

بررسی خواص ترموفیزیکی و الکتریکی پوشش‌های تبدیلی کرومات بر روی آلیاژ آلومینیم Alclad AA7075-T6

کوروش شیروانی

پژوهشکده مواد پیشرفته و انرژی‌های نو، پژوهشگاه فناوری‌های نوین، سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی ایران

چکیده

ویژگی مهم مورد نظر برای پوشش‌های کاربردی در ماهواره‌ها شامل خواص ترموفیزیکی، مقاومت الکتریکی تماسی و مقاومت خوردگی است. پوشش‌های تبدیلی کرومات بر روی آلیاژهای آلومینیم از جمله این پوشش‌ها محسوب می‌شوند. پوشش‌های کرومات به روش غوطه‌وری در محلول با ترکیب نزدیک به محلول تجاری Alodine 1200S بر روی آلیاژ آلومینیم Alclad AA7075-T6 اعمال شده است. تأثیر زمان پوشش‌دهی بر روی خواص ترموفیزیکی پوشش‌ها شامل ضرایب جذب نور خورشید (α_s) و نشر حرارت (ϵ_T) و همچنین میزان مقاومت الکتریکی تماسی آنها ارزیابی شده است. ضرایب α_s و ϵ_T به ترتیب با دستگاه‌های Reflectometer و Emmisometer اندازه‌گیری شدند. در زمان پوشش‌دهی از ۳۰ تا ۱۸۰ ثانیه ضرایب α_s و ϵ_T به ترتیب در دامنه‌های زمانی ۰٫۷-۰٫۹۴ و ۰٫۰۶-۰٫۲۲ به دست آمد. میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) و نیروی اتمی (AFM) برای بررسی مورفولوژی سطحی پوشش‌ها استفاده شده است. نتایج نشان داد که مورفولوژی سطحی این پوشش‌ها شامل ساختاری نانومتری است که با کنترل پارامترهای پوشش‌دهی از جمله زمان می‌توان لایه‌های نازک کرومات با مقادیر α و ϵ متفاوت و مقاومت الکتریکی تماسی مناسب برای کاربرد روی سازه‌های آلومینیمی ماهواره‌ها ایجاد نمود.

واژه‌های کلیدی: پوشش تبدیلی کرومات، آلومینیم ۷۰۷۵، ضریب نشر، ضریب جذب، مقاومت الکتریکی تماسی

Thermophysical and electrical properties of chromate conversion coatings on Alclad AA7075-T6 Aluminum alloy

K. Shirvani

Department of Advanced Materials and Renewal Energies, Advanced Technologies Institute, Iranian Research Organization for Science and Technology (IROST)

Abstract: Thermophysical properties, electrical contact resistance (ECR) and corrosion performance are considered as critical properties of coatings, which are utilized in the satellite manufacturing industry. Chromate conversion coatings (CCCs) for Al alloys are among these coatings.

In this study, CCCs were applied on Alclad AA7075-T6 Al Alloy by means of a chromating solution having chemical composition very near to the commercial chromating solution of Alodine 1200S. Influence of coating time on the coatings thermophysical properties including coefficients of solar absorption or Absorptivity (α_s) and thermal emission or Emissivity (ϵ_T) as well as their ECR values were investigated. The ϵ_T was measured directly by Emmisometer device, while α_s was determined indirectly by Reflectometer equipment. In coating time from 30 up to 180 seconds α_s and ϵ_T values were measured in the ranges of 0.7-0.94 and 0.06-0.22, respectively. The results were revealed that different ϵ_T and α_s as well as desired ECR values according to the specifications of satellite industry are obtainable by control of coating parameters such as coating time. In addition, base on the results of surface coating morphology evaluating conducted by SEM and AFM, it was concluded that developed coatings were formed in nanocrystallized structures.

Keywords: Chromate conversion coating, 7075 Aluminum, Emissivity, Absorptivity, Electrical contact resistance

E-mail of corresponding author (s): Shirvani@irost.org

مقدمه

که بتواند در شرایط دمایی فضا در دامنه دمایی مشخصی

قرار گیرد، دانستن این خواص سطحی لازم است.

