

## Метод изготовления облегченных оптических элементов.

77-30569/415359

# 04, апрель 2012

Сычев В. В.

УДК.520

Россия, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
[viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

### 1. Введение

Исследование качества изображения в 25-метровом телескопе с СГЗ из 1-метровых элементов показало, что реально достижимая точность их позиционирования удовлетворяет допустимой степени ухудшения качества изображения [1]. Сами оптические элементы составного главного зеркала должны быть максимально легкими и жесткими, т.к. они являются исполнительными элементами системы автоматического регулирования.

В настоящее время известно большое количество вариантов конструкций облегченных зеркал высокого качества. В крупногабаритном астрономическом телескопостроении наибольшее распространение получили два из них:

- тонкие пластины в сочетании с многоточечной, активно или пассивно управляемой разгрузкой;
- сотовые структуры, изготовленные различными методами – отливки, спекания, сваривания, с разгрузкой или без нее.

На основании исследования жесткостных свойств ферменных структур была предложена оригинальная конструкция оптического зеркала в виде двух пластин из оптического материала – лицевой и тыльной, которые неразъемно соединены между собой жесткой легкой ферменной структурой тетраэдрического типа.

В качестве материала стержней фермы могут использоваться металлы, углепластики, стеклопластики и т.п. [2]. Важно было подобрать материал фермы с коэффициентом линейного теплового расширения, максимально близким к КЛТР материала оптических пластин.

Геометрия ферменной структуры и ее отдельных элементов определяется требованиями к жесткости зеркала как в условиях его эксплуатации, так и в процессе изготовления.

В настоящее время идут работы по отработке технологии изготовления шестигранных зеркал с диаметром вписанной окружности 900 мм, толщиной 100 мм и весом не более 20 кг. Их предполагается использовать в качестве элементов составного главного зеркала диаметром 25 метров для проектируемого телескопа АСТ-25. С целью существенного (в 9 раз) увеличения жесткости зеркала и уменьшения его термодформаций была разработана новая схема несущей конструкции оптического элемента.

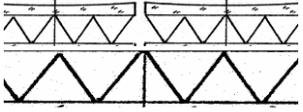
Для исследования деформаций конструкции зеркала под действием гравитационных (собственный вес), инерционных (перегрузки до 1 g) и тепловых нагрузок и ее оптимизации необходимо было решить следующие задачи:

- разработка общей математической модели расчета деформаций рабочей поверхности зеркала под действием перечисленных нагрузок,
- проведение сравнительного анализа жесткости вариантов пространственных регулярных стержневых конструкций,
- проведение расчетов деформаций конкретных вариантов конструктивных схем зеркала.

В качестве примера в таблице 1 приведены результаты расчетов деформаций предлагаемой конструкции трехслойного зеркала, расположенного горизонтально, опирающегося на три опорные точки и имеющего следующие параметры:

- диаметр зеркала – 900 мм,
- диаметр окружности, на которой расположены три опоры зеркала – 564 мм,
- минимальная толщина лицевой пластины (в центре) – 15 мм,
- радиус кривизны лицевой пластины – 30000 мм,
- толщина тыльной пластины – 80 мм,
- плотность материала пластин – 2,46 г/см<sup>3</sup>,
- КЛТР материала пластин: вариант 1 –  $5 \cdot 10^{-7}$  град<sup>-1</sup>, вариант 2 –  $3 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>,
- модуль упругости материала пластин: вариант 1 – 100000 кг/см<sup>2</sup>, вариант 2 – 870000 кг/см<sup>2</sup>,
- высота стержневой решетки – 40 мм,
- диаметр стержней – 3 мм,
- плотность материала стержней – 1,6 г/см<sup>3</sup>,
- КЛТР материала стержней –  $9 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>,
- модуль упругости материала стержней – 84000 кг/см<sup>2</sup>.

Таблица 1.

