

УДК 629.78.023.222

**ТЕРМОРЕГУЛИРУЮЩЕЕ ПОКРЫТИЕ К-208Ср.
ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ, СВОЙСТВА И ИХ ИЗМЕНЕНИЯ
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФАКТОРОВ
КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА**

© 2017 г. Свечкин В.П.¹, Савельев А.А.², Соколова С.П.¹, Бороздина О.В.¹

¹Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия») Ул. Ленина, 4А, г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация, 141070, e-mail: post@rsce.ru

²ФГУП «НПО «Техномаш» (НПО «Техномаш») 3-й проезд Марьиной Роши, 40, г. Москва, Российская Федерация, 127018, e-mail: info@tmnp.ru

В настоящей статье приводится состав штатного пакета терморегулирующего покрытия на основе элементов покрытия К-208Ср. Изложены основные результаты исследований по отработке технологии получения и испытаний терморегулирующего покрытия К-208Ср класса «солнечные отражатели». Приведены достоинства и недостатки терморегулирующего покрытия К-208Ср. Указаны химический состав и способ получения пластин оптического стекла К-208, а также подготовка пластин стекла перед нанесением высокоотражающего покрытия. Приведены и обоснованы достоинства применяемого магнетронного метода нанесения высокоотражающего и защитного покрытий. Описаны схема внутрикамерного устройства вакуумной напылительной установки, последовательность нанесения серебра и нержавеющей стали, особенности проведения процесса для получения максимальной производительности. Приведены сводные данные по действующим на терморегулирующее покрытие К-208Ср факторам космического пространства и результаты их воздействия, результаты наземных и летных испытаний покрытия.

Ключевые слова: терморегулирующее покрытие, элементы покрытия, факторы космического пространства.

**THERMAL CONTROL COATING K-208CP.
TECHNOLOGY, PROPERTIES AND THEIR CHANGES
IN THE OPERATION PROCESS UNDER THE EFFECT OF SPACE FACTORS**

Svechkin V.P.¹, Savelyev A.A.², Sokolova S.P.¹, Borozdina O.V.¹

¹S.P. Korolev Rocket and Space Public Corporation Energia (RSC Energia) 4A Lenin str., Korolev, Moscow region, 141070, Russian Federation, e-mail: post@rsce.ru

²FGUP NPO Technomash (NPO Technomash) 40 3rd passage Mar'ina Roshcha, Moscow, 127018, Russian Federation, e-mail: info@tmnp.ru

This article presents a composition of nominal thermal control coating package based on coating K-208Cp components. The main results of research of the technology development and testing thermal control coating K-208Cp of the solar reflectors class are stated. The advantages and disadvantages of thermal control coating K-208Cp are given. The chemical composition and a way of making optical glass plates K-208 are indicated, as well as the glass plates processing before applying highly reflective coating. The advantages of the magnetron method used for applying highly reflective and protective coatings are given and justified. The layout diagram of the vacuum chamber sputtering unit, sequence of applying silver and stainless steel, features of the process for the maximum performance are described. The summarized data on the space factors effect on thermal control coating K-208Cp are given, as well as the results of their effect and the results of the ground and flight tests of the coating.

Key words: thermal control coating, coating components, space factors.



СВЕЧКИН В.П.



САВЕЛЬЕВ А.А.



СОКОЛОВА С.П.



БОРОЗДИНА О.В.

СВЕЧКИН Валерий Петрович — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
SVECHKIN Valery Petrovich — Candidate of Science (Engineering), Lead research scientist at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

САВЕЛЬЕВ Александр Александрович — кандидат технических наук, начальник лаборатории НПО «Техномаш», e-mail: lab3104@mail.ru
SAVELYEV Alexander Alexandrovich — Candidate of Science (Engineering), Head of Laboratory at NPO Technomash, e-mail: lab3104@mail.ru

СОКОЛОВА Светлана Павловна — начальник лаборатории РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
SOKOLOVA Svetlana Pavlovna — Head of Laboratory at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

БОРОЗДИНА Ольга Васильевна — ведущий инженер-технолог РКК «Энергия», e-mail: post@rsce.ru
BOROZDINA Olga Vasilyevna — Lead engineer-technologist at RSC Energia, e-mail: post@rsce.ru

Введение

Обеспечение теплового режима космических аппаратов (КА) связано с выбором терморегулирующего покрытия (ТРП) класса «солнечные отражатели». Этот тип покрытий предназначен для применения на радиационных поверхностях, обеспечивающих отвод избыточного тепла в окружающее космическое пространство в условиях одновременного облучения этих поверхностей Солнцем. В качестве рабочего покрытия на радиационных панелях КА «Ямал» [1], *Egyptsat*, а также на других 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.