معادله II وابستگی حرارت آزاد شده در فضا به روش تابش (Q) را به ضریب نشر حرارتی پوشش سطح، سطح ماهواره و دمای تعادلی نشان می دهد [۵]:

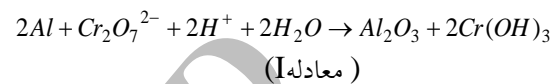
$$Q = \epsilon T.A.\sigma.T^4 \quad (\text{معادله II})$$

در این رابطه A سطح ماهواره بر حسب m^2 ، σ ثابت بولتزمان $5.67 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$ و T دمای تعادلی بر حسب کلونین می باشد. از طرفی در مورد قطعات داخلی که عمدتاً تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی هستند، مقاومت الکتریکی تماسی سطوح (ECR)^۲ ویژگی اصلی محسوب می شود. ECR پارامتری است که برای شناسایی مقاومت اهمی بین دو جزء پوشش دار به کار می رود.

پوشش های تبدیلی کرومات دارای ECR پایین (کمتر از $5 \text{ m}\Omega.\text{in}^{-2}$) بوده و می توانند کاندید مناسبی برای اعمال روی سطوح مواضع نصب اجزای الکتریکی و الکترونیکی ماهواره ها باشند [۶ و ۷].

سایر ویژگی های مورد توجه پوشش های کرومات در این کاربرد عبارتند از نقش قابل توجه این پوشش ها در افزایش چسبندگی لایه های رنگ و افزایش مقاومت خوردگی. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه ترکیب و ساختار پوشش های کرومات روی آلیاژهای آلومینیم [۸-۱۳]، مقاومت خوردگی [۱۴-۱۷] و چسبندگی رنگ بر روی آنها [۱۸] انجام شده است اما خواص ترموفیزیکی و الکتریکی آنها کمتر مورد توجه بوده است. در این مقاله تأثیر پوشش های تبدیلی کرومات روی خواص جذب نور خورشید و نشر حرارت و همچنین مقاومت الکتریکی تماسی آلیاژ سخت شده Alclad AA7075-T6 مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین نتایج بررسی مورفولوژی سطح پوشش ها نیز ارائه شده است.

پوشش تبدیلی کرومات^۱ طبق تعریف فیلم نازکی است حاصل از واکنش های شیمیایی و یا الکتروشیمیایی سطح فلز با یک محلول شیمیایی مناسب حاوی کرومات. در مورد آلومینیم، واکنش I به عنوان واکنش کلی مطرح می باشد [۱]:



انجام واکنش اکسایش / احیا Cr^{6+}/Cr^{3+} با مصرف پروتون ها باعث افزایش موضعی pH می گردد. افزایش مقدار pH باعث ترسیب مخلوطی آمورف از اکسیدهای هیدراته آلومینیم و کروم می شود [۲]. برای اعمال این پوشش ها عمدتاً از روش های غوطه وری و اسپری استفاده می شود. سادگی، هزینه پایین و راندمان بالای حفاظت خوردگی این پوشش ها باعث شده کاربرد گسترده ای در صنایع مختلف داشته باشند.

پوشش های تبدیلی کرومات با نام تجاری آلوداین به همراه پوشش های تبدیلی آندی یا آندایزینگ و رنگ های آلی کاربرد گسترده ای به عنوان پوشش های سطحی روی سازه های ماهواره ها دارند [۳].

به طور کلی به دو دلیل سطح سازه ها در ماهواره ها پوشش داده می شوند؛ اول کنترل انتقال تابش حرارت درون ماهواره ها با هدف به حداقل رساندن شیب های دمایی و دوم، حفاظت سطح در برابر اجزاء محیط فضا مثل اکسیژن اتمی، اشعه مافوق بنفش و تابش های ذره ای [۴].

به طور کلی سطوح ماهواره ها به دو قسمت در معرض مستقیم اشعه خورشید (اجزای خارجی) و در سایه (اجزای داخلی) تقسیم می شوند. خواص ترموفیزیکی شامل ضرایب αS و ϵT ویژگی های مهمی است که در مورد پوشش های سطوح اجزای در معرض نور در نظر گرفته می شوند. برای مثال جهت محاسبه سطح مورد نیاز ماهواره

² Electrical Contact Resistance (ECR)

¹ Chromate Conversion Coating (CCC)

روش تحقیق

در این تحقیق پوشش بر روی نمونه های ورقی شکل آلیاژ Alclad AA7075-T6 به ضخامت کلی ۱mm اعمال گردیده است. این آلیاژ که از انواع روکش دار است شامل پایه ای از جنس آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ روکش داده شده با آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۲ (به ضخامت حدود ۰/۰۷ میلیمتر) می باشد. ترکیب شیمیایی آلیاژ اصلی و روکش آن در جدول ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که عملیات حرارتی مشخص شده با علامت T6 شامل فرآیندهای متوالی انحلال، کوئنچ و پیر سازی مصنوعی است. این عملیات منجر به تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در ساختار می گردد که عامل اصلی ایجاد استحکام در آلیاژ می باشد. نمونه های با ابعاد ۱cm × ۷cm × ۷cm برای تمامی بررسی ها استفاده شده است.

