

УДК: 621.396.67

Проектирование и технология изготовления сектора центрального зеркала космической обсерватории «Миллиметрон»

Бердникова Н.А.*, Чичурин В.Е.**

Компания «Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнёва», ул. Ленина, 52, г. Железногорск, Красноярский край, 662972, Россия

**e-mail: berdnikova-nataly@mail.ru*

***e-mail: chichyrin@iss-reshetnev.ru*

Аннотация

Для реализации космического проекта «Миллиметрон» предложена конструкция центрального зеркала (ЦЗ) космического телескопа из композиционного материала (КМ). ЦЗ представляет собой сборную конструкцию из 24 секторов. Выбор оптимальной конструкции ЦЗ осуществлялся с учетом данных модального и статического анализа. На основании выбранных конструкторских решений разработана технология изготовления сектора ЦЗ. Изложены данные по опробованию технологии изготовления сектора ЦЗ.

Ключевые слова: композиционный материал, конструкция вафельного типа, резиновый пуансон, вакуумно-автоклавное формование.

Введение

Космическая обсерватория «Миллиметрон» с космическим телескопом диаметром 10 м предназначена для исследования объектов Вселенной в миллиметровом и инфракрасном диапазонах длин волн (от 0.02 до 17 мм) с

ультравысокой чувствительностью и со сверхвысоким угловым разрешением - до десятков миллиардных долей угловой секунды, рис. 1. Это в десятки миллиардов раз лучше разрешения человеческого глаза [1].

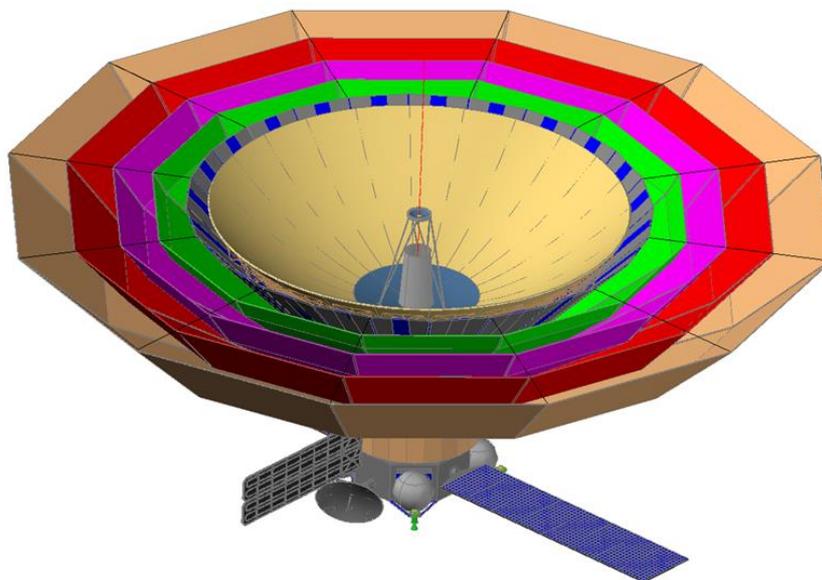


Рис. 1. Общий вид космической обсерватории «Миллиметрон»

Высокая чувствительность зеркальной системы телескопа и приемной аппаратуры достигается за счет глубокого охлаждения. Высокое угловое разрешение обеспечивается благодаря расположению обсерватории в районе точки Лагранжа, находящейся на 1,5 миллионов километров от Земли [1].

Изучение мирового опыта изготовления космических телескопов показало, что существует несколько вариантов конструкции зеркала:

- вафельная конструкция из КМ с оребрением в виде сочетания треугольных и пятиугольных элементов (АКЦ ФИАН им. П.Н. Лебедева РАН) [2];

- трехслойная конструкция из композиционных материалов с треугольными ребрами (телескоп Планк) [3];

- вафельная конструкция из карбида кремния с оребрением в виде треугольных элементов (телескоп Хершель)[4].

Учитывая миссию обсерватории и условия эксплуатации ЦЗ, наибольший интерес представляют конструкции с одной оболочкой и оребрением, обеспечивающие эффективное охлаждение.

