

НОВЫЙ СПОСОБ КРЕПЛЕНИЯ АСТРОНОМИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛ С ОТВЕРСТИЕМ В ЦЕНТРЕ

© 2008 г. Ю. А. Клевцов, канд. техн. наук

ПО “Новосибирский приборостроительный завод”, г. Новосибирск

E-mail: Klevtsov_yuri@mail.ru

Предлагается способ крепления астрономических зеркал с отверстием в центре, состоящий в том, что зеркало приклеивается ободом центрального отверстия к опорным площадкам упругих лепестков разрезной втулки, которая служит средством разгрузки зеркала от собственного веса, а также является компенсатором термических деформаций зеркала. Соединение разрезной втулки с элементами ее крепления в телескопе производится через прокладные кольца с опорными площадками, упирающимися в крепежный буртик разрезной втулки напротив друг друга, что позволяет избавиться от деформаций поверхности зеркала, вызываемых усилием зажима колец.

Коды OCIS: 350.1260, 230.4040.

Поступила в редакцию 21.12.2007.

В сложных зеркальных и зеркально-линзовых телескопах требования к центрировке главного зеркала, как правило, жесткие. В телескопах Ричи–Кретьена и телескопах автора с менисковым корректором [1] допустимая децентрировка главного зеркала может составлять 0,05–0,2 мм. Для телескопов с диаметром действующего отверстия 150–400 мм указанное значение сопоставимо с термическим зазором между зеркалом и оправой. Чтобы при наблюдениях в условиях смены температуры и после транспортировки инструмента избежать потери качества изображения из-за деформаций поверхности и перемещения зеркала в оправе, ее снабжают разгрузочными устройствами и термическими компенсаторами, которые ограничивают перемещение и не допускают искажения формы поверхности зеркала при любых положениях телескопа и перепадах температуры [2]. Основными недостатками такой стандартной оправы являются конструктивная сложность, большие габариты и масса, вследствие чего ее применение в серийных телескопах в настоящее время ограничено.

Оригинальный и технологически простой способ крепления главного четырехметрового зеркала телескопа Кассегрена разработан на заводе астрономических приборов в Нанкине (КНР) [3]. В этом проекте зеркало устанавливается центральным отверстием на втулку-отсекатель паразитного света. При таком способе крепления главного зеркала оправы не нужна, что упрощает конструкцию трубы телескопа, уменьшает ее габариты и массу, а также сокращает время термической отстойки инструмента. Большим преимуществом данного способа крепления зеркала является возможность уменьшения его толщины и веса.

Похожий способ крепления мы с успехом применяем для зеркал серийных любительских телескопов с диаметром действующего отверстия 150–250 мм, однако, в отличие от [3], зеркала жестко блокируются нами при помощи клея на втулке-отсекателе паразитного света [4].

В монографии [5] исследован изгиб нагруженной плоскопараллельной пластинки, жестко защемленной по ободу центрального отверстия. Анализ приведенных в этой работе данных позволяет утверждать, что для зеркал с отверстием в центре $1/4$ – $1/3$ внешнего диаметра выигрыш в минимальной толщине зеркала относительно широко применяемой в телескопах системы разгрузки на 6 точек [2] составляет 1,4–1,7 раза. Кроме того, прогиб зеркала, направленного в зенит, в отличие от случая, рассмотренного в [2], радиально симметричен, поэтому существует возможность рассчитать форму тыльной стороны зеркала таким образом, чтобы его прогибы качественно не изменяли форму рабочей поверхности [3].

При разработке опытных образцов телескопов диаметром 150–250 мм с менисковым корректором, имеющих относительное отверстие $f/10$ – $f/8$, мы столкнулись с дилеммой. С одной стороны, чтобы выполнить допуски на центрировку зеркала $\pm(0,1-0,2)$ мм, необходимо жестко ограничить его перемещение. С другой стороны, при перемене температуры в жестко заблокированном зеркале не должно возникать вредных напряжений, способных испортить форму его поверхности.

Выход из сложившейся ситуации был найден в том, что главное зеркало приклеивается ободом центрального отверстия к опорным площадкам упругих лепестков разрезной втулки, которая по мере поли-

меризации клея берет на себя как функцию элемента разгрузки зеркала от собственного веса, так и функцию термического компенсатора при перепадах температуры [4]. При этом, однако, возникает еще одна проблема: как закрепить в телескопе саму втулку, на которой приклеено главное зеркало? Очевидно, что усилия, возникающие при соединении разрезной втулки с элементами ее крепления в телескопе, способны передаваться упругим лепесткам и приклеенному к ним зеркалу. Забегая вперед, укажем, что и эта проблема также была решена [6, 7].

