

بررسی رفتار پوشش‌های کنترل گرمایی سفید پایه سیلیکاتی در برابر شرایط

شبیه‌سازی شده محیط فضا

نرگس کیومرثی پور، رضا شجاع‌رضوی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، شاهین‌شهر

کمال قانی

دانشکده شیمی کاربردی، مجتمع دانشگاهی علوم، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، شاهین‌شهر

(دریافت مقاله: ۹۱/۰۲/۱۰ - پذیرش مقاله: ۹۲/۰۱/۱۷)

چکیده

پوشش‌های کنترل گرمایی به منظور حفاظت از سامانه‌های فضایی در برابر عوامل مخرب موجود در فضا، بر سطح خارجی آن‌ها اعمال می‌شوند. در تحقیق حاضر، با استفاده از رنگ‌دانه‌های اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیم و یک رنگ‌دانه تولید شده به همراه رزین سیلیکات پتاسیم، پوشش کنترل گرمایی سفید تولید و آنگاه به منظور بررسی مقاومت آن در برابر شرایط شبیه‌سازی شده محیط فضا؛ در محیط پلاسما حاوی اتم‌ها و یون‌های اکسیژن، در معرض تابش پرتو الکترونی و در برابر سیکل حرارتی قرار داده شد. به منظور شبیه‌سازی محیط دارای اکسیژن اتمی موجود در فضا؛ از دستگاه پلاسما DC و به منظور پرتو دهی از پرتو الکترونی با دوز جذب 70 Gy استفاده شد. آزمون سیکل حرارتی نیز در محدوده دمایی 100°C - 75°C با سرعت تغییرات دمای $12^\circ\text{C}/\text{min}$ به تعداد سی سیکل اعمال شد. نتایج نشان داد که جذب خورشیدی و نشر گرمایی نمونه‌ها در اثر اعمال شرایط فوق تغییر نکرده است. بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی نیز نشان داد که سطح نمونه‌ها دستخوش تغییرات، کندگی و آسیب ناشی از اتلاف جرم نشده است. به عبارت دیگر پوشش‌های کنترل حرارتی با پایه سیلیکاتی از مقاومت بسیار بالایی در برابر محیط فضا برخوردار هستند. همچنین نتایج نشان داد که رنگ‌دانه تولید شده کاملاً مشابه با رنگ‌دانه اکسید روی رفتار کرده و از مقاومت بسیار مناسبی در برابر شرایط شبیه‌سازی شده محیط فضا برخوردار است و می‌توان از آن به جای اکسید روی در این پوشش‌ها استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن اتمی، پرتو الکترونی، سیکل گرمایی، رنگ کنترل حرارتی، ماهواره.

Evaluation of Silicate White Thermal Control Coatings in a Simulated Space Environment

N. Kiomarsipour and R. Sh. Razavi

Materials Engineering Department, Malek-e-Ashtar University of Technology

K. Ghani

Department of Chemistry, Malek-e-Ashtar University of Technology

(Received 29 April 2012, accepted 6 April 2013)

Abstract

Thermal control coatings are used to protect spacecrafts from space environment and applied on their outer surfaces. In the present work, coatings were made by ZnO, TiO₂ and produced pigments into potassium silicate binder and exposed to simulated space environment. Oxygen plasma exposure tests were conducted in a DC plasma chamber. Electron beam with 70 Gy absorption dose and thermal cycling in the region -75-100 °C were used to simulation of electron irradiation and thermal cycling. The results indicated that solar absorptance and thermal emittance were stable and observed no surface morphology change and mass lose. The produced pigment was stable as well as ZnO in this condition and well substitute of ZnO.

Keywords: Atomic Oxygen, Electron Beam, Thermal Cycling, Thermal Control Coating, Satellite

E-mail of corresponding author: na.kiomarsipour@yahoo.com

مقدمه

سامانه‌های فضایی در طول مدت زمان مأموریت خویش، در معرض گستره وسیعی از شرایط متغیر محیطی قرار می‌گیرند و به منظور داشتن کارایی بهینه باید در برابر این محیط مخرب، مقاوم باشند. اکسیژن اتمی، تابش فرابنفش، زباله‌های فضایی، میکروشهاب سنگ‌ها، تابش ذرات باردار، تبخیر سطحی و آلودگی از جمله مواردی هستند که سازه‌های فضایی در حین عملیات با آن‌ها روبه‌رو می‌شوند [۱]. یک سامانه فضایی در صورت استقرار در مدار پایینی زمین^۱، در معرض خطر فرسایش ناشی از برخورد اکسیژن اتمی قرار می‌گیرد. مواد به کار رفته در سطح ماهواره‌های مستقر در مدار پایینی زمین، در معرض اصابت اتم‌های اکسیژن با سرعت 8 km/s قرار می‌گیرند. از این رو سیستم‌های فضایی باید در برابر این محیط خورنده و مخرب حفاظت شوند. یکی از راه‌های متداول حفاظت از سامانه‌ها، استفاده از پوشش‌های کنترل گرمایی است. این پوشش‌ها نه تنها به طور ذاتی در برابر اکسیژن اتمی مقاوم هستند و از سامانه در برابر تمامی عوامل فوق محافظت می‌کنند بلکه با داشتن خواص نوری و گرمایی ویژه، دمای سیستم را نیز در محدوده مناسب (زیر 100°C) حفظ می‌کنند. پوشش‌های با پایه غیرآلی (سیلیکاتی) از مقاومت خوبی در برابر اکسیژن اتمی و تابش فرابنفش برخوردار هستند؛ به همین علت تقریباً تمام رادیاتورهای ایستگاه فضایی بین‌المللی (ISS) با رنگ Z-93؛ رنگ دارای رنگ‌دانه اکسید روی در رزین سیلیکات پتاسیم، پوشش داده شده‌اند. رزین پلی‌اورتان بیشتر از رزین سیلیکونی تحت تأثیر سایش ناشی از اکسیژن اتمی قرار می‌گیرد، زیرا انرژی پیوندی باندهای C-C ($\text{C-C bond energy} = 306.7 \text{ kJ/mol}$)، کمتر از انرژی پیوندی باندهای Si-O ($\text{Si-O bond energy} = 797.5 \text{ kJ/mol}$) است. تحت تأثیر حمله اکسیژن اتمی، زنجیره‌های پلیمری گسسته شده و در نهایت سبب تخریب و سایش پوشش می‌شود. در پوشش‌های کنترل گرمایی، بخش آلی پوشش توسط اکسیژن

