

بررسی تاثیر آندایزینگ در افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم هوایی و دریایی

علی یزدانی^{۱*}، آرمان زارعی^۲

۱. دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. گروه شناورهای اثر سطحی، سازمان صنایع دریایی

تاریخ پذیرش: ۸۹/۷/۲۷

تاریخ دریافت: ۸۹/۳/۹

چکیده

با توجه به کاربرد روز افزون آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف، لزوم اعمال عملیات سطحی مناسب جهت افزایش مقاومت به خوردگی آنها اجتناب ناپذیر است. در این میان به دلیل استفاده شدن عناصر خاص در بعضی از گروه های آلیاژی (آلیاژهای گروه ۲۰۰۰ و ۷۰۰۰)، مشکلات خوردگی آنها نیز حادثتر است. پوشش های مختلفی در این زمینه استفاده می شود. در محیط های دریایی و دیگر مناطق با رطوبت بالا، اعمال پوشش آندایزینگ، بهترین روش جلوگیری از خوردگی ورقه ای شدن آلیاژهای آلومینیوم است. در این تحقیق تاثیر دانسیته جریان های متفاوت ($1/6 \frac{A}{dm^2}$ و $2/6 \frac{A}{dm^2}$) و اهمیت آب بندی، در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش های آندایزینگ آلیاژهای T۶-۷۰۷۵، T۳-۲۰۲۴، T۶-۶۰۶۱ و H۳۴-۵۰۸۳، توسط تست پاشش مه نمک، بر طبق استاندارد ASTM B ۱۱۷ بررسی شده است. نتایج بیانگر اهمیت میزان دانسیته جریان و پروسه ی آب بندی در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش های آندایز است.

واژگان کلیدی: آندایزینگ، خوردگی، آلومینیوم، هوایی، دریایی

*نویسنده مسوول مقاله، پست الکترونیک: ailyazdani165@yahoo.com

۱. مقدمه

آلومینیوم و آلیاژهای آن به طور گسترده ای در صنایع مختلف به کار می روند (Van Horn, 1990). این آلیاژها به دلیل دانسیته پائین، هدایت حرارتی بالا و خواص الکترومغناطیس، در صنایع هوافضا (Cutler, 2005) اتومبیل سازی، کشتی سازی، قطعات کامپیوتر و سایر صنایع کاربرد فراوانی دارند.

آلیاژهای آلومینیوم به طور کلی به ۸ گروه مختلف تقسیم بندی می شوند که از آلیاژسازی آلومینیوم با عناصر دیگر از جمله مس، منیزیم، منگنز و غیره تولید می شوند. در این میان آلیاژهای ۲۰۲۴ از گروه ۲XXX و ۷۰۷۵ از گروه ۷XXX در صنایع هوائی، و آلیاژهای ۶۰۶۱ از گروه ۶XXX و ۵۰۸۳ از گروه ۵XXX در صنایع دریائی کاربرد زیادتری دارند. در آلیاژهای آلومینیوم هوائی T۶-۷۰۷۵ و T۳-۲۰۲۴، مس با تشکیل فازهای بین فلزی در حین عملیات حرارتی، یک عامل اساسی استحکام بخشی این آلیاژها محسوب می شود از طرفی تشکیل پیل گالوانیکی بین رسوبات غنی از مس و زمینه، سبب ایجاد خوردگی موضعی در این آلیاژها می شود. آلیاژهای دریایی T۶-۶۰۶۱ و H۳۴-۵۰۸۳ آلومینیوم مقاومت به خوردگی بهتری دارند.

استفاده گسترده از آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف، لزوم اعمال عملیات سطحی مناسب جهت حفاظت از خوردگی آنها را مشخص می کند (Davis, 1999; Deluccia, 1993). پوشش های مختلفی از جمله بوهمیت (Vargel, 2004)، فسفات (Twite, 1998)، روی، سل-ژل (Voevodin, 2001; Wang, 2009)، کرومات، آلکد (Petroyiannis, 2005) و آندایزینگ (Twite, 1998) در زمینه آلومینیوم مطرح شده اند، که در این میان به دلیل مقاومت به خوردگی

