

Comparison of the effects of atomic oxygen on two black & white polyurethane thermal control coatings

Abstract

In this paper firstly thermal control coatings were produced with polyurethane resin and titanium dioxide and carbon black pigments, then the effects of atomic oxygen, as one of the most destructive elements in space, have been investigated. The Plasma oxygenation device for supply of atomic oxygen flow, scanning electron microscopy (SEM) for surface change investigation, Energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) for coating chemical structure change were used. In addition, by measuring changes in solar absorption coefficient, the total emission coefficient, roughness and coating mass, and its resistance to atomic oxygen are evaluated. The result showed that oxygen atoms destroyed the resin in surface of coating. Carbon black pigment is vulnerable against atomic oxygen because of its organic nature, while the nature of titanium dioxide is minerals and therefore resistant to atomic oxygen. In result, in addition to mass loss due to changes in coating surface, the solar absorption coefficient and the total emission coefficient are also changed.

Keywords: Atomic Oxygen, Thermal Control Coating, Polyurethane, TiO₂, Carbon Black.

مقایسه اثر اکسیژن اتمی روی دو نوع پوشش کنترل حرارتی سیاه و سفید پلی‌اورتانی

چکیده

در این تحقیق ابتدا پوشش‌های کنترل حرارتی با استفاده از رزین پلی‌اورتان و رنگدانه‌های دی‌اکسید تیتانیم و کربن سیاه تولید و سپس اثر اکسیژن اتمی، به عنوان یکی از عوامل مخرب موجود در فضا، روی آن‌ها بررسی شده است. از دستگاه اکسیژن‌دهی پلاسمایی برای تأمین جریان اکسیژن اتمی، دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی تغییرات ایجاد شده روی سطح و دستگاه‌های طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس (EDS) و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز (FTIR) برای بررسی تغییرات ساختار شیمیایی پوشش استفاده شده است. همچنین با اندازه‌گیری تغییرات ضریب جذب خورشیدی، ضریب نشر کلی، زبری و جرم پوشش، مقاومت آن در برابر اکسیژن اتمی ارزیابی شده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده، رزین موجود در سطح پوشش توسط اتم‌های اکسیژن تخریب می‌شود. رنگدانه کربن سیاه به‌دلیل ماهیت آلی آن در برابر اکسیژن اتمی آسیب‌پذیر است درحالی‌که دی‌اکسید تیتانیم ماهیت معدنی دارد و در برابر اکسیژن اتمی مقاومت می‌کند. در نتیجه علاوه بر کاهش جرم به علت تغییرات ایجاد شده در سطح پوشش ضریب جذب خورشیدی و ضریب نشر کلی نیز تغییر می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: اکسیژن اتمی، پوشش کنترل حرارتی، پلی‌اورتان، دی‌اکسید تیتانیم، کربن سیاه.

مقدمه

ماهورها و فضاپیماهای مستقر در فضا همواره در معرض تابش‌های شدیدی از طرف خورشید هستند که می‌تواند دما را تا حد از کار افتادن قطعات آن‌ها افزایش دهد. اثر گرمای تولید شده توسط قطعات داخلی را نیز باید به مشکل کنترل دما اضافه کرد. از طرفی در فضا امکان دفع حرارت از طریق هدایت و همرفت وجود ندارد و در نتیجه تنها روش ممکن برای کاهش دما، انتقال حرارت از طریق تابش (امواجی مانند مادون قرمز) است (Gerigorevskiy, 2009; Johnson, 2003). پوشش‌های کنترل حرارتی، که از رزین‌هایی نظیر پلی‌اورتان و پلی‌سیلیکون و رنگدانه‌هایی نظیر دی‌اکسیدتیتانیوم، کربن سیاه و اکسیدروی ساخته می‌شوند، به واسطه خواص نوری خود یعنی ضریب جذب خورشیدی^۱ (α_s) و ضریب نشر کلی^۲ (ϵ_t)، تعادل حرارتی ماهواره‌ها و سازه‌های فضایی را برقرار می‌کنند (Johnson, Heidenreich, Mantz, Baker, Donley, 2003). پوشش‌های سفید کنترل حرارتی دارای ضریب نشر بالا و ضریب جذب پایین و پوشش‌های سیاه کنترل حرارتی دارای ضریب جذب و نشر بالا و نسبت α/ϵ نزدیک به یک هستند که هرکدام بنابر کارایی مورد نظر در ماهواره‌ها و فضاپیماها استفاده می‌شوند. در محیط فضا عوامل مخربی نظیر سیکل حرارتی، پرتوهای الکترونی و پروتونی، تابش فرابنفش و اکسیژن اتمی وجود دارند که روی این پوشش‌ها تأثیر می‌گذارند و خواص نوری آن‌ها را تغییر می‌دهند (Dever, Banks, deGroh, Miller, 2000). از بین عوامل ذکر شده اکسیژن اتمی اثر تخریبی بیشتری روی پوشش‌های کنترل حرارتی دارد و عمر مفید آن‌ها را کاهش می‌دهد (Gerigorevskiy, Kiseleva, Aleksandrov, 2009). لی و همکارانش (Li and et al, 2002) اثر اکسیژن اتمی روی لایه‌ای از الماس را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که الماس مقاومت بسیار خوبی از خود نشان می‌دهد. هوانگ و همکارانش (Huang, Tian, Yang, Chu, 2007) اثر اکسیژن اتمی روی پلی‌ایمید را بررسی کردند و مکانیسم تخریب نمونه توسط اکسیژن اتمی را پیچیده و شامل واکنش‌های اولیه در سطح مشترک و مرحله پایای کاهش جرم توصیف کردند. هافلوند و همکارانش (Hoflund, Gonzalez, Phillips, 2001) اثر اکسیژن اتمی را روی کوپلیم‌اورتان-سیلوکسان بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اکسیژن اتمی باعث کاهش کربن و افزایش اکسیژن در ساختار پلیمر می‌شود. شپیلمن و همکارانش (Shpilman, Gouzman, Lempert, Grossman, Hoffman, 2008) از دستگاه تولید اکسیژن پلاسمایی به عنوان منبع تولید اکسیژن اتمی استفاده کردند و اثر آن را روی پلی‌ایمید بررسی کردند و نتیجه گرفتند که اثر تخریبی اکسیژن پلاسمایی به اندازه اکسیژن اتمی است. با توجه به وجود اکسیژن اتمی در فضا و برخورد آن با پوشش پلی‌اورتانی سطح ماهواره که در افزایش طول عمر آن‌ها مؤثر است، اهمیت بررسی این موضوع بیشتر مشخص می‌شود. در این تحقیق با استفاده از دستگاه تولید اکسیژن پلاسمایی به عنوان منبع تولید اکسیژن اتمی، اثر این عامل مخرب روی دو نوع پوشش کنترل حرارتی پلی‌اورتانی بررسی شده است و برای این منظور از دستگاه‌های میکروسکوپ الکترونی روبشی^۳، طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس^۴ و طیف‌سنجی تبدیل فوریه مادون قرمز^۵ و همچنین اندازه‌گیری تغییرات ضریب جذب خورشیدی، ضریب نشر کلی، زبری و جرم پوشش استفاده شده است.