Основными факторами, оказывающими радиационное воздействие на материалы конструкции КА, находящегося на геостационарной орбите (ГСО), являются электронное и протонное излучения внешнего радиационного пояса Земли, протонное излучение и ядерная составляющая солнечных космических лучей [2]. Кроме радиационных

факторов на ГСО на материалы оказывают воздействие также и термические факторы. Изменение оптических характеристик покрытия К-208Ср вызвано, в основном, образованием пленки загрязнений на поверхности покрытия и зависит от толщины этой пленки.

Терморегулирующее покрытие К-208Ср представляет собой пластины оптически прозрачного стекла К-208 толщиной 170 ± 30 мкм, размерами 20×20 , 25×25 , 40×40 мм, с последовательно нанесенными в вакууме на одну сторону слоями серебра и нержавеющей стали, приклеенные металлизированной стороной к корпусу изделия.

Исходные значения термооптических характеристик элементов покрытия К-208Ср: $As = 0,08-0,09$; $\epsilon > 0,85$. При нанесении на радиационные панели элементов покрытия между ними образуются технологические зазоры. В зависимости от величины зазоров между элементами поглощательная способность солнечного излучения As (коэффициент поглощения) покрытия составляет $0,09-0,12$. Значение $As = 0,12$ имеет место при максимально допустимой величине зазора $0,4$ мм.

К недостаткам покрытия следует отнести:

- сравнительно большие массовые характеристики (~ 600 г/м², из них ~ 460 г/м² —

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 относится к 1970–1972 гг. и была выполнена РКК «Энергия» совместно с НИИИТ (в настоящее время 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.

В связи с прекращением в РКК «Энергия» работ по тематике изделий, эксплуатирующихся на ГСО, покрытие не было внедрено на нашем предприятии. Покрытия на основе пластин оптического стекла К-208 с нанесенными слоями алюминия или серебра нашли применение в изделиях предприятий НПО им. Лавочкина, НПО ПМ (в настоящее время НПО ИСС им. академика М.Ф. Решетнева, г. Железногорск Красноярского края).

За период с 1970 г. в технологии изготовления пластин оптического стекла К-208 практически не произошло изменений. Слитки стекла К-208 производит Лыткаринский оптико-механический завод. Пластины стекла из слитков изготавливают НПО «Квант» и ПО «Позит» (бывший филиал НПО «Квант»). Учитывая, что пластины стекла К-208 постоянно выпускало ПО «Позит» для использования в качестве защиты от воздействия факторов космического пространства фотоэлектрических преобразователей (ФЭП), особых проблем по технологии изготовления пластин стекла К-208 для ТРП не было. Вместе с тем необходимо было учесть при отработке типоразмеров стекол особенности покрываемых поверхностей АКА, сложность нанесения на труднодоступные места, необходимость в этом случае дополнительной нарезки пластин других размеров, технологическую возможность их применения в процессе нанесения на штатные узлы изделия.

Нашей целью было восстановление на современной основе технологии получения терморегулирующего покрытия К-208Ср и крепления элементов покрытия к поверхности

изделия, проведение комплекса испытаний применительно к условиям эксплуатации АКА.

Изготовление терморегулирующего покрытия К-208Ср

Состав и способ получения пластин оптического стекла К-208. Оптическое стекло К-208 разработано в 1970-х гг. 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%; V_2O_5 — 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.

Пластины стекла К-208 получают путем вытягивания через валки из расплава слитков. Регулируя зазор между валками, получают требуемую толщину пластин. Ширина ленты составляет ~ 70 мм. Оператор разрезает ленту на отрезки ~ 200 – 250 мм, а затем на специальном приспособлении разрезает на элементы необходимых размеров, в частности, для АКА был выбран основной размер элементов стекла $20 \times 20 \times 0,17$ мм. Возможно получение и более тонких пластин (~ 100 – 120 мкм), однако при этом из-за низкой прочности пластин значительно возрастает процент брака как при разрезке, так и при наклейке на поверхность изделия, что приводит, соответственно, к возрастанию стоимости работы.