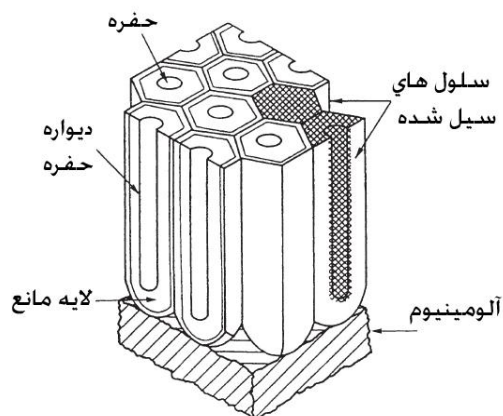
پائین، مسائل اقتصادی، تخریب های زیست محیطی و جدید بودن، تنها تعداد معدودی از آنها هم اکنون در صنعت استفاده می شوند.

در میان تمامی پوشش های محافظ در برابر خوردگی، پوشش کرومات به عنوان یکی از بهترین پوشش ها جهت حفاظت آلیاژهای آلومینیوم مورد تأیید بوده و کاربرد گسترده پیدا کرده است. تاکنون تحقیقات گسترده ای بر روی تأثیر عوامل مختلفی چون آماده سازی (Campestrini, 2001)، شرایط حمام و چگونگی عملیات کرومات کردن (Zhao, 2001) صورت گرفته است، اما طبیعت سمی و سرطان زای یون کروم ۶ ظرفیتی (Cr^{6+}) موجب شده است تا سازمان های حفاظت از محیط زیست و سازمان بهداشت جهانی استفاده از این پوشش در صنایع مختلف را تا حد زیادی محدود کنند. این امر لزوم تحقیق برای یافتن جایگزینی مناسب برای پوشش مذکور را به وضوح نشان می دهد (Yu, 2003).

همانطور که ذکر شد، یکی دیگر از روش های کاهش خوردگی آلیاژهای آلومینیوم، آندایزینگ است. آندایزینگ آلومینیوم یک پروسه الکترو شیمیائی است که کاربردهای گسترده زیادی دارد از جمله افزایش مقاومت به خوردگی، افزایش مقاومت به سایش، بهبود ظاهر، افزایش قدرت تشعشع و افزایش چسبندگی رنگ (Brace, 1979).

پوشش آندایز یک پوشش سرامیکی آلومینا (Al_2O_3) می باشد که به کمک پلاریزاسیون آندی سطح آلومینیوم در محلول های اسیدی مختلف ایجاد می شود که بسته به نوع فرآیند آندایز، مقاومت به خوردگی آلومینیوم را به مقدار قابل توجهی افزایش می دهد (Huang, 2008). در محیط های دریائی و دیگر مناطق با رطوبت بالا، آندایزینگ، بهترین روش جلوگیری از خوردگی

الکترولیت مورد استفاده می‌تواند اگرالیک اسید باشد. تفاوت پوشش‌های آندایزینگ نوع دوم و سوم در دمای عملیات و دانسیته جریان اعمالی می‌باشد. در جدول ۱، شرایط پوشش آندایزینگ نوع دوم آورده شده است.



شکل ۱. شماتیک ساختار پوشش آندایز ایجاد شده در محلول اسیدی.

در زمینه عوامل موثر بر آندایزینگ از جمله، دما (Aerts, 2007)، اسید مصرفی (Hsing, 2000)، دانسیته جریان (Aerts, 2007)، ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش‌های آندایز (Forn, 2007)، تحقیقات زیادی انجام شده است. همانطور که ذکر شد، یکی از خواص مهم این نوع از پوشش‌ها، بحث بهبود مقاومت به خوردگی آن‌ها است. در این مقاله تاثیر نوع آلیاژ فلز پایه، دانسیته جریان اعمالی و پروسه ی آب بندی، بر مقاومت به خوردگی تعدادی از آلیاژهای آلومینیوم بررسی شده است. جهت بررسی مقاومت به خوردگی مواد، تست‌های مختلفی وجود دارد که با توجه به شرایط کارکرد قطعه تعیین می‌شود.

ورقه ای آلیاژهای آلومینیوم است (Lopez, 2002). این نوع پوشش می‌تواند جایگزین مناسبی برای پوشش مقاوم کروماته باشد.