Конструктивная схема	Материал пластин	Вид нагрузки	Деформации [мкм]		
			max +	max -	средн экв.
	Вариант 1	Вес	0,000	- 0,079	0,021
		$\Delta t = 1^\circ\text{C}$	0,000	0,000	0,001
	Вариант 2	Вес	0,000	- 0,011	0,003
		$\Delta t = 1^\circ\text{C}$	0,000	0,000	0,001

### 3.Создание модели и расчет конструкции оптического элемента

Общий вид несущей конструкции ячейки зеркала показан на рис. 1. Конструкция представляет собой ферменную платформу, имеющую в плане форму правильного шестиугольника. Верхний и нижний решетчатые каркасы набраны из стержней, образуя ячейки в форме равностороннего треугольника, и соединены между собой стержнями той же длины, образуя тетраэдры. К нижнему каркасу прикреплена шестиугольная пластина. К верхнему каркасу прикреплена пластина из стекла (собственно зеркало). Нижний каркас через жесткое опорное кольцо закреплен в трех точках.

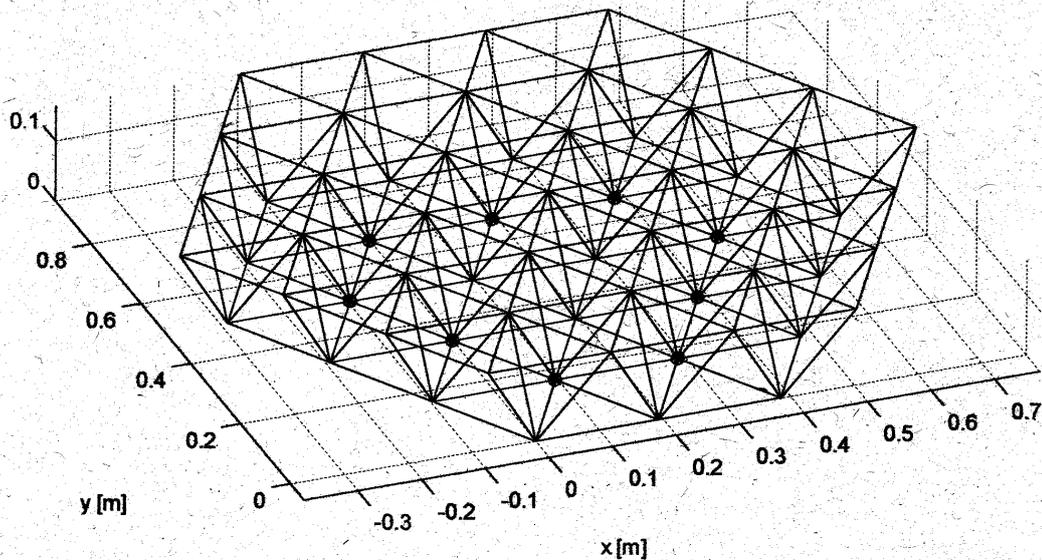


Рис. 1. Общий вид несущей конструкции ячейки зеркала

В качестве нагрузки выступает вес элементов конструкции и тепловое воздействие.

Определяющим требованием к работоспособности конструкции является высокая жесткость, обеспечивающая минимальные нормальные прогибы верхней пластины.

Сравнительно малое число стержней в каркасах и соединительном слое не позволяет использовать континуальную модель многослойной пластины для всей ячейки зеркала. По этой причине были выбраны две расчетные схемы.

В основу первой расчетной схемы (схема А) положена пространственная стержневая ферма. К узлам нижнего и верхнего слоев прикреплены мембранные пластины, работающие только на растяжение - сжатие и сдвиг в своих плоскостях.

Вторая расчетная схема (схема Б) описывает изгиб верхней многослойной пластины (углепластиковое основание и слой стекла) в пределах отдельной треугольной ячейки. Причем, рассмотрена как внутренняя ячейка, опирающаяся по трем сторонам, так и крайние ячейки, имеющие опирание только по двум сторонам.