На рис. 1 показаны конструктивное устройство и элементы юстировки узла крепления астрономического зеркала с центральным отверстием, реализующие принципы патентов [4, 7]. Основным элементом крепления зеркала 1 служит разрезная втулка 2, которая площадками упругих лепестков жестко приклеена к ободу центрального отверстия в зеркале, при этом ось втулки перпендикулярна базовой плоскости опорной площадки тыльной стороны зеркала, а центр кривизны зеркала лежит на оси втулки. Для повышения упругости лепестков разрезная втулка выполнена из углеродистой стали с последующей термообработкой. На окончательной стадии изготовления втулки лепестки разрезаются, а их опорные площадки шлифуются. Между втулкой и центральным отверстием зеркала под слой клея оставляется зазор не более 0,05 мм. При боль-

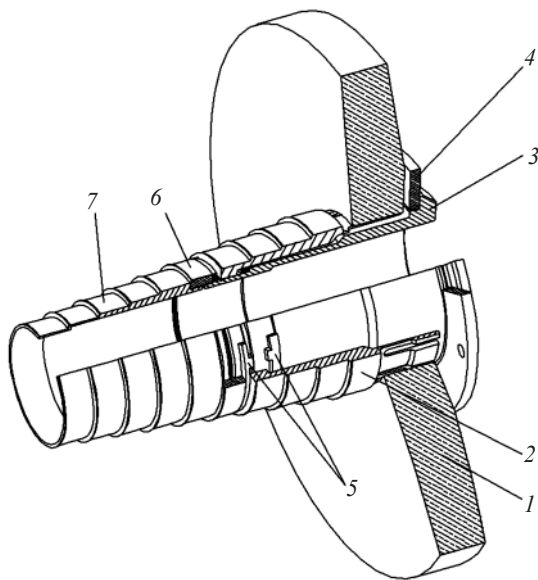


Рис. 1. Узел крепления астрономических зеркал с отверстием в центре. 1 – главное зеркало, 2 – разрезная втулка, 3 – втулка сферического шарнира, 4 – стопорное кольцо, 5 – прокладные кольца, 6 – резьбовое кольцо, 7 – втулка-отсекатель паразитного света.

шом числе упругих лепестков и малых промежутках между ними после полимеризации клея такая разрезная втулка по жесткости практически эквивалентна сплошной и может взять на себя функцию разгрузки зеркала от собственного веса. Кроме того, такая втулка, соединенная особым образом с элементами крепления и юстировки, в состоянии стабильно удерживать зеркало от каких-либо перемещений как в процессе работы телескопа, так и при его транспортировке. Упругие лепестки разрезной втулки выполняют важную роль компенсатора радиальных усилий, действующих на зеркало, как при усадке клея в процессе его полимеризации, так и при изменении температуры окружающей среды, т. е. выполняют функцию термического компенсатора.

Чтобы упругие лепестки разрезной втулки сами не оказали вредного воздействия на форму поверхности зеркала, они не должны быть излишне жесткими: между числом лепестков, их длиной и толщиной их опасного сечения должны выполняться определенные соотношения, которые, кроме того, связаны со свойствами клея и потому окончательно устанавливаются опытным путем. Максимальная площадь опорной площадки лепестка, а следовательно, их количество, зависит от материала зеркала и втулки, а также от степени усадки клея и толщины зеркала в месте центрального отверстия. Опытным путем установлено, что усадка клея не должна превышать 2–3%. Для зеркал из астроситалла или стекла ЛК7 ($\alpha_t = 0-40 \times 10^{-7}$ град $^{-1}$) с толщиной обода центрального отверстия 20–25 мм площадь опорной площадки лепестка стальной втулки не должна превышать 1–1,5 см 2 . Толщина опасного сечения лепестка для зеркал диаметром 150–250 мм не должна быть больше 0,75–1,25 мм.

Поскольку зеркало должно работать в широких интервалах температур без разрушения слоя клея, желательно использовать термостойкие клеи, не разрушающиеся при температуре до -60 °С.

Изменение формы поверхности зеркала являлось практическим критерием контроля устройства рис. 1 на всех этапах его разработки – от выбора параметров разрезной втулки и марки клея, до разработки конструкции крепления зеркала в телескопе. Интерферометрические испытания главных сферических зеркал серийных телескопов ТАЛ-200К и ТАЛ-250К, заблокированных в устройстве крепления рис. 1, позволили установить оптимальные сочетания параметров разрезной втулки, включая ее термообработку, и выбрать подходящие марки клея. Испытания проводились с помощью цифрового интерферометра по схеме Физо, устанавливаемого в центре кривизны зеркал.