قبل از اعمال پوشش، عملیات آماده سازی سطح به شرح ذیل روی نمونه ها انجام گرفته است: چربی زدایی در استون به مدت ۵ دقیقه اکسیدزدایی در محلول اسید سولفوریک- اسید فسفریک با دمای ۶۰ °C به مدت ۵ دقیقه با ترکیب (۸۵ Vol/%) H₃PO₄ ۲۰ gr.dm⁻³ + (۹۸ Vol/%) H₂SO₄ ۱۰ gr.dm⁻³

آبکشی با آب مقطر

دوده زدایی در محلول ۱:۱ آب مقطر: (۶۵ Vol/%) HNO₃ حاوی ۲۰ gr.dm⁻³ HF به مدت ۳۰ ثانیه در دمای ۲۵°C

آبکشی با آب مقطر

سپس نمونه های آماده سازی شده به روش غوطه وری در محلول با ترکیب ذیل: ۰/۹ g/L K₃Fe(CN)₆ - ۰/۹ g/L NaF - ۵/۴ g/L CrO₃ کووماته شدند. زمان های مختلفی برای تشکیل پوشش کروماته شامل ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه استفاده گردید.

نمونه های کروماته شده توسط آب مقطر شستشو شدند تا مواد اضافی از سطح آنها حذف گردد. خشک کردن ظاهری نمونه ها توسط جریان هوای خنک به مدت ۱۰ ثانیه انجام شد و سپس نمونه ها در اتمسفر آزمایشگاه قرار داده شدند تا به طور کامل خشک گردند.

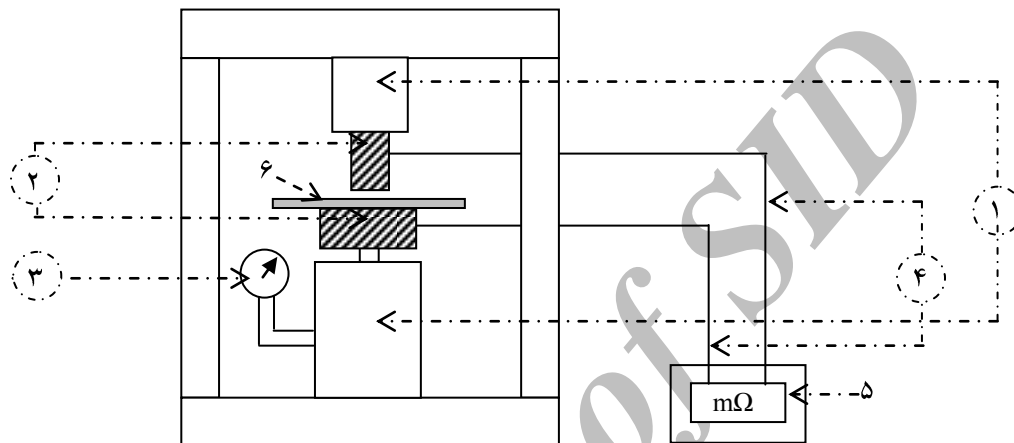
جهت بررسی مورفولوژی و توپوگرافی سطح پوشش های تبدیلی کروماته از میکروسکوپ های الکترونی روبشی (SEM) و نیروی اتمی (AFM) استفاده شده است. در بررسی SEM از میکروسکوپ JEOL model JSM-T80 با ولتاژ شلتب دهنده ۲۰KeV استفاده شد و تصاویر الکترون های ثانویه از سطح پوشش ها تهیه گردید. همچنین از AFM به عنوان ابزاری برای شناسایی توپوگرافی و زبری سطح پوشش ها استفاده گردید. بدین منظور تصاویر گرفته شده از ابعاد ۱μm × ۱μm سطح نمونه ها با نرم افزار WSXM4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