Главное отличие конструкции и технологии её изготовления, предложенных в данной работе, состоит в том, что конструкция имеет пояс жесткости, расположенный на радиусе крепления конструкции зеркала к несущей платформе, а технология изготовления исключает использование клея.

Постановка задачи

ЦЗ космической обсерватории «Миллиметрон» состоит из 24 секторов. Оно представляет собой симметричную вырезку из параболоида вращения диаметром 3000мм с фокусным расстоянием 2400мм. Зеркало имеет центральное отверстие 600мм, три отверстия диаметром 100мм и три опорные площадки в секторах 3, 11, 19, рис.2.

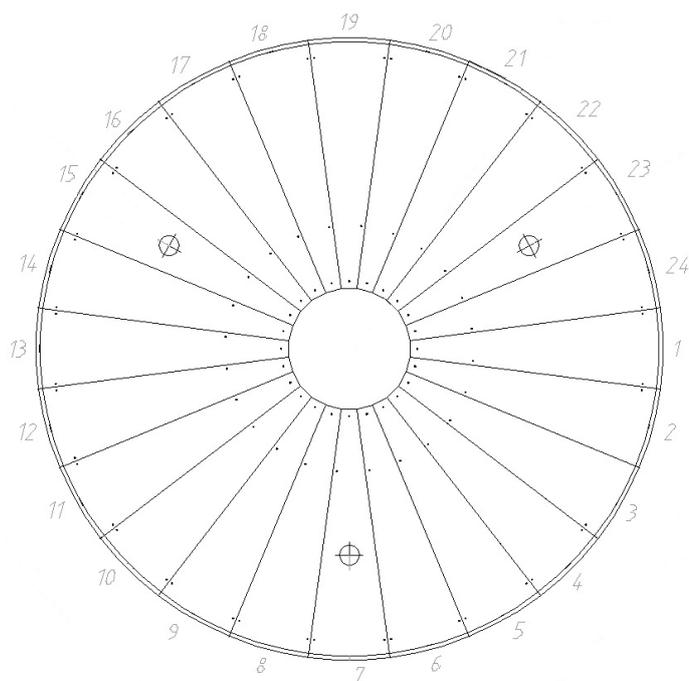


Рис.2. Схема ЦЗ

Технические требования к ЦЗ:

1. Суммарная масса деталей ЦЗ из КМ должна быть не более 200кг.
2. Среднеквадратичное отклонение формы рабочей поверхности сектора ЦЗ от действия силы тяжести при его сборке не должно превышать $\pm 0,5$ мкм.
3. Деформация сектора ЦЗ под собственным весом при его сборке не должно превышать $\pm 0,5$ мкм.
4. Основная частота колебаний ЦЗ должна быть выше 40Гц.

При разработке конструкции и технологии изготовления сектора ЦЗ из КМ, рассматриваются следующие задачи:

- выбор схемы армирования слоев КМ для отражающей поверхности ЦЗ;

- конечно-элементный расчет величины перемещений под собственным весом и собственных частот колебаний ЦЗ;

- выбор и опробование технологии изготовления сектора ЦЗ.

Выбор схемы армирования слоев КМ для отражающей поверхности ЦЗ

При использовании КМ в размеростабильных конструкциях особо остро стоит задача синтеза материала, его качественного и количественного состава, схем армирования и гибридизации для обеспечения минимального температурного расширения при определенном уровне прочностных характеристик.

Влияние угла укладки (φ) волокон на величину температурных деформаций многослойной структуры проявляется неоднозначно. Для углов укладки углеродных волокон в диапазоне от 0° до 30° величина температурных деформаций смещается до больших отрицательных значений. При угле укладки 45° - приближается к нулевому уровню. Схема $\pm 45^\circ$ отвечает наиболее высокому модулю упругости при сдвиге в плоскости армирования. В случае укладки части волокон вдоль оси симметрии (схема армирования $0 \pm \varphi$) для повышения показателей прочностных свойств КМ величина температурных деформаций смещается в сторону отрицательных значений по сравнению с однонаправленным КМ со схемой укладки ($\pm\varphi$). Такой неоднозначный характер зависимости температурных деформаций от угла армирования КМ объясняется высокой анизотропией термоупругих свойств углеродных волокон и характером термических напряжений, возникающих в связи с этим на границе волокно-матрица при данных углах армирования.

