

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. در این پژوهش، 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 نورخورشید (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 ϵ و α 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 می‌دهد [۵]:

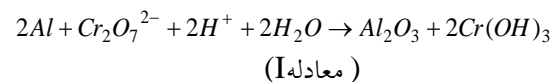
$$Q = \epsilon T.A.\sigma.T^4 \quad (\text{معادله II})$$

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 می‌باشد. از طرفی در مورد قطعات داخلی که عمدتاً تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی هستند، مقاومت الکتریکی تماسی سطوح (ECR)^۲ ویژگی اصلی محسوب می‌شود. ECR پارامتری است که برای شناسایی مقاومت

اهمی بین دو جزء پوشش‌دار به کار می‌رود. پوشش‌های تبدیلی کرومات دارای ECR پایین (کمتر از $5 \text{ m}\Omega.\text{in}^{-2}$) بوده و می‌توانند کاندید مناسبی برای اعمال روی سطوح مواضع نصب اجزای الکتریکی و الکترونیکی ماهواره‌ها باشند [۶ و ۷].

سایر ویژگی‌های مورد توجه پوشش‌های کرومات در این کاربرد عبارتند از نقش قابل توجه این پوشش‌ها در افزایش چسبندگی لایه‌های رنگ و افزایش مقاومت خوردگی. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه ترکیب و ساختار پوشش‌های 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 پوشش‌های تبدیلی کرومات روی خواص جذب نور خورشید و نشر حرارت و همچنین مقاومت الکتریکی تماسی آلیاژ سخت شده Alclad AA7075-T6 مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج بررسی مورفولوژی سطح پوشش‌ها نیز ارائه شده است.

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



انجام واکنش اکسایش/ احیا Cr^{6+}/Cr^{3+} با مصرف پروتون‌ها باعث افزایش موضعی pH می‌گردد. افزایش مقدار pH باعث ترسیب مخلوطی آمورف از اکسیدهای هیدراته آلومینیم و کروم می‌شود [۲]. برای اعمال این پوشش‌ها عمدتاً از روش‌های غوطه‌وری و اسپری استفاده می‌شود. سادگی، هزینه پایین و راندمان بالای حفاظت خوردگی این پوشش‌ها باعث شده کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف داشته باشند.

پوشش‌های تبدیلی کرومات با نام تجاری آلوداین به همراه پوشش‌های تبدیلی آندی یا آندایزینگ و رنگ‌های آلی کاربرد گسترده‌ای به عنوان پوشش‌های سطحی روی سازه‌های ماهواره‌ها دارند [۳].

به طور کلی به دو دلیل سطح سازه‌ها در ماهواره‌ها پوشش داده می‌شوند؛ اول کنترل انتقال تابش حرارت درون ماهواره‌ها با هدف به حداقل رساندن شیب‌های دمایی و دوم، حفاظت سطح در برابر اجزاء محیط فضا مثل اکسیژن اتمی، اشعه مافوق بنفش و تابش‌های ذره‌ای [۴].

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

² Electrical Contact Resistance (ECR)

¹ Chromate Conversion Coating (CCC)

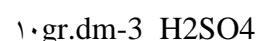
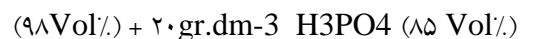
روش تحقیق

در این تحقیق پوشش بر روی نمونه‌های ورقی شکل آلیاژ Alclad AA7075-T6 به ضخامت کلی ۱mm اعمال گردیده است. این آلیاژ که از انواع روکش‌دار است شامل پایه‌ای از جنس آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵ روکش داده شده با آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۲ (به ضخامت حدود ۰/۰۷ میلیمتر) می‌باشد. 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 پیرسازی مصنوعی است. این عملیات منجر به تشکیل رسوبات ریز و پراکنده در ساختار می‌گردد که عامل اصلی ایجاد استحکام در آلیاژ می‌باشد. نمونه‌های با ابعاد ۱cm × ۱cm × ۷cm برای تمامی بررسی‌ها استفاده شده است.

