

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОСТАВНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ БОЛЬШИХ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ТЕЛЕСКОПОВ

© 2013 г. М. А. Абдулкадыров, канд. техн. наук; С. П. Белоусов;
А. П. Патрикеев, канд. эконом. наук; В. Е. Патрикеев; А. П. Семенов, канд. техн. наук
Лыткаринский завод оптического стекла, г. Лыткарино, Московская обл.
E-mail: lastro@lzos.ru

Технические возможности Лыткаринского завода оптического стекла позволяют производить оптику от стадии варки и отжига заготовок до изготовления готовых астрономических зеркал.

Описан опыт предприятия по изготовлению заготовок и готовых сегментов из Астроситалла® для телескопов с составными сегментированными зеркалами.

Приведена схема контроля формы сферической поверхности сегментов составного зеркала с использованием линзы Физо. Для реализации схемы была изготовлена линза Физо большого диаметра, разработан и изготовлен специальный стенд, который позволяет контролировать как сферическую поверхность самой линзы, так и сферический элемент составного зеркала.

Ключевые слова: сегментированные зеркала, оптический контроль, асферическая поверхность.

Коды OCIS: 220.0220; 220.0230; 220.4610; 350.1260

Поступила в редакцию 30.08.2012

Введение

Для создания зеркал наземных и космических телескопов на Лыткаринском заводе оптического стекла (ОАО ЛЗОС) применяется ситалл СО-115М (*Astrositall*®). Многолетние экспериментальные данные по обработке и изготовлению зеркал из ситалла показали его высокую стабильность и эффективность при изготовлении сплошных, облегченных и тонких крупногабаритных зеркал [1, 2]. Для астрономических телескопов с составными сегментированными зеркалами изготовлены заготовки и готовые сегменты зеркал проектов *South African Large Telescope (SALT)* [3] и *Large Sky Area Multi-Object Spectroscopic Telescope (LAMOST)* [4].

Изготовление заготовок крупногабаритных астрономических зеркал

Производство Астроситалла® СО-115М было освоено в 1959 г. на ЛЗОС, где выполняются работы по изготовлению из него оптических деталей от стадии отлива и отжига заготовок

до окончательного формообразования. В настоящее время этот материал используется для изготовления высокоточных астрономических зеркал как непосредственно в ОАО ЛЗОС, так и в других фирмах.

Астроситалл® – стеклокристаллический материал со сверхнизким температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР), по своим оптическим и физико-механическим свойствам является аналогом материала *Zerodur*® фирмы SCHOTT (Германия). В течение длительного времени проводились многочисленные испытания, подтверждающие стабильность свойств СО-115М на деталях специального назначения. Сравнение свойств Астроситалла® (СО-115М) и *Zerodur*® приведено в табл. 1.

Полный цикл обработки оптических деталей от наваара стекла до получения готовых деталей обеспечен оборудованием для предварительной обработки заготовок (распиловка, кругление, обработка торцов, закладка сфер на заготовках габаритом до 6 м), оборудованием для получения геометрических размеров с точностью до 10 мкм на заготовках диаметром до 4 м (координатно-расточные, пло-

Таблица 1. Свойства Астроситалла® и Zerodur®

Параметры	Астроситалл®	Zerodur®
среднее значение ТКЛР, (К ⁻¹)	$\pm 1,5 \times 10^{-7}$ температура от -60 до +60 °С	$\pm 1,0 \times 10^{-7}$ температура от 0 до +50 °С
показатель преломления (N_D)	1,536	1,542
плотность, г/см ³	2,46	2,53
модуль Юнга, $\times 10^4$, МПа	9,2	9,3
коэффициент Пуассона	0,28	0,24
удельная теплоемкость, Дж/г К	0,92	0,80
теплопроводность, Вт/м К	1,18	1,46
температуропроводность, $\times 10^{-6}$, м ² /с	0,52	0,72