از آنجا که لایه آندی ایجاد شده در محیط اسیدی بر روی سطح آلومینیوم ساختاری متخلخل دارد (شکل ۱)، لازم است که قبل از بکارگیری این پوشش، حفرات مذکور سیل شود. عملیات سیل کردن در حقیقت به این معنی است که اکسید آلومینیوم با مولکول‌های آب ترکیب شده و به $Al_2O_3 \cdot H_2O$ تبدیل شود که با افزایش حجم همراه بوده و موجب بسته شدن دهانه حفرات می‌شود. این عملیات توسط محلول‌های مختلفی نظیر آب جوش، دی کرومات، استات نیکل، اسید استئاریک و فلئوئورید نیکل استفاده می‌شود. در این میان آب جوش مرسوم‌ترین، به صرفه‌ترین و رایجترین روش مورد استفاده می‌باشد.

یک بررسی کلی بر انواع تکنیک‌های آب بندی توسط Cheng و Hao (2000) صورت گرفته است که بر اساس آن تمام روش‌های آب بندی، مقاومت به خوردگی آلیاژهای آندایز شده را تا اندازه ای افزایش می‌دهند. Gonzalez گزارش کرده که حتی در محیط‌های به شدت خورنده، آب بندی با آب جوش سبب افزایش زیاد مقاومت به خوردگی آلیاژها می‌شود (Gonzalez, 2002).

بر اساس استاندارد میلیتاری انواع مختلفی از پوشش آندایزینگ وجود دارد که عبارتند از: آندایزینگ نوع اول (I)، آندایزینگ نوع دوم (II) و آندایزینگ سخت یا نوع سوم (III). تفاوت انواع پوشش‌های آندایزینگ در نوع محلول الکترولیت و شرایط انجام عملیات پوشش‌دهی می‌باشد. پوشش آندایزینگ نوع اول در وان محتوی محلول الکترولیت اسید کرومیک انجام می‌شود و پوشش‌های آندایزینگ نوع دوم و سوم با استفاده از محلول اسید سولفوریک انجام می‌شوند همچنین

شده که در هر حالت نیز تعدادی از نمونه ها در حالت آب بندی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۲. ترکیب شیمیایی اسمی آلیاژهای ۷۰۷۵، ۲۰۲۴، ۶۰۶۱ و ۵۰۸۳ (درصد وزنی).

نوع	۷۰۷۵	۲۰۲۴	۶۰۶۱	۵۰۸۳
Si	۰/۴۰	۰/۵۰	۰/۴۰-۰/۱۸	۰/۴۰
Fe	۰/۵۰	۰/۵۰	۰/۷	۰/۱۰
Cu	۱/۲-۲/۰	۳/۸-۴/۹	۰/۱۵-۰/۴	۰/۴۰-۱/۰
Mn	۰/۳۰	۰/۳۰-۰/۹	۰/۱۵	۴/۰-۴/۹
Mg	۲/۱-۲/۹	۱/۲-۱/۸	۱/۲-۰/۱۸	۳/۵-۴/۵
Cr	۰/۲-۰/۲۸	۰/۱۰	۰/۰۴-۰/۴	۰/۰۴-۰/۴
Zn	۵/۱-۶/۱	۰/۲۵	۰/۲۵	۰/۲۵
Ti	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
AL/	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده	باقیمانده

با توجه به استانداردها و اهداف مورد نظر تست، تعداد ۲۵ نمونه از هر آلیاژ به ابعاد $10/2 \times cm \ 10/2 \times cm \ 1/1 \ cm$ ($4'' \times 4'' \times 0/4''$) تهیه شد است. سطح نمونه‌ها با استفاده از حلال های مناسب کاملاً از چربی‌ها و آلودگی های سطحی پاک شده و بعد از شستشو با آب مقطر، نمونه‌ها خشک شده اند.