قبل از اعمال پوشش، عملیات آماده‌سازی سطح به شرح ذیل روی نمونه‌ها انجام گرفته است:

چربی‌زدایی در استون به مدت ۵ دقیقه

اکسیدزدایی در محلول اسید سولفوریک- اسید فسفریک با دمای ۶۰ °C به مدت ۵ دقیقه با ترکیب



آبکشی با آب مقطر

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

آبکشی با آب مقطر

سپس نمونه‌های آماده‌سازی شده به روش غوطه‌وری در محلول با ترکیب ذیل: ۰/۹ g/L K₃Fe(CN)₆ - ۰/۹ g/L NaF - ۵/۴ g/L CrO₃ کرومات شدند. زمان‌های مختلفی برای تشکیل پوشش کرومات شامل ۳۰، ۶۰، ۹۰ و ۱۸۰ ثانیه استفاده گردید.

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

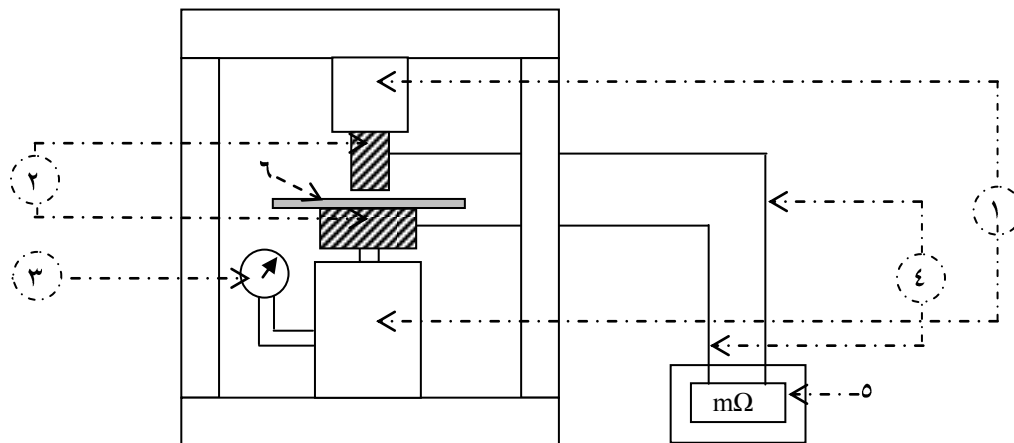
جهت بررسی مورفولوژی و توپوگرافی سطح پوشش‌های تبدیلی کرومات از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) و نیروی اتمی (AFM) استفاده شده است. در بررسی SEM از میکروسکوپ JEOL model JSM-T80 با ولتاژ شتاب‌دهنده ۲۰KeV استفاده شد و تصاویر الکترون‌های ثانویه از سطح پوشش‌ها تهیه گردید. همچنین از AFM به عنوان ابزاری برای شناسایی توپوگرافی و زبری سطح پوشش‌ها استفاده گردید. بدین منظور تصاویر گرفته شده از ابعاد ۱μm × ۱μm سطح نمونه‌ها با نرم‌افزار WSXM4 مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

خواص ترموفیزیکی مورد بررسی در این پژوهش شامل ضرایب αS و εT به ترتیب توسط دستگاه‌های Reflectometer model AE و Emmisimeter اندازه‌گیری 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) می‌باشد. با توجه به رابطه کلی $R + T + \alpha = 1$ و صفر بودن مقدار ضریب عبور نور (T) در نمونه‌های مورد بررسی، می‌توان 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 می‌گردد. در این

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ اصلی و روکش (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.

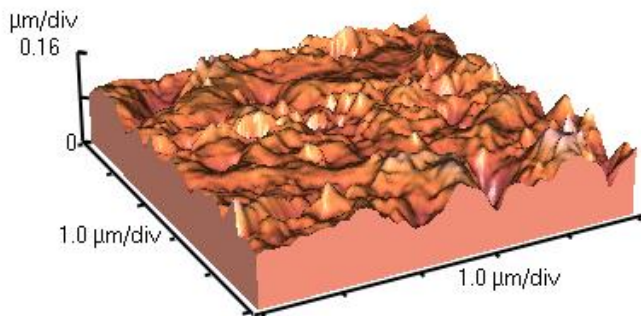
نتایج و بحث

در شکل ۲ تصاویر SEM از مورفولوژی سطح پوشش‌های تبدیلی کرومات عمل شده با زمان‌های مختلف بر روی آلیاژ Alclad AA7075-T6 نشان داده شده است. درشت شدن مورفولوژی سطح این پوشش‌ها با افزایش زمان غوطه‌وری در محلول کرومات در این تصاویر کاملاً مشهود است. همچنین با افزایش زمان، پهنای ترک‌های موجود در پوشش که ویژگی ذاتی این پوشش‌ها هستند [۱۹ و ۲۰]، افزایش یافته است.

