

УДК.629.78.023.222

Анализ технологии изготовления стеклянных элементов для термооптических покрытий космических элементов

Вятлев П.А.^{1*}, Гончаров К.А.^{1}, Сигаев В.Н.^{2***},
Сысоев В.К.^{1****}, Юдин А.Д.^{1*****}**

¹*Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина,
ул. Ленинградская, 24, Химки, Московская область, 141400, Россия*

²*Российский химико-технологический университет имени Д.А. Менделеева,
Миусская площадь, 9, Москва, 125047, Россия*

**e-mail: vyatlev@laspace.ru*

***e-mail: heatpipe@laspace.ru*

****e-mail: vlad.sigaev@gmail.com*

*****e-mail: sysoev@laspace.ru*

******e-mail: yudin@laspace.ru*

Аннотация

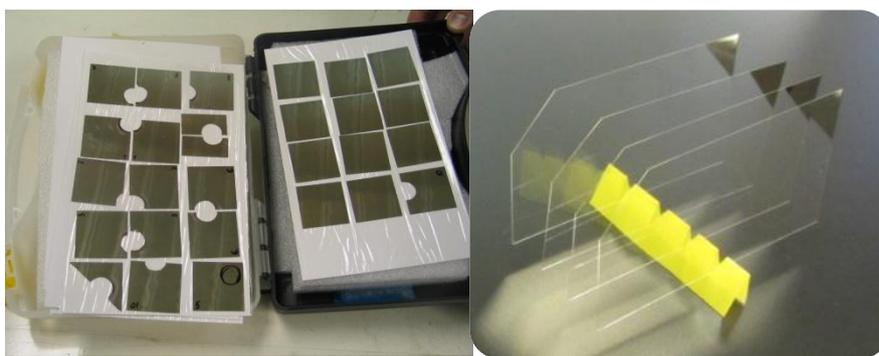
В настоящее время для систем терморегулирования космических аппаратов успешно используются термооптические покрытия. Терморегулирующее покрытие изготовлено из оптически прозрачного стекла К-208. Терморегулирующее покрытие К-208Ср представляет собой пластины толщиной 150 ± 20 мкм, размерами 20x20, 25x25, 40x40 мм. Оно обладает наименьшим значением соотношения термооптических характеристик As/ε , а также имеет высокую радиационную стойкость. В данной статье представлен системный анализ технологии изготовления стеклянных элементов для этого покрытия.

Ключевые слова: космический аппарат, терморегуляция, терморегулирующее покрытие, технология изготовления стеклянных элементов.

Введение

Обеспечение теплового режима космических аппаратов (КА) связано с выбором терморегулирующего покрытия (ТРП) [1-8]. Тип покрытий класса «солнечные отражатели» предназначен для применения на радиационных поверхностях, обеспечивающих отвод избыточного тепла в окружающее космическое пространство в условиях одновременного облучения этих поверхностей Солнцем [9-14]. В качестве рабочего покрытия на радиационных панелях на автоматических космических аппаратах (АКА) отрасли применяется терморегулирующее покрытие К-208Ср. Оно обладает наименьшим значением соотношения термооптических характеристик As/ε по сравнению с силикатными и лакокрасочными покрытиями, а также имеет высокую радиационную стойкость.

Терморегулирующее покрытие К-208Ср представляет собой пластины оптически прозрачного стекла К-208 толщиной 150 ± 20 мкм, размерами 20x20, 25x25, 40x40 мм, с последовательно нанесенными в вакууме на одну сторону электропроводящего прозрачного покрытия, а на другую сторону слои серебра и нержавеющей стали, приклеенные металлизированной стороной к корпусу изделия (рис 1а).



а

б

Рисунок 1. Стекланные элементы для космических аппаратов (а – напыленные элементы для радиационных радиаторов, б – защитные элементы для фотопреобразователей)

Основные значения термооптических характеристик элементов покрытия К-208Ср: $A_s = 0,08-0,09$; $\varepsilon > 0,85$.