¹ Solar Absorptance² Total Emittance³ Scanning Electron Microscopy (SEM)⁴ Energy-dispersive X-ray Spectroscopy (EDS)⁵ Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR)

روش پژوهش

مواد

در این تحقیق از متیل دی فنیل ایزوسیانات^۱، ایزوفورون دی ایزوسیانات^۲، بوتیل استات^۳ و زایلن^۴ شرکت مرک آلمان، پلی کاپرولاکتون^۵ شرکت پرستورپ^۶ سوئد با نام تجاری Capa2054 با وزن مولکولی ۵۵۰، پلی تترامتیلن گلایکول^۷ با وزن مولکولی ۱۰۰۰ و عدد هیدروکسیل ۱۱۲ از پتروشیمی اراک و کاتالیست دی بوتیل تین دیلئورات^۸ با نام تجاری SND3260 محصول شرکت جیلست^۹ آمریکا استفاده شد. همچنین از کربن سیاه با نام تجاری Printex V با اندازه ذره ۲۵ نانومتر تولید شرکت دگوسای^{۱۰} آلمان و رنگدانه دی اکسید تیتانیوم (TiO₂) با اندازه ذره ۲۴۰ نانومتر تولید شرکت کمیرا^{۱۱} فنلاند به عنوان رنگدانه و دیسپریک ۱۶۱ شرکت بی‌وی کی آلمان به عنوان ترکنده و پخش کننده رنگدانه استفاده شد.

ساخت پوشش سفید

برای سنتز رزین پیش پلیمر اورتانی از یک بالون سه دهانه به همراه دماسنج، مبرد، ورودی نیتروژن، همزن مغناطیسی و حمام روغن داغ استفاده شد. ابتدا ۴۰ گرم از پلی تترامتیلن گلایکول با ۱۶ گرم ایزوفورون دی ایزوسیانات در غیاب کاتالیست و در دمای ۸۰°C به مدت ۶ ساعت واکنش داده شدند. سپس رزین ساخته شده در مخلوط ۵۰/۵۰ حجمی زایلن و بوتیل استات حل و ۴۰ گرم دی اکسید تیتانیوم به آن اضافه شد. ذرات رنگدانه توسط آسیاب گلوله‌ای با سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه در رزین پخش شدند و اندازه ذرات توسط گریندومتر بر اساس استاندارد ASTM D1210 (ASTM, 2003) تا رسیدن به اندازه ۱۰ میکرون کنترل شد. در انتها و قبل از اعمال پوشش کاتالیست به مخلوط اضافه گردید.

ساخت پوشش سیاه

ابتدا مقدار ۲۰ گرم از پلی کاپرولاکتون را با ۱۴ گرم متیل دی فنیل ایزوسیانات در دمای ۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت واکنش داده تا رزین اولیه پلی اورتانی حاصل گردد. زایلن و بوتیل استات نیز با نسبت حجمی برابر مخلوط و به همراه رنگدانه کربن سیاه به رزین افزوده شد. برای پخش شدن بهتر رنگدانه در رزین از مقدار کمی دیسپریک ۱۶۱ استفاده شد و سپس با سرعت ۶۰۰ دور در

¹ Methylenabis phenyl isocyanate (MDI)

² Isophorone diisocyanate (IPDI)

³ n-butyl acetate (nBA)

⁴ Xylene

⁵ Polycaprolactone

⁶ Perstorp

⁷ Polytetramethylene glycol (PTMG)

⁸ DibutylTin Dilaurate

⁹ Gelest

¹⁰ Degussa

¹¹ Kemira

دقیقه درون همزن قرار گرفت. اندازه ذرات بر اساس استاندارد ASTM D1210 با گریندومتر اندازه‌گیری شد تا به زیر ۱۰ میکرون برسد. در انتها و قبل از اعمال پوشش کاتالیست به مخلوط اضافه گردید.