Теоретические расчеты и экспериментальные данные показывают, что наиболее близким к нулю термическим расширением (до $\pm 0,1 \cdot 10^{-6}$ 1/град) обладает многослойная структура со схемой армирования ($\pm 45^\circ$), ($0 \pm 75^\circ$), ($0 \pm 90^\circ$) и ($0 \pm 45/90$), ($0/45/90/135$), при соответствующем объемном соотношении армирующих волокон и матрицы [5].

Таким образом, с указанными выше схемами армирования слоев КМ проведено конечно-элементное моделирование поверхности ЦЗ для определения наиболее жесткой схемы.

Все расчеты проводятся методом конечных элементов при помощи MSC NASTRAN. В расчетах используется высокомодульный ортотропный КМ со свойствами указанными в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики КМ

Модуль упругости $E1^*$, МПа	320
Модуль упругости $E2^{**}$, МПа	85
Плотность, кг/м ³	1600
[*] $E1$ – модуль упругости КМ вдоль волокон; ^{**} $E2$ – модуль упругости КМ поперек волокон.	

Визуализация направления волокна первого слоя для сектора ЦЗ показана на рис. 3.

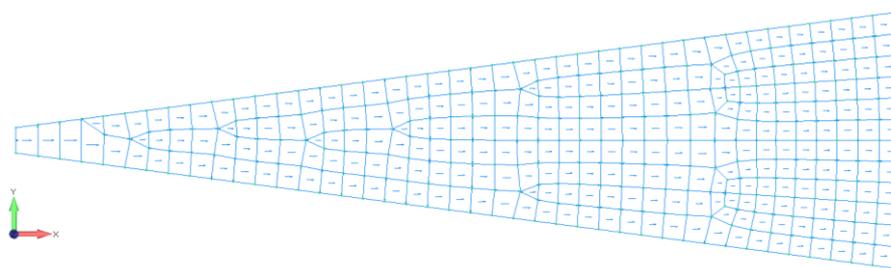


Рис.3. Визуализация направления волокна первого слоя для сектора ЦЗ

Для проведения исследования толщина поверхности ЦЗ выбрана 8мм. Таким образом, толщина монослоя КМ составляет 4мм, при схеме (+45°/-45°), 2,67мм, при схемах (0/+75°/-75°), (0/+90°/-90°), и 2мм при схемах армирования (0/+45°/-45°/90), (0/45/90/135). Результаты модального анализа и эквивалентные свойства многослойной структуры для каждой из схем армирования занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты модального анализа и эквивалентные свойства многослойной структуры для каждой из схем армирования.

Схема армирования	$\pm 45^\circ$	$0 \pm 75^\circ$	$0 \pm 90^\circ$	$0 \pm 45/90^\circ$	0/45/90/135
Частота первого тона собственных колебания, Гц	11,4	10,94	13,65	14,49	12,58
Модуль упругости E1, Па	9,8E+9	2,1E+10	2,1E+10	2,5E+10	2,5E+10
Модуль упругости E2, Па	9,8E+9	6,6E+10	1,3E+11	2,5E+10	5,3E+10

Наглядное отображение изменения эквивалентных модулей упругости при изменении углов укладки слоев КМ показано на рис. 4.