خواص ترموفیزیکی مورد بررسی در این پژوهش شامل ضریب αS و εT به ترتیب توسط دستگاه های Reflectometer model AE و Emmisimeter اندازه گیری شدند. دامنه طول موج در آزمایش تعیین αS در محدوده ۲۰۰ تا ۳۰۰۰ نانومتر در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که خروجی مستقیم دستگاه Reflectometer ضریب انعکاس نور (R) می باشد. با توجه به رابطه کلی

$R + T + \alpha = 1$ و صفر بودن مقدار ضریب عبور نور (T) در نمونه های مورد بررسی، می توان نوشت: $\alpha = 1 - R$ تعیین مقاومت الکتریکی تماسی (ECR) طبق استاندارد MIL-81706 و به کمک دستگاهی که بدین منظور طراحی و ساخته شده بود انجام گرفت. شماتیک این دستگاه در شکل ۱ نشان داده شده است. این دستگاه از یک بخش مکانیکی جهت اعمال نیرو و بخش الکترونیکی جهت ثبت مقاومت الکتریکی بین الکترودهای مسی تشکیل شده است. مقاومت الکتریکی در زمان اعمال فشار ثابت ۲۰۰ psi بر سطحی معادل ۲ in^۲ از نمونه پوشش دار قرار گرفته بین دو الکترود مسی ثبت می گردد. در این

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ اصلی و روکش آلایز (wt%) Alclad AA7075-T6

آلیاژ	Al	Ti	Zn	Cr	Mg	Fe	Si	Cu	Mn	سایر عناصر
۷۰۷۵	باقیمانده	۰/۲	۵/۱-۶/۱	۰/۱۸-۰/۲۸	۲/۱-۲/۹	۰/۵	۰/۴	۱/۲-۲	۰/۳	<۰/۱۵
۷۰۷۲ روکش	باقیمانده	-	۰/۸-۱/۳	-	۰/۱	۰/۷	۰/۱	۰/۱	۰/۱	<۰/۱۵



شکل ۱: شماتیک دستگاه تعیین ECR، ۱-بازوهای اعمال فشار، ۲-الکترودهای مسی، ۳-گیج تعیین فشار، ۴-اتصالات الکتریکی، ۵-میلی اهم متر، ۶- نمونه پوشش دار

رابطه از یک میلی اهم متر دیجیتال با دقت $100 \mu\Omega$ در مقاومت های کم استفاده شده است.

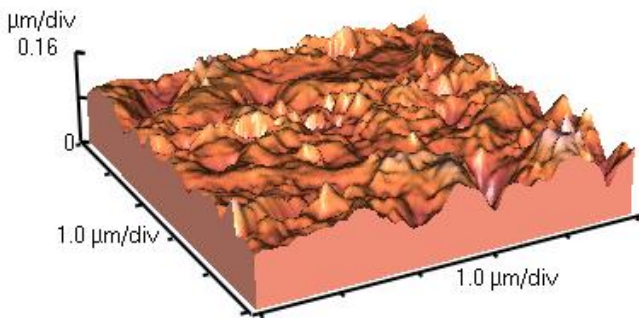
نتایج و بحث

در شکل ۲ تصاویر SEM از مورفولوژی سطح پوشش های تبدیلی کرومات اعمال شده با زمان های مختلف بر روی آلیاژ Alclad AA7075-T6 نشان داده شده است. درشت شدن مورفولوژی سطح این پوشش ها با افزایش زمان غوطه وری در محلول کرومات در این تصاویر کاملاً مشهود است. همچنین با افزایش زمان، پهنای ترک های موجود در پوشش که ویژگی ذاتی این پوشش ها هستند [۱۹ و ۲۰]، افزایش یافته است.

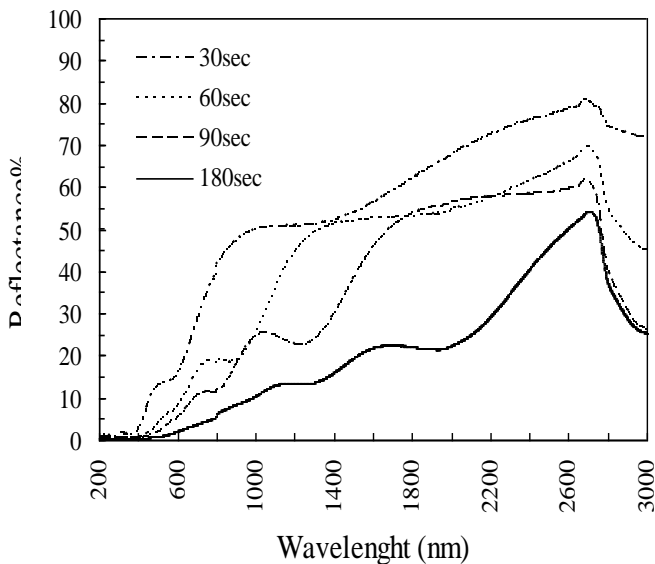
با توجه به نقش زبری سطح بر روی خواص ترموفیزیکی و مقاومت الکتریکی تماسی، بررسی دقیق تری روی توپوگرافی سطح پوشش ها توسط میکروسکوپ AFM انجام شد.