پلازما خورده شده و ذرات اکسید فلزی باقی می‌مانند. در این شرایط، رنگ‌دانه‌ها بدون تغییر و ثابت باقی می‌مانند و جزء آلی پوشش (رزین) در اثر سایش اکسیژن اتمی از بین می‌رود [۲]. پوشش‌های سیلیکاتی در زمره پوشش‌های خنثی هستند؛ به این معنی که اکسیژن اتمی هیچ تأثیری بر ساختار و ترکیب شیمیایی سطح ندارد. پیوندهای اکسیژن-سیلیکون دارای انرژی بالایی هستند به نحوی که اکسیژن اتمی قادر نیست آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد یا بشکند. از طرف دیگر چون تمام پیوندهای موجود در سطح از نوع Si-O است، اکسیژن با سطح، ترکیب دیگری تشکیل نمی‌دهد.

مهم‌ترین مسأله‌ای که یک سازه فضایی در مدار با آن مواجه می‌شود، تغییرات شدید دمایی به واسطه تغییر موقعیت سامانه نسبت به خورشید است. سمتی از ماهواره که به طرف خورشید است به واسطه جذب مستقیم تابش خورشیدی گرم می‌شود و این در حالی است که سمت دیگر که به طرف فضای خالی است در حال نشر گرما است؛ این تفاوت در موقعیت می‌تواند باعث ایجاد اختلاف دمایی تا حدود 400°C میان قسمت‌های مختلف سیستم گردد که در نهایت سبب تغییر شکل و از کار افتادن سامانه می‌شود. به منظور حفاظت از سیستم در برابر تغییرات شدید دمایی و همچنین شرایط سخت مواجه شده در فضا، استفاده از پوشش‌های کنترل گرمایی، اجتناب ناپذیر است [۳-۹]. از سوی دیگر این سامانه‌ها در معرض تابش ذرات پر انرژی مانند الکترون‌ها و پروتون‌ها نیز قرار دارند که ویژگی‌های سطحی پوشش را تحت تأثیر قرار داده و جذب و نشر گرمایی آن را با اختلال مواجه می‌سازند [۱۰ و ۱۱]. پوشش‌های کنترل گرمایی با داشتن جذب خورشیدی پایین (α_s) و نشر گرمایی بالا (ϵ)؛ از جذب تابش خورشیدی جلوگیری کرده و با نشر گرمایی سبب سرد شدن سیستم می‌گردند. این پوشش‌ها همچنین با داشتن مقاومت مناسب در برابر محیط فضا می‌توانند از سامانه در برابر مخاطرات این محیط حفاظت نمایند. پوشش کنترل گرمایی سفید، حاوی رنگ‌دانه اکسید روی در رزین سیلیکات پتاسیم با عنوان تجاری Z-93، در دهه ۱۹۶۰ میلادی به عنوان اولین پوشش کنترل گرمایی، تهیه و مورد استفاده قرار گرفت

جدول ۲. مشخصات رزین سیلیکات پتاسیم.

ترکیب	SiO ₂	K ₂ O	محتوای جامد	SiO ₂ :K ₂ O
غلظت (% W/W)	۶۰/۲۶	۳۲/۴۵	٪۳۱/۷۴	۱/۸۵۷

به منظور تهیه رنگ‌دانه نوع C، در مرحله اول ۵۰۰ میلی‌لیتر آب مقطر و ۴۷۵ میلی‌لیتر اتانول را در ظرف آزمایش ریخته و در حالی که محلول توسط همزن مغناطیسی به هم می‌خورد ۱۳ گرم ستیل‌تری‌متیل‌آمونیم به آن اضافه شد. ۰/۳ گرم نمک استات روی را در ۸۵ میلی‌لیتر محلول آبی آمونیاک ۲۸ درصد حل کرده و به محلول قبلی اضافه گردید. در مرحله دوم، ۳۶ میلی‌لیتر تترااتیل‌اورتوسیلیکات را به تدریج و آرام آرام به محلول اضافه کرده و به آن اجازه داده شد تا به مدت دو ساعت در دمای اتاق هم بخورد. پس از دو ساعت، مخلوط سفید رنگ حاصل صاف شده و پس از خشک شدن در آن با دمای ۷۵°C، به مدت هشت ساعت در دمای ۵۴۰°C کلسینه شد. پودر سفید به دست آمده MCM-41 نام دارد [۱۲]. تمام مواد مورد استفاده جهت تولید این رنگ‌دانه، خالص بوده و از شرکت مرک تهیه شدند. به منظور افزایش غلظت اکسید روی در این ماده، یک عملیات اضافی بر روی آن صورت گرفت. برای این کار، ابتدا ۸۴/۳۴ گرم پودر MCM-41 را در ۸۴۳/۴ میلی‌لیتر آب مقطر معلق ساخته و سپس در حالی که مخلوط توسط همزن مغناطیسی به هم می‌خورد، ۱۱۳/۷ گرم استات روی حل شده در ۷۳۳/۸ میلی‌لیتر آب مقطر به آن اضافه شد. در صورت تغییر pH مخلوط از مقدار هفت، اکسید روی به دلیل داشتن خاصیت آمفوتریک حل خواهد شد، بنابراین به منظور ثابت نگه‌داشتن pH مخلوط در هفت، از آمونیاک رقیق شده استفاده شد. پس از تنظیم pH، مخلوط حاصل به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط هم زده شده و سپس صاف، در دمای ۷۵°C خشک و در دمای ۳۰۰°C به مدت هشت ساعت کلسینه شد. به منظور تهیه پوشش، پودر رنگ‌دانه و رزین با یکدیگر مخلوط شده و به مدت سه ساعت تا رسیدن به

و از آن زمان تاکنون، مطالعات گسترده‌ای بر روی آن انجام گرفته است. این رنگ در نسبت رنگ‌دانه به رزین ۱:۴/۳، دارای جذب خورشیدی ۰/۱۵ و نشر گرمایی ۰/۹۰ بوده و قابلیت حفاظت از سامانه در برابر تمام عوامل مخرب بیرونی را داراست [۹].