تعداد ۲۰ نمونه از هر گروه از آلیاژها در حالت آندایز و ۵ نمونه بدون آندایز تست خوردگی شده است. عملیات آندایزینگ نوع II، در دمای $21^{\circ}C$ تحت دو دانسیته جریان مختلف انجام شده که نهایتاً ضخامت پوشش $18 \mu m$ به دست آمده است. ضخامت پوشش ها بر طبق استاندارد ASTM B244 توسط دستگاه ضخامت سنج جریان گردابی اندازه گیری شده است. عملیات آندایزینگ نمونه‌ها در تانک محلول محتوی $190 \pm 2 \ g/l$ اسیدسولفوریک انجام شده است. برای دستیابی به

جدول ۱. شرایط انجام عملیات آندایزینگ نوع دوم (II)

محلول الکترولیت اسید سولفوریک	۱۵٪ اسید سولفوریک
درجه حرارت	$21 \pm 1^{\circ}C$
زمان انجام عملیات	۴۰ تا ۶۰ دقیقه
دانسیته جریان	$\frac{A}{dm^2} \ 1/2-2/4$
ولتاژ	۲۴ V

از این میان تست های خوردگی امیدانس الکتروشیمیایی و پاشش مه نمک، تست های معمولی هستند که در تحقیقات بیشتر به کار می روند. در این تحقیق تاثیر دانسیته جریان های متفاوت ($\frac{A}{dm^2} \ 1/6$ و $\frac{A}{dm^2} \ 2/6$) و اهمیت آب بندی، در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش های آندایزینگ نوع دوم در آلیاژهای T۶-۷۰۷۵، T۳-۲۰۲۴، T۶-۶۰۶۱ و H۳۴-۵۰۸۳، توسط تست پاشش مه نمک، بر طبق استاندارد ۱۱۷ ASTM B بررسی شده است.

۲. مواد و روش ها

در این تحقیق مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم-هوائی T۶-۷۰۷۵، T۳-۲۰۲۴ و آلیاژهای دریائی T۶-۶۰۶۱ و H۳۴-۵۰۸۳ در حالت بدون پوشش و آندایز شده بررسی شده است. ترکیب شیمیائی اسمی آلیاژها مصرفی در جدول ۲ آورده شده است. جهت بررسی مقاومت به خوردگی آلیاژهای فوق، نمونه ها در ابتدا بر طبق استاندارد MIL۸۶۲۵F آندایزینگ نوع دوم شدند و سپس طبق استاندارد ASTM B ۱۱۷ با تست پاشش مه نمک مورد بررسی خوردگی قرار گرفته اند. چون فرم پوشش آندی تشکیل شده با تغییر دانسیته جریان تغییری کند و این مسئله در مقاومت به خوردگی آلیاژها موثر است، عملیات آندایزینگ در دو دانسیته جریان مختلف انجام

نمک در حدود ۲۵Psi - ۱۰ و درجه حرارت انجام تست در محدوده $3 \pm 35^\circ\text{C}$ قرار داده شد. PH محلول نمک در محدوده ۶/۵-۷/۲ در نظر گرفته شد. با افزایش هیدروکسید سدیم (۰/۰۱N) مقدار PH را در صورت نیاز افزایش می دادیم تا مقدار PH در محدوده فوق باقی بماند.

نتایج حاصل از بوجود آمدن حفرات پس از انجام تست پاشش مه نمک با استاندارد ۸۶۲۵F MIL مطابقت داده شدند. براساس استاندارد ۸۶۲۵F MIL تعداد حفره‌های مجزای بوجود آمده بر روی قطعات باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) نمونه‌های تست شده نباید بیشتر از ۱۵ حفره جداگانه در مجموع 968 cm^2 (150 in^2) از تعداد ۵ نمونه و یا تعداد بیشتر نمونه‌های تست شده داشته باشند و قطر هیچ کدام از این حفره‌ها نباید بزرگتر از 0.2 cm^2 (0.31 in^2) باشد. مناطقی با فاصله 0.4 cm^2 (0.62 in^2) از مناطق لبه‌ها و محله‌هایی که اثر تماس الکترودها بعد از انجام آندایزینگ باقی مانده‌اند باید از کل سطح اصلی حذف شوند.