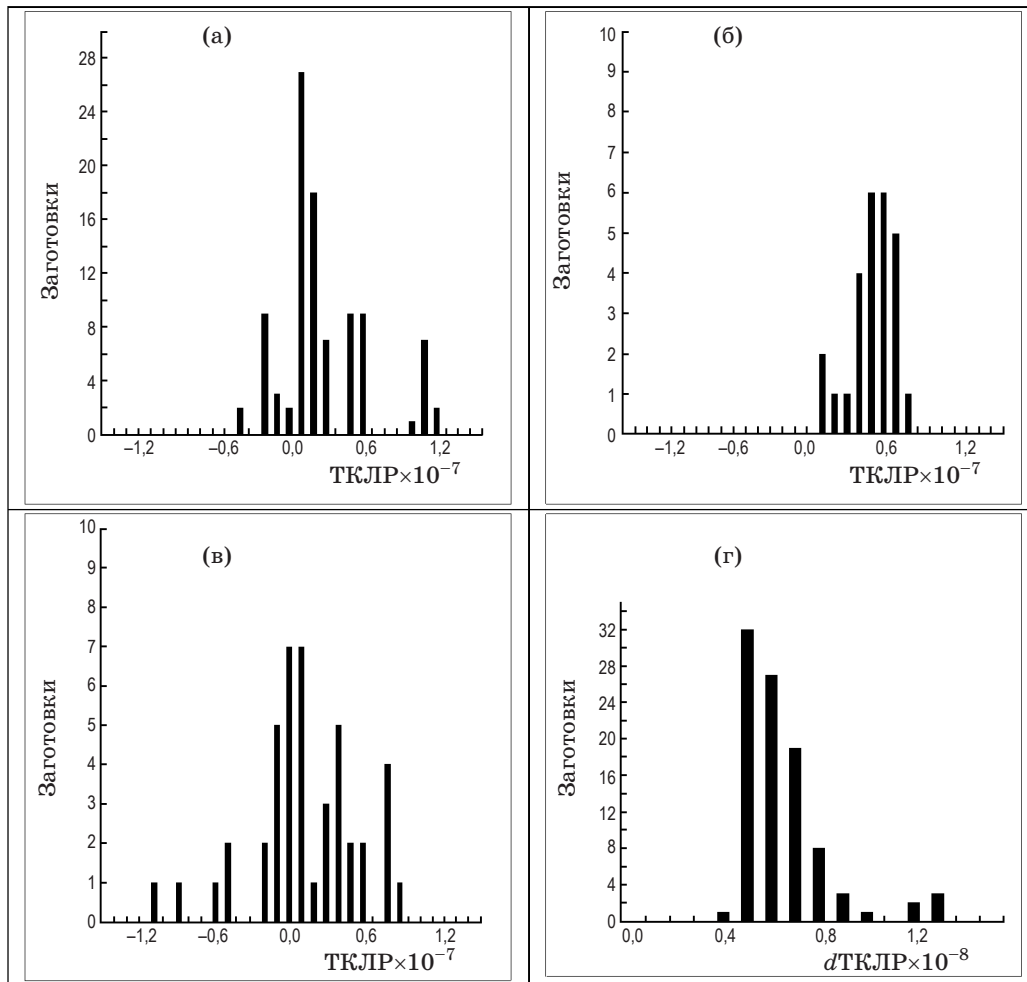


Рис. 1. Распределение среднего значения ТКЛР по 96 заготовкам SALT (а), по 26 заготовкам LAMOST (б) и по заготовкам диаметром > 1 м (в). Однородность ТКЛР по 96 заготовкам SALT (г).

скошлифовальные и др. станки), а также для изготовления и автоматизированного формообразования поверхностей крупногабаритных оптических деталей [1, 2].

Процесс получения геометрических размеров деталей включает в себя стандартные процедуры распиливания и фрезерования отлитых заготовок на оборудовании с программным