اعمال پوشش

به منظور فسفاته کردن زیرلایه‌های آلومینیومی آن‌ها را در مخلوط اسید فسفریک، ۱-پروپانول و آب مقطر (با نسبت ۲۰:۶۰:۲۰) به مدت ۱۵ دقیقه در دمای محیط قرار داده و سپس توسط آب مقطر شسته شدند. هرکدام از زیرلایه‌ها قبل از اعمال پوشش توسط حلال شسته و خشک شدند. پوشش‌ها توسط دستگاه اسپری با فشار ۲/۵ بار و از فاصله ۲۵ سانتی متری اعمال شدند؛ سپس به مدت ۱ روز در محفظه‌ای با رطوبت ۴۰ درصد و دمای ۵۰ درجه سانتیگراد و بعد به مدت ۵ روز در محیط اتاق قرار گرفتند تا بطور کامل خشک شوند.

تجهیزات

به منظور شبیه‌سازی محیط اکسیژن اتمی از دستگاه نیتراسیون پلاسمایی تخلیه‌ی تابناک^۱ ساخت شرکت پلاسما فن ایران با فرکانس ۱۲۰۰-۶۰۰ Hz، فشار محفظه ۱۰^{-۲} Torr-۵-۲/۵، دمای ۴۵-۲۳°C، ولتاژ ۹۱۰۷-۳۷۰ V، جریان ۰/۹A-۰/۵ A، دوره کاری ۷۰ درصد و دبی گاز اکسیژن ۰/۱ ml/min به مدت زمان ۵ ساعت استفاده شد. به منظور تعیین جذب پوشش‌های کنترل حرارتی مطابق استاندارد (ECSS-Q-ST-70-09, 2008) عمل شد. در این تحقیق از دستگاه اسپکتروفوتومتر DRSV-670، ساخت جاسکوی ژاپن در محدوده طول موج ۲۲۰-۲۲۰۰ nm استفاده شد. به منظور تعیین نشر مادون قرمز پوشش‌های کنترل حرارتی از دستگاه رفلکتومتر مادون قرمز مدل Temp 2000A ساخت شرکت آرتک^۲ آمریکا مطابق استاندارد ASTM E408-71 (ASTM, 2002) استفاده شد. برای بررسی سطوح از میکروسکوپ الکترونی روبشی ساخت شرکت زایس آلمان با فاصله کاری ۱۳ میلی‌متر و ولتاژ ۶ کیلوولت استفاده گردید. جهت بررسی ترکیب عنصری سطح پوشش، قبل و بعد از اعمال اکسیژن اتمی از دستگاه طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس مدل Inca ساخت شرکت Oxford Instrument انگلستان که روی دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی نصب شده بود، استفاده شد. پوشش‌دهی طلا نیز به وسیله دستگاه لایه‌گذاری مدل SCD005 ساخت شرکت بالتک سوئیس انجام شد. جهت بررسی ترکیب شیمیایی سطح پوشش، قبل و بعد از اعمال اکسیژن اتمی از طیف سنج مدل JASCO-6300 ساخت شرکت JASCO ژاپن با وضوح ۰/۷ cm⁻¹ در محدوده ۴۰۰-۴۰۰۰ cm⁻¹ به منظور طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه نمونه استفاده شد. برای اندازه‌گیری میزان براقیت پوشش‌ها از دستگاه براقیت سنج مدل Sheen315 ساخت شرکت Sheen انگلستان استفاده شد و آزمایش مطابق با استاندارد ASTM-D523 انجام پذیرفت (ASTM, 2003). محاسبه زبری سطح نیز با استفاده از دستگاه زبری‌سنج مدل SJ-210 شرکت Miyutoyo ژاپن انجام گرفته است (DeGarmo, Black, Kohser, 2003).

¹ Glow discharge plasma nitriding

² AZ TEK

تجزیه و تحلیل داده‌ها

اثر اکسیژن اتمی بر ساختار سطح

پس از قرارگرفتن نمونه‌ها در معرض اکسیژن اتمی، سطح آن‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت. در شکل‌های ۱ و ۲ تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی و در شکل ۳ طیف EDS نمونه پوشش سفید قبل و بعد از قرارگیری در معرض اکسیژن اتمی نشان داده شده‌اند. اتم‌های اکسیژن اثر سایشی شدیدی روی پوشش‌های پلی‌اورتان دارند و این پدیده به عنوان یک نقطه ضعف در مورد این نوع پوشش‌ها شناخته می‌شود (Tribble, et al, 1996). حد تسلیم فرسایش این پوشش‌ها با استفاده از رابطه‌های ۱ و ۲ طبق استاندارد ASTM E2089-00 محاسبه شد (ASTM, 2000).

$$F = \frac{\text{کاهش جرم نمونه شاهد}}{\rho_k E_k A_k t} \quad (1)$$

$$E_p = \frac{\text{کاهش جرم پوشش}}{\rho_p A_p t F} \quad (2)$$

در این روابط A_k و A_p به ترتیب مساحت نمونه شاهد و نمونه پوشش بر حسب cm^2 ، ρ_k و ρ_p به ترتیب چگالی نمونه شاهد و نمونه پوشش است. E_k حد تسلیم نمونه شاهد است که در این تحقیق از نمونه شاهد کپتون با حد تسلیم فرسایش $3 \times 10^{-24} \text{cm}^3/\text{Atom}$ استفاده شد. در جداول ۱ و ۲ نیز تغییرات جرم، براقیت و خواص نوری نمونه‌های پوشش آورده شده‌است.