В качестве примера выбора параметров разрезной втулки и для наглядной демонстрации преимуществ данного способа крепления зеркал приведем данные интерферометрических испытаний главного сферического зеркала телескопа ТАЛ-200К, в центральное отверстие которого вклеена разрезная втулка. Зеркало изготовлено из астроситалла марки СО115М и имеет внешний диаметр 206 мм. Толщина по ободу центрального отверстия 20 мм, диаметр отверстия 62 мм, среднеквадратическое отклонение формы поверхности зеркала от ближайшей сферы $RMS = 0,03\lambda$ ($\lambda = 632,8$ нм). Разрезная втулка выполнена из углеродистой стали и закалена. Для блокировки зеркала применяли клей на основе эпоксидной смолы, выдерживающий без разрушения температуру до -35 °С и имеющий степень усадки 2%. Количество лепестков разрезной втулки 10, зазор между лепестками и ободом центрального отверстия не превышал 0,05 мм. После полимеризации клея интерферометрический контроль показал незначительную разницу в форме поверхности исходного и заблокированного зеркал. Среднеквадратическое отклонение формы поверхности зеркала с вклеенной в него разрезной втулкой от ближайшей сферы сравнения $RMS = 0,04\lambda$. Это свидетельствует о том, что после усадки клея форма поверхности зеркала практически не изменилась, что подтверждает действенность предлагаемого способа блокировки зеркал. На рис. 2 приведены интерферограммы этого зеркала с вклеенной в него разрезной втулкой. Во втулку заложена предварительно подогретая в кипятке 300-граммовая гиря от разновеса. Таким образом, создан локальный перепад температуры в центре зеркала порядка 40–60 °С. Интерферограммы, показанные на рис. 2, сняты через несколько минут после стабилизации теплового потока воздуха от центра зеркала. Хорошо видно, что форма поверхности зеркала осталась практически идеальной, без каких-либо признаков астигматизма, который мог быть вызван пережатием центра зеркала при изменении температуры. Поток теплого воздуха впереди зеркала хорошо виден на всех интерферограммах рис. 2 и не имеет отношения к форме поверхности зеркала.

Таким образом, вклеенная в центральное отверстие зеркала разрезная втулка с упругими лепестками оказалась в состоянии компенсировать такой, явно большой и нереальный в условиях эксплуатации локальный перепад температуры в паре астроситалл ($\Delta\alpha_r = 110 \times 10^{-7}$ град $^{-1}$). Из этого экспериментально подтвержденного факта можно сделать следующие выводы.

Во-первых, сравнительно небольшие плавные колебания температуры, имеющие место в реаль-

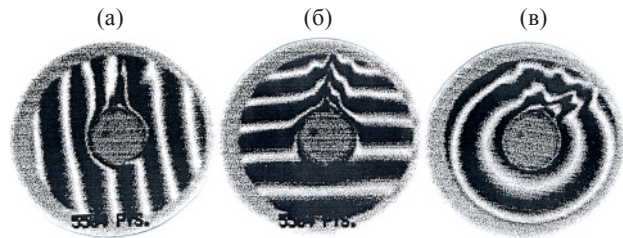


Рис. 2. Интерферограммы 206 мм-сферического зеркала телескопа ТАЛ-200К с вклеенной в центральное отверстие разрезной втулкой после локального термического удара в центре зеркала.

ных условиях наблюдений, никак не должны отражаться на форме поверхности зеркала.

Во-вторых, время термической отстойки телескопов, зеркала которых выполнены из астроситалла и закреплены по предлагаемому способу, должно оказаться в разы меньше времени термической отстойки телескопов, зеркала которых закреплены обычным способом [2].

В астрономической оптике предлагаемое крепление зеркала позволит полностью использовать возможности астроситалла как материала с коэффициентом линейного расширения, близким к нулю, независимо от свойств сопрягаемого с ним материала.

Как было сказано выше, при креплении в телескопе приклеенного к разрезной втулке зеркала возникают проблемы, связанные с деформациями самой втулки (при соединении ее с элементами крепления), способными передаваться упругим лепесткам, а через них зеркалу. Для уменьшения деформаций втулки 2 ее цилиндрическая часть удлиняется (см. рис. 1). Внешняя ее часть служит отсекателем паразитного света в телескопе. Конец сплошной части снабжается упорным буртиком, обе стороны которого должны быть тщательно шлифованы. Разрезная втулка 2 соединяется упорным буртиком с втулкой выпуклого сферического шарнира 3, служащего для юстировки зеркала в телескопе. Соединение производится через прокладные кольца 5 с помощью резьбового кольца 6. Каждое прокладное кольцо снабжено тремя радиально-симметричными выступами, которые при сборке устройства рис. 1 последовательно устанавливаются напротив друг друга упорными площадками и фиксируются на втулке 3 стопорными винтами (на рис. 1 не показаны). После этого производится затяжка резьбового кольца 6. Затем на втулку 3 ставится внешняя часть трубки отсекателя паразитного света 7, после чего собранный блок устанавливается в вогнутый сферический шарнир заднего фланца тру-

бы телескопа, центр кривизны которого совпадает с центром зеркала.