در شکل ۳ تصویر AFM سه بعدی از سطح پوشش اعمال شده در زمان ۳۰ ثانیه نشان داده شده است. این تصویر ماهیت نانو ساختاری پوشش های CCC [۱۹] را روی آلیاژهای آلومینیم تأیید می نماید. نتایج تحلیل توپوگرافی سطح پوشش ها با نرم افزار WSXM4 بر روی تصویر گرفته شده از سطح دو نمونه پوشش داده شده با زمان های پوشش دهی ۳۰ ثانیه (شکل ۳) و ۶۰ ثانیه نشان داد که این نمونه ها به ترتیب از زبری سطح 200 nm و 370 nm برخوردار هستند.

در شکل ۴ طیف انعکاس نور در دامنه طول موج $200-3000 \text{ nm}$ برای CCCs با زمان های مختلف پوشش دهی ارائه شده است. با استفاده از رابطه $\alpha + R = 1$ نمودار α در مقابل طول موج نیز ترسیم شده که در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل ۵ می توان تغییرات α بر حسب طول موج را به سه ناحیه تقسیم نمود (الف) کاهش جزئی α از طول موج ۲۰۰ تا حدود ۴۰۰ نانومتر،



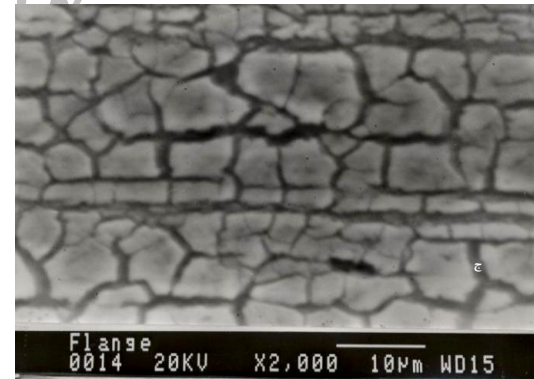
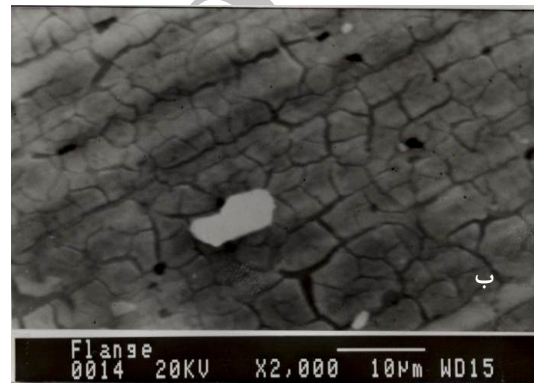
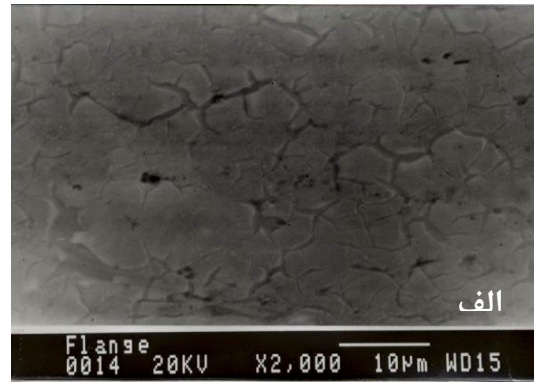
شکل ۳- تصویری سه بعدی از AFM از سطح نمونه پوشش داده شده به مدت ۳۰ ثانیه.