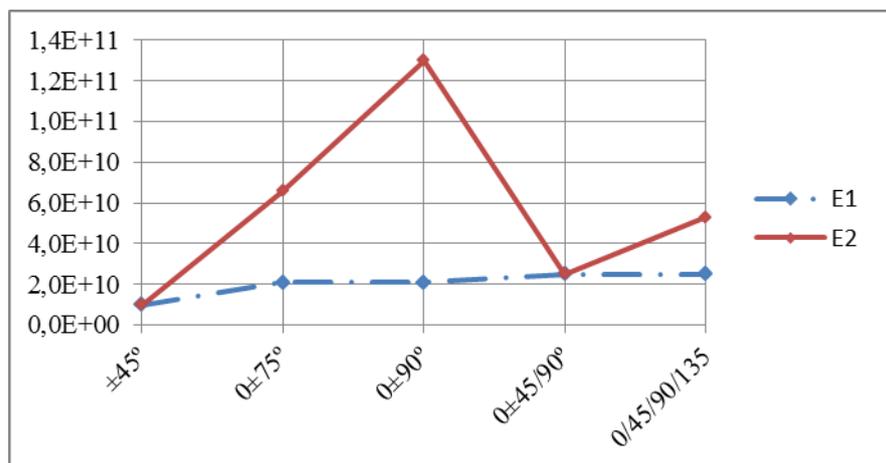


Рис.4. График зависимости модулей упругости многослойной структуры от схемы армирования слоев

Таким образом, при одинаковой толщине конструкции, схема армирования ($0 \pm 45/90^\circ$) имеет преимущество перед остальными по жесткости и структура многослойной поверхности центрального зеркала является квазиизотропной.

С данной схемой армирования осуществляется дальнейшее моделирование ЦЗ.

Конечно-элементное моделирование, анализ перемещений под действием собственного веса и определение собственных частот колебаний ЦЗ

Исходя из требований к ЦЗ, необходимо обеспечить конструкции высокую изгибную жесткость.

Конечно-элементная модель ЦЗ представлена элементами типа Laminate. Упругие характеристики соответствуют выбранной схеме армирования материала. Граничные условия ЦЗ выбраны исходя из транспортировочного крепления ЦЗ к

платформе. Таким образом, граничные условия представлены жесткой заделкой в трех узлах на секторах 3, 11, 19, рис. 2. Так как крепление ЦЗ осуществляется за площадки определенного размера, моделирование этих площадок осуществлялось при помощи элементов Rigid. Независимый узел с зависимыми узлами связан по поступательным степеням свободы.

На первом этапе работы рассматривался вариант реберной структуры тыльной стороны зеркала из одинаковых треугольных или трапециевидных элементов, так как способ изготовления конструкции из одинаковых деталей является более технологичным.

Учитывая угол сектора ЦЗ равный 15° , вариант конструкции с однородным треугольным оребрением оказался тяжелым и недостаточно жестким. Далее моделировалась конструкция с конфигурацией большинства треугольных элементов соответствующих правильному треугольнику. Оставшиеся неподкрепленные участки поверхности ЦЗ заполнялись треугольными элементами различной конфигурации.

Неизменными параметрами при подборе оптимальной реберной структуры оставались свойства материала, схема армирования слоев КМ и схема закрепления при испытаниях. Результаты модального анализа и массовые характеристики для вариантов конструкции ЦЗ указаны в таблице 3.

Результаты модального анализа и массовые характеристики для вариантов конструкции ЦЗ

№ варианта	Частота колебаний первого тона ЦЗ, Гц	Масса конструкции, кг	Краткое описание конструкции
1	66	185	Однородное треугольное оребрение
2	84,9	157	Однородное трапециевидное оребрение
3	91	153	Неоднородное треугольное оребрение. Высота основных одинаковых по размеру треугольников 120 мм

Таким образом, конструкция с оребрением в виде правильных треугольников является наиболее жесткой и легкой. На рис. 5 показана основная форма собственных колебаний данной конструкции.