Подготовка пластин оптического стекла К-208 перед нанесением покрытия. 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.

Для проведения процесса очистки пластины стекла укладывают в один слой в специальное приспособление, помещают в ультразвуковую ванну с моющим составом.

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.

Метод магнетронного нанесения покрытий. Для последовательного нанесения комплексного высокоотражающего и защитного покрытия был выбран метод магнетронного

нанесения. Этот метод имеет ряд важных преимуществ перед методом термического испарения в вакууме, которые во многих случаях делают его предпочтительнее.

Магнетронный метод основан на использовании анодно-катодной системы. При подаче на эту систему напряжения получают эмиссию электронов с катода. Электроны на своем пути ионизируют атомы газа (аргона), а образующиеся ионы, в свою очередь, под действием электрического поля бомбардируют поверхность катода, выбивая из него атомы металла (серебра). Инертная среда — аргон — играет роль потенциального источника ионов. Чем выше масса атомов инертной среды, тем выше эффективность выбивания атомов с катода. В качестве инертной среды удобнее всего применять аргон, поскольку он представляет собой вполне доступный инертный газ, обладающий сравнительно большой молекулярной массой, что обеспечивает более высокую по отношению к воздуху скорость распыления.

Магнитное поле увеличивает эффект ионизации среды. Покрытие, нанесенное магнетронным методом, обладает хорошей адгезией и однородностью толщины на большой площади.

Для осуществления процесса нанесения серебра и нержавеющей стали на пластины оптического стекла К-208 была использована вакуумная напылительная установка УВН-74-ПЭ.

Схема внутрикамерного устройства вакуумной напылительной установки приведена на рис. 1.

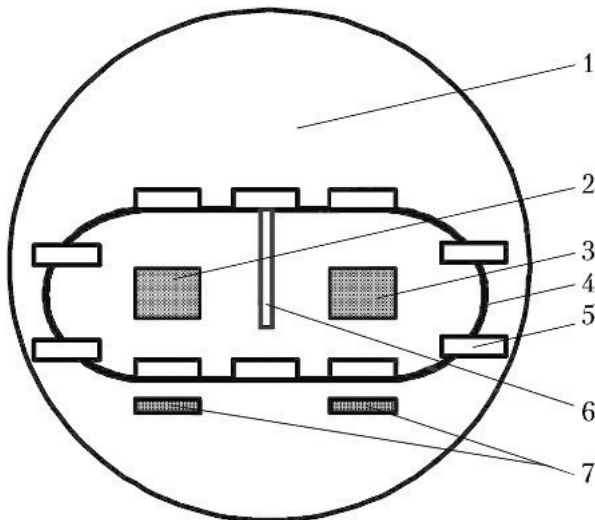


Рис. 1. Схема внутрикамерного устройства вакуумной напылительной установки: 1 — камера; 2 — магнетрон с мишенью из серебра; 3 — магнетрон с мишенью из нержавеющей стали; 4 — карусель на 10 позиций; 5 — поддон с пластинами стекла К-208 (60 шт.); 6 — защитный экран; 7 — нагреватель

Последовательное нанесение серебра и нержавеющей стали. Перед нанесением покрытия на пластины стекла (рис. 1) во внутри-

камерную оснастку 1 устанавливают поддоны 5 с уложенными пластинами стекла. На соответствующие магнетроны устанавливают катоды из серебра 999 (ГОСТ 6836-80) 2 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 735000-77) 3.

Откачивают вакуумную камеру до давления $1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. Производят обработку поверхности пластин в тлеющем разряде по 15 мин на каждый поддон.

После выключения тлеющего разряда откачивают вакуумную камеру до давления $1 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-5}$ мм рт. ст. и включают нагреватель деталей 7. При достижении на поверхности деталей (пластин стекла) температуры 250°C в камеру пускают газообразный аргон (ГОСТ 10157-79) до достижения давления 1×10^{-2} мм рт. ст.

Каждый поддон с уложенными на него пластинами стекла К-208 располагают так, чтобы он находился строго под распыляемым катодом из серебра или нержавеющей стали. При проведении процесса поддоны перемещаются без разгерметизации.