جدول ۱: تغییرات جرم، براقیت و خواص نوری نمونه پوشش سفید پس از اعمال اکسیژن اتمی

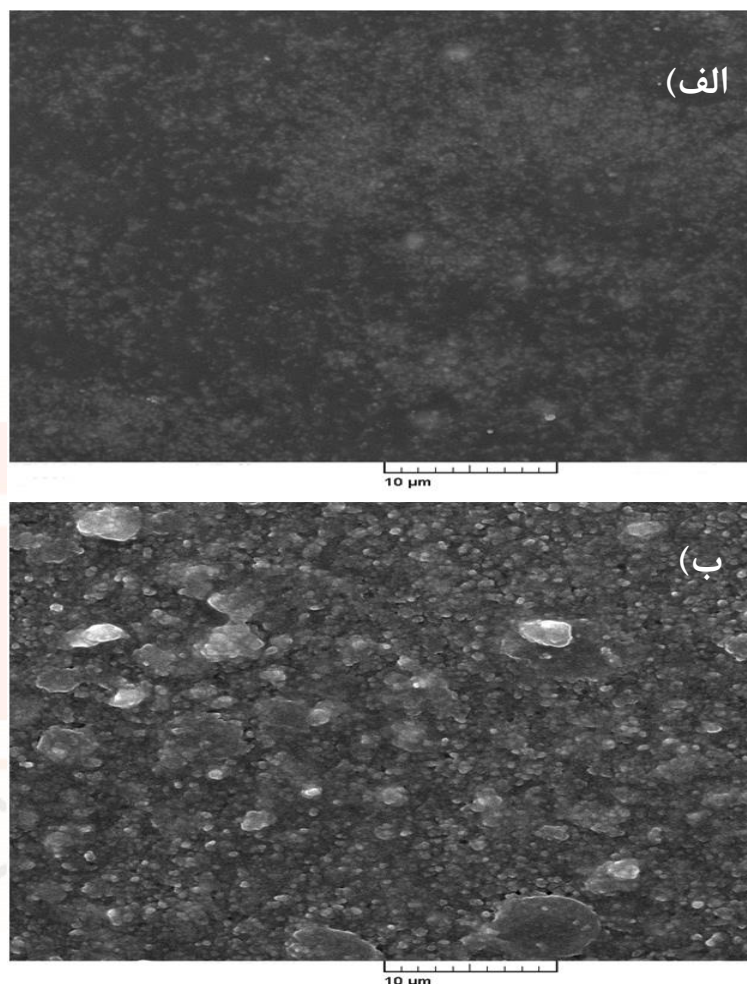
| کمیت | مقدار اولیه | مقدار ثانویه | درصد تغییر |
|-----------------------|-------------|--------------------------|------------|
| جرم (گرم) | ۳/۴۵۶۲ | ۳/۴۴۰۸ | -۰/۴۴ |
| براقیت (درصد) | ۷۰/۶ | ۳۶/۳ | -۴۸/۵ |
| حد تسلیم فرسایشی | - | $1/5116 \times 10^{-23}$ | - |
| ϵ_t | ۰/۸۶۲ | ۰/۸۴۳ | -۲/۲۰ |
| α_s | ۰/۲۳۶ | ۰/۲۳۳ | -۱/۲۷ |
| α_s/ϵ_t | ۰/۲۷۳ | ۰/۲۷۶ | ۱/۰۹ |

جدول ۲: تغییرات جرم، براقیت و خواص نوری نمونه پوشش سیاه پس از اعمال اکسیژن اتمی

| کمیت | مقدار اولیه | مقدار ثانویه | درصد تغییر |
|-----------------------|-------------|--------------------------|------------|
| جرم (گرم) | ۳/۷۶۹۴ | ۳/۷۶۲۱ | -۰/۱۹ |
| براقیت (درصد) | ۸/۹۵ | ۵/۳۷ | -۴۰ |
| حد تسلیم فرسایشی | - | ۷/۱۶۵۶×۱۰ ^{-۲۴} | - |
| ϵ_t | ۰/۸۵۷ | ۰/۸۷۱ | ۱/۶۳ |
| α_s | ۰/۹۴۸ | ۰/۹۸۶ | ۴ |
| α_s/ϵ_t | ۱/۱۰۶ | ۱/۱۳۲ | ۲/۳۵ |