К сложностям такого покрытия следует отнести:

- сравнительно большие массовые характеристики ($\sim 600 \text{ г/м}^2$, из них $\sim 460 \text{ г/м}^2$ — масса отдельных элементов покрытия; $\sim 13 \text{ г/м}^2$ — масса защитного лака ЭП-730; $\sim 127 \text{ г/м}^2$ — масса клея СКТН с наполнителем «алюминиевая паста»);
- достаточно высокую трудоемкость как при нанесении серебра и нержавеющей стали, так и при креплении элементов покрытия к корпусу изделия.

Разработка покрытия К-208Ср была выполнена РКК «Энергия» совместно с НПО «Квант» в достаточно полном объеме, включая комплексные испытания покрытия на воздействие статических и вибрационных нагрузок с положительными результатами. Исследовано влияние факторов космического пространства (УФ-воздействие, корпускулярное облучение, вакуум, термоциклирование и т. п.) на оптические характеристики, проведены коррозионные испытания.

Покрытия на основе пластин оптического стекла К-208 с нанесенными слоями алюминия или серебра нашли применение в изделиях предприятий ГК «Роскосмос».

Цель данной статьи – системный анализ технологии изготовления стеклянных элементов для термооптических покрытий космических элементов, проводимой в сотрудничестве АО «НПО Лавочкина» с РХТУ им. Д.И. Менделеева и Центром оптического стекла.

Состав и способ получения пластин оптического стекла К-208.

Оптическое стекло К-208 разработано на основе широко известного и распространенного стекла К-8 с добавкой 2% CeO_2 . Двухпроцентная добавка двуокиси церия при сохранении высокой прозрачности стекла значительно повышает его радиационную стойкость. Стекло К-208 имеет состав: SiO_2 — 69,49%; B_2O_3 — 11,93%; Na_2O — 10,33%; K_2O — 6,25%; CeO_2 — 2,0%. На слитки стекла К-208 имеется отраслевой стандарт ОСТ 3-3677-82. Слитки стекла К-208 производит Лыткаринский оптико-механический завод (ЛЗОС).

Ультратонкие стеклянные элементы толщиной 150 ± 20 мкм и размерами от 20x10 до 80x40 мм из радиационностойкого стекла марки К208 применяются для решения следующих задач при эксплуатации космических аппаратов (КА):

- защитные покрытия фотоэлементов солнечных батарей;
- термооптические покрытия радиаторов-теплообменников системы терморегулирования.

Рассмотрим дорожную карту изготовления стеклянных элементов (рис.2) и проанализируем каждый этап.



Рисунок 2. Схема изготовления стеклянных элементов термооптических покрытий

В России изготовление блоков из заготовок и полировкой их поверхностей успешно реализуется в ЛЗОС. Основное требование это однородность таких блоков и отсутствие свилей.

Следующим этапом изготовления стеклянных элементов является вытяжка стеклоленты из полученных блоков. Для этой цели используется тигельная электропечь, как показано на рисунке 3.



Рисунок 3. Вытяжка стеклоленты

Технология изготовления стеклянных элементов основана на нагреве полированных стеклянных блоков из стекла К208 размером 400x400x400 мм до высоко вязкого состояния с последующей вытяжкой стеклоленты толщиной около 150 мкм и шириной около 60 мм через фильеру из нержавеющей стали.

При этом полученные отрезки стеклоленты служат заготовками для изготовления стеклоэлементов. Надо отметить, что качество полировки фильеры определяет качество поверхности стеклоленты. Данный способ изготовления позволяет получать ленту из стекла марки К-208 с толщиной от 80 до 200 мкм с 12-14 классом поверхности. Стеклолента толщиной 150 - 170 мкм получают вытягиванием стекломассы при температуре 920 – 940 С через фильеру с шириной щели 4,5 мм со скоростью вытяжки 23 - 28 мм/с в зависимости от температуры печи. Увеличение скорости вытяжки до 38 мм/с позволяет вытягивать стеклоленту толщиной 80 мкм.