شکل ۴- طیف انعکاس نور در دامنه طول موج ۲۰۰-۳۰۰۰ nm

(رجوع به شکل ۵). این افزایش ضریب α به مقدار زیادی به تغییرات مورفولوژی سطح با زمان پوشش دهی بستگی دارد. در واقع با افزایش زمان، ضمن درشت تر شدن دانه های پوشش، پهنای گسل ها (جدایش بین دانه های پوشش) هم بیشتر شده است. با عریض تر و عمیق تر شدن گسل ها که افزایش زبری سطح را به همراه دارد، شرایط برای جذب بیشتر نور فراهم و در نتیجه ضریب α افزایش می یابد [۲۰].

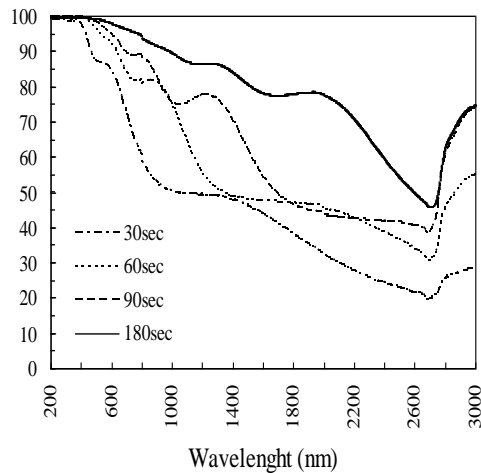
نمودار تغییرات ضریب متوسط نشر حرارتی پوشش های کروماتنه با زمان پوشش دهی نیز در شکل ۶ نشان داده شده



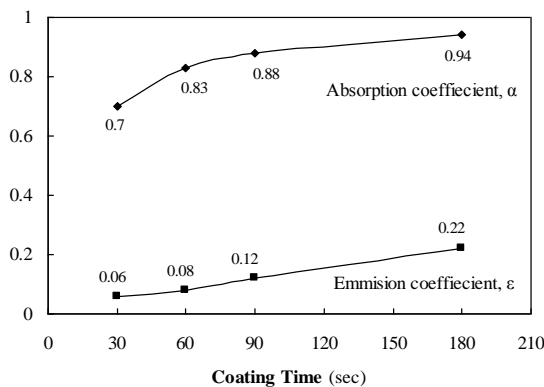
شکل ۲- تصاویر SEM از سطح پوشش اعمال شده در زمان های (الف) ۳۰ ثانیه، (ب) ۶۰ ثانیه و (ج) ۱۸۰ ثانیه. بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر.

(ب) کاهش شدید α از حدود ۴۰۰ تا حدود ۲۷۰۰ نانومتر و نهایتاً (ج) افزایش α در طول موج های بالاتر از ۲۷۰۰ نانومتر.

متوسط ضریب جذب نور خورشید در محدوده طول موج ۳۰۰-۱۲۰۰ nm برای پوشش های مختلف محاسبه و نتایج مربوطه به صورت نمودار در شکل ۶ ارائه شده است. همان طور که مشاهده می گردد افزایش زمان پوشش دهی باعث افزایش ضریب αS سطح شده است. البته این وضعیت تقریباً در تمامی طول موج ها مشاهده گردید



شکل ۵- طیف درصد جذب نور در دامنه طول موج



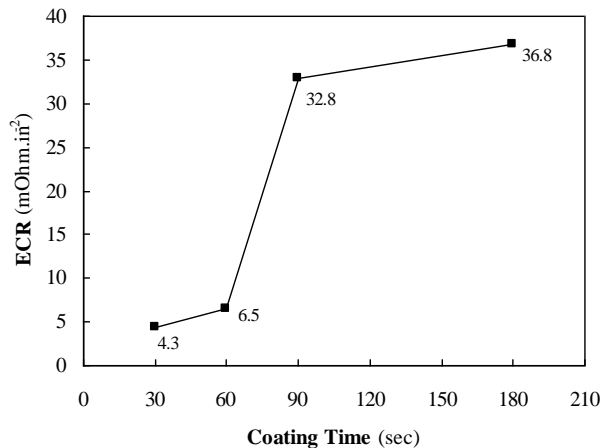
شکل ۶- تغییرات متوسط ضرایب جذب نور و نشر حرارت پوشش های CCC در دامنه طول موج ۱۲۰۰-۳۰۰ nm با زمان پوشش دهی.