بر اساس شکل ۱ و همچنین جدول ۱ سطح نمونه پوشش سفید قبل از اعمال اکسیژن اتمی صاف و براق می‌باشد. در حالی که بعد از اعمال شرایط، از براقیت پوشش کاسته می‌شود و این پدیده به علت تخریب رزین در اثر اکسیژن اتمی می‌باشد (Tribble, et al, 1996). بر اساس شکل ۲-الف نیز سطح نمونه پوشش سیاه قبل از اعمال اکسیژن اتمی و خلأ، صاف و یکدست می‌باشد. در حالی که بعد از اعمال شرایط، از صافی پوشش کاسته شده و به حالت فرش مانند^۱ در می‌آید که این پدیده به علت تخریب رزین در اثر اکسیژن اتمی می‌باشد (Pei, Li, Wang, Sun, 2009). رزین پلی‌اورتان به علت ماهیت آلی آن در برابر اکسیژن اتمی آسیب پذیر است (پیوندهایی مانند C-N، C-O و C-H موجود در پلی‌اورتان به علت پایین بودن انرژی پیوند خود که حدود ۶۵ تا ۹۸ کیلوکالری بر مول است، در برابر اکسیژن اتمی آسیب پذیر هستند). از این رو در هنگام قرار گیری در معرض اکسیژن اتمی، به تدریج رزین پلی‌اورتان تخریب می‌شود. همان‌گونه که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود، سطح پوشش پس از قرارگیری در برابر اکسیژن اتمی دچار تغییراتی شده است که می‌توان با اندازه‌گیری زبری سطح به این مورد دست یافت. در جدول ۳ تغییرات زبری سطح با قرارگیری در معرض اکسیژن اتمی برای نمونه‌ها آورده شده است. همان‌طور که مشخص است با اعمال اکسیژن اتمی بر پوشش زبری سطح زیاد شده است. بر اثر واکنش اکسیژن اتمی با ترکیبات پوشش در سطح، ترکیبات فرار تشکیل شده و بر اثر شکستن پیوندهای ماده در سطح و خارج شدن عناصر و ترکیبات از سطح، پستی و بلندی‌ها افزایش یافته‌اند. همچنین برخورد اکسیژن اتمی با انرژی بالا به پوشش باعث کنده شدن و خروج فیزیکی ماده از سطح پوشش می‌شود. تمامی این تغییرات منجر به افزایش زبری سطح شده است. البته در پوشش‌های سفید بدلیل وجود رنگدانه‌های دی‌اکسید تیتانیم که ماهیتی معدنی دارند و با قرارگیری در معرض اکسیژن اتمی تخریب می‌شوند (پیوند Ti-O در دی‌اکسید تیتانیم با داشتن انرژی پیوند در حدود ۱۱۹ کیلوکالری بر مول در برابر اکسیژن اتمی به مراتب مقاومت بیشتری نسبت به پلی‌اورتان دارد)؛ زبری سطح با تخریب رزین پلی‌اورتانی اطراف این رنگدانه‌ها افزایش بیشتری نسبت به پوشش‌های سیاه از خود نشان می‌دهد. این پدیده در شکل ۱-ب به صورت ظهور ذرات دی‌اکسید تیتانیم روی سطح نمونه قابل مشاهده است.

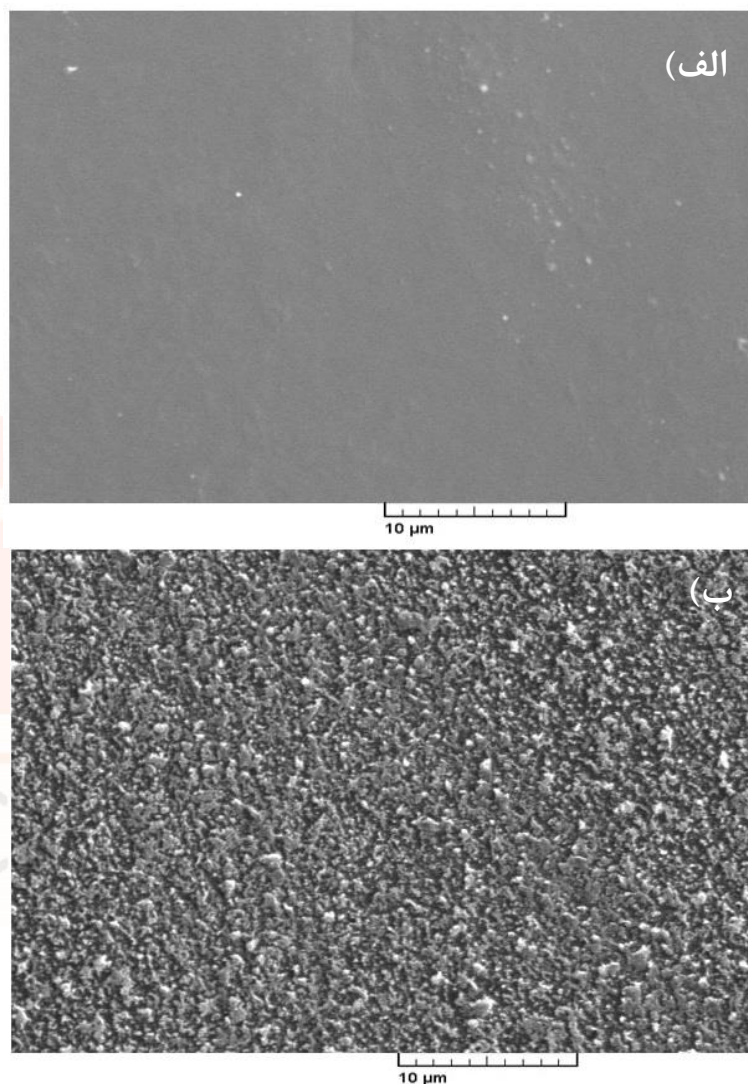
¹ Carpet-Like



شکل ۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش سفید، الف) قبل از اعمال اکسیژن اتمی، ب) بعد از اعمال اکسیژن اتمی.