Альтернативой тигельной вытяжки стеклоленты нами опробован метод перетяжки из полированных стеклопластин размером 1000x300x20 мм в стеклоленту, как показано на рисунке 3б. Более низкая температура, чем у тигеля, позволяет получить стеклоленты с высоким качеством поверхности (14 класс). Но низкий уровень, порядка 40%, выхода стеклоленты у данного метода против 70% выхода при тигельной вытяжке, и высокая стоимость заготовок делает этот процесс не рентабельным.

Процесс вытяжки из высокопластичного стеклянного блока большой размерности приводит возникновению трудностей по обеспечению плоскостности

вытягиваемой стеклоленты. Как правило, форма стеклоленты имеет вид, показанный на рис. 4 и характеризуется тремя областями: облоями — утолщениями по обоим краям, которые при резке удаляются и областью основного материала, выпуклого в одном из направлений.

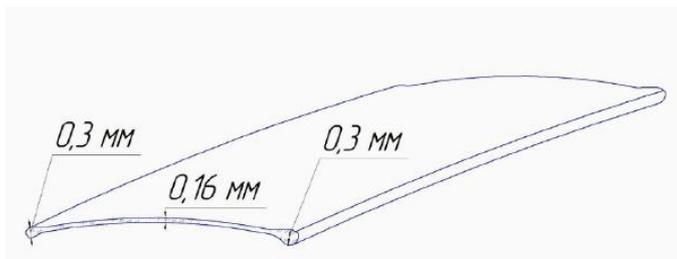


Рисунок 4. Заготовка стеклоленты после вытяжки

После вытяжки происходит отжиг стеклоленты в электрической камерной печи для снятия внутренних напряжений в стекле, возникающих при остывании после вытяжки.

Следующий этап данной технологии является резка стеклоленты на стеклоэлементы необходимых размеров. К стеклянным элементам предъявляются высокие требования по геометрическим параметрам:

- размерам — толщине, длине, ширине;
- качеству поверхности — светорассеиванию и отсутствию каверн;
- отклонению от плоскостности.

Существует три вида технологий разделения стеклоленты на элементы (рис.5).



Рисунок 5. Резка ленты на стеклоэлементы

Наиболее простая технология – это разделение при помощи алмазного инструмента для скрайбирования (рис. 5а). Достаточная точность ± 10 мкм, что вполне удовлетворяет техническим требованиям.

В случаях, когда требуется высокая точность менее ± 5 мкм и без дефектных краёв, т.е. повышение прочности, применяется лазерное термораскалывание (рис. 5б) [15-16].

Третий вариант это склеивание элементов стеклоленты с последующим шлифованием стопки (до 50 элементов). После доведения до нужных размеров производится расклейка стопки и получение готовых стеклоэлементов (рис. 5в).

Выбор технологии диктуется необходимым объемом производимых стеклоэлементов.

Стеклоэлементы для термооптических покрытий должны отвечать следующим требованиям отклонения от плоскостности: по двум координатным линиям 0.1 мм на 50 мм.

Для обеспечения требуемого отклонения от плоскостности применяется технология тепловой пластической деформации под нагрузкой стеклянных элементов. Для этого в стальную оправу (рис. 6) укладывается стопка стеклянных элементов толщиной 150 мкм из стекла марки К-208 с прокладкой каждого элемента кварцевыми шлифованными пластинами. На стопку устанавливается калиброванный груз весом около 480 г.



Рисунок 6. Выравнивание, химическое упрочнение и очистка

Оправа с двумя стопками стекол помещается в печь с регулируемым режимом температуры, в которой происходит нагревание до температуры, при которой происходит размягчение и выравнивание стеклянных элементов.

В результате проводимых экспериментов в рамках «температура-время-усилие нагрузки» установлено, что минимальное отклонение от плоскостности элементов получено при нагрузке 480 г и определенной временной циклограмме температуры [17-18].