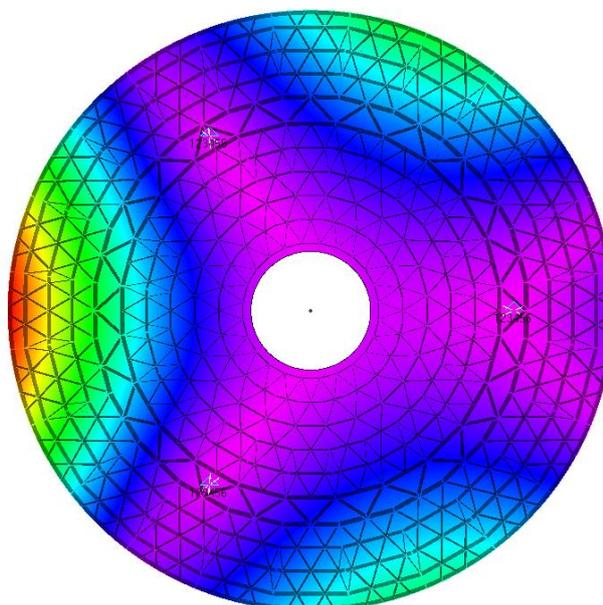


Рис. 5. Основная форма собственных колебаний выбранной конструкции ЦЗ

Для обеспечения заданного требования к сектору ЦЗ в части перемещений под собственным весом конечно-элементное моделирование сектора ЦЗ проводилось элементами типа Laminate. Граничные условия для сектора ЦЗ выбраны исходя из закрепления сектора на испытаниях. Таким образом, граничные условия представлены шарнирным закреплением в шести узлах, рис.6.

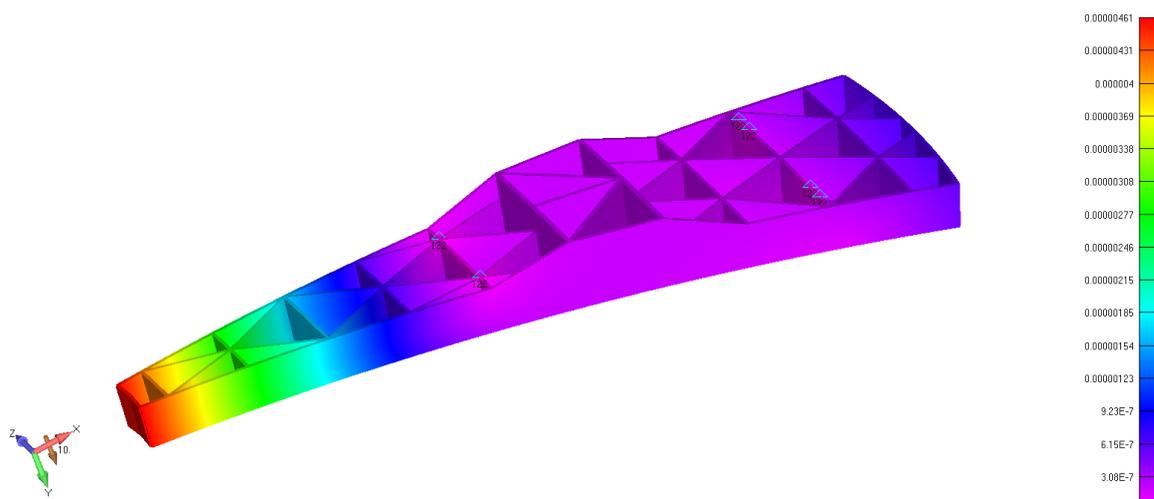


Рис.6.Картина перемещений для сектора ЦЗ

Максимальные перемещения сектора ЦЗ под действием собственного веса составляют 0,0046 мм.

Технология изготовления сектора ЦЗ

Изготовить ЦЗ можно двумя различными способами. Первый способ заключается в изготовлении монолитного ЦЗ. Второй способ предполагает изготовление отдельных секторов ЦЗ с последующей сборкой.

Изготовление монолитного ЦЗ обеспечивает получение конструкции высокой точности и жесткости. Изготовление прецизионной оснастки диаметром 3 м является трудоемким и дорогостоящим процессом, при этом нет гарантий, что изготовленное монолитное ЦЗ будет соответствовать требуемой точности зеркальной поверхности. Исправить полученную монолитную конструкцию будет невозможно.

При изготовлении отдельных секторов ЦЗ с последующей сборкой значительно уменьшаются габариты прецизионной формообразующей оснастки, значительно сокращаются расходы и трудоемкость. Также, в случае изготовления дефектного сектора ЦЗ всегда остается возможность его заменить.

Недостатком сборного варианта ЦЗ является наличие погрешности при сборке секторов, но он компенсируется более точным изготовлением каждого сектора.