Исследование качества изображения телескопа после воздействия на него динамической нагрузки, возникающей при транспортировке, показало, что при ширине опорных площадок прокладных колец 8–10 мм для зеркала с внешним диаметром 200–250 мм необходимое усилие затяжки резьбового кольца 6 составляет 3–5 кгс м.

Приложенное к буртику разрезной втулки 2 усилие затяжки резьбового соединения элементов 3 и 6 распределяется в пределах опорных площадок прокладных колец 5 тем равномернее, чем точнее они, а также чем точнее обработаны стороны упорного буртика разрезной втулки 2 и чем выше чистота обработки. Поскольку прокладные кольца 5 установлены опорными площадками напротив друг друга, то реакции опоры, действующие на буртик втулки 2, будут распределены в пределах опорных площадок колец и приложены к буртику примерно в тех же местах, что и действующие на него усилия сжатия. Поэтому они не вызывают изгибающих моментов, которые могли бы привести к деформации упорного буртика разрезной втулки 2, а следовательно, и зеркала 1. Однако опорные площадки колец обладают конечными размерами и для полного исключения остаточных деформаций поверхности зеркала от неравномерного распределения усилия затяжки резьбового соединения в местах касания опорных площадок прокладных колец с буртиком разрезной втулки необходимы высокая чистота обработки и подгонка по толщине опорных площадок прокладных колец и буртика.

Поворот зеркала в сферическом шарнире устройства рис. 1 вокруг его центра в процессе юстировки телескопа производится с помощью болтов, пропущенных через задний фланец трубы телескопа в стопорное кольцо 4. Окончательная затяжка этих болтов производится в процессе юстировки телескопа.

В качестве подтверждения работоспособности описанной выше системы крепления зеркала приведем (см. рис. 3) результаты интерферометрического контроля двух главных сферических зеркал серийного телескопа ТАЛ-250К ($f/8,5$). Зеркала выполнены из стекла ЛК7 и имеют внешний диаметр 256 мм. Диаметр центрального отверстия 80 мм, толщина обода центрального отверстия 25 мм, число лепестков разрезной втулки 15. Блокировку разрезной втулки в отверстиях зеркал производили клеем на основе эпоксидной смолы, модифицированной искусственным каучуком. В качестве наполнителя использовали двуокись титана. Испытания показали, что такая композиция не меняет свои

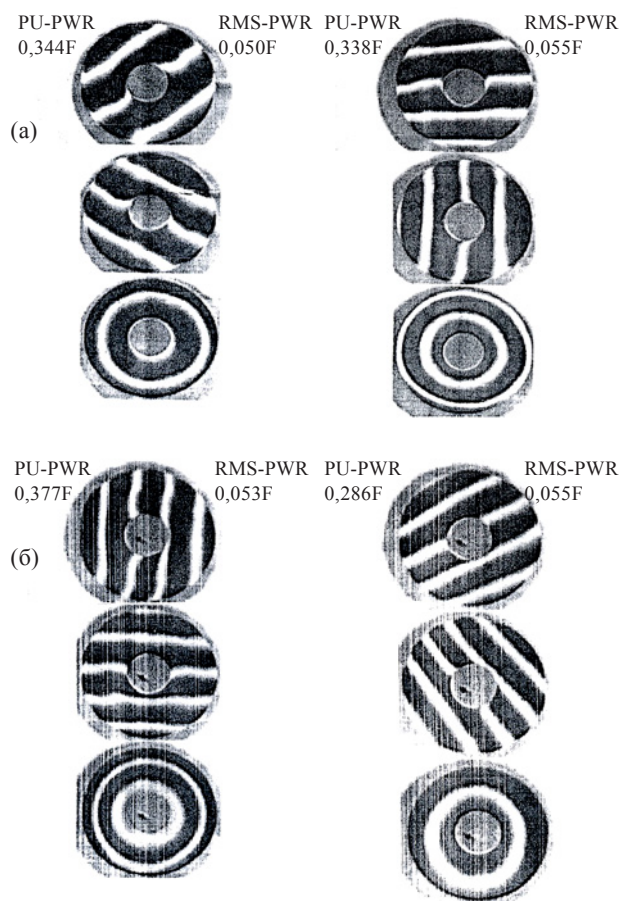


Рис. 3. Интерферограммы 256 мм-сферических зеркал, заблокированных в сферическом шарнире заднего фланца трубы телескопа ТАЛ-250К. а – интерферограммы исходных зеркал, б – интерферограммы заблокированных зеркал.