گزارش شده است [۳]. لذا دامنه تغییرات ϵ برای پوشش های CCC روی آلیاژهای آلومینیم از گستردگی قابل توجهی برخوردار است که می تواند در مرحله طراحی حرارتی ماهواره سودمند واقع شود. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی تماسی اندازه گیری شده برای پوشش های کروماتنه با زمان پوشش دهی مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده می گردد که ECR برای پوشش های با زمان تشکیل پایین، یعنی ۳۰ و ۶۰ ثانیه به ترتیب برابر $4/3 \text{ m}\Omega.\text{in}^{-2}$ و $5/6 \text{ m}\Omega.\text{in}^{-2}$ بوده که در حدود حداکثر مقدار قابل قبول این معیار یعنی کمتر از $5 \text{ m}\Omega.\text{in}^{-2}$ قرار دارند [۶ و ۷]. در حالی که برای زمان های پوشش دهی طولانی تر ECR پوشش ها زیاد و

است. ملاحظه می شود که با افزایش زمان پوشش دهی ضریب ϵ پوشش بیشتر شده است. افزایش ϵ طبق رابطه I باعث می گردد حداکثر دمای قابل دسترس سطح کمتر شود [۶]. برای کاربرد در ماهواره ها جایی که نیاز به کاهش دما باشد دو راه حل عمده شامل افزایش سطح ماهواره و استفاده از پوشش با ϵ بیشتر وجود دارد. در مورد $\epsilon = 0/06$ (پوشش با زمان اعمال ۳۰ ثانیه در این تحقیق) و فرض $A = 11/5 \text{ m}^2$ و $Q = 1561/2 \text{ W}$ ، دمای تعادلی سطح برای یک جزء الکترونیکی که به طور اسرمی گرمایی معادل 100 W آزاد می کند، به کمک رابطه I برابر با $323 \text{ }^\circ\text{K}$ می گردد. حال با این فرض که برای کاربرد این جزء الکترونیکی در دماهای بالاتر از $323 \text{ }^\circ\text{K}$ محدودیت وجود دارد در مرحله طراحی بایستی کاهش دما به میزان $123 \text{ }^\circ\text{K}$ را در نظر گرفت. برای مثال نتایج محاسبات مربوط به هر یک از روش های مذکور برای رسیدن به این کاهش دما به صورت ذیل است:

- ۱- روش افزایش سطح: برای رساندن دمای تعادلی به $323 \text{ }^\circ\text{K}$ به روش افزایش سطح، استفاده از رابطه I نشان می دهد که لازم است سطح ماهواره حدود 42 m^2 باشد، یعنی $3/6$ برابر سطح اولیه.
 - ۲- روش تغییر پوشش: محاسبه بر اساس رابطه I نشان می دهد که به شرط استفاده از پوششی با ضریب ϵ معادل $0/22$ و با همان سطح اولیه دما به مقدار $322 \text{ }^\circ\text{K}$ قابل کاهش است. در صورت در اختیار داشتن پوششی با $\epsilon = 0/6$ برای رسیدن به این دما ($322 \text{ }^\circ\text{K}$) سطح می تواند $3/6 \text{ m}^2$ باشد که برای طراحی حرارتی ماهواره های کوچک سودمند خواهد بود.
- با توجه به محدودیت های ممکن در افزایش سطح ماهواره، تغییر پوشش می تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب و ساده تر مورد توجه قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که ϵ برای لایه های CCC اعمال شده تحت شرایط آماده سازی مورد استفاده تا $0/22$ قابل افزایش است. در سایر مراجع امکان افزایش ϵ این پوشش ها تا مقدار $0/6$ نیز

به طور کلی پوشش های CCC به دلیل داشتن ECR پایین برای پوشش دهی سطح مواضع نصب اجزاء الکتریکی و الکترونیکی انتخاب مناسبی هستند. با این حال باید در انتخاب زمان پوشش دهی مناسب برای رسیدن به ECR قابل قبول دقت لازم به عمل آید.



شکل ۷- تغییرات مقاومت الکتریکی تماسی پوشش های CCC با زمان پوشش دهی.

غیر قابل قبول است. به طور کلی افزایش ECR به دلیل کاهش سطح واقعی تماس حاصل از افزایش زیری سطح پوشش ها با افزایش زمان پوشش دهی می باشد.

نتیجه گیری

از مجموعه بررسی های انجام گرفته در این تحقیق موارد ذیل قابل استنتاج می باشد:

سطح پوشش های CCC بر روی آلیاژ Alclad AA7075-T6 شامل شبکه ای از ترک های به هم پیوسته بوده که ساختار شبیه به دانه های هم محور را روی سطح ایجاد می کند. ابعاد و نحوه توزیع این دانه ها به پارامترهای مختلفی از جمله زمان پوشش دهی بستگی دارد. مشاهده گردید که با افزایش زمان پوشش دهی مورفولوژی درشت تری روی سطح ایجاد شده است.

