under computer control.

A hexapod machine and laser tracker (fig. 9) are used to adjust and fit the mirrors location in space.

As example of results of large-scale astronomical mirror processing there are wave front interferograms of the main mirror of VISTA telescope with diameter of 4100 mm and asphericity of about 850 μm in fig.11: on the left there is highlighting of regular errors, distortive impairments created by the corrector, the own error of the wave front corrector received as based on the results of building a surface topographic map, and on the right there is a real interferogram for a little number of fields. It depicts remanent defocusing and zonal error equivalent to the remanent zonal error of the wave front lens corrector that's deducted from the total wave front.

"Lytkarino Optical Glass Factory" has also designed ion-beam techniques of optics processing (IBP). A vacuum unit has been created for IBP of the surfaces of large-scale optical parts ('Lutch (Beam) -2.5" unit, fig. 12) for the parts with diameter of up to 2.5 m. Similar units for composite mirror segments processing were created in France (SAGEM Company), the USA (ITT), they were successfully used to manufacture component parts of main mirrors of Keck I and Keck II (the USA), GRANTECAN (Spain) telescopes, etc.

Upon contact of a polishing tool to surface of the part there are significant errors in the edge area at its crossing over the part edge that's why light area parameters are specified on the working surface. IBP technique does not have any such disadvantage and it is especially effective for processing of composite mirrors of the telescopes consisting as a rule of hexagonal segments incorporated into a single mirror in which it is required to make the whole surface with optical quality including edge areas of



- figuring, polishing and testing of segmented astronomic mirrors for SALT and LAMOST project. – Proceedings of SPIE, 2004, v.5494, p.31–38.
13. **Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Патрикеев А.П. и др.** Изготовление оптических элементов составных зеркал для больших астрономических телескопов. – Оптический журнал, 2013, т. 80, № 4, с. 18–23.
 14. **Абдулкадыров М.А., Белоусов С.П., Придня В.В. и др.** Оптимизация технологии формообразования и методов контроля выпуклых асферических поверхностей крупногабаритных оптических деталей. – Оптический журнал, 2013, т. 80, № 4, с. 24–32.
 15. **Абдулкадыров М.А., Барышников Н.В., Денисов Д.Г. и др.** Неравноплечий ИК-интерферометр Тваймана-Грина для контроля формы и качества поверхностей крупногабаритных оптических деталей на стадии шлифования. – Оптический журнал, 2010, т. 77, № 10, с.40–47.
 16. **Poleshchuk A.G.** Fabrication and application of diffractive optical elements. – Proc. of SPIE, 2010, v.7544, 75443L-1–75443L-12.
 17. **Poleshchuk A.G.** Computer generated holograms for aspheric optics testing. – Proc. of SPIE, 2009, v.7133, 713333-1–713333-9.
 18. **Лямин Ю.Б., Рябинин В.А.** Автоматизирование доводочные станки модели АД. – ОМП, 1987, № 7, с.31–33.
 19. **Лямин Ю.Б.** Автоматизированные станки с компьютерным управлением по 5 координатам для формообразования высокоапертурных поверхностей крупногабаритных зеркал. – Оптический журнал, 2011, т. 78, № 4, с. 21–24.
 20. **Dierickx P.** Optical fabrication in the large. – Workshop on Extremely Large Telescopes. – Bäckaskog, Sweden, 1999.

the part. Processing technology is on the stage of modernization and further development.

A laser tracker is used to measure apical radius of the optical surface allowing to measure sections between a wave front corrector and a mirror with accuracy in millimeter fractions, to adjust location of optical elements of the control chart with high accuracy.

In order to evaluate a degree of complexity of surfaces made by "Lytkarino Optical Glass Factory", JSC let's use a chart (fig. 13) introduced by P.Dierickx in 1999 [20], supplement it with data of the last decade and specify on it location of the main and secondary mirrors of the key projects processed by "Lytkarino Optical Glass Factory", JSC. The chart shows a degree of complexity of the manufactured mirror depending on dy parameter and reached quality of processing of RMS (W):

$$dy = 8N^3/k,$$

where N is an aperture (afocal ratio) of optical surface, and k is a conic constant. Thus a conclusion follows that closer to the coordinate basic origin the point is located on the chart, the more complicated the manufactured surface is.

In figure 14 there is a chart of maximal asphericity gradient in micron/mm for the main (abscissa axis) and secondary (Y-axis) mirrors of telescopes: triangles are a number of foreign projects on manufacturing of telescope optics. The circles mark a number of projects executed by "Lytkarino Optical Glass Factory", JSC relating to manufacturing of optics for different telescopes, mainly within the recent time. As seen from the chart, a set of optics of VISTA (3.74; 4.02) telescope surpasses all the earlier main and secondary mirrors significantly in relation of complexity of production and asphericity gradient thus proving success of the technology developed.