Для каждой из расчетных схем выполнялось два расчета, в результате которых определялись вертикальные (нормальные к поверхности зеркала) перемещения:

- 1) - нагружение конструкции только собственным весом;
- 2) - только тепловое воздействие при  $\Delta T=10^\circ$ .

Расчет на общий изгиб ферменной платформы с прикрепленными пластинами выполнялся на основе метода конечных элементов (МКЭ) [3]. Отдельный стержень был представлен отдельным пространственным стержневым конечным элементом. Весь решетчатый каркас был набран из 234 стержневых конечных элементов. Верхняя и нижняя пластина были набраны треугольными многослойными мембранными конечными элементами, в пределах отдельной треугольной ячейки использовался один конечный элемент. Таким образом, для нижней пластины понадобилось 37 конечных элементов, а для верхней - 54. Суммарное количество узлов - 64. Общее количество узловых перемещений 192. В узлах 5, 9, 14, 20, 21, 22, 176, 11 были запрещены все перемещения.

Первый расчет на общий изгиб ферменной платформы с прикрепленными пластинами выполнялся при действии нагрузки от собственного веса. Из расчета видно, что верхняя пластина принимает форму выпукло - вогнутого купола. Наибольшие по абсолютной

величине прогиба наблюдаются на краях пластины и составляют 0,8 мкм. Прогиб центральной части около 0,4 мкм.

Второй расчет на общий изгиб ферменной платформы с прикрепленными пластинами выполнялся на тепловое воздействие без учета нагрузки от собственного веса. Перепад температуры  $\Delta T$  принимался равным  $10^\circ$ . Общий вид деформированного состояния верхней пластины показан на рис. 2; на рис. 3 цветные изолинии нормального перемещения. Из рисунков, построенных по результатам расчета, видно, что верхняя пластина принимает форму вогнутого купола. При отрицательном перепаде температуры верхняя пластина примет форму выпуклого купола и прогибы на краях пластины будут отрицательны. Наибольшее нормальное перемещение имеет место на краях пластины, достигая 12 мкм. Такая форма деформирования объясняется тем, что КЛТР нижней пластины больше приведенного КЛТР верхней пластины. При нагреве нижняя пластина в большей степени увеличивает свои размеры, чем верхняя. Следует отметить, что прогибы от температурных деформаций на порядок больше прогибов от действия собственного веса.

#### 4. Результаты расчетов.

По результатам расчета была проведена оценка среднеквадратичного отклонения СКО для прогиба. Поскольку площади треугольных элементов одинаковы, то вычисления среднеквадратичных отклонений были проведены по формуле:

$$СКО = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{w} - w_i)^2} ; \quad СКО_1 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\bar{w} - w_i)^2} , \quad (1)$$

где:  $\bar{w} = \sum_{i=1}^n w_i / n$  - среднее значение прогиба верхней пластины,

$w_i$  - среднее значение прогиба в одном конечном мембранном элементе,

$n = 54$  - число конечных элементов в верхней пластине.