Выбранная конструкция сектора ЦЗ представляет собой обшивку, подкрепленную с тыльной стороны ребрами жесткости в форме треугольников. Изготовление осуществляется за один технологический цикл на оснастке, материал которой имеет КЛТР, близкий к КЛТР материала сектора.

Приспособление состоит из оправки с прецизионной формообразующей поверхностью, ограничительных пластин и кассеты для формования резиновых пуансонов.

Для изготовления резиновых пуансонов необходимо на заранее обработанную антиадгезионным составом поверхность залить резиновый компаунд. Далее

установить крышку с пластинами, ограничивающими и формирующими контур треугольников. После полимеризации произвести демонтаж резиновых пуансонов.

Процесс раскроя заготовок материала для выкладки оболочки и реберной структуры сектора ЦЗ осуществляется при помощи высокоточного планшетного плоттера. Раскрой заготовок выполняется по контурам, полученным с послойной модели сектора ЦЗ, выполненной в модуле CAD-системы CATIA – CompositeDesign. При послойном моделировании учитываются технологические свойства материала, такие как драпируемость, толщина и ширина.

На основании послойной модели генерируются файлы для раскроя каждого элемента конструкции на планшетном плоттере и создаются трехмерные контуры для выкладки материала.

После завершения раскроя на подготовленную поверхность приспособления послойно выкладываются заготовки материала, состоящего из углеродного волокна пропитанного связующим. Заготовки материала выкладываются на формообразующую поверхность приспособления с контролем углов ориентации при помощи трехмерного лазерного проектора.

Отдельно, на каждый пуансон по четырем граням укладываются заготовки материала по выбранной схеме армирования, после чего все пуансоны крепятся к кассете и устанавливаются в приспособление для изготовления сектора ЦЗ, собирается вакуумный чехол и производится полимеризация конструкции сектора ЦЗ в автоклаве.

Отформованный сектор демонтируется с поверхности приспособления для проведения механической обработки ребер жесткости по высоте и боковым плоскостям в местах крепления секторов ЦЗ между собой.

Каждый сектор подвергается испытаниям в термобарокамере и контролю геометрических размеров. На основании фактических данных принимается решение по дальнейшему использованию сектора ЦЗ.

Результаты опробования конструкторско-технологических решений

Для отработки конструкторско-технологических решений при изготовлении сектора ЦЗ изготовлен образец. Образец представляет собой оболочку, с тыльной стороны подкрепленную ребрами в виде треугольных сегментов, рис. 7. Конструктивно в образце реализовано однородное оребрение в виде правильных треугольников. Опробована новая технология с применением термокомпрессионного формования.

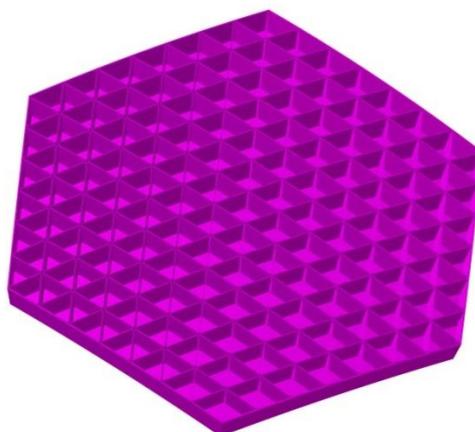


Рис. 7. Трехмерная модель образца

На основании трехмерной модели для образца подготовлен раскрой каждого слоя оболочки и каждого слоя треугольного элемента. На рис. 8 представлен внешний вид приспособления с выложенной оболочкой.