Отражающий слой из серебра наносится по 2 мин на каждый поддон. Затем поворачивают карусель 4 с нанесенным слоем серебра под магнетрон с мишенью из нержавеющей стали и наносят защитный слой из нержавеющей стали в течение 3 мин на каждый поддон.

После окончания нанесения защитного слоя из нержавеющей стали выключают нагреватель деталей. При достижении на поверхности пластин стекла температуры 80°C в вакуумную камеру пускают воздух и вынимают приспособление с пластинами стекла.

Контроль элементов покрытия К-208Ср.

Качество покрытия определяется визуально при естественном освещении без применения увеличительных приборов. Толщины серебра ($\sim 0,1$ мкм) и нержавеющей стали ($\sim 0,2$ мкм) обеспечиваются технологическим процессом и определяются временем их нанесения.

Требуемое значение коэффициента поглощения солнечной радиации $As \leq 0,10$ также обеспечивается технологическим процессом нанесения серебра. Адгезия серебра и нержавеющей стали к стеклу контролируется методом отрыва с помощью липкой ленты.

Нанесение элементов покрытия на корпус изделия

Крепление элементов покрытия К-208Ср к поверхности корпусных панелей АКА осуществляется с помощью клеевой композиции. По результатам проведенных работ была выбрана клеевая композиция на основе метил- или фенилсилоксановых каучуков СКТН

и СКТНФ, обеспечивающая выполнение требований по работоспособности клеевых соединений. Клеевые композиции на основе каучуков обеспечивают работоспособность клеевых соединений как при повышенных температурах (+100 °С), так и при низких (-77...-135 °С), они стойки к воздействию радиации, технологичны — позволяют проводить отверждение клеевых соединений при комнатной температуре.

Для улучшения смачиваемости указанными клеями элементов покрытия К-208Ср при креплении, а также для защиты металлизированной поверхности элементов от повреждений (царапины, потертости), влияния атмосферных факторов (повышенная влажность) и отрицательного воздействия материалов, содержащих в своем составе серу и хлор, было рекомендовано нанесение на металлизированную поверхность элементов покрытия эпоксидного лака ЭП-730 (ГОСТ 20824-81). Положительный результат использования лака ЭП-730 подтвержден экспериментальными работами.

Согласно исходным данным, клеевая композиция для крепления элементов покрытия К-208Ср должна быть теплопроводной ($\lambda \geq 0,4$ Вт/мК) и обеспечивать достаточную электропроводность поверхности покрытия. Исходя из указанных выше требований, была проведена рецептурная доработка выбранной ранее клеевой композиции путем введения специальных наполнителей (серебро, алюминиевая паста, карбонильное железо).

Исследование образцов на электризуемость. Оптимизация состава клеевой композиции проведена по результатам испытания образцов ТРП на электризуемость в условиях облучения электронным потоком по режиму:

- энергия облучающих электронов 30 кВ;
- плотность электронного потока 10^{-10} и 10^{-7} А/см².

Образцы представляли собой металлические пластины из алюминиевого сплава АМг6 с наклеенными элементами ТРП К-208Ср.

В ходе проведения испытаний определялись:

- величина поверхностного потенциала;
- параметры возникающих электрических разрядов, их частота;
- визуально отмечались места возникновения электрических разрядов.

Испытания показали, что образцы заряжаются до низкого потенциала (менее 2 кВ), что ниже пробойного значения. Электрические разряды не возникают. Однако, для выбора предпочтительного состава наполнителя для клеевой композиции с точки зрения электро-

статической стойкости были проведены дополнительные испытания в более жестком режиме при плотности облучающего электрического потока 10^{-5} А/см². По результатам испытаний в этом режиме для обеспечения электрической стойкости клеевой композиции на основе каучуков СКТН и СКТНФ были рекомендованы два наполнителя: серебро и алюминиевая паста марки АСП ТУ 48-0131-2-86.

Оценка прочностных характеристик клеевых соединений. Оценка прочностных характеристик клеевых соединений элементов покрытия К-208Ср с использованием оптимизированной клеевой композиции показала их соответствие требованиям исходных данных ($\tau_{сдв} \geq 1$ кгс/см²). Работоспособность клеевых соединений элементов покрытия в условиях воздействия акустических нагрузок, вибрации и удара подтверждалась как на образцах-макетах трехслойных панелей (обшивка + сотовый наполнитель + обшивка), сделанных по технологии изготовления корпусных панелей АКА, так и в составе динамического макета. Образцы выдержали испытания. Отслоения клеевых соединений и повреждения покрытия К-208Ср не наблюдалось.