ب) نمونه‌های تست شده در مجموع cm^2 ۱۹۴ (30 in^2) از تعداد یک یا چند نمونه تست شده نباید بیشتر از پنج حفره جداگانه با قطر بیشتر از 0.2 cm^2 داشته باشند. مناطقی با فاصله 0.4 cm^2 از مناطق لبه‌ها و محل‌هایی که اثر تماس الکترودها بعد از عملیات آندایزینگ روی آنها باقی مانده است، باید حذف بشوند. قابل ذکر است که با توجه به استاندارد MIL-۸۶۲۵F حفره به ناحیه‌ای از محل خوردگی موضعی که عمقی بزرگتر از پهنا داشته باشد اطلاق می‌گردد. در تحقیق انجام شده، سطح هر کدام از نمونه‌هایی که در معرض عملیات آندایزینگ قرار گرفته‌اند منهای لبه‌ها، 97 cm^2 (15 in^2) می‌باشد و برای داشتن مقاومت خوردگی مطلوب و مورد قبول باید

پوششی مطلوب، محلول الکترولیت پیش از هر عملیات آندایزینگ آنالیز می‌گردید. همانطور که بیان شد آندایزینگ در دو شرایط مختلف زیر انجام شده است:

حالت (۱)

در این حالت عملیات آندایزینگ تحت دانسیته جریان $2/6 \frac{A}{\text{dm}^2}$ انجام گرفت که در این حالت برای رسیدن به ضخامت پوشش $18 \mu\text{m}$ ، نمونه‌های آلیاژ T۳-۲۰۲۴ به مدت ۲۲ دقیقه و بقیه آلیاژها به مدت ۲۰ دقیقه در حمام اسیدسولفوریک قرار داده شده‌اند.

حالت (۲)

در این حالت عملیات آندایزینگ تحت دانسیته جریان $1/6 \frac{A}{\text{dm}^2}$ انجام گرفت که در این حالت برای رسیدن به ضخامت پوشش $18 \mu\text{m}$ ، نمونه‌های آلیاژ T۳-۲۰۲۴ به مدت ۳۸ دقیقه و بقیه آلیاژها به مدت ۳۲ دقیقه در حمام اسیدسولفوریک قرار داده شده‌اند. قابل ذکر است که دانسیته جریان‌های فوق پس از آزمایش بر روی تعدادی از نمونه‌ها و مطالعه و بررسی بر روی شرایط پوشش حاصل از اعمال دانسیته جریان‌های مختلف انتخاب شدند.

نمونه‌های آندایز شده در دو حالت آب بندی و بدون آب بندی تست خوردگی شده‌اند. آب بندی در دمای 88°C آب داغ به مدت زمان ۲۰ دقیقه انجام شده است. تمامی نمونه‌ها بوسیله دممش هوا خشک شده و در نقاط مختلف ضخامت پوشش آنها اندازه‌گیری و سپس در دسیکاتور قرار داده شدند.

تست‌های بررسی اثر و رفتار خوردگی براساس استاندارد ASTM B ۱۱۷ انجام گردیدند. محلول نمک مورد نظر برای انجام تست بصورت ۵ حجم کلرید سدیم در ۹۵ حجم آب تهیه شد. فشار هوای دمیده شده در دستگاه تست پاشش مه

قرار بگیرند باید حتما پوشش مناسب بر روی آنها ایجاد شود. نتایج تحقیقات انجام شده توسط شانگینگ سان و همکارانشان در مورد خوردگی اتمسفری آلیاژهای ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ در محیط های صنعتی، شهری و دریایی نیز حاکی از مقاومت به خوردگی پائین این آلیاژها در اتمسفر دریایی است (Shuangqing Sun, 2009).

جدول شماره ۳. خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه های آلیاژی بدون پوشش

نوع آلیاژ	میانگین زمان ایجاد ۳ حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت)
۲۰۲۴-T۳	۱۵
۵۰۸۳-H۳۴	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد
۶۰۶۱-T۶	۳۱۵
۷۰۷۵-T۶	۳۰