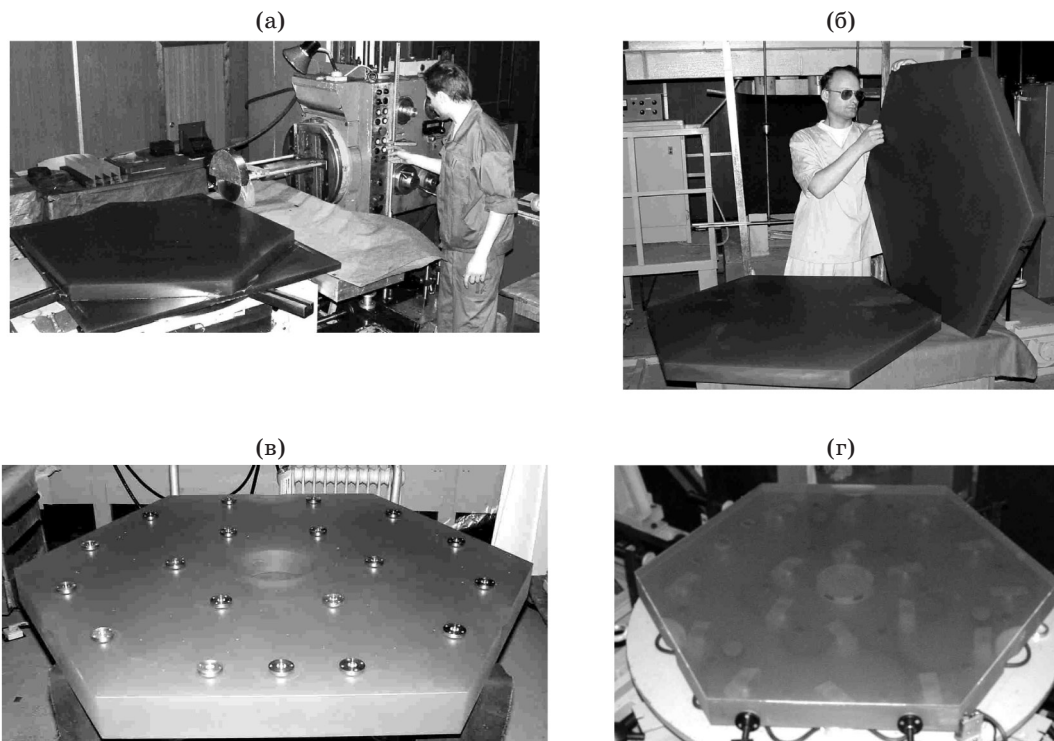


Рис. 2. Изготовление шестигранных заготовок для проекта SALT (а, б). Приклеивание элементов опор разгрузки к сегменту зеркала LAMOST (в). Сегмент на мембранно-технологической оправе (г).

управлением с использованием алмазного обрабатывающего инструмента.

Для составного главного зеркала телескопа SALT изготовлены 96 шестигранных сегментов габаритами 1019×55 мм. Для контроля в заготовках ТКЛР разработаны и изготовлены интерференционные dilatометры нового поколения [5], обеспечивающие погрешность измерений не более $5 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$. Однородность ТКЛР, определенная по 18-ти образцам, взятым на различных участках заготовки, не превышала по размаху $15 \times 10^{-9} \text{ K}^{-1}$. Распределение ТКЛР по 96 заготовкам приведено на рис. 1а. На рис. 1в – диаграмма распределения среднего значения ТКЛР по заготовкам диаметром $> 1 \text{ м}$, из которого следует, что значения находятся в пределах $\pm 1,0 \times 10^{-7} \text{ K}^{-1}$. На рис. 1г – диаграмма распределения разброса значений ТКЛР, которая показывает, что разброс значений (неоднородность ТКЛР) в заготовках, в основном, не превышает $1,0 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$. В настоящее время именно такие требования (и более жесткие) предъявляются к заготовкам сверхбольших (диаметр $> 30 \text{ м}$) составных зеркал телескопов.

Ряд требований к материалу заготовок проекта SALT приведен в табл. 2, в частности, к двулучепреломлению.

Таблица 2. Технические требования к заготовкам для главного зеркала телескопа SALT

Параметры	Значения
среднее значение ТКЛР, $\times 10^{-6}, \text{ K}^{-1}$	$0 \pm 0,15$
разница ТКЛР в толщине заготовки, $\times 10^{-6}, \text{ K}^{-1}$	$\leq 0,015$
среднее двулучепреломление, нм/см	< 3
максимальное двулучепреломление*, нм/см	< 10

Примечание. *Максимальное двулучепреломление измерялось на расстоянии 50 мм от края каждой из шести сторон заготовки сегмента.

Заготовки для проекта SALT (рис. 2) изготавливались в соответствии с техническими условиями на наличие пузырей и включений (табл. 3).