Полученные результаты позволили определить состав штатного пакета ТРП на основе элементов покрытия К-208Ср.

Состав штатного пакета изображен на рис. 2.

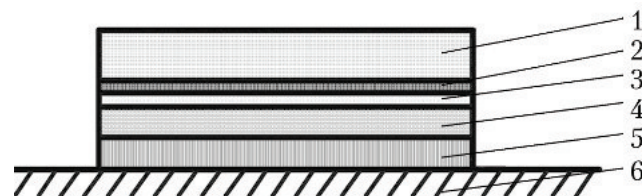


Рис. 2. Состав штатного пакета терморегулирующего покрытия на основе элементов покрытия К-208Ср: 1 — пластина стекла К-208; 2 — отражающий слой серебра; 3 — защитный слой нержавеющей стали; 4 — защитный слой эпоксидного лака ЭП-730; 5 — клей СКТН или СКТНФ с наполнителем «алюминиевая паста АСП»; 6 — металл с анодно-окисным покрытием и подслоем П-11

Результаты циклических термовакуумных испытаний. Работоспособность клеевых соединений ТРП К-208Ср оценивалась также по результатам циклических термовакуумных испытаний. Условия проведения испытаний:

- нагрев в вакууме 1×10^{-2} мм рт. ст. до температуры +50 °С;
- охлаждение до -50 °С;
- количество циклов испытания — 150.

На клеевые соединения, выполненные с использованием клеев СКТН и СКТНФ, установлен срок сохраняемости свойств

в наземных условиях 15 лет (14 лет — в отапливаемом хранилище, один год — в полевых условиях).

На основании проведенных исследований разработана технология нанесения покрытия К-208Ср. Были проведены испытания покрытия на изгиб, динамические испытания на удар и высокочастотную вибрацию, коррозионные испытания.

Стойкость покрытия К-208Ср к воздействию факторов космического пространства

По своей природе покрытие К-208Ср стойко к воздействиям факторов космического пространства. Основа покрытия — стекло К-208 — отличается высокой радиационной стойкостью, зеркальный подслоя серебра также радиационно стоек. Поэтому основной причиной изменения оптических свойств покрытия является образование на

его поверхности фотополимеризованной пленки загрязнений. Основными источниками загрязнения покрытия являются газы-выделение из материалов, расположенных в зоне его видимости, а также продукты работы двигательных установок.

В зависимости от уровня загрязнений конкретных КА изменение коэффициента A_s ТРП во время летной эксплуатации может меняться в широких пределах. В этом отношении очень показательными являются данные, согласно которым изменение A_s покрытия за 10 лет эксплуатации на ГСО составляет 0,08...0,33 в зависимости от размещения в разных зонах КА [3].

Сводные данные по действующим на ТРП К-208Ср факторам и результатам их воздействия приведены в табл. 1. Конкретные условия для КА, интенсивность отдельных факторов космического пространства определяются параметрами орбит.

Таблица 1

Действующие на терморегулирующее покрытие К-208Ср факторы и результаты их воздействия

Воздействующий фактор	Результат воздействия на покрытие К-208Ср	Характер изменения свойств
Вакуум	Образование на поверхности покрытия тонкой пленки загрязнений в результате осаждения на нем продуктов газовой выделенной неметаллических материалов, находящихся в зоне видимости	Увеличение A_s
Электроны	Незначительное уменьшение коэффициента пропускания стекла К-208 (при отсутствии загрязнений)	Увеличение A_s
	Полимеризация пленки загрязнений	
Протоны	Незначительное уменьшение коэффициента пропускания стекла К-208 (при отсутствии загрязнений)	Увеличение A_s
	Полимеризация пленки загрязнений	
Солнечное излучение	Полимеризация пленки загрязнений	Увеличение A_s
Струи жидкостных ракетных двигателей	Образование на поверхности покрытия пленки загрязнений в результате осаждения на нем непрореагировавших компонентов топлива	Увеличение A_s
Ксеноновая плазма (струи электроракетных двигателей)	Образование на поверхности покрытия пленки загрязнений в результате распыления окружающих материалов	Увеличение A_s
Атомарный кислород (только на низких околоземных орбитах)	Очистка поверхности покрытия от неполимеризованных загрязнений	Уменьшение A_s
	Незначительное взаимодействие с клеем СКТНФ в зазорах между элементами покрытия	Увеличение A_s