علاوه بر این مطابق طیف EDS نمونه قبل از اعمال اکسیژن اتمی (شکل شماره ۳-الف) عناصر کربن، اکسیژن و تیتانیوم در ترکیب سطح نمونه وجود دارند که وجود کربن مربوط به رزین پلی‌اورتان و وجود تیتانیوم مربوط به رنگدانه است. در صورتی که مطابق طیف EDS نمونه بعد از اعمال اکسیژن اتمی (شکل شماره ۳-ب) تنها عناصر تیتانیوم و اکسیژن در ترکیب سطح نمونه وجود دارند و عدم شناسایی کربن در این طیف به منزله تخریب رزین پلی‌اورتان می‌باشد.

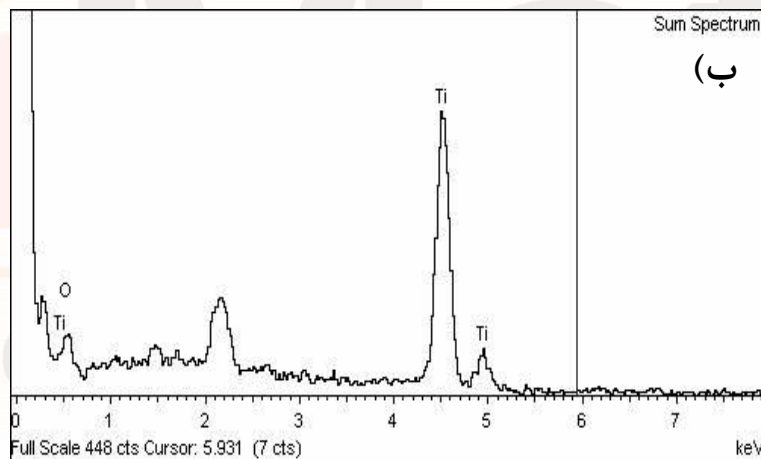
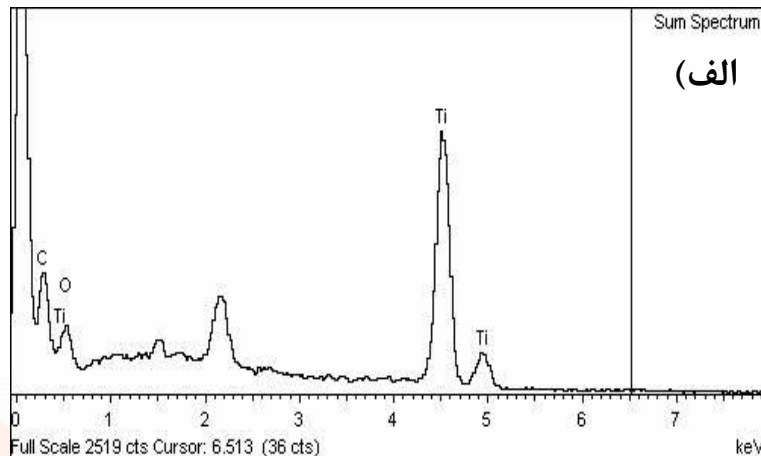
تخریب رزین توسط اکسیژن اتمی توسط طیف FTIR نیز قابل بررسی است. همانگونه که در شکل شماره ۴ مشاهده می‌شود، قله‌های جذبی مربوط به پلی‌اورتان (N-H در 3300 cm^{-1} ، C-H در 2920 cm^{-1} و C=O در 1700 cm^{-1}) ضعیف‌تر شده‌اند؛ در حالی که قله‌های جذبی مربوط به دی‌اکسیدتیتانیوم (670 cm^{-1} و 1064 cm^{-1}) با شدت بیشتری ظاهر شده‌اند (شکل ۴-الف).



شکل ۲: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی پوشش سیاه، الف) قبل از اعمال اکسیژن اتمی، ب) بعد از اعمال اکسیژن اتمی.