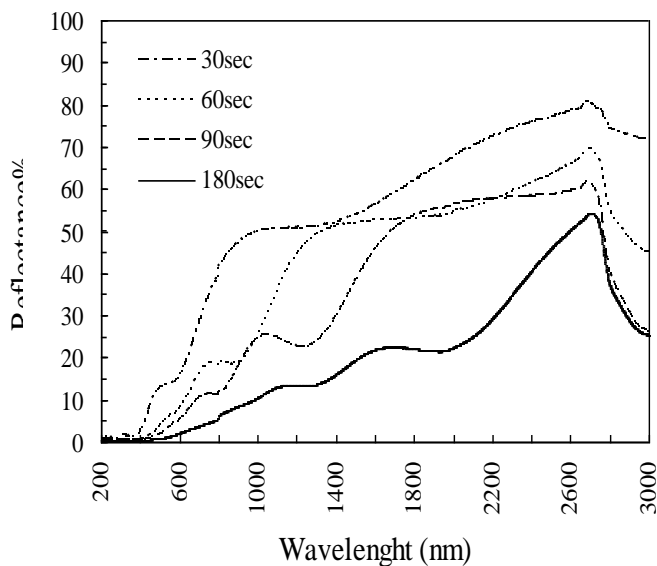
با توجه به نقش زبری سطح بر روی خواص ترموفیزیکی و مقاومت الکتریکی تماسی، بررسی دقیق‌تری روی توپوگرافی سطح پوشش‌ها توسط میکروسکوپ AFM انجام شد.

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 پوشش‌های CCC [۱۹] را روی آلیاژهای آلومینیم تأیید می‌نماید. نتایج تحلیل توپوگرافی سطح پوشش‌ها با نرم افزار WSXM4 بر روی تصویر گرفته شده از سطح دو نمونه پوشش داده شده با زمان‌های پوشش‌دهی ۳۰ ثانیه (شکل ۳) و ۶۰ ثانیه نشان داد که این نمونه‌ها به ترتیب از زبری سطح 200 nm و 370 nm برخوردار هستند.

در شکل ۴ طیف انعکاس نور در دامنه طول موج پوشش‌دهی 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 می‌توان تغییرات α بر حسب طول موج را به سه ناحیه تقسیم نمود: الف) کاهش جزئی α از طول موج ۲۰۰ تا حدود ۴۰۰ نانومتر،



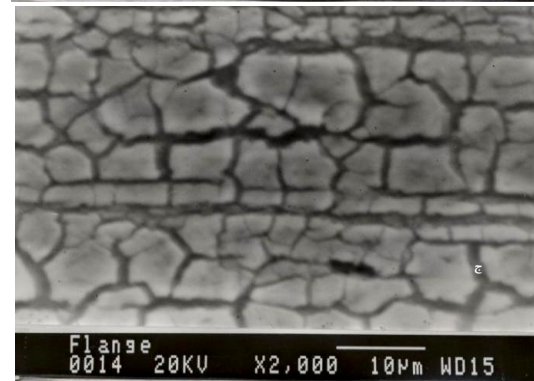
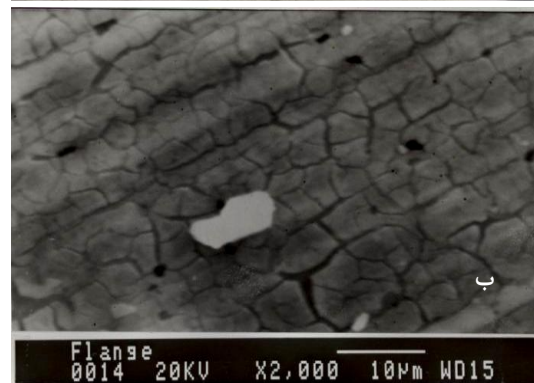
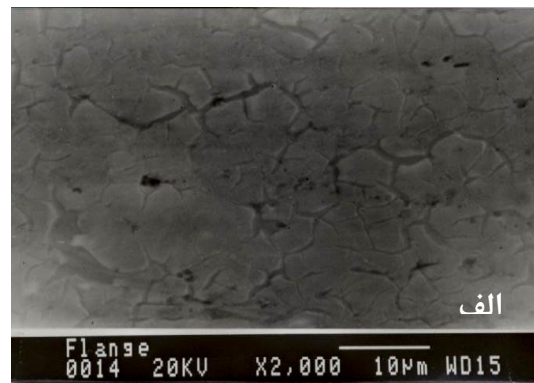
شکل ۳- تصویر سه بعدی AFM از سطح نمونه پوشش داده شده به مدت ۳۰ ثانیه.