Наземные и летные испытания покрытия

Определение влияния загрязнений на исходные термооптические характеристики покрытия К-208Ср проводилось ЦНИИмаш. Пленка загрязнений наносилась на вакуумном стенде ТЕСТ-1 методом осаждения на покрытие продуктов газовой выделенной материалов. Влияние пленки загрязнений на коэффициент A_s измерялось с помощью фотометра ФМ-59. Исследовались пленки без

дополнительного облучения, т. е. без полимеризации. Результаты исследований приведены на рис. 3.

Облучение покрытия различными видами излучений проводилось в филиале АО «НИФХИ им. Л.Я. Карпова», г. Обнинск. При облучении производилась имитация распределения поглощенной дозы по толщине покрытия при эксплуатации на ГСО: объемная поглощенная доза имитировалась воздействием гамма-квантов ^{60}Co , поверхностная поглощенная доза —

ускоренными электронами энергией 120 кэВ и протонами энергией 80 кэВ. Имитация воздействия УФ-излучения Солнца проводилась в вакууме на стенде ИК-600/300, имитация воздействия электронов и протонов — на вакуумном стенде ИК-400. Гамма-облучение проводилось на установке РХ-30.

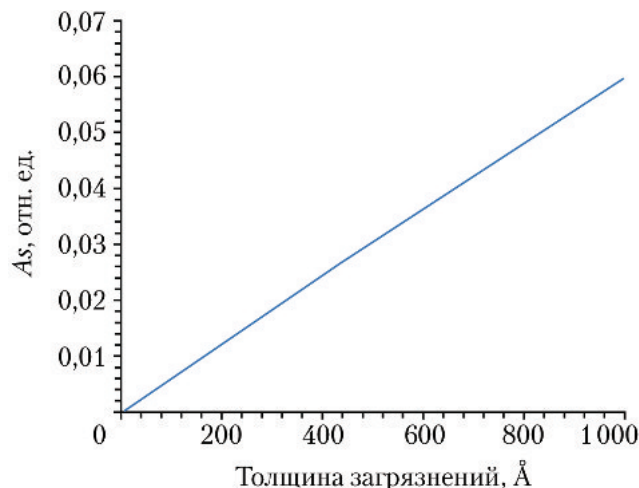


Рис. 3. Влияние загрязнений на изменение поглощательной способности солнечного излучения As покрытия К-208Ср

Оценка вклада различных излучений в деградацию ТРП показала, что при наличии загрязнений определяющим является воздействие низкоэнергетического электронного излучения, а УФ-излучение и протоны оказывают значительно меньшее воздействие на оптические свойства покрытия. После облучения гамма-квантами до дозы 100 Мрад образцы покрытия своих термооптических характеристик не изменяют.

При отсутствии загрязнений деградация К-208Ср незначительна и определяется небольшим снижением пропускания стекла К-208 при воздействии электронного и протонного облучений.

Оценка влияния ксеноновой плазмы двигателей на пропускание стекла К-208 проводилась по результатам исследования специалистами РКК «Энергия» стекла К-208 после его облучения ксеноном при испытаниях в МАИ ксенонового электроракетного двигателя СПД-70. Время облучения составило 27 ч 45 мин. Визуальный осмотр и осмотр стекла под микроскопом после испытаний показали, что внешний вид стекла практически не изменился, интегральный коэффициент пропускания, измеренный прибором ФМ-59, остался без изменений (значение коэффициента 0,92 до и после облучения ксеноном), спектральный коэффициент пропускания немного уменьшился. Пропускание стекла К-208 до и после воздействия ксеноновой плазмы приведено на рис. 4.