همانطور که ذکر شد، آلیاژ ۷۰۷۵ آلومینیوم، به دلیل اختلاف پتانسیل شدید بین ترکیبات بین فلزی Cu, Fe و زمینه، به شدت مستعد خوردگی حفره ای شدن هستند (Andreatta, 2004) بنابراین در این گروه از آلیاژها نیز آب بندی بعد از آندایزینگ از اهمیت زیادی برخوردار است (Yu, 2003). Zuo, 2003). خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه های آندایزینگ شده آلیاژ ۷۰۷۵-T۶ در جدول ۴ آورده شده است. بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه ها نشان داد که با آب بندی نکردن نمونه های آندایز شده در هر دو شرایط آندایز (دانسیته جریان های $\frac{A}{dm^2}$ و $\frac{A}{dm^2}$)، نمونه ها در مدت زمان ۵۰ ساعت خورد می شوند، بنابراین بر طبق استاندارد مقاوم به خوردگی نیستند. نمونه های آندایز و آب بندی شده تحت هر دو شرایط ۱ و ۲ تا مدت زمان استاندارد یعنی ۳۳۶ ساعت هیچگونه مشکل خوردگی نداشتند و با ادامه تست پاشش نمک تا

بیشتر از ۳ حفره وجود نداشته باشد. بر طبق استاندارد MIL-۸۶۲۵F جهت داشتن شرائط مقاومت به خوردگی قابل قبول، باید نمونه هایی که تحت شرایط پاشش نمک مطابق استاندارد ASTM B ۱۱۷ قرار گرفته اند تا مدت زمان ۳۳۶ ساعت شرایط الف و یا ب که در بالا توضیح داده شد را تامین نمایند. با توجه به ابعاد نمونه های تست، بر طبق استاندارد (MIL۸۶۲۵F) اگر در نمونه های تست شده در مدت زمان ۳۳۶ ساعت تعداد سه حفره جداگانه تشکیل نشود آن نمونه ها مقاوم به خوردگی هستند، اما برای بررسی دقیقتر رفتار خوردگی تلاش شد تا برای مدت زمانی طولانی تر نمونه ها تحت تست پاشش نمک قرار بگیرند و مدت زمان تست پاشش نمک به سه ماه (۲۲۳۰ ساعت) افزایش یافت.

۳. نتایج

جهت بررسی و مقایسه نمونه های آندایز شده با نمونه های بدون پوشش، تعداد پنج نمونه از هر آلیاژ نیز بر اساس استاندارد ASTM B ۱۱۷ تحت عملیات تست پاشش نمک قرار گرفتند. نتایج تست پاشش نمک آنها در جدول ۳ آورده شده است (از هر آلیاژ ۵ نمونه).

با بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه های بدون پوشش مشخص شد که آلیاژ ۵۰۸۳ بدون پوشش، مقاومت به خوردگی بسیار خوبی دارد. در سایر نمونه های آلیاژی در مدت زمانی کمتر از ۳۳۶ ساعت ۳ حفره بوجود آمد، بنابراین با توجه استاندارد مقاوم به خوردگی نیستند. البته آلیاژ ۶۰۶۱ شرایط مطلوب تری را نشان می داد. با بررسی نتایج مشخص می شود که نمونه های آلیاژی ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ به هیچ عنوان شرایط مطلوبی از لحاظ مقاومت به خوردگی ندارند و اگر در اتمسفر دریایی و محیط خورنده

آندایز این آلیاژ در ضخامت های بالا، اکسیژن یکی از عوامل ایجاد ترک خوردگی لایه آندایز (Dimogerontakis, 1998) و پائین آمدن مقاومت به خوردگی آن می باشد. ممکن است آندایزینگ تحت دانسیته جریان پائین، سبب ایجاد ترک در پوشش شده و مقاومت به خوردگی آنرا کاهش داده باشد.

بنابراین بهترین شرایط انجام عملیات آندایزینگ آلیاژ T3-2024، عملیات آندایزینگ آب بندی شده تحت دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ می باشد.

جدول ۵. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T3-2024

شرایط آندایزینگ	شرایط آب بندی	میانگین زمان ایجاد ۳ حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت)
۱	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۱	آب بندی نشده	۲۵
۲	آب بندی شده	۱۳۳۰
۲	آب بندی نشده	۲۵

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه های آندایزینگ شده آلیاژ T6-6061 در جدول ۶ آورده شده است. با بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه ها مشخص گردید که تمامی نمونه ها تا مدت زمان ۳۳۶ ساعت (مدت زمان استاندارد تست) مشکلی نداشتند و بنابراین این آلیاژها بعد از آندایزینگ در برابر خوردگی مقاوم هستند.