در تحقیق حاضر، ابتدا با استفاده از رنگ‌دانه‌های اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیم روتایل و رنگ‌دانه تولید شده درون رزین سیلیکات پتاسیم؛ پوشش کنترل گرمایی سفید تهیه شد و آنگاه به منظور بررسی رفتار این پوشش در برابر محیط فضای شبیه‌سازی شده، در معرض اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و سیکل گرمایی قرار گرفت. جذب، نشر و همچنین مورفولوژی سطح نمونه‌ها قبل و پس از انجام آزمون بررسی و با یکدیگر مقایسه شد. تهیه پوشش کنترل گرمایی به منظور کنترل گرمای ورودی به سامانه‌های فضایی اولین بار است که در کشور انجام شده است. تولید رنگ با خواص نوری-گرمایی ویژه جهت استفاده در ماهواره، ضمن بومی نمودن فناوری تولید این قبیل پوشش‌ها در داخل و خارج نمودن آن از انحصار چندین کشور خاص، کشور را از واردات این کالا بی‌نیاز می‌سازد. تهیه رنگ‌دانه تولید شده و استفاده از آن به جای اکسید روی نخستین بار است که در دنیا انجام گرفته و این رنگ‌دانه، با داشتن خلوص و اندازه ذره‌ای قابل کنترل می‌تواند جایگزین مناسبی برای اکسید روی باشد.

مواد و روش تحقیق

مشخصات رنگ‌دانه‌های اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم روتایل در جدول ۱ و مشخصات رزین سیلیکات پتاسیم استفاده شده، در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات رنگ‌دانه‌های اکسید روی و دی‌اکسید تیتانیم روتایل.

ترکیب	غلظت (% W/W)	اندازه ذره‌ای
ZnO	۹۹/۴۲	۰/۶-۲/۰ μm
Rutile TiO ₂	≥۹۴٪	۰/۱۸ μm

دانه‌بندی مناسب هم زده شدند. مشخصات ترکیب شیمیایی پوشش‌های تهیه شده در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳. مشخصات ترکیب شیمیایی پودرهای تهیه شده

کد نمونه	نسبت رنگ‌دانه به رزین	ZnO (g)	TiO ₂ (g)	C (g)	سیلیکات پتاسیم (g)	آب مقطر (g)
A	۳/۵:۱	۳۵	-	-	۳۱/۵	۲۳
B	۳/۵:۱	-	۳۵	-	۳۱/۵	۳۶
C	۳/۵:۱	-	-	۳۵	۳۱/۵	۶۴

۷۰ Gy در فشار محیط و به مدت پنج ساعت انجام گرفت. به منظور انجام آزمون سیکل حرارتی، با استفاده از مخلوط یخ خشک - اتانول و خشک کن، محدوده دمایی ۱۰۰°C - ۷۵°C ایجاد شد. سرعت تغییرات دما، ۱۲ °C/min و تعداد سی سیکل در این محدوده دمایی اعمال شد. ضریب جذب خورشیدی رنگ‌ها با استفاده از دستگاه طیف سنج بازتابی ۲ مدل LPSR300، ساخت شرکت AZ Technology و نشر گرمایی توسط دستگاه TEMP 2000A ساخت شرکت AZ Technology اندازه‌گیری شدند. به منظور بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌های رنگ از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی ۳ مدل S4160 ساخت شرکت Hitachi ژاپن با ولتاژ ۱۵ کیلو ولت و پرتو الکترون ثانویه استفاده شد.

نتایج و بحث

پس از اتمام فرایند پخت نمونه‌ها، میزان بازتاب و نشر گرمایی اولیه نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. پس از انجام آزمون‌ها، مجدداً جذب خورشیدی و نشر گرمایی اندازه‌گیری شد. نتایج اندازه‌گیری جذب خورشیدی و نشر گرمایی پوشش‌ها قبل و پس از آزمون در جدول‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است.

پوشش‌های تولید شده بر روی زیرلایه‌های آلومینیومی اسپری شدند. فشار مورد استفاده برای اسپری، ۳-۴ بار و فاصله از سطح زیرلایه ۲۰-۱۵ سانتیمتر انتخاب شد. قبل از اسپری کردن رنگ، جهت آماده سازی زیرلایه‌ها؛ از روش سنباده‌زنی معمولی و آندایزینگ استفاده شد. آندایزینگ زیرلایه‌های آندایز شده مطابق با استاندارد MIL-A-8625F انجام شد. از آن جایی که اکثر زیرلایه‌ها آغشته به مواد روغنی هستند، آن‌ها را به مدت ۳۰ ثانیه در محلول سود ۰/۱ نرمال فرو برده و سپس با آب مقطر به خوبی شستشو داده شدند. آنگاه زیرلایه‌ها ابتدا با سنباده‌های شماره ۴۰۰ و ۱۲۰۰ سنباده زده شده و در پایان با استون خالص شستشو شدند. پس از اعمال رنگ، نمونه‌ها در رطوبت ۶۵-۴۵ درصد به مدت هفت روز قرار داده شدند تا پخت شوند. به منظور شبیه سازی محیط دارای اکسیژن اتمی موجود در فضا، از دستگاه نیتراسیون پلاسمایی تخلیه تابناک ساخت شرکت پلاسما فن؛ با فرکانس ۱۲۰۰ هرتز، فشار محفظه ۲-۱۰×۵ torr، ولتاژ ۶۰۰ ولت، شدت جریان ۲/۴ آمپر و دبی گاز اکسیژن ۰/۰۵ ml/min به مدت پنج ساعت استفاده شد. در این آزمون انرژی هر ملکول اکسیژن برابر با ۵۴ eV در نظر گرفته شد. آزمون پرتو دهی الکترونی با استفاده از دستگاه زیمنس آنکورا ۱ با دوز جذبی

²- Spectroreflectometer

³- FE SEM

¹- Siemens- Oncor

جدول ۴. جذب خورشیدی اولیه و نهایی نمونه‌ها.