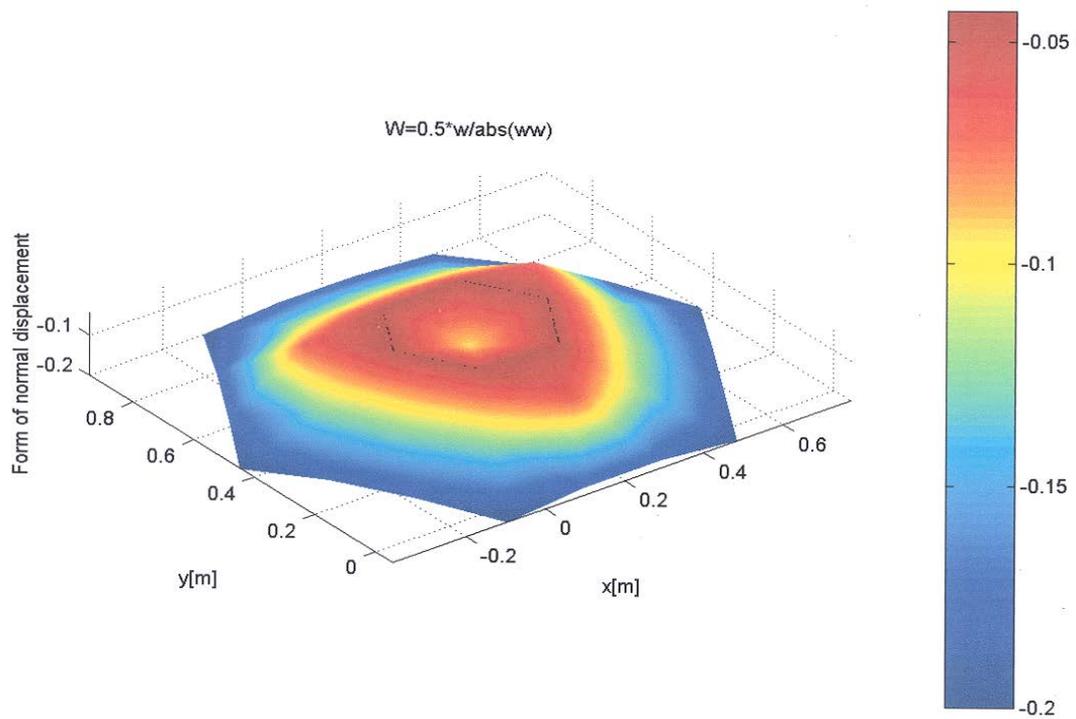


Рис. 2. Деформированная поверхность верхней пластины при действии нагрузки от собственного веса

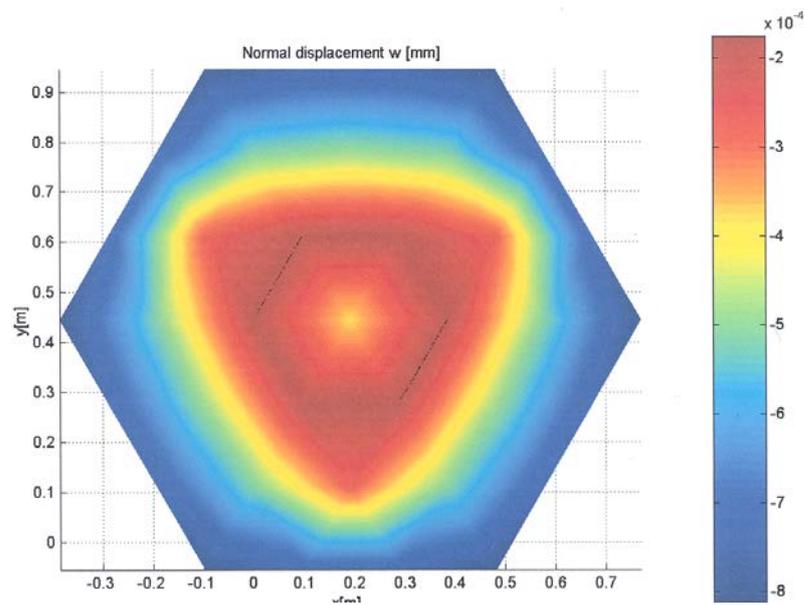


Рис. 3. Изолинии нормального перемещения поверхности верхней пластины при действии нагрузки от собственного веса