جدول ۳: تغییرات زبری سطح پوشش‌های سفید و سیاه پلی‌اورتانی

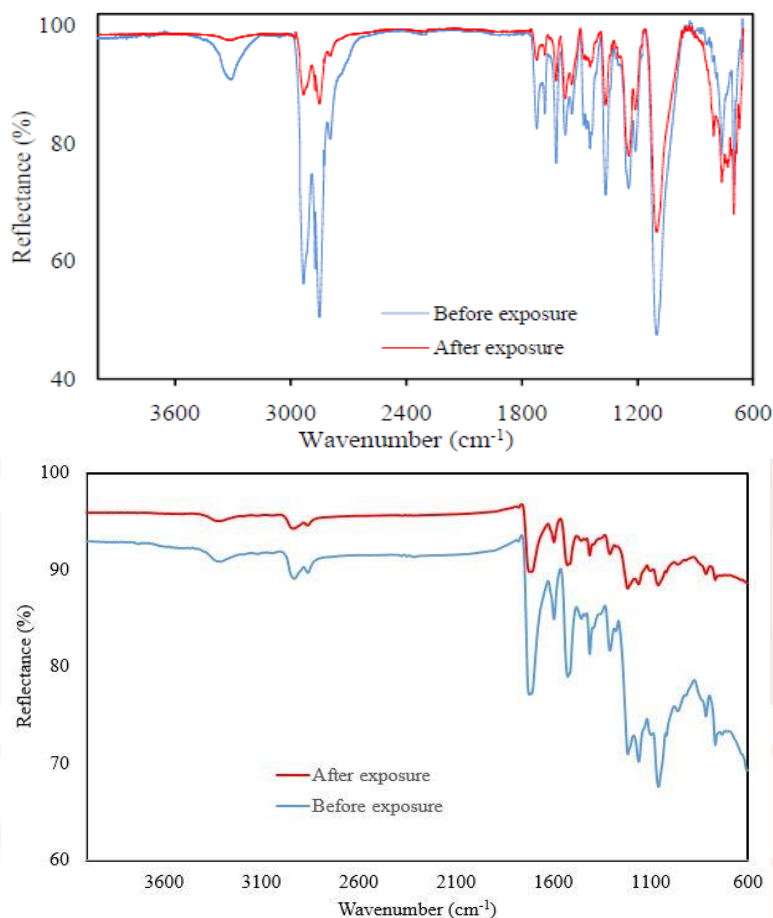
| پوشش | زمان | R _z | R _q | R _a |
|------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|
| سفید پلی‌اورتانی | قبل از اعمال اکسیژن اتمی | ۰/۷۹ | ۰/۱۳ | ۰/۱۱ |
| | بعد از اعمال اکسیژن اتمی | ۲/۲۴ | ۰/۴۸ | ۰/۲۷ |
| سیاه پلی‌اورتانی | قبل از اعمال اکسیژن اتمی | ۰/۷۳ | ۰/۱۶ | ۰/۱۳ |
| | بعد از اعمال اکسیژن اتمی | ۱/۰۲ | ۰/۲۴ | ۰/۲۰ |



شکل ۳: طیف EDS سطح نمونه، الف) قبل از اعمال اکسیژن اتمی، ب) بعد از اعمال اکسیژن اتمی.

تغییرات جرم نمونه

رزین پلی اورتان پس از تخریب به صورت مواد فرآری مانند دی اکسید کربن یا دیگر مشتقات هیدروکربنی از نمونه خارج می شود و در نتیجه جرم نمونه کاهش می یابد. البته مواد خارج شده ممکن است روی سطوح دیگر سازه فضایی بنشینند که نوعی آلودگی به حساب می آیند (Dever, et al, 2000). استفاده از پلی ال استری در ساخت رزین پوشش سیاه موجب کاهش جرم کمتر این پوشش نسبت به پوشش سفیدی شده است که در ساخت آن از پلی ال اتری استفاده شده است. بطور کلی پلی ال های استری نسبت به پلی ال های اتری، افزایش چسبندگی به زیرلایه (میرحسینی، شجاع رضوی، طاهران، برکت، ناصری، ۱۳۹۲) و مقاومت به سایش بهتری را فراهم می کند (میرحسینی، شجاع رضوی، طاهران، برکت، سی منی، ۱۳۹۲).



شکل ۴: طیف FTIR پوشش‌ها قبل و بعد از اعمال اکسیژن اتمی، (الف) پوشش سفید پلی‌اورتانی، (ب) پوشش سیاه پلی‌اورتانی.

تغییرات خواص نوری نمونه

با تخریب رزین، محیط پیرامون رنگدانه از رزین به هوا تغییر می‌کند و در نتیجه بر اساس روابط فرزنل^۱ (روابط ۳ و ۴) که در آن n_1 ضریب شکست نور محیط پیرامون رنگدانه و n_2 ضریب شکست رنگدانه هستند، با کاهش ضریب شکست نور محیط پیرامون رنگدانه، خواص نوری کاهش می‌یابد (ASTM, 2003). از طرف دیگر پس از تخریب رزین ناهمواری سطح افزایش می‌یابد که به نوبه خود باعث افزایش α_s و ϵ می‌شود (Yu, Xu, Shen, Yan, Cheng, 2009). براساس نتایج حاصله و جداول ۱ و ۲ می‌توان گفت که اکسیژن اتمی موجب کاهش ضرایب جذب و نشر در پوشش سفید و افزایش این ضرایب در پوشش سیاه پلی‌اورتانی می‌شود که این تغییرات به نحوی است که نسبت α_s/ϵ افزایش یافته و بنابراین کارایی پوشش کاهش می‌یابد.