کد نمونه	جذب خورشیدی اولیه (α)	پس از اکسیژن اتمی	پس از پرتودهی الکترونی	پس از سیکل حرارتی
A	۰/۲۱۰	۰/۲۱۹	۰/۲۱۵	۰/۲۲۱
B	۰/۲۹۶	۰/۳۱۰	۰/۳۰۲	۰/۳۱۱
C	۰/۲۷۳	۰/۲۸۰	۰/۲۷۸	۰/۲۸۸

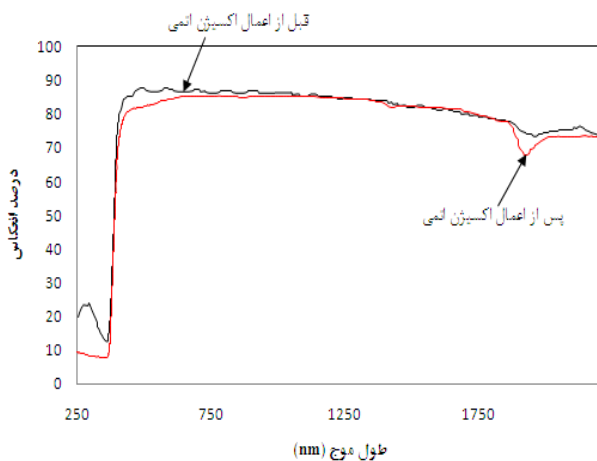
جدول ۵. نشر گرمایی اولیه و نهایی نمونه‌ها.

کد نمونه	نشر گرمایی اولیه (ϵ)	پس از اکسیژن اتمی	پس از پرتودهی الکترونی	پس از سیکل حرارتی
A	۰/۹۱۰	۰/۹۰۸	۰/۹۱۰	۰/۹۱۰
B	۰/۸۷۲	۰/۸۷۲	۰/۸۷۴	۰/۸۷۲
C	۰/۹۱۷	۰/۹۱۴	۰/۹۱۴	۰/۹۱۳

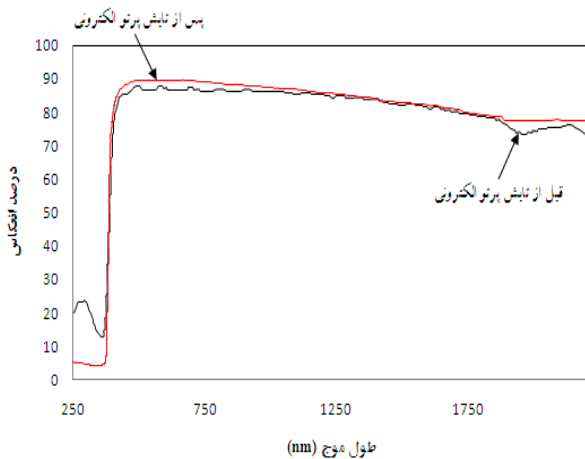
اتمی مقاومت می‌کند. بررسی‌های انجام شده بر روی رنگ‌های سیلیکونی و پلی‌اورتانی نشان داد که پیوند میان اتم‌ها در رزین آلی در اثر اصابت اتم‌های اکسیژن رفته رفته شکسته شده و اتلاف جرم اتفاق می‌افتد. این اتلاف جرم با بیشتر شدن زبری سطحی نمود پیدا می‌کند [۱۳]. در پاره‌ای دیگر از پوشش‌های دارای رزین سیلیکونی، اتم‌های کربن جای خود را به اتم‌های اکسیژن داده و سطح به سیلیکات تبدیل می‌شود. تنش ناشی از تبدیل شدن سطح به سیلیکات سبب ترک خوردن پوشش و نفوذ اکسیژن از فواصل میان ترک‌ها می‌شود [۱۴]. تابش پرتو الکترونی با انرژی کم در برخی موارد باعث کاهش زبری سطحی و صاف شدن سطح می‌شود [۱۱]. این عوامل سبب تغییر ناچیزی در خواص نوری و گرمایی پوشش‌های کنترل گرمایی می‌شوند. نتایج نشان داد که هر سه نوع پوشش و رنگ‌دانه به دلیل داشتن خاصیت معدنی، در برابر الکترون‌ها مقاوم هستند و اثر قابل ملاحظه‌ای از صاف شدگی بر روی سطح رنگ مشاهده نشد. پوشش‌های

نتایج نشان دادند که خواص نوری و گرمایی پوشش‌های کنترل گرمایی سیلیکاتی در اثر حمله اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و سیکل حرارتی بدون تغییر باقی می‌مانند. پوشش‌های سیلیکاتی به دلیل داشتن پیوندهای سیلیکون - اکسیژن قوی، در برابر حمله اکسیژن اتمی بدون تغییر باقی می‌مانند. پوشش‌های سیلیکاتی بر خلاف پوشش‌های سیلیکونی و پلی‌اورتانی؛ در برابر انرژی ناشی از برخورد اتم‌های اکسیژن دچار فرسایش و خوردگی نمی‌شوند. میزان بازتاب نمونه‌ها قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی، تغییر قابل ملاحظه‌ای را نشان نداد. به دلیل اینکه میزان زبری سطح رنگ در اثر برخورد اتم‌های اکسیژن تغییر نکرد؛ نشر گرمایی نیز بدون تغییر باقی مانده است. رنگ‌دانه‌های اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیم و رنگ‌دانه نوع C، هر سه دارای ماهیت معدنی هستند و برخورد اتم‌های اکسیژن، انرژی کافی جهت تخریب این رنگ‌دانه‌ها را ندارد. رزین سیلیکاتی به دلیل داشتن ماهیت غیرآلی، به خوبی در برابر خوردگی ناشی از اکسیژن

می دهد که، رنگ دارای رنگدانه اکسید روی نیز مانند رنگ Z-93 [۱۷]، در برابر اکسیژن اتمی پایدار بوده و تغییری در ریخت سطحی و خواص نوری و حرارتی آن مشاهده نشد. این رنگ بر خلاف رنگ های با پایه سیلیکونی که در برابر اعمال اکسیژن اتمی ترک می خورند [۲]؛ و رنگ های با پایه پلی اورتان که زبری سطح آن ها افزایش می یابد [۱۶]، در برابر اکسیژن اتمی مقاوم است. تابش پرتو الکترونی نیز میزان بازتاب پوشش را دستخوش تغییر محسوسی نکرد و مورفولوژی سطح نمونه نیز با زبری و ناهمواری مواجه نشد. به دلیل اعمال پوشش فوق بر روی زیرلایه آندایز شده، پس از انجام سیکل حرارتی پوشش دچار ترک خوردگی نشد.