прочностные характеристики в широком диапазоне температуры от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Кроме того, она не вызывает заметной деформации склеиваемых деталей на площади приклеивания до $1,5\text{ см}^2$ и, что немаловажно для опытной отработки элементов крепления, в случае надобности может быть легко расклеена в ацетоне.

Интерферограммы рис. 3а соответствуют исходным зеркалам, рис. 3б – тем же зеркалам, заблокированным в устройстве крепления рис. 1 с тщательно шлифованными и подогнанными по толщине прокладными кольцами 5, зажатыми моментом 5 кгс м. Собранные узлы крепления с зеркалами устанавливались в сферический шарнир заднего фланца трубы телескопа, а юстировочные болты шарнира затягивались. Поскольку в качестве материала для зеркала применялся не астроситалл, а стекло ЛК7, съемка интерферограмм производилась только после тщательной термической отстойки всего устройства в целом.

Можно убедиться в том (см. рис. 3), что разница максимальных PV- и среднеквадратических RMS-отклонений волнового фронта от ближайшей сферы сравнения для исходных и заблокированных зеркал настолько мала, что находится за пределами точности цифровой интерферометрии. Из этого можно сделать вывод, что предлагаемая система крепления зеркала практически не вносит собственных искажений в форму его поверхности.

В заключение сформулируем основные достоинства предлагаемого способа крепления астрономических зеркал с центральным отверстием:

1) существенное уменьшение диаметра трубы телескопа, ее массы, а также толщины и массы главного зеркала;

2) полное отсутствие деформаций поверхности зеркала, в том числе и при перепадах температуры во время наблюдений;

3) отсутствие перемещений зеркала как в процессе работы, так и после транспортировки, характерное для жесткого типа блокировки зеркал, что позволяет надеяться на практическое осуществление светосильных зеркальных и зеркально-линзовых систем телескопов с жесткими допусками на центрировку главного зеркала;

4) сокращение времени термической отстойки инструмента за счет термической компенсации (упругих лепестков разрезной втулки) и отсутствия контакта зеркала с элементами оправы.

Предлагаемый способ крепления зеркал отработан нами на зеркалах диаметром 150–250 мм, однако автор полагает, что данное устройство крепления без каких-либо конструктивных изменений может быть применено и для 300 мм-зеркал. Успех зависит от соблюдения технологии вклеивания разрезной втулки в зеркало и тщательности обработки опорных площадок прокладных колец и упорного буртика разрезной втулки.

Что касается зеркал диаметром до 500 мм, то автор считает, что их также можно крепить подобным образом. В этом случае, вероятно, трехточечная система крепления разрезной втулки из-за большой массы зеркал окажется недостаточной для их стабилизации в телескопе, вследствие чего будет необходим переход к большему числу опорных точек, что повлечет за собой выработку иной конструкции крепления разрезной втулки.

В заключение автор выражает благодарность начальнику отдела нестандартного оборудования ФГУП ПО НПЗ И.В. Кучеру за активную помощь в опытной отработке элементов крепления зеркал телескопов ТАЛ-200К и ТАЛ-250К.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Клевцов Ю.А.* Кададиоптрический телескоп // Патент России № 2248024. 2005.
2. *Михельсон Н.Н.* Оптические телескопы. Теория и конструкция. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. С. 384–389.
3. *Мейнел А., Мейнел М., Ниншен Ху, Кикьян Ху, Чунхуа Пан.* Сообщение о 4-метровом телескопе минимальной стоимости // Оптические и инфракрасные телескопы 90-х годов. М.: Мир, 1983. С. 72–96.
4. *Клевцов Ю.А.* Способ крепления астрономического зеркала в трубе телескопа // Патент России № 2201608. 2003.
5. *Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С.* Пластинки и оболочки. М.: Наука, 1966. С. 73–79.
6. *Кучер И.В., Клевцов Ю.А., Парко Л.В.* Устройство кададиоптрического телескопа. Описание полезной модели RU № 23508 U1. Бюллетень № 17. 2002.
7. *Клевцов Ю.А., Михайличенко И.А., Парко Л.В.* Узел крепления и юстировки астрономического зеркала в трубе телескопа // Патент России № 2321872. 2008.