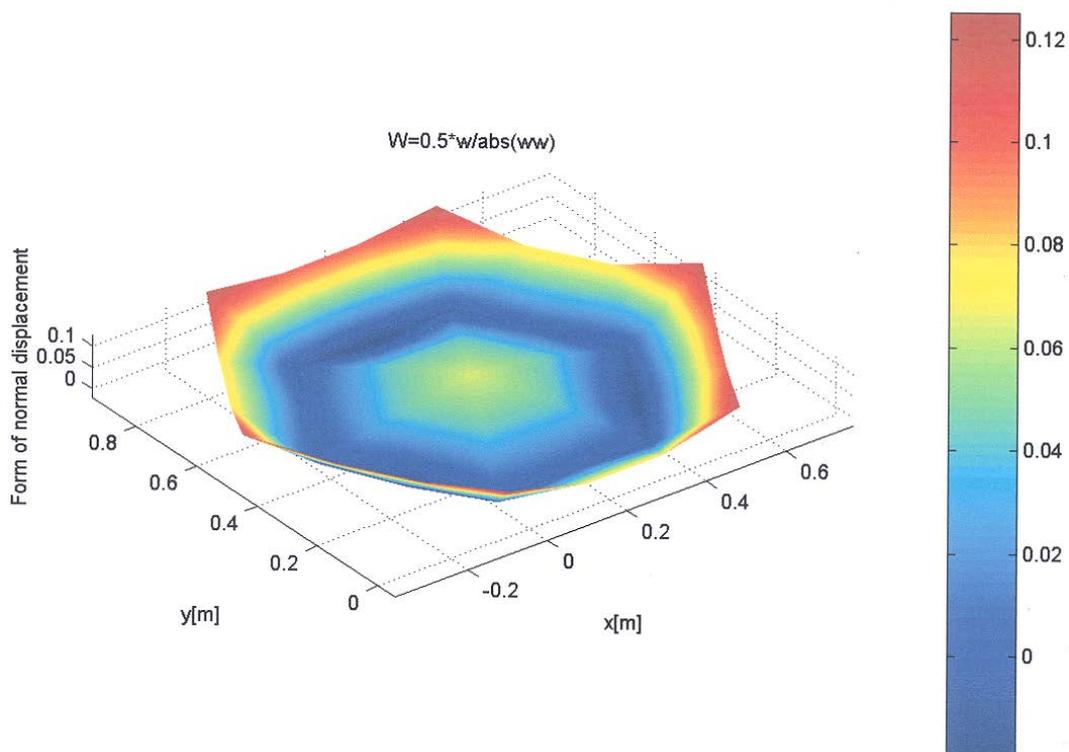


Рис. 4. Деформированная поверхность верхней пластины при тепловом воздействии

Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2.

Расчетные значения перемещений верхней многослойной пластины

( $w$ - наибольший или наименьший прогиб) Тип нагружения	$w$ [мкм]	СКО [мкм]	СКО <sub>1</sub> [мкм]
Собственный вес	-0,812	0,172	0,174
Изменение температуры	12,1	2,26	2,28