شکل ۱. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه اکسید روی قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی

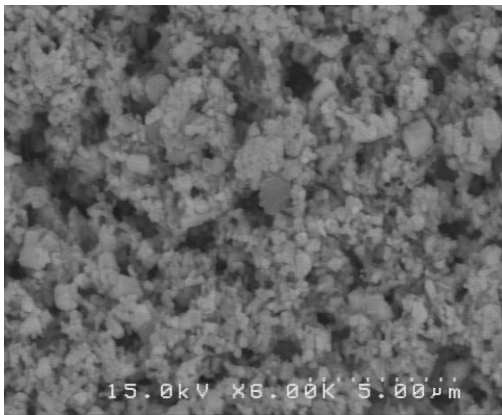


شکل ۲. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه اکسید روی قبل و پس از تابش پرتو الکترونی

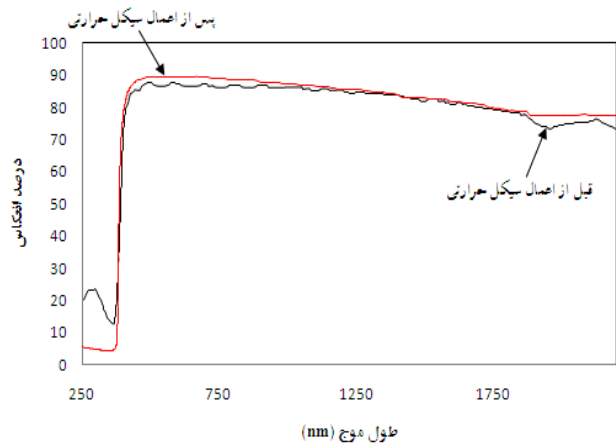
کنترل گرمایی سیلیکاتی، به دلیل عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی میان پوشش و زیرلایه در حین سیکل حرارتی دچار ترک خوردگی می شوند، از این روی بهتر است این پوشش ها بر روی زیرلایه آندایز شده اعمال شوند تا از مقدار این اختلاف کاسته شود [۱۵].

اثر محیط فضای شبیه سازی شده بر پوشش دارای رنگدانه اکسید روی

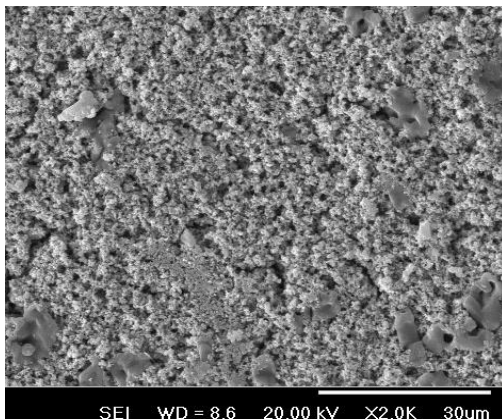
میزان بازتاب این رنگ قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و سیکل حرارتی به ترتیب در شکل های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. همان گونه در شکل ها دیده می شود پس از اعمال شرایط محیط فضای شبیه سازی شده، میزان انعکاس رنگ تغییر قابل ملاحظه ای نکرده است. اتم های اکسیژن موجود در پلاسما این انرژی را دارند که پیوندهای مواد پلیمری سطح پوشش های آلی را تحت تأثیر قرار داده و بشکنند. به عبارت دیگر چون انرژی پیوندی زنجیره های پلیمری از انرژی پیوندی آن ها با اکسیژن کمتر است، پیوندشان شکسته شده و ترکیبات اکسیدی تشکیل می دهند [۲]. این ساختارهای جدید، بازتاب نور را تحت تأثیر قرار داده و آن را کاهش می دهند. در مورد پوشش فوق و سایر پوشش های با پایه سیلیکات، ترکیب سطح کاملاً SiO_2 است و اکسیژن ترکیب دیگری با سطح تشکیل نمی دهد؛ از این رو میزان بازتاب پس از اعمال اکسیژن اتمی تغییر نمی کند. رزین های سیلیکونی تحت تأثیر اکسیژن اتمی، به دلیل تشکیل ساختارهای ناقص SiO_x و تنش های ناشی از این تغییر شکل، دچار ترک خوردگی می شوند ولی ساختارهای سیلیکاتی در برابر اکسیژن اتمی پایدار و ثابت باقی می مانند. رنگدانه های معدنی نیز در برابر برخورد و سایش ناشی از اکسیژن اتمی پایدار هستند [۱۶]. میزان بازتاب این پوشش پس از اعمال اکسیژن اتمی، تغییر قابل توجهی نکرد و تصاویر SEM به دست آمده از سطح نمونه قبل و پس از انجام آزمون ها، همان گونه که در شکل های ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است، اثری از ایجاد حفره، سایش و کاهش ماده در اثر حمله اکسیژن اتمی نشان نداد. مقایسه نتایج به دست آمده با رنگ Z-93 نشان



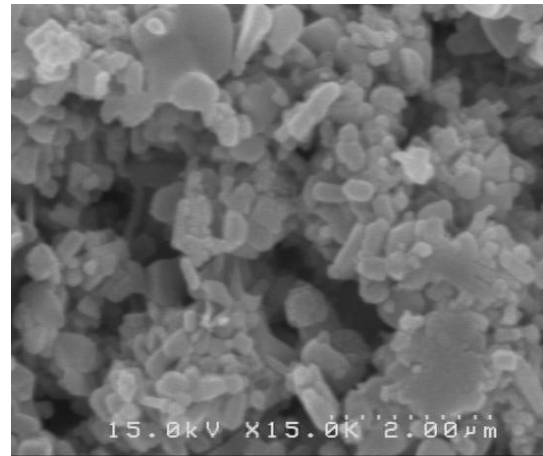
شکل ۶. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه اکسید روی پس از تابش پرتو الکترونی.



شکل ۳. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه اکسید روی قبل و پس از اعمال سیکل حرارتی



شکل ۷. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه اکسید روی پس از انجام سیکل حرارتی.