¹ Fresnel

$$R \propto \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right)^2 \quad (۳)$$

$$\alpha = 1 - R \quad (۴)$$

نتیجه‌گیری

بر اساس نتایج به‌دست آمده، رزین پلی‌اورتانی موجود در سطح پوشش توسط اتم‌های اکسیژن (با شکستن پیوندهای پلیمری و تشکیل ترکیبات فراری همچون دی‌اکسیدکربن و دیگر مشتقات هیدروکربنی) تخریب می‌شود. رنگدانه کربن سیاه به دلیل ماهیت آلی آن در برابر اکسیژن اتمی آسیب‌پذیر است درحالی‌که دی‌اکسید تیتانیوم ماهیت معدنی دارد و در برابر اکسیژن اتمی مقاومت می‌کند. در نتیجه علاوه بر کاهش جرم به علت تغییرات ایجاد شده در سطح پوشش ضریب جذب خورشیدی و ضریب نشر کلی نیز تغییر می‌کنند. حد تسلیم فرسایشی برای پوشش‌های سفید 1.5116×10^{-23} و برای پوشش‌های سیاه 7.1656×10^{-24} محاسبه شد. اکسیژن اتمی موجب کاهش ضرایب جذب و نشر در پوشش سفید و افزایش این ضرایب در پوشش سیاه پلی‌اورتانی می‌شود که این تغییرات به نحوی است که نسبت α_s/ϵ_t افزایش یافته و بنابراین کارایی پوشش کاهش می‌یابد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که پوشش‌های سیاه و سفید پلی‌اورتانی به علت ضعف در برابر اکسیژن اتمی موجود در لایه‌های کمتر از ۳۵۰۰۰ کیلومتر، می‌توانند برای سطوح بالاتر از آن به کار گرفته شوند.

منابع

میرحسینی، سید صابر، شجاع‌رضوی، رضا، طاهران، مهرداد، برکت، سید مسعود، ناصری، سید محمدجواد. (۱۳۹۲). ارزیابی چسبندگی پوشش کنترل حرارتی سیاه پلی‌اورتانی و اثر عوامل مختلف بر آن. دومین همایش بین‌المللی و هفتمین همایش مشترک انجمن مهندسی متالورژی ایران و انجمن ریخته‌گری ایران.

میرحسینی، سید صابر، شجاع‌رضوی، رضا، طاهران، مهرداد، برکت، سید مسعود، سی‌منی، مهدی. (۱۳۹۲). بهینه‌سازی مقاومت سایشی پوشش‌های کنترل حرارتی سیاه پلی‌اورتانی برای سطوح آلومینیومی. چهاردهمین سمینار ملی مهندسی سطح.

ASTM D1210 (2003). "Standard Test Method for Fineness of Dispersion of Pigment-Vehicle Systems", ASTM International.

ASTM D523 (2003). "Standard Test Method for Specular Gloss", ASTM International.

ASTM E2089-00 (2000). "Standard practices for ground laboratory atomic oxygen interaction evaluation of materials for space applications", ASTM International.

ASTM E408-71 (2002). "Standard Test Methods for Total Normal Emittance of Surfaces Using Inspection-Meter Techniques", ASTM International.

Dever, J. Banks, B., deGroh, K., & Miller, Sh. (2000). "Degradation of Spacecraft Materials", Ohio , NASA Glenn Research Center.

DeGarmo, E.P., Black, J.T., & Kohser, R.A. (2003). "Materials and Processes in Manufacturing" (9th Edition), Wiley.

ECSS-Q-ST-70-09C (2008). "Measurements of thermo-optical properties of thermal control materials", Space product assurance.

Gerigorevskiy, A.V., Kiseleva, L. V., & Aleksandrov, N. G. (2009). "Investigations of Advanced Thermal Control Paint Coatings", *Protection of Materials and Structures from Space Environment*, Vol. 1087, Pp. 349-354.

Hoflund, G. B., Gonzalez, R. I., Phillips, S. H. (2001). "In situ oxygen atom erosion study of a polyhedral oligomeric silsesquioxane-polyurethane copolymer", *Journal of Adhesion Science and Technology*, Vol. 15, Pp. 1199-1211.

Huang, Y., Tian, X., Yang, S., & Chu, Pk (2007). "A ground-based radio frequency inductively coupled plasma apparatus for atomic oxygen simulation in low Earth orbit", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 78, Pp. 1-4.

Johnson, J. A., Heidenreich, J. J., Mantz, R. A., Baker, P. M., & Donley, M. S. (2003). "A multiple-scattering model analysis of zinc oxide pigment for spacecraft thermal control coatings", *Progress in Organic Coatings*, Vol. 47, Pp. 432-442.

Li, J., Zhang, Q., Yoon, S. F., Ahn, J., Zhou, Q., Wang, S., Yang, D., Wang, Q., Li, Z., Wang, J., & Lei, Q. (2002). "Reaction of diamond thin films with atomic oxygen simulated as low-earth-orbit environment", *Journal of Applied Physics*, Vol. 92, Pp. 6275-6277.

Pei, X., Li, Y., Wang, Q., & Sun, X. (2009). "Effects of atomic oxygen irradiation on the surface properties of phenolphthalein poly(ether sulfone)", *Applied Surface Science*, Vol. 255, Pp. 5932-5934.

Shpilman, Z., Gouzman, I., Lempert, G., Grossman, E., & Hoffman, A. (2008). "RF plasma system as an atomic oxygen exposure facility", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 79, Pp. 1-6.

Tribble, A. C., Lukins, R., Watts, E., Borisov, V. A., Demidov, S. A., Denisenko, V. A., Gorodetskiy, A. A., Grishin, V. K., Nauma, S. F., Sergeev, V. K., & Sokolova, S. P. (1996). "United states and Russian thermal control coating results in low earth orbit", *Journal of Spacecraft And Rockets*, Vol. 33, Pp. 221-228.

Yu, H., Xu, G., Shen, X., Yan, X., & Cheng, C. (2009). "Low infrared emissivity of polyurethane/Cu composite coatings", *Applied Surface Science*, Vol. 255, Pp. 6077-6081.