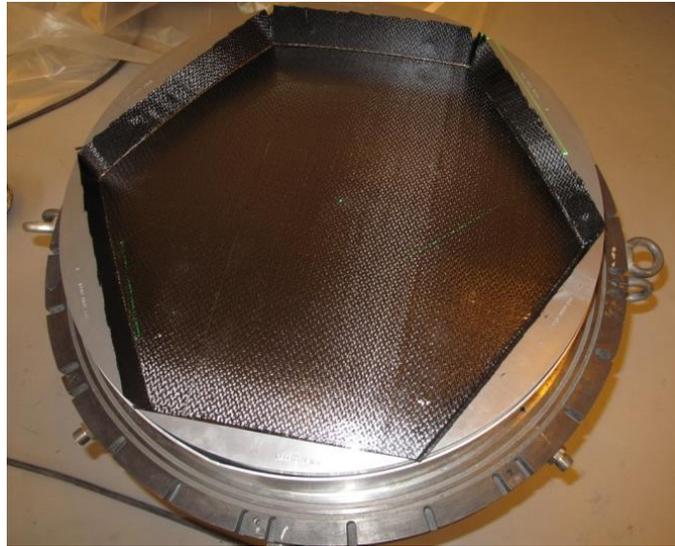


Рис. 8. Приспособление с выложенным материалом оболочки

Выкройка материала для треугольного элемента, с помощью которого происходит реализация оребрения тыльной поверхности показана на рис. 9.

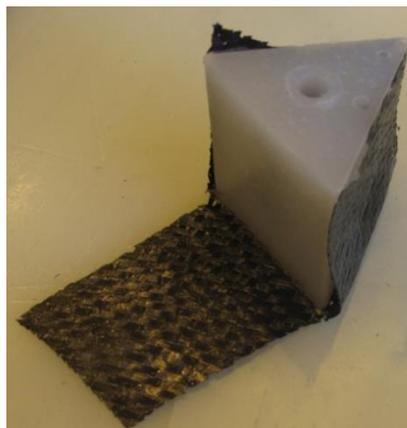


Рис. 9. Резиновый пуансон с выложенным слоем материала

Изготовление образца проводилось вакуумно-автоклавным и термокомпрессионным формованием за один технологический цикл. Внешний вид изготовленного образца со стороны оболочки представлен на рис. 10. Зеркальная поверхность имеет требуемый глянец.

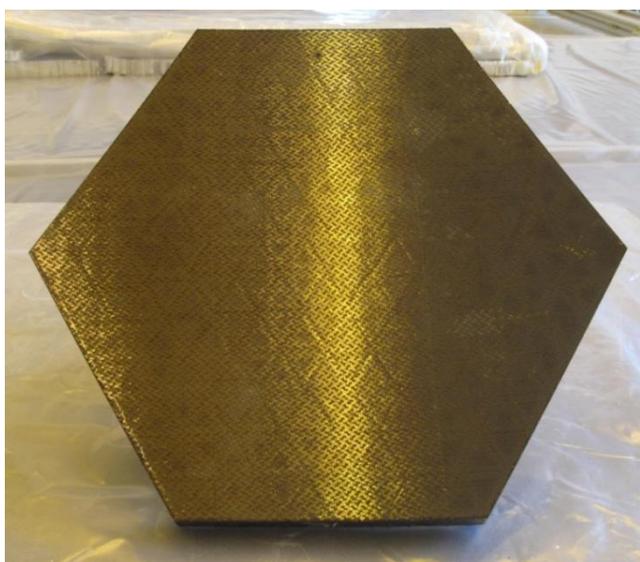


Рис. 10. Образец, вид со стороны оболочки

Образец, изготовленный по вышеописанной технологии, прошел этап механической обработки. На рис. 11 показан срез в месте стыка отдельных треугольных элементов. По срезу видно, что материал пропрессован. Ребра конструкции соединены без использования клея, представляют собой монолитные пластины без расслоений.

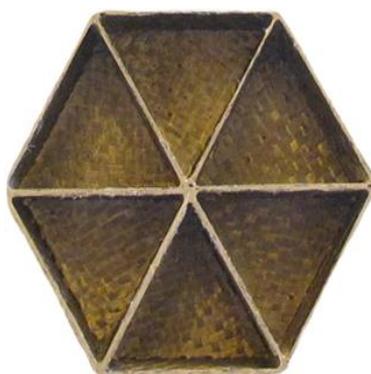


Рис. 11. Узел схождения треугольных элементов образца

В дальнейшем произведено измерение геометрических параметров рабочей поверхности. Среднеквадратичное отклонение (СКО) составило 0,05 мм.