Изготовление шестигранных сегментов зеркала M_B проекта LAMOST

ОАО ЛЗСО произвело заготовки для пластины Шмидта M_A проекта *Large Sky Area Multi-Object Spectroscopic Telescope* (LAMOST) [4] из Астроситалла® и обработало готовые сегмен-

Таблица 3. Технические требования к включениям в заготовках проекта SALT

Требования к пузырям (включениям)	Предельные значения параметров пузырей (включений) со средним диаметром более 0,2 мм	
	критическая зона	некритическая зона
максимальная площадь пузырей (включений), мм ² /100 см ³	2	2
максимальный средний диаметр, мм	2	6
максимальное среднее количество пузырей (включений), шт/100 см ³	5	5

Таблица 4. Спецификация сегментов зеркала M_B

Параметры	Характеристики, значения
материал	<i>Zerodur</i> [®]
количество зеркал, шт	40
форма	гексагональная
поверхность	вогнутая сфера
размер по диагонали, мм	1100
толщина, мм	75 ± 0,25
радиус кривизны, мм	40 000 ± 40
СКО формы поверхности, нм	< 20
размах ошибок, нм	< 150
отклонение радиусов сегментов (от зеркала сравнения), мм	< 1,5

ты зеркала M_B , изготовленные из материала *Zerodur*[®] фирмы SCHOTT. Телескоп является специальной отражающей системой Шмидта [6, 7], состоящей из двух крупногабаритных сегментных зеркал – пластины Шмидта M_A и сферического главного зеркала M_B . Размеры M_A – около 5,7×4,4 м, оно содержит 24 шестигранных сегмента зеркала [6]. Размеры M_B – около 6,7×6 м, оно состоит из 37 шестигранных сегментов [7]. Спецификация сегментов зеркала M_B проекта LAMOST представлена в табл. 4.

Технологический процесс обработки заготовок, которые поступали с фирмы SCHOTT, включал в себя получение окончательных геометрических параметров заготовки (рис. 2), шлифование задней базовой поверхности, фрезерование пазов, фасок, изготовление центрального глухого отверстия.

Затем выполнялась процедура приклеивания инваровых элементов системы разгрузки сегмента (рис. 2в), которая используется во всех крупных астрономических проектах. Системы разгрузки современных астрономических зеркал, как правило, включают инваровые элементы, которые приклеиваются к

боковой и тыльной поверхностям специальными клеями. Инвар, или суперинвар, имеет низкий ТКЛР, поэтому его используют в качестве промежуточного элемента, или интерфейса, между зеркалом и системой разгрузки.

После окончательной полимеризации клея деталь устанавливалась на станок для шлифования и полирования рабочей поверхности зеркала. Полирование поверхностей сегментов выполняется в термостатированном помещении с температурой 22 ± 1 °С. Важная особенность этого процесса – необходимость получения формы поверхности с ошибкой на краю сегмента (срывы или резкие подъемы) в пределах допуска на размах ошибки, поскольку каждый сегмент является частью целого зеркала. Для финишной доводки деталей использовалась автоматизированная технология обработки на станках серии АД [2, 8, 9], которая была доработана и запущена в данном проекте.

После проведения сеанса обработки поверхности деталь устанавливается на мембранно-технологическую оправу в стенд контроля (рис. 2г).

Система разгрузки обеспечивает деформационные изменения формы поверхности зеркала в процессе технологического и аттестационного контроля в допустимых пределах, меньших по амплитуде, чем требуемый размах ошибок поверхности обрабатываемого зеркала. Разгрузочная оправа снабжена системой автоматической стабилизации положения зеркала на оправе при изменении внешних условий (атмосферного давления, влажности) во время контроля формы поверхности, что обеспечивает ее неизменное состояние с необходимой точностью.

В процессе контроля зеркало устанавливается на 18 опор. Были выполнены расчеты системы разгрузки зеркала с использованием модели зеркала M_B с реальными габаритными характеристиками (размеры, отверстия

и пазы). Модель разбита на 9453 элемента типа *Solid95*. Установка на 18 опор выполняется с усилием 81,3633 Н. Модель сегмента во избежание перемещения закрепляется в трех точках, совмещенных с опорами внутреннего круга. Реакция опор не более 0,02 Н. Полученная деформация волнового фронта (ВФ), выраженная в среднеквадратическом отклонении (СКО) составила 0,014λ (8,86 нм) и по размаху 0,076λ (48 нм), длина волны λ = 633 нм.