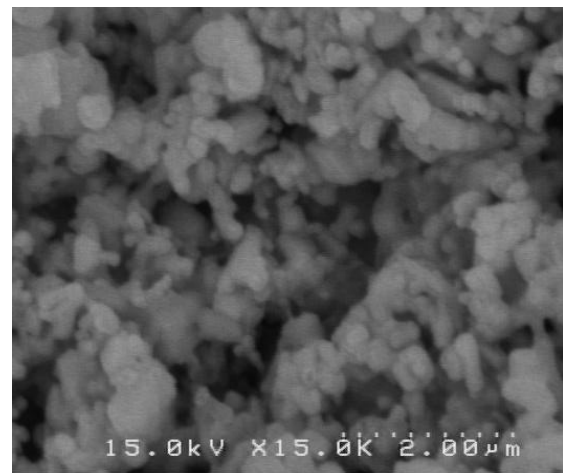


شکل ۴. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه اکسید روی قبل از انجام آزمون.

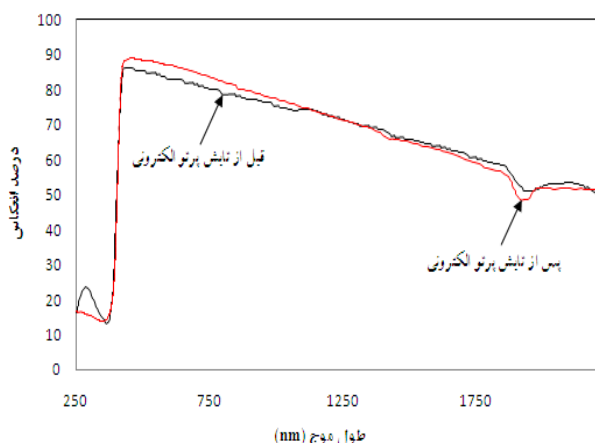
اثر محیط شبیه سازی شده بر پوشش دارای رنگدانه

دی اکسید تیتانیم

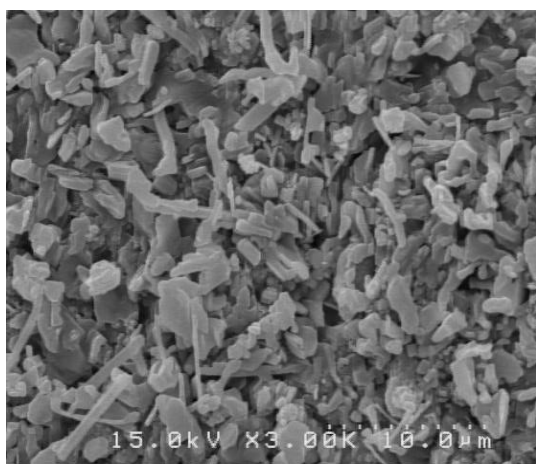
طیف های بازتابی این رنگ قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و سیکل حرارتی به ترتیب در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. مشاهده طیف های بازتابی نشان می دهد که میزان بازتاب این پوشش در مقایسه با پوشش دارای رنگدانه اکسید روی کمتر است و میزان جذب رنگدانه دی اکسید تیتانیم در ناحیه مادون قرمز نزدیک بیشتر از اکسید روی است. همان طور که مشاهده می شود، اعمال اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و انجام سیکل حرارتی تغییر محسوسی در میزان انعکاس پوشش فوق ایجاد نمی کند. در این پوشش رنگدانه و رزین هر دو در مقابل شرایط شبیه سازی شده مقاوم هستند. تصاویر SEM از سطح پوشش مورد



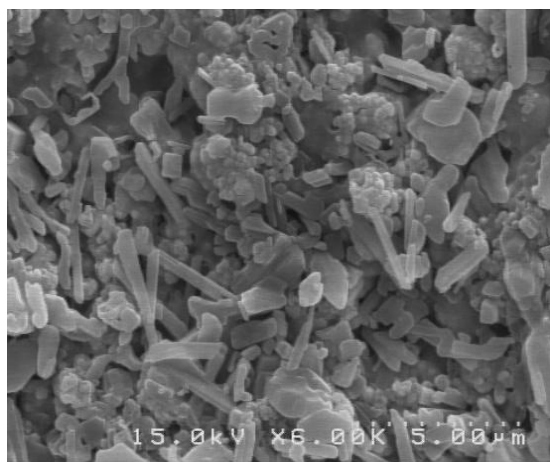
شکل ۵. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه اکسید روی پس از اعمال اکسیژن اتمی.



شکل ۹. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیم قبل و پس از تابش پرتو الکترونی.

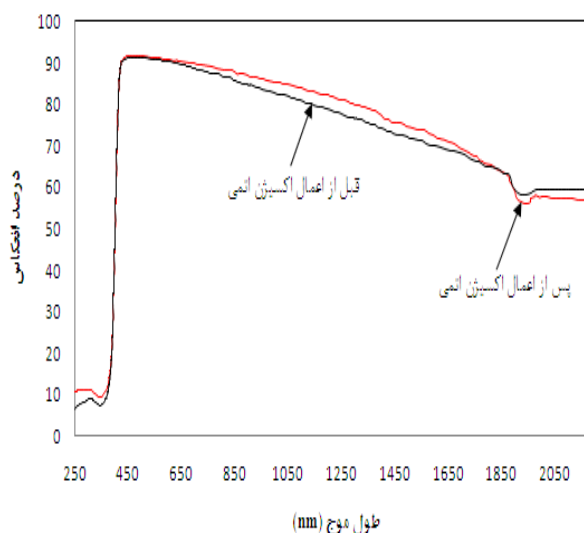


شکل ۱۰. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیم قبل از انجام آزمون.



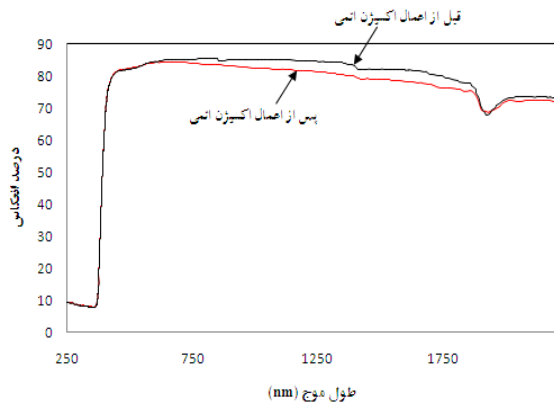
شکل ۱۱. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیم پس از اعمال اکسیژن اتمی.