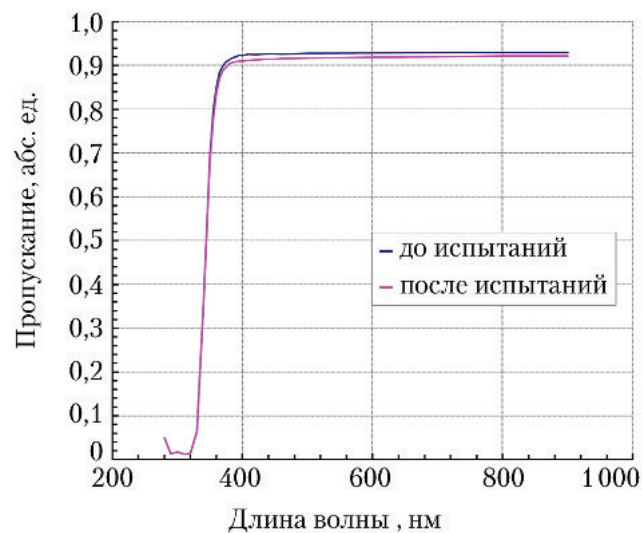


Рис. 4. Пропускание стекла К-208 до и после воздействия ксеноновой плазмы

Наземные испытания покрытия на стойкость к воздействию атомарного кислорода проводились в НИИЯФ МГУ на стенде «Комплекс-1». Деградация покрытия К-208Ср возможна только в случае, если недостаточно надежно изолированы места стыков элементов покрытия, так как при этом происходит активное взаимодействие атомарного кислорода с серебром, нанесенным на внутреннюю поверхность стекла К-208. Испытания покрытия до флюенса $2,4 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ показали, что атомарный кислород не оказывает существенного влияния на его оптические свойства, происходит только легкое матирование и незначительный унос клея СКТНФ из зазоров между элементами покрытия. Спектральные характеристики покрытия до и после облучения атомарным кислородом приведены на рис. 5.

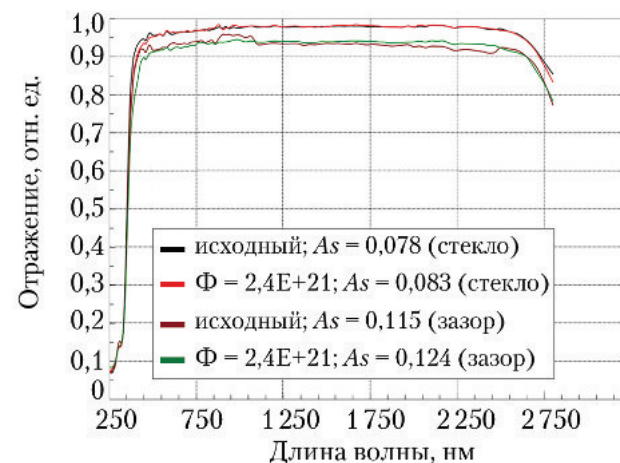


Рис. 5. Спектральная отражательная способность покрытия К-208Ср до и после воздействия атомарного кислорода

На основании проведенных испытаний была сделана прогнозная оценка деградации покрытия К-208Ср за 12,25 лет эксплуатации на ГСО для КА типа «Ямал».

Изменение коэффициента A_s покрытия К-208Ср во время летной эксплуатации зависит от уровня загрязнения на радиационных поверхностях. Деградация покрытия будет минимальной при условии, что в зоне видимости радиаторов с ТРП К-208Ср отсутствуют двигатели, а также приборы и элементы конструкции КА (экранно-вакуумная тепловая изоляция, солнечные батареи, антенны). Так как такое условие вряд ли выполнимо, реальное значение ΔA_s будет зависеть от уровня загрязнения покрытия окружающими элементами конструкции и двигателями, т. е. от компоновки КА.

Несмотря на ограничения, налагаемые на неметаллы по параметрам газовой выделения, и проведение термовакуумной дегазации материалов, полностью устранить загрязнения оптических поверхностей не удастся. Интенсивность нарастания пленки загрязнений и ее последующая деградация увеличивается по экспоненте и максимальна в первые годы полета.