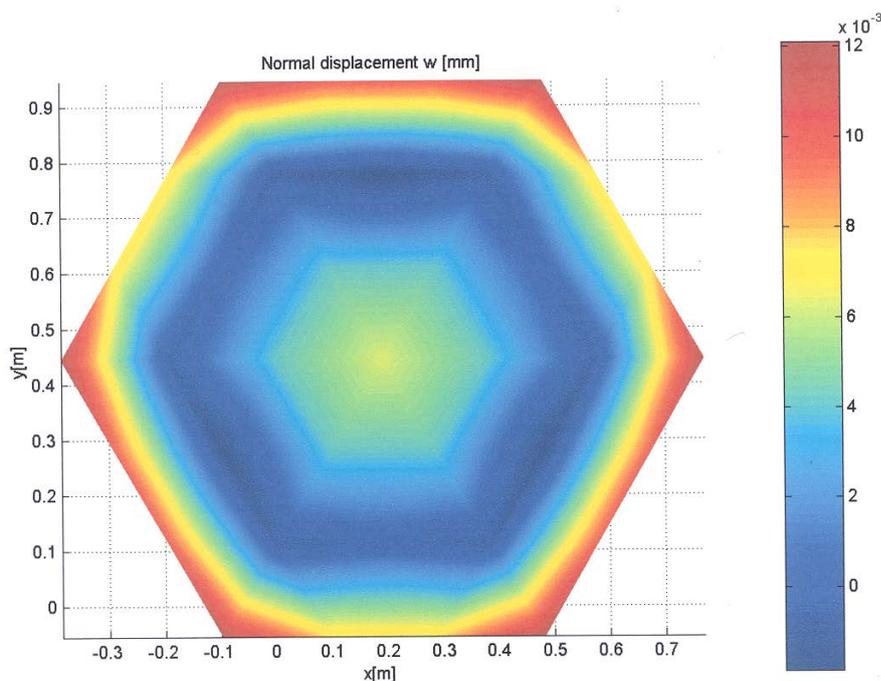


Рис. 5. Изолинии нормального перемещения поверхности верхней пластины при тепловом воздействии

С целью выявления влияния толщины нижней пластины на деформации верхней пластины был проведен параметрический анализ.

Результаты анализа при нагружении собственным весом представлены на рис. 6 в виде графика зависимости СКО от толщины нижней пластины.

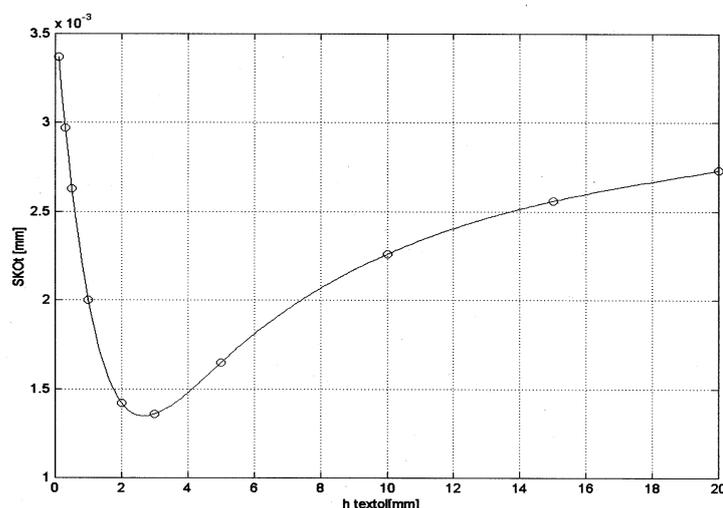


Рис. 6. Зависимость среднего квадратичного отклонения от толщины нижней пластины при действии весовой нагрузки.

Из графика видно, что эта зависимость имеет минимум при толщине пластины  $h_* \approx 3$  мм. При толщине нижней пластины  $h < h_*$  ей "не хватает" мембранной жесткости для обеспечения общей изгибной жесткости решетчатой платформы. При  $h > h_*$  увеличивается

весовая нагрузка и для обеспечения общей изгибной жесткости платформы уже не хватает мембранной жесткости верхней пластины.

Результаты анализа при температурном воздействии представлены на рис. 5. Здесь также имеет место минимум при толщине пластины  $h_* \approx 3 \text{ мм}$ .