به طور کلی پوشش های CCC ساختاری نانومتری داشته و زیری سطح آنها در حد چند صد نانومتر است.

به دلیل امکان ایجاد پوشش های CCC با خواص ترموفیزیکی نسبتاً متنوع، از این پوشش ها به عنوان یک انتخاب مناسب در طراحی های حرارتی از جمله طراحی حرارتی ماهواره ها می توان استفاده کرد.

مراجع

1. M. W. Kendig, A. J. Davenport and H. S. Isaacs, *The mechanism of corrosion inhibition by chromate conversion coatings from x-ray absorption near edge spectroscopy (Xanes)*, *Corrosion Science*, 34(1) (1993) 41-49.
2. M. Brown, K. Shimizu, K. Kobayashi, G. E. Thompson, and G. C. Wood, *The growth of chromate conversion coatings on high purity aluminium*, *Corrosion Science*, 34(7) (1993) 1045-1054.
3. Tommy et al, *Pegasus Thermal Design*, NASA TN D325 (1966).
4. A. Teichman, W. S. Slep and W. G. Witte, *Evaluation of selected thermal control coatings for long-life space structures*, REPORT NUMBER NASA TM-4319 (1993).
5. A.J. Chapman, *Heat Transfer, Chap. 11: Heat Transfer by Radiation*, Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1974.
6. A. Korinek, *Chromate Conversion Coatings*, *Metals Handbook*, Metals Park, OH, ASM International Vol. 13 (1987).
7. Military Specification, MIL-DTL-81706A (2002).
8. Yu et al., *Applied Surface Science*, 62, (1992) 217-225
9. Treverton and M.P. Amor, *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 60 (1982) 92-99.
10. A.E. Hughes et al., *Surface and Interface Analysis*, 25 (1997) 223-231.
11. M. Jaime Vasquez, G.P. Halada, C.R. Clayton, J.P. Longtin, *On the Nature of the Chromate Conversion Coating Formed on Intermetallic Constituents of AA2024-T3*, *Surface and Interface Analysis*, 33 (2002) 607-616.
12. D. Chidambaram, C.R. Clayton, M.W. Kendig, and G.P. Halada, *Surface Pretreatments of Aluminum Alloy AA2024-*

17. Campestrini, H. Terryn, J. Vereecken, J.H.W. de Wit, *Chromate Conversion Coating on Aluminum Alloys*, Journal of the Electrochemical Society, 151(6) (2004) B370-B377.
18. A. Dickie, *Paint adhesion, corrosion protection, and interfacial chemistry*, Progress in Organic Coatings, 25(1) (1994) 3-22.
19. Joshua Du, et al, *Inorganic/organic hybrid coatings for aircraft aluminum alloy substrates*, Progress in organic coatings, 41 (2001) 280-291.
20. A. Kulinich, A.S. Akhtar, D. Susac, P.C. Wong, K.C. Wong, K.A.R. Mitchell, *On the growth of conversion chromate coatings on 2024-Al alloy*, Applied Surface Science 253 (2007) 3144-3153.
- T3 and Formation of Chromate Conversion Coatings*, Journal of the Electrochemical Society, 151(11) (2004) B613-B620.
13. W. Zhang, *Formation and Corrosion Inhibition Mechanisms of Chromate Conversion Coatings on Aluminum and AA2024-T3*, PhD. Thesis, The Ohio State University (2002).
14. Jun Zhao, G. Frankel and R. L. McCreerya, *Corrosion Protection of Untreated AA-2024-T3 in Chloride Solution by a Chromate Conversion Coating Monitored with Raman Spectroscopy*, Journal of the Electrochemical Society, 145(7) (1998) 2258-2264.
15. O. Lunder, J.C. Walmsley, P. Mack, K. Misancioglu, *Formation and characterization of a chromate conversion coating on AA6060 aluminum*, Corrosion Science, 47 (2005) 1604-1624.
16. Campestrini, G. Goeminne, H. Terryn, J. Vereecken, J.H.W. de Wit, *Chromate Conversion Coating on Aluminum Alloys*, Journal of the Electrochemical Society, 151(2) (2004) B59-B70.

Archive of SID