При выборе температуры выравнивания стеклянных элементов было обнаружено, что при повышении температуры выше 530°C на поверхности элементов появляются каверны, количество которых превышает допустимый

уровень. Механизм возникновения каверн авторы связывают с наличием газовых включений на границе кварцевая подложка — стеклянный элемент.

Были проведены долговременные исследования изменения формы выровненных стеклянных элементов, которые позволили установить, что температурный режим выравнивания и его длительность снимают все температурные напряжения тонких стеклянных элементов, что не приводит к изменению их формы.

В этот цикл работ также входят процессы химического упрочнения.

Основной проблемой применения тонких пластин стекла является их недостаточная механическая прочность. Необходимость высоких значений прочности стекол обусловлена тем, что защитные покрытия должны выдерживать операции сборки и транспортировки, и к тому же несут конструкционные нагрузки. Простым, но достаточно эффективным методом упрочнения пластин стекла является метод низкотемпературного ионного обмена [19-20].

Перед процессом нанесения покрытия необходимо произвести очистку пластин от загрязнений. Очистка является необходимым этапом получения качественного покрытия с высокой адгезией серебра к стеклу.

Опыт нанесения покрытий показал, что при недостаточной очистке поверхности стекла от загрязнений адгезия серебра к стеклу практически отсутствует.

Обработку поверхности пластин стекла в ультразвуковой ванне производят в течение трех минут. Затем пластины стекла промывают последовательно в теплой, холодной, дистиллированной воде и сушат на воздухе.

В данной работе не рассматриваются процессы нанесения электропроводящих, высокоотражающих и защитных покрытий. Эти работы успешно развиваются в ФГУП «НПО Техномаш» в лаборатории Савельева А.А. и основаны на методе магнетронного нанесения покрытий. Для последовательного нанесения комплексного высокоотражающего и защитного покрытия был выбран метод магнетронного нанесения.

Структура данных работ показана на рисунке 7.

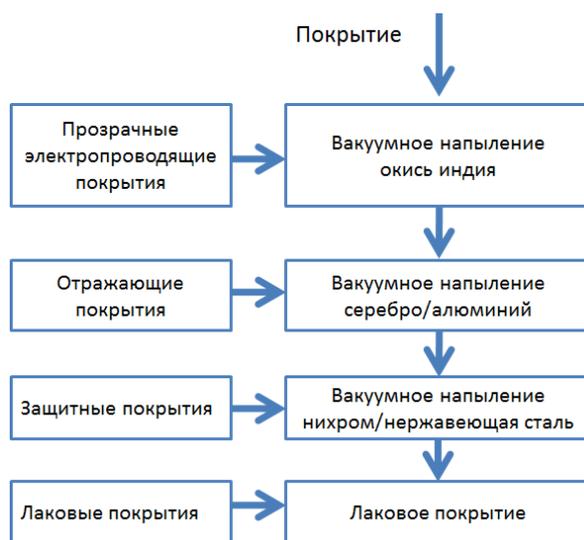


Рисунок 7. Нанесение покрытий

Заключение

В статье показаны этапы получения высококачественных стеклянных элементов терморегулирования космических аппаратов. Были проанализированы эффекты, при которых возникают отклонения от заданных требований к стеклянным

элементам, и предложены меры по их устранению. Так же были рассмотрены методы по повышению прочности стеклянных элементов.