با ادامه تست پاشش نمک تا مدت زمان ۲۲۳۰ ساعت نیز، تحت هر دو شرایط آندایزینگ، در نمونه های آب بندی شده و آب بندی نشده، مشکلی از لحاظ خوردگی بوجود نیامد و مقاومت به خوردگی نمونه ها با عملیات آندایزینگ افزایش

مدت زمان ۲۲۳۰ ساعت هم مشکلی برای آنها بوجود نیامد. بنابراین بر طبق استاندارد، با این شرایط آندایز، مقاومت به خوردگی مناسبی دارند.

جدول ۴. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T6-7075

شرایط آندایزینگ	شرایط آب بندی	میانگین زمان ایجاد ۳ حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت)
۱	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۱	آب بندی نشده	۵۰
۲	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی نشده	۵۰

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه های آندایزینگ شده آلیاژ T3-2024 در جدول ۵ آورده شده است. همان گونه که مشخص است تمام نمونه های آب بندی نشده در ۲۵ ساعت بیش از ۳ حفره در آنها دیده شد، بنابراین از نظر استاندارد مقاومت به خوردگی مناسبی ندارند و در واقع آب بندی کردن یک مسئله بحرانی و ضروری در مورد پوشش های آندایز آلیاژهای ۲۰۲۴ می باشد. در مواردی که نمونه ها آب بندی شده اند مقاومت به خوردگی آنها افزایش یافته و تمامی نمونه ها و تحت هر دو شرایط انجام عملیات آندایزینگ، به مدت زمان ۳۳۶ ساعت مشکلی نداشتند. نمونه هایی که تحت دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ آندایز و آب بندی شده بودند، پس از مدت زمان ۱۳۳۰ ساعت از نظر استاندارد مردود بودند، در حالی که نمونه های آندایز شده تحت شرایط ۱ یعنی با دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ تا مدت زمان ۲۲۳۰ ساعت نیز هیچ گونه مشکلی نداشتند.

آلیاژ با درصد بالای مس ۲۰۲۴، یکی از آلیاژهای است که آندایز آن بسیار مشکل است. در

۴. بحث و نتیجه گیری

با انجام تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های بدون پوشش مشخص شد که نمونه آلیاژی ۵۰۸۳ بدون انجام عملیات آندایزینگ هم مقاومت به خوردگی خوبی دارد و می‌توان با اطمینان از این آلیاژ در محیط‌های دریایی و خورنده استفاده نمود. همچنین مشخص شد که نمونه‌های آلیاژی پر استحکام آلومینیوم یعنی ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ مقاومت به خوردگی بسیار پایینی در شرایط محیط‌های دریایی دارند و می‌توان با ایجاد پوشش آندایزینگ و پروسه آب بندی، آنها را در برابر خوردگی مقاوم کرد. آلیاژ ۶۰۶۱ در شرایط محیط‌های دریایی مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به نمونه‌های ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ دارد ولی این مقدار هم زیر حد استاندارد است و در صورت استفاده از این آلیاژ در محیط‌های دریایی می‌توان با انجام عملیات آندایزینگ، مقاومت به خوردگی مطلوب را ایجاد نمود.

با تست نمونه‌های آندایز شده مشخص شد که آب بندی کردن نمونه‌های آلیاژی ۲۰۲۴ و ۷۰۷۵ ضروری است و نمونه‌های بدون آب بندی از این آلیاژها مقاومت به خوردگی مطلوبی ندارند. در مورد آلیاژ ۲۰۲۴ مشخص شد که تحت انجام عملیات آندایزینگ با دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ ۱/۶، پس از گذشت ۱۳۳۰ ساعت تعداد ۳ حفره ایجاد می‌گردد در حالی که نمونه‌های آندایز شده با دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ ۲/۶ تا مدت زمان ۲۲۳۰ ساعت هم مشکلی ندارند. یعنی اینکه آلیاژ ۲۰۲۴ در دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ ۲/۶ شرایط تشکیل لایه آندی بهتری دارد.