نظر قبل و پس از انجام آزمون‌ها در شکل‌های ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود اثری از کاهش ماده، افزایش ناهمواری و خلل و فرج در سطح نمونه دیده نمی‌شود. رنگدانه دی اکسید تیتانیم، به دلیل معدنی بودن، از مقاومت مناسب در برابر اکسیژن اتمی برخوردار است و از آن جایی که رزین سیلیکاتی نیز در برابر اکسیژن اتمی پایدار است؛ اتم‌های اکسیژن موجود در پلاسما قادر نیستند پیوندهای Si-O موجود در سطح را تحت تأثیر قرار دهند و با سطح ترکیب دیگری تشکیل نمی‌دهند. بنابراین پس از اعمال اکسیژن اتمی و تابش پرتو الکترونی، تغییری در میزان بازتاب و ریخت سطحی مشاهده نشد. پس از آزمون سیکل حرارتی؛ سطح پوشش، همان گونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده، دچار ترک خوردگی شد. از آن جا که زیرلایه استفاده شده در این نمونه سنباذه زده شده بود، تفاوت میان ضریب انبساط گرمایی پوشش و زیرلایه سبب ترک خوردگی پوشش گردید ولی در میزان جذب و نشر آن تغییری مشاهده نشد.



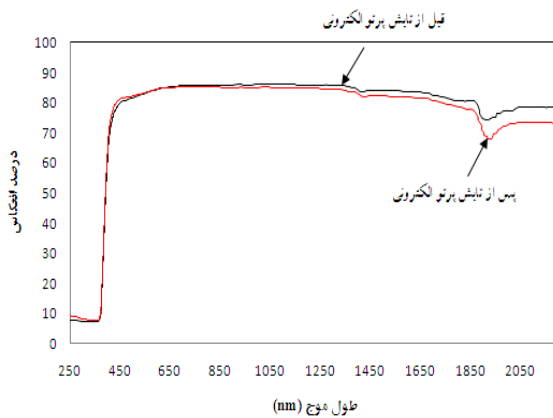
شکل ۸. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیم قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی.

که رنگ دانه نوع C که به طور آزمایشگاهی تولید شده از مقاومت خوبی در برابر شرایط شبیه سازی شده محیط فضا برخوردار است و این قابلیت را دارد که به جای اکسید روی در این پوشش ها بکار رود.



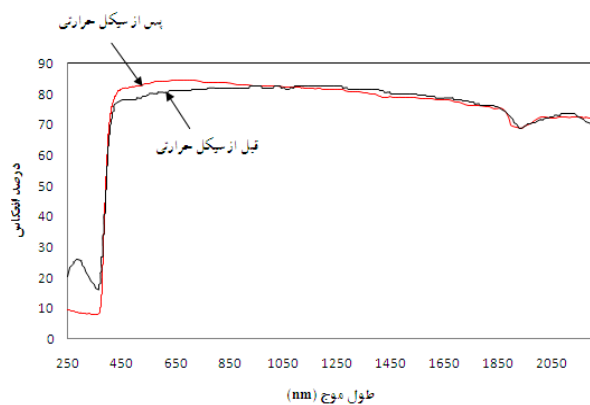
شکل ۱۲. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیوم پس از تابش پرتو الکترونی.

شکل ۱۴. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه نوع C قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی.



شکل ۱۳. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگدانه دی اکسید تیتانیوم پس از انجام سیکل حرارتی.

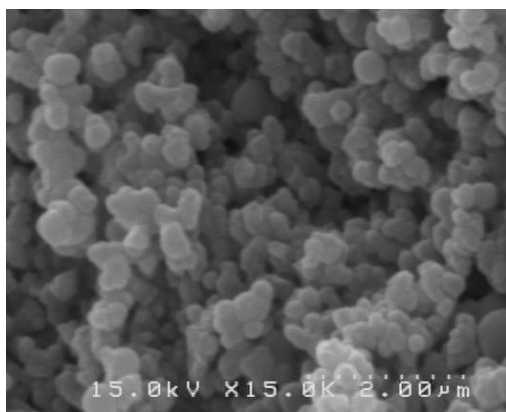
شکل ۱۵. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه نوع C قبل و پس از تابش پرتو الکترونی.



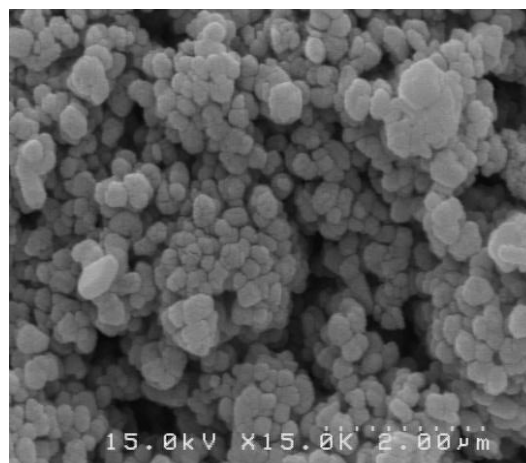
شکل ۱۶. تغییر در میزان بازتاب پوشش دارای رنگدانه نوع C قبل و پس از اعمال سیکل حرارتی.

اثر اعمال اکسیژن اتمی بر رنگ دارای رنگدانه نوع C

در شکل های ۱۴، ۱۵ و ۱۶ به ترتیب طیف های بازتابی پوشش مذکور قبل و پس از اعمال اکسیژن اتمی، تابش پرتو الکترونی و سیکل حرارتی نشان داده شده است. مقایسه نمودارها نشان می دهد، که تغییرات میزان بازتاب بسیار ناچیز است و رنگ دانه نوع C از مقاومت کافی و مناسب در برابر عوامل فوق برخوردار است. رزین های سیلیکاتی بر خلاف رزین های آلی [۱۶ و ۲] از مقاومت خوبی در برابر اکسیژن اتمی برخوردار هستند و ماهیت غیرآلی رنگدانه نوع C از تخریب آن در اثر حمله اکسیژن اتمی جلوگیری می کند. تصاویر SEM از سطح پوشش قبل و پس از انجام آزمون ها، همان طور که در شکل های ۱۷، ۱۸، ۱۹ و ۲۰ نشان داده شده، تغییر چشمگیری در ریخت نمونه، ناهمواری سطحی و شکل ذرات رنگدانه نشان نمی دهد. به عبارت دیگر نتایج نشان می دهند