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 درشت‌تر شدن دانه‌های پوشش، پهنای گسل‌ها (جدایش بین دانه‌های پوشش) هم بیشتر شده است. با عریض‌تر و عمیق‌تر شدن گسل‌ها که افزایش زیری سطح را به همراه دارد، شرایط برای جذب بیشتر نور فراهم و در نتیجه ضریب α افزایش می‌یابد [۲۰].

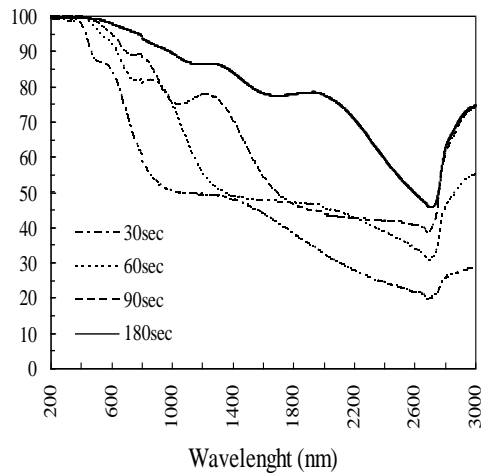
نمودار تغییرات ضریب متوسط نشر حرارتی پوشش‌های کروماته با زمان پوشش دهی نیز در شکل ۶ نشان داده شده



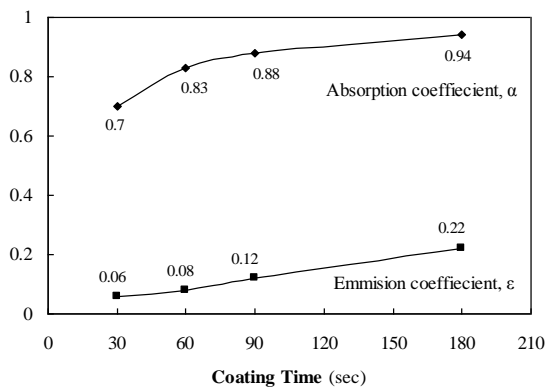
شکل ۲- تصاویر SEM از سطح پوشش اعمال شده در زمان‌های (الف) ۳۰ ثانیه، (ب) ۶۰ ثانیه و (ج) ۱۸۰ ثانیه. بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر.

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

متوسط ضریب جذب نور خورشید در محدوده طول موج ۱۲۰۰-۳۰۰ nm برای پوشش‌های مختلف محاسبه و نتایج مربوطه به صورت نمودار در شکل ۶ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد افزایش زمان پوشش دهی باعث افزایش ضریب α_S سطح شده است. البته این وضعیت تقریباً در تمامی طول موج‌ها مشاهده گردید



شکل ۵- طیف درصد جذب نور در دامنه طول موج



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

گزارش شده است [۳]. لذا دامنه تغییرات ϵ برای پوشش‌های CCC روی آلیاژهای آلومینیم از گستردگی قابل توجهی برخوردار است که می‌تواند در مرحله طراحی حرارتی ماهواره سودمند واقع شود. نمودار تغییرات مقاومت الکتریکی تماسی اندازه‌گیری شده برای پوشش‌های کروماته با زمان پوشش‌دهی مختلف در شکل ۷ ارائه شده است. مشاهده می‌گردد که ECR برای پوشش‌های 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 زمان‌های پوشش‌دهی طولانی‌تر ECR پوشش‌ها زیاد و