Основной сложностью при контроле формы сферической поверхности элементов составного зеркала является необходимость выдерживать допуск на отступление значений радиусов кривизны всех сегментов в пределах ±1,5 мм от контрольного образца при радиусе сегментов в 40 м. Проконтролировать выполнение заданных требований возможно лишь в вертикальной схеме Физо (рис. 3а). Применение этой схемы позволяет сократить трассу контроля до 10184 мм, а также контролировать поверхность сегмента относительно одной поверхности сравнения. Появление при этом дефокусировки более ±0,5λ будет свидетельствовать об отступлении размера радиуса более чем ±1,5 мм. Основным элементом схемы является линза Физо, одна из поверхностей которой имеет радиус кривизны 40 000 ± 20 мм и является поверхностью сравнения. Другая

поверхность линзы гиперболическая и служит для направления лучей гомоцентрического пучка по нормальям к контролируемой сферической поверхности. Контролируемый сегмент устанавливается под линзой Физо на строго фиксированном расстоянии для обеспечения требуемого допуска на разницу между радиусами кривизны сегментов в пределах < 1,5 мм.

Для реализации схемы разработан и изготовлен специальный стенд контроля (рис. 3в), который позволяет контролировать как сферическую поверхность линзы Физо, так и сферические элементы составного зеркала. Для контроля линзы было изготовлено эталонное сферическое зеркало из Астроситалла® СО-115М Ø1200 мм с радиусом кривизны 40 000 ± 7 мм. Его аттестация осуществлялась в специальном вертикальном стенде на базе вакуумной камеры высотой 70 м. Поскольку линза Физо имеет большой диаметр (1200 мм), ее изготовление – весьма непростая задача: необходимо изготовить эталонную выпуклую сферическую поверхность на одной стороне и выпуклую гиперболическую поверхность на другой. Интерферограмма линзы Физо, контролируемой со сферическим эталонным зеркалом, представлена на рис. 3б. СКО ВФ менее 0,05λ.

В процессе первоначальной эксплуатации линзы Физо выявилось, что эталонная фор-

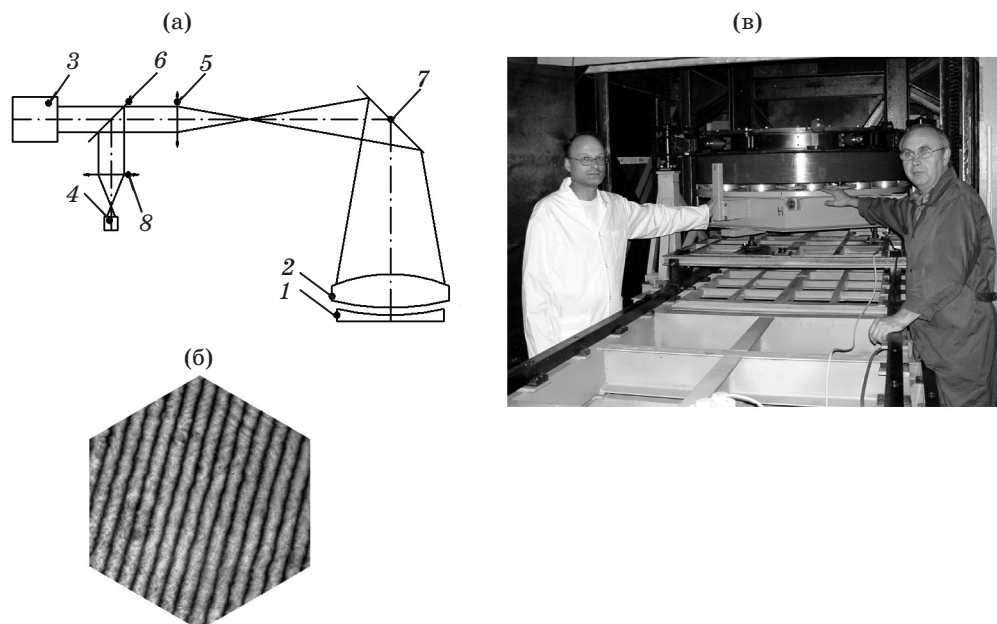


Рис. 3. Схема Физо для контроля элементов составного зеркала (а). 1 – контролируемое зеркало, 2 – линза Физо с эталонной поверхностью, 3 – интерферометр, 4 – камера ПЗС, 5, 6, 8 – элементы интерферометра, 7 – диагональное зеркало. Интерферограмма эталонной поверхности линзы Физо (б). Стенд контроля сферических сегментов с линзой Физо (в).