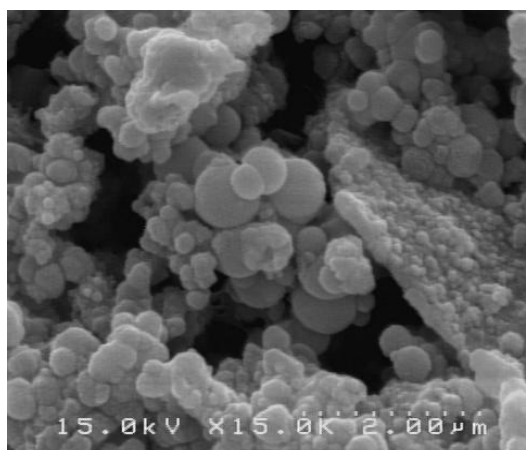
شکل ۲۰. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگ‌دانه نوع C پس از انجام سیکل حرارتی



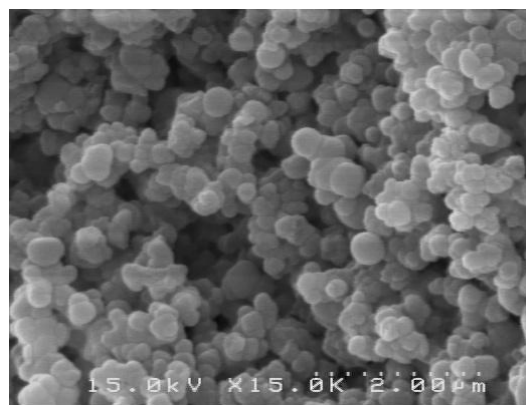
شکل ۱۷. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگ‌دانه نوع C قبل از انجام آزمون.

نتیجه‌گیری

پوشش‌های کنترل گرمایی با پایه سیلیکاتی از مقاومت خوبی در برابر شرایط شبیه سازی شده محیط فضا برخوردار هستند. رزین‌های غیرآلی؛ مانند سیلیکات پتاسیم، از تخریب و خوردگی پوشش در اثر حمله اکسیژن اتمی و تابش پرتو الکترونی جلوگیری می‌کنند و در صورت اعمال پوشش بر زیرلایه آندایز شده در برابر سیکل حرارتی نیز مقاوم هستند. رنگ‌دانه‌های معدنی مانند اکسید روی، دی‌اکسید تیتانیم و رنگ‌دانه تولید شده؛ قادر هستند در محیط شبیه سازی شده بدون تغییر در میزان بازتاب، بکار روند. استفاده از پوشش‌های سیلیکاتی به منظور حفاظت از سامانه در مأموریت‌های طولانی مدت توصیه می‌شود و رنگ‌دانه‌ای که در تحقیق حاضر تهیه و مورد استفاده قرار گرفت این توانایی را دارد که در پوشش‌های کنترل گرمایی به جای اکسید روی استفاده شود با این قابلیت که میزان ناخالصی و اندازه ذره‌ای در آن کاملاً قابل کنترل است.



شکل ۱۸. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگ‌دانه نوع C پس از تابش پرتو الکترونی



شکل ۱۹. تصویر SEM از سطح پوشش دارای رنگ‌دانه نوع C پس از اعمال اکسیژن اتمی

- منابع
15. S.A. Daneman, Selection Rationale, Application, Optical Properties and Life Verification of Z-93 for the Space Station, McDonnell Douglas Aerospace, Report 94H0632, 1994.
 16. I. Gouzman, Atomic Oxygen of Uncoated and Coated High-Frequency Circuit Materials, High Performance Polymer, 13 (2001) S505-S516.
 17. D. Dooling, Material Selection Guidelines to Limit Atomic Oxygen Effects on Spacecraft Surface, NASA/ TP-1999-209260, 1999.
 1. European Cooperation For Space Standardization, ECSS-E-ST-10-04C, Space Engineering, Space Environment, ESA Publications Division, 2008.
 2. J.I. Kleiman, Protection of Materials and Structures from Space Environment, Space Technology Proceedings, Kluwer Academic Publisher, 5 (2003) 194-200.
 3. J.G. Keller, Thermal Control Coatings, US Pat. 2008/0038454 A1, 2008.
 4. D.A. Jaworske, Correlation of Predicted and Observed Optical Properties of Multilayer Thermal Control Coatings, Thin Solid Films, 332(1998), 30-33.
 5. T. Horie, Thermal Control Coating Composition, US Pat. 4741778, 1988.
 6. S. Berman, Spacecraft Materials Development Programs For Thermal Control Coatings And Space Environmental Testing, Amptiac Quarterly, 8(2004).
 7. J.B. Schutt, Alkali-Metal Silicate Binders And Methods Of Manufacture, US Pat. 4162169, 1979.
 8. B. Schutt, Potassium Silicate- Zinc Coatings, US Pat. 3620784, 1971.
 9. Y. Harada, M. Deshpanoe, Requalification of White Thermal Control coatings, IIT Research Institute , Chicago, 1994.
 10. X.D. Wang , S.Y. He, D.Z. Yang, A study of electron exposure effects on ZnO/K₂SiO₃ thermal control coatings, Materials Chemistry and Physics, 78 (2002) 38-42.
 11. H. Xiao, C. Li, M. Sun, D. Yang, M. Di, Sh. He, An analysis on optical degradation of ZnO/silicone white paint under proton exposure, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 266 (2008) 86-92.
 12. S. Velu, Characterization of MCM-41 mesoporousmolecular Sieves containing copper and zinc and their Catalytic performance in the selective oxidation Of alcohols to aldehydes, Microporous and Mesoporous Materials, 54(2002), 113-126.
 13. Y. Nakayama, Evaluation and Analysis of Thermal Control Materials under Ground Simulation Test for Space Environment Effects, High Performance Polymers, IOP Publishing, 13 (2001) S433-S451.
 14. G. Bitetti, M. Marchetti, S. Mileti, F. Valente, S. Scaglione, Degradation of the surfaces exposed to the space environmen, Acta Astronautica 60 (2007) 166 – 174.