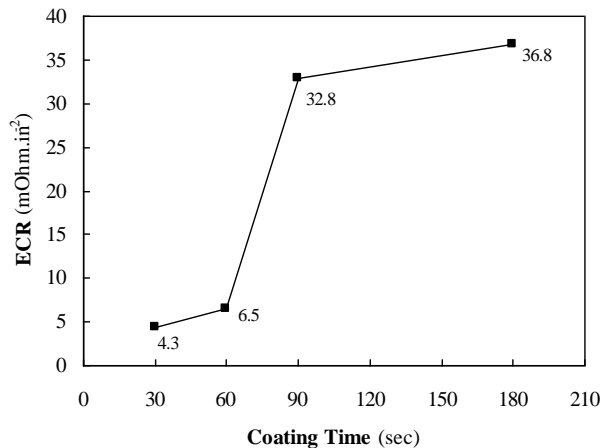
است. ملاحظه می‌شود که با افزایش زمان پوشش‌دهی ضریب ϵ پوشش بیشتر شده است. افزایش ϵ طبق رابطه I باعث می‌گردد حداکثر دمای قابل دسترس سطح کمتر شود [۶]. برای کاربرد در ماهواره‌ها جایی که نیاز به کاهش دما باشد دو راه حل عمده شامل افزایش سطح ماهواره و استفاده از پوشش با ϵ بیشتر وجود دارد. در مورد $\epsilon = 0/06$ (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 اسمی گرمایی معادل 100 W آزاد می‌کند، به کمک رابطه I برابر با 323 K می‌گردد. حال با این فرض که برای کاربرد این جزء الکترونیکی در دماهای بالاتر از 323 K محدودیت وجود دارد در مرحله طراحی بایستی کاهش دما به میزان 123 K را در نظر گرفت. برای مثال نتایج محاسبات مربوط به هر یک از روش‌های مذکور برای رسیدن به این کاهش دما به صورت ذیل است:

۱- روش افزایش سطح: برای رساندن دمای تعادلی به 323 K به روش افزایش سطح، استفاده از رابطه I نشان می‌دهد 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 می‌دهد که به شرط استفاده از پوششی با ضریب ϵ معادل $0/22$ و با همان سطح اولیه دما به مقدار 322 K قابل کاهش است. در صورت در اختیار داشتن پوششی با $\epsilon = 0/6$ برای رسیدن به این دما (322 K) سطح می‌تواند $3/6 \text{ m}^2$ باشد که برای طراحی حرارتی ماهواره‌های کوچک سودمند خواهد بود.

با توجه به محدودیت‌های ممکن در افزایش سطح ماهواره، تغییر پوشش می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین مناسب و ساده‌تر مورد توجه قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان داد که ϵ برای لایه‌های CCC اعمال شده تحت شرایط آماده-سازی مورد استفاده تا $0/22$ قابل افزایش است. در سایر مراجع امکان افزایش ϵ این پوشش‌ها تا مقدار $0/6$ نیز

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



شکل ۷- تغییرات مقاومت الکتریکی تماسی پوشش‌های CCC با زمان پوشش‌دهی.

غیر قابل قبول است. به طور کلی افزایش ECR به دلیل کاهش سطح واقعی تماس حاصل از افزایش زبری سطح پوشش‌ها با افزایش زمان پوشش‌دهی می‌باشد.

نتیجه‌گیری

از مجموعه بررسی‌های انجام گرفته در این تحقیق موارد ذیل قابل استنتاج می‌باشد:

سطح پوشش‌های CCC بر روی آلیاژ Alclad AA7075-T6 شامل شبکه‌ای از ترک‌های به هم پیوسته بوده که ساختار شبیه به دانه‌های هم‌محور را روی سطح ایجاد می‌کند. ابعاد و نحوه توزیع این دانه‌ها به پارامترهای مختلفی از جمله زمان پوشش‌دهی بستگی دارد. مشاهده گردید که با افزایش زمان پوشش‌دهی مورفولوژی درشت‌تری روی سطح ایجاد شده است. به طور کلی پوشش‌های CCC ساختاری نانومتری داشته و زبری سطح آنها در حد چند صد نانومتر است. به دلیل امکان ایجاد پوشش‌های CCC با خواص ترموفیزیکی نسبتاً متنوع، از این پوشش‌ها به عنوان یک انتخاب مناسب در طراحی‌های حرارتی از جمله طراحی حرارتی ماهواره‌ها می‌توان 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.