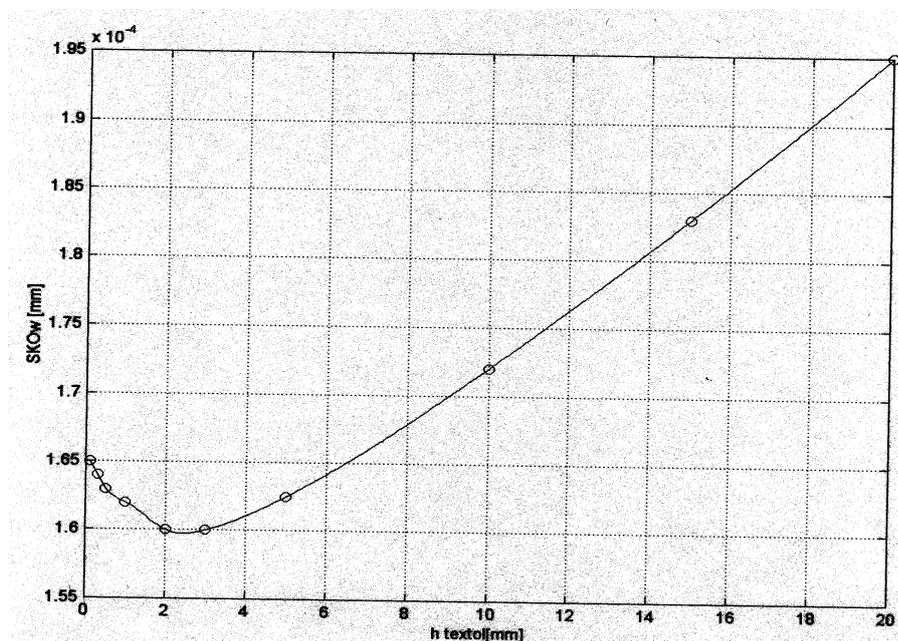


Рис. 7. Зависимость среднего квадратичного отклонения от толщины нижней пластины при тепловом воздействии.

## 5. Пример методики по изготовлению облегченного зеркала

В данной методике описывается процесс изготовления облегченного 3-х слойного зеркала с рамной пространственной конструкцией подложек.

1. Соединение деталей в процессе сборки облегченного зеркала должно быть неразъемным, что возможно осуществить, например, с помощью склеивания специальным клеем или при помощи диффузной сварки, позволяющей использование изделия в более неблагоприятных условиях эксплуатации.

2. Для сборки зеркала используется комплект специальной технологической оснастки, включающий:

- сборочный стапель (кондуктор), фиксирующий пространственное положение контрольных точек конструкции изделия, состоящий из плоских пластин с отверстиями.
- набор соединительных узлов, предназначенных для удержания верхних концов стержней заготовки зеркала в проектном положении в процессе сборки;
- набор фиксирующих держателей и прижимов для фиксации концов стержней заготовки зеркала в проектном положении в процессе сборки;
- набор грузов, предназначенных для создания требуемого прижимного усилия при приклеивании.

Основные технические требования к деталям и узлам.

1. Точность геометрических размеров заготовки и взаимного расположения составляющих ее элементов: это, прежде всего, расстояние между узлами и слоями, их

параллельность, «геометрию» взаимного расположения узлов пространственных структур в каждом из слоев и взаимного расположения этих слоев.

2. Отсутствие внутренних напряжений в собранной заготовке.

3. Максимальную прочность клеевых узлов и соединений.

Перед сборкой все детали необходимо обезжирить в два этапа: сначала тщательно промыть в нефрасе (бензине) и сушить при комнатной температуре 10-15 минут, затем обезжирить ацетоном и сушить при комнатной температуре 15-20 минут.

Работы по сборке нужно проводить в надетых на руки резиновых или хлопчатобумажных перчатках, а также закрыв рот и нос марлево-тканевой повязкой.

Сборка первой подложки. Это силовой слой, представляющий собой рамную структуру из сочлененных трехгранных пирамид, ребра которых являются стержнями, а углы пирамиды – узлы, соединяющие стержни.

1. Закрепить узлы на оснастке винтами в контрольных точках стапеля.

2. Вставить стержни в закрепленные узлы и склеить.

3. Повторить ту же операцию для верхней пластины.

4. Произвести монтаж наклонных стержней в соответствии с чертежом.

5. После склеивания выдержать в течение суток при комнатной температуре для полного закрепления деталей.

Сборка второй подложки. Это разгрузочный слой, в котором размер ячейки составляет  $\frac{1}{3}$  от силовой.

Повторить действия 1.1 – 1.5 в соответствии с чертежом разгрузочной подложки.

Соединение слоев с рамной пространственной структурой. Освободить подложки от оснастки (снять со стапеля).

1. Произвести шлифовку плоскостей, предназначенных для неразъемного соединения первой и второй подложек.

2. Соединить подложки и склеить.

3. Выдержать в течение суток при комнатной температуре под грузом для полного закрепления деталей.