Результаты оценки (прогноз) изменения термооптических характеристик покрытия К-208Ср с учетом воздействия радиации и пленки загрязнений приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменения термооптических характеристик покрытия К-208Ср с учетом воздействия радиации и пленки загрязнений (прогноз)

Толщина пленки загрязнений, Å	$A_{s_{исх}}$	Прогноз изменения $A_s (\Delta A_s)$ за годы эксплуатации на ГСО, лет				Значение ϵ , не менее
		1	5	10	12,25	
0	$\leq 0,12$	0,020	0,025	0,027	<0,03	0,85
200		0,025	0,045	0,047	0,05	
500		0,040	0,090	0,095	0,10	

Летные испытания покрытия К-208Ср на ГСО были проведены в процессе летной эксплуатации КА «Ямал-100» и «Ямал-200» в составе аппаратуры «Эпсилон», представляющей собой сборки микрокалориметров. Результаты летных испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты летных испытаний покрытия К-208Ср на ГСО

Место проведения летных испытаний	$A_{s_{исх}}$	Изменения $A_s (\Delta A_s)$ за годы эксплуатации на ГСО, лет			
		1	3	5	10
КА «Ямал-100»	0,09	0,020	0,065	0,10	0,125
КА «Ямал-200»		0,010	0,03	0,07	0,090

Сравнение результатов летных экспериментов, проводившихся на КА «Ямал-200» и «Ямал-100», показало, что деградация К-208Ср в эксперименте на КА «Ямал-200» оказалась существенно ниже, чем деградация тех же покрытий в эксперименте на КА «Ямал-100» за те же сроки полета [3]. Более высокая деградация К-208Ср на КА «Ямал-100» объясняется расположением аппаратуры «Эпсилон» в зоне повышенного загрязнения (в зону видимости попадают выступающие части элементов конструкции КА, закрытые экранно-вакуумной тепловой изоляцией, т. е. имеются дополнительные источники загрязнения).

Выводы

1. На современном уровне восстановлена технология получения терморегулирующего покрытия К-208Ср и крепления элементов покрытия к поверхности космического аппарата.

2. Проведены комплексные лабораторные испытания покрытия К-208Ср, которые подтвердили его работоспособность при воздействии статических и динамических нагрузок, при знакопеременном термоциклировании в вакууме и изгибающих нагрузках. Ускоренные коррозионные испытания показали, что хранить элементы покрытия К-208Ср необходимо только в отапливаемых помещениях.

3. Установлено, что при условии соблюдения всех требований технологических процессов нанесения отражающего слоя серебра, крепления элементов покрытия К-208Ср к поверхности изделия среднее значение коэффициента поглощения солнечной радиации A_s не превышает заданное 0,12.

4. Установлен гарантийный срок хранения терморегулирующего покрытия К-208Ср в условиях отапливаемого помещения при температуре $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха до 80% — 19 лет, в т. ч. срок эксплуатации в натуральных условиях — 12,25 лет, срок наземной подготовки, включая хранение и транспортирование на технический комплекс — три года.

5. Разработана и документально оформлена технология нанесения покрытия К-208Ср.

Список литературы

1. Ковтун В.С., Королев Б.В., Синяевский В.В., Смирнов И.В. Космические системы связи разработки Ракетно-космической корпорации «Энергия» имени С.П. Королёва //

Космическая техника и технологии. 2015. № 2(9). С. 3–24.

2. Кузнецов В.Д. Космическая погода и риски космической деятельности // Космическая техника и технологии. 2014. №3(6). С. 3–13.

3. Городецкий А.А., Ковтун В.С., Соколова С.П. Термооптические характеристики терморегулирующих покрытий космических аппаратов «ЯМАЛ-200» // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 3. С. 23–36.

Статья поступила в редакцию 02.02.2017 г.

Reference

1. Koptun V.S., Korolev B.V., Sinyavskiy V.V., Smirnov I.V. Kosmicheskie sistemy svyazi razrabotki Raketno-kosmicheskoi korporatsii «Energiya» imeni S.P. Koroleva [Space communication systems developed by S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, no. 2(9), pp. 3–24.

2. Kuznetsov V.D. Kosmicheskaya pogoda i riski kosmicheskoi deyatel'nosti [Space weather and risks of space activity]. *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2014, no. 3(6), pp. 3–13.

3. Gorodetskiy A.A., Koptun V.S., Sokolova S.P. Termoopticheskie kharakteristiki termoreguliruyushchikh pokrytii kosmicheskikh apparatov «YaMAL-200» [Thermooptical characteristics of thermal control coatings of the Yamal-200 spacecraft]. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2011, no. 3, pp. 23–36.