Библиографический список

1. Финченко В.С., Котляров Е.Ю., Иванков А.А. Системы обеспечения тепловых режимов автоматических межпланетных станций. – Химки: НПО Лавочкина, 2018. - 400 с.
2. Малоземов В.В., Кудрявцева Н.С. Системы терморегулирования космических аппаратов. - М.: Машиностроение, 1995. - 192 с.
3. Laub B., Venkatapathy E. Thermal protection system technology and facility needs for demanding future planetary missions // European Space Agency, ESA SP-544, Noordwijk, Netherlands, ESA Publications Division, ISBN 92-9092-855-7, 2004, pp. 239 – 247.
4. Gilmore D.G. et al. Thermal design examples Spacecraft Thermal Control Handbook, vol. 1, Fundamental Technologies, El Segundo, CA, Aerospace Press, 2002, Chapter 3, pp. 71 – 137.
5. Donabedian M., Gilmore D.G. et al. Thermal design examples Spacecraft Thermal Control Handbook, vol. 1, Fundamental Technologies, El Segundo, CA, Aerospace Press, 2002, Chapter 5, pp. 161 - 205.
6. Панин Ю.В., Коржов К.Н. Разработка теплопередающего устройства для альтернативного способа терморегулирования системы обеспечения теплового

- режима космического аппарата // Труды МАИ. 2012. № 80. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=56875>
7. Ануров А.Е. Микросистема терморегулирования малых космических аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 45. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=25328>
8. Сафронов А.А. Расчет максимальной тепловой мощности космического капельного холодильника-излучателя // Труды МАИ. 2012. № 65. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=35841>
9. Свечкин В.П., Савельев А.А., Соколова С.П., Бороздина О.В. Терморегулирующее покрытие к-208ср. технология получения, свойства и их изменения в процессе эксплуатации при воздействии факторов космического пространства // Космическая техника и технологии. 2017. № 2 (17). С. 99 - 107.
10. Липатьев А.С., Мамаджанова Е.Х., Рыженков В.С., Вятлев П.А., Сысоев В.К., Сигаев В.Н. Технология получения тонких защитных покрытий солнечных батарей для космической техники // Успехи в химии и химической технологии. 2011. Том XXV. № 5 (121). С. 93 - 97.
11. Price M. Kitchin C., Eaves H., Crabb R., Buia P. Solar Cell Coverglasses for Satellites in the Intermediate Earth Orbit // 5th European Space Power Conference Proceedings, Tarragona, Spain, 21- 25 September, 1998. URL:
<http://adsabs.harvard.edu/full/1998ESASP.416..569P>

12. Johnston C.O., Hollis B.R., Sutton K. Nonequilibrium Stagnation-Line Radiative Heating for Fire II // Journal of Spacecraft and Rockets, 2008, vol. 45, no. 6, pp. 1185 - 1195.
13. Вятлев П.А. Высокопрецизионные лазерные технологии изготовления элементов ракетно-космической техники // XXXI Всероссийская научно - техническая конференция «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». Тезисы конференции. (Королев, 28-30 апреля 2008). - М.: ФГУП РНИИКП, 2008. С. 33.
14. Городецкий Л.А., Ковтун В.С., Соколова С.П. Термооптические характеристики терморегулирующих покрытий космических аппаратов «ЯМАЛ-200» // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 3. С. 23 - 36.
15. Сысоев В.К. Лазерная обработка оксидных стекол. - М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011. – 136 с.
16. Сысоев В.К. Технология получения тонких защитных покрытий солнечных батарей для космической техники // Успехи в химии и химической технологии. 2011. Т. 25. № 5. С. 93 - 97.
17. Вятлев П.А., Сергеев Д.В., Сигаев В.Н. Сысоев В.К., Шулепов А.В. Выравнивание стеклянных элементов из оптического радиационно-стойкого стекла К-208 для терморегулирующих покрытий космических аппаратов // Письма о материалах. 2017. № 7(1). С. 64 - 74.
18. Вятлев П.А. Методика обеспечения оптимального режима управляемого лазерного термораскалывания стекол // V международная конференция

«Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности».
Труды конференции. (Санкт-Петербург, 28-30 апреля 2008). - М: МГУ, 2008. Т. 12.
С. 167 - 168.

19. Бутаев А.М. Прочность стекла, ионообменное упрочнение. - Махачкала: Изд-во ДГУ, 1997. - 133 с.

20. Эрнсбергер Ф.М. Прочность и упрочнение стекла. - М.: Мир, 1969. - 340 с.