Изготовление третьего (рабочего) слоя – стеклянной заготовки зеркала производится по чертежу.

Изготовление заготовки облегченного зеркала.

1. Произвести шлифовку плоскости двуслойной конструкции для неразъемного соединения с третьим слоем – стеклянной подложкой.

2. Приклеивание последнего слоя путем наложения двуслойной конструкции на заднюю поверхность стеклянной подложки.

3. Выдержать в течение суток при комнатной температуре под грузом для полного закрепления сборки.

Оптическая обработка облегченного зеркала.

1. Вклеить приспособление для шарнира шлифовально-полировального станка.

2. Произвести шлифовку рабочей поверхности зеркала.

3. Произвести полировку рабочей поверхности зеркала.

Промывка и покраска задней части облегченного зеркала аэрозольным черным лаком.



Рис. 8. Облегченное плоское зеркало АИЖЮ Э1902.130СБ



Рис. 9. Снятие готового зеркала после вакуумного напыления отражающего покрытия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сычев В.В. Адаптивные оптические системы в крупногабаритном телескопостроении. Монография. Изд-во «Тонкие наукоемкие технологии», Старый Оскол, 2005г. С. 464.
2. Максutow Д.Д. «Астрономическая оптика», Л., «Наука», 1979. 391 с.
3. В.В.Сычев, Р.К.Вафин, А.А.Ширшов, М.П.Сахарова. Арматурный каркас. Патент № 2331743 от 19.07.2007г, зарегистрирован в Государственном реестре 27 ноября 2007 г.
4. Васильев С.А., Касперский В.Б., Стешенко Н.В., Сычев В.В., Тузов В.Г., Журавель В.П. Облегченное зеркало и способ его изготовления. Патент SU N 01811620. Бюллетень изобретений N 15 за 1993 год.

## Method of manufacturing of the lightened optical elements.

77-30569/415359

# 04, April 2012

Sychev V.V.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

[viktorsychev@list.ru](mailto:viktorsychev@list.ru)

Main mirror is the most complex and expensive part of the contemporary telescope. Its surface must keep its form with accuracy up to small fractions of wavelength with any working inclinations of mirror in entire working temperature range. In this case it must be maximally facilitated in order to ensure acceptable requirements for the framework of telescope. Today, perhaps, there is no doubt that composite mirrors only will be used as the main mirrors of telescopes of the fifth generation; their mutual attitude of separate elements during the work will be continuously corrected for the purpose of the maintenance of the assigned form and for the purpose of the adaptive compensation for the distortions of the wave front of the emission formed with telescope. In this article the original method of manufacturing of the lightened optical elements was proposed. It was shown on the basis of calculations and experimental data that the errors in the production of optical elements were found within the permissible limits. An example of the procedure of the production of the lightened mirror was given.

---

**Publications with keywords:** [the lightened optical mirrors \(segments\)](#), [adaptive compensation](#), [the main mirror of telescope](#)

**Publications with words:** [the lightened optical mirrors \(segments\)](#), [adaptive compensation](#), [the main mirror of telescope](#)

---

### References

1. Sychev V.V. *Adaptivnye opticheskie sistemy v krupnogabaritnom teleskopostroenii* [Adaptive optical systems in a large telescope building]. Staryi Oskol, Tonkie naukoemkie tekhnologii Publ., 2005. 464 p.
2. Maksutov D.D. *Astronomicheskaja optika* [Astronomical optics]. Leningrad, Nauka, 1979. 391 p.
3. Sychev V.V., Vafin R.K., Shirshov A.A., Sakharova M.P. *Armaturnyi karkas* [Reinforcement cage]. Patent RF no. 2331743, 2007.
4. Vasil'ev S.A., Kasperskii V.B., Steshenko N.V., Sychev V.V., Tuzov V.G., Zhuravel' V.P. *Oblegchennoe zerkalo i sposob ego izgotovleniia* [Lightweight mirror and method of its manufacture]. Patent SU no. 01811620, 1993.