Для проверки размеростабильности образца при тепловом воздействии проведены испытания в термобарокамере. Измерение геометрии рабочей поверхности после испытаний показал изменение СКО на 0,01 мм от исходной геометрии.

Циклическое температурное воздействие на образец в процессе термовакуумных испытаний не привело к нарушению целостности конструкции.

Таким образом, подтверждена возможность применения описанной технологии изготовления вафельной конструкции из КМ, образованной отдельными элементами, без использования клея.

Выводы

1. На основании ранее опубликованных результатов исследования схем армирования многослойной структуры из КМ, выбраны схемы с минимальными

температурными деформациями. Данные схемы использованы для модального анализа поверхности ЦЗ с целью выявления наиболее жесткой схемы армирования. Результаты модального анализа (таблица 2) показывают, что схема армирования ($0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) обладает наибольшей основной частотой колебаний. Зависимость модулей упругости от угла армирования слоев показывает, что структура поверхности ЦЗ при схеме ($0^\circ/+45^\circ/-45^\circ/90^\circ$) является квазиизотропной.

2. Проведено инвариантное моделирование реберной структуры ЦЗ. Проведены модальный и статический анализ каждого варианта. По результатам анализов, конструкция ЦЗ, состоящая из элементов в виде правильного треугольника с высотой 120 мм, является наиболее жесткой (основная частота колебаний равна 91 Гц) и удовлетворяет заданным требованиям.

3. С выбранной схемой оребрения конструкции ЦЗ, проведен анализ перемещений сектора ЦЗ, для подтверждения требования допустимого отклонения формы поверхности при сборке ЦЗ. Максимальное перемещение сектора ЦЗ под действием собственного веса составляет 0,0046мм, что соответствует заявленным требованиям.

4. В данной работе рассмотрен сборный вариант изготовления ЦЗ. Исходя из этого, проведена проработка конструкторско-технологических решений для изготовления сектора ЦЗ.

5. Технология изготовления сектора ЦЗ является сочетанием термокомпрессионного и вакуумного-автоклавного формования, с применением сложной и уникальной оснастки.

6. Особенностью данной технологии является то, что формование осуществляется за один технологический цикл. Выкладка на оснастку заготовок материала для всех элементов сектора (отражающей поверхности, ребер жесткости, боковых граней сектора) осуществляется в сыром виде. Необходимая форма ребрам жесткости задается приспособлением. Клей в конструкции не используется.

7. Проведено опробование данной технологии на образце, который соответствует принятым конструкторским решениям для сектора ЦЗ. Результаты изготовления образца подтвердили эффективность выбранной технологии. Проведенные термовакуумные испытания образца подтвердили размеростабильность конструкции.

Библиографический список

1. Артеменко Ю.Н. Синтез механизмов ориентации космического телескопа «Миллиметрон». 1. Возможности механизмов параллельной структуры для ориентации космического телескопа «Миллиметрон», URL: <http://technomag.edu.ru/doc/534292.html> (дата публикации 01.01.2013).
2. Жебит В. ФИАНЕ разработаны прецизионные панели для обсерватории «Миллиметрон», URL: <http://www.fian-inform.ru/astrofizika/item/90-v-fiane-razrobotany-pretsizionnye-paneli-dlya-observatorii-millimetron> (дата публикации 12.02.2013).
3. Олейников Л.Ш. Методы и средства стабилизации оптических параметров криотелескопов космического базирования и наземных имитационно-

ИСПЫТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ. URL: <http://tekhnosfera.com/metody-i-sredstva-stabilizatsii-opticheskikh-parametrov-krioteleskopov-kosmicheskogo-bazirovaniya-i-nazemnyh-immitatsionno-ispitatilnih-kompleksov> (дата публикации 06. 10. 2004).

4. Ашимбаева Н.Т. Телескоп Гершель - прорыв в новую реальность. URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1233419> (дата публикации 20.02.2009).

5. Гардымов Г.П., Мешков Е.В. Композиционные материалы в ракетно-космическом аппаратостроении. – СПб.: СпецЛит, 1999. - С. 271.