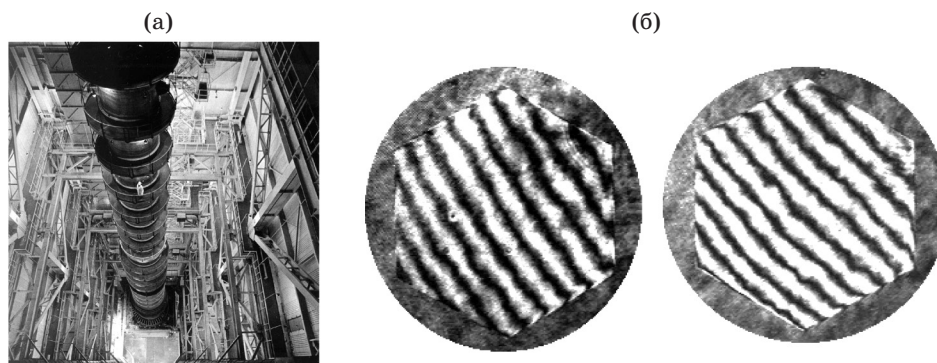


Рис. 4. Стенд прямого контроля первых сегментов в камере высотой 70 м; точка контроля на расстоянии 40 м от сегмента зеркала (а). Интерферограммы двух сегментов зеркала M_B , LAMOST.

ма ее поверхности непостоянна, поэтому была модернизирована система разгрузки линзы (с учетом термокомпенсации) для стабилизации формы ее ВФ.

Расхождения радиусов кривизны сегментов контролировались следующим образом. Для получения достоверной информации о форме поверхности сегмента из суммарного ВФ линзы Физо и сегмента вычитался ВФ линзы. Для проверки полученных результатов выполнялся прямой контроль поверхности сегментов в вертикальном контрольном стенде (рис. 4). На этом же рисунке приведены интерферо-

граммы двух сегментов зеркала M_B проекта LAMOST. СКО формы поверхности сегментов приведено в табл. 5.

Таблица 5. Результаты обработки сегментов

Измеряемые параметры	Требования спецификации	Полученные значения
СКО формы поверхности, нм	< 20	около 15–16
полный размах отклонений, нм	< 150	>140

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Rumyantsev V.V.* Non-traditional technologies to fabricate lightweighted astronomical mirrors with high stability of surface shape // Proc. SPIE. 1999. V. 3786. P. 468–473.
2. *Semenov A.P., Patrikeev V.E., Samuylov A.V., Sharov Y.A.* Computer-controlled fabrication of large-size ground and space-based optics from glass ceramic Sitall CO-115M // Proc. SPIE. 1999. V. 3786. P. 474–479.
3. *Meiring J.G., Buckley D.A.H., Lomberg M.C., Stobie R.S.* Southern African Large Telescope (SALT) Project: progress and status after two years // Proc. SPIE. 2002. V. 4837. P. 11–25.
4. *Hongjun Su, Xiangqun Cui.* LAMOST project and its current status // Proc. SPIE. 2002. V. 4837. P. 26–35.
5. *Ponin O.V., Sharov A.A., Galyavov I., Kompan T.A., Swiegers J., Swat A.* Demonstrating the suitability of Sitall for the SALT primary mirror // Proc. SPIE. 2002. V. 4837. P. 795–804.
6. *Xiangqun Cui, Yeping Li, Xiaoui Ni, Xiangqun Cui, Yeping Li, Xiaoyu Ni, Dehua Yang, Zhengqiu Yao, Guoping Li, Yuefei Wang.* Active support system of LAMOST reflecting Schmidt plate // Proc. SPIE. 2002. V. 4837. P. 628–636.
7. *Gong X., Cui X., Chen H., Ye X., Zhang R.* Design and analysis of support system of LAMOST primary mirror // Proc. SPIE. 2002. V. 4837. P. 667–674.
8. *Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Semenov A.P., Sharov Y.A.* Manufacturing of primary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 131–137.
9. *Semenov A.P., Abdulkadyrov M.A., Belousov S.P., Ignatov A.N., Patrikeev V.E., Pridnya V.V., Polyanchikov A.V., Rumyantsev V.V., Samuylov A.V., Sharov Y.A.* Manufacturing of secondary mirrors from Sitall CO-115M for European projects TTL, NOA and VST // Proc. SPIE. 2001. V. 4451. P. 138–144.