قابل توجهی یافته بود. تست‌های الکتروشیمیایی که در این زمینه بر روی آلیاژ ۶۰۶۱ انجام شده نیز تایید کنند این مطلب است (Huang, 2008).

جدول ۶. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T6-۶۰۶۱

شرایط آندایزینگ	شرایط آب بندی	میانگین زمان ایجاد ۳ حفره بر روی نمونه‌ها در تست پاشش نمک (ساعت)
۱	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۱	آب بندی نشده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی نشده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی نشده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های آندایزینگ شده آلیاژ H۳۴-۵۰۸۳ در جدول ۷ آورده شده است. با توجه به نتایج جدول مشخص است که بر روی تمام نمونه‌ها تا مدت زمان ۳۳۶ ساعت هیچ حفره‌ای تشکیل نشده بود. تحت تمامی شرایط و حالت‌های آندایزینگ عمر نمونه‌های آب بندی شده و آب بندی نشده بیشتر از ۲۲۳۰ ساعت بود و تا این مدت زمان که نمونه‌ها از محفظه تست پاشش مه نمک خارج شدند هیچ‌گونه مشکل خوردگی برای آنها بوجود نیامد. نمونه‌های بدون پوشش این آلیاژ نیز هیچ مشکل خوردگی نداشتند و می‌توان از این آلیاژ بدون پوشش هم در اتمسفر دریایی استفاده نمود.

جدول ۷. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ H۳۴-۵۰۸۳

شرایط آندایزینگ	شرایط آب بندی	میانگین زمان ایجاد ۳ حفره بر روی نمونه‌ها در تست پاشش نمک (ساعت)
۱	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۱	آب بندی نشده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی شده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.
۲	آب بندی نشده	تا ۲۲۳۰ ساعت مشاهده نشد.

- Davis, J.R. 1999. Corrosion of aluminum and aluminum alloys, ASM International, Materials Park, p25.
- Deluccia, J.J. 1993. Aircraft materials for corrosion prevention and control: A qualified products list. Report No. NAWCADWAR-94099-60.
- Cutler J., Liber J. 2005. Understanding aircraft structures. Blackwell Publishing, p340.
- Voevodin, N., Jeffcoate, C., Simon, L., Khobaib, M., Donley, M. 2001. Characterization of pitting corrosion in bare and sol-gel coated aluminum 2024-T3 alloy. Surf. Coat. Tech. 140: 29-34.
- Petroyiannis P.V., Pantelakis G., Haidemenopoulos G.N. 2005. Protective role of local Al cladding against corrosion damage and hydrogen embrittlement of 2024 aluminum alloy specimens. Theo. App. Fra. Mech. 44: 70-81.
- Twite, R.L., Bierwagen, G.P. 1998. Review of alternatives to chromate for corrosion protection of aluminum aerospace alloys. Prog. Org. Coat. 33: 91-100.
- Sun S., Zheng Q., Li D, Wen J. 2009. Long-term atmospheric corrosion behavior of aluminum alloys 2024 and 7075 in urban, coastal and industrial environments. Corr. Sci. 51: 719-727.
- Aerts, T., Dimogerontakis, T. 2007. Influence of the anodizing temperature on the porosity and the mechanical properties of the porous anodic oxide film. Surf. Coat. Tech. 201:7310-7317.
- Dimogerontakis, T. 1998. Oxygen evolution during the formation of barrier type anodic film on 2024-T3 aluminum alloy. Corr. Sci. 40: 1939-1951.
- Horn, V, Kenet, R. 1990. Aluminum Design and Application. American society for metals, Metals Park, Ohio Vol.2, p250.
- Yu, X., Cao, C. 2003. Electrochemical study of the corrosion behavior of ce sealing of anodized 2024 aluminum alloy. Thin Sol. Fil. 423: 252-256.
- Zuo, Y., Zhao, P., Zhao, J. 2003. The influence of sealing methods on corrosion behavior of anodized aluminium alloys in NaCl solutions. Surf. Coat. Tech. 166: 237-242.
- Huang, Y. 2008. Evaluation of corrosion resistance of anodized aluminum
- منابع
- Forn, A., Picas, J.A., Baile, M.T. 2007. Microstructure and tribological properties of anodic oxide layer formed on Al-Si alloy produced by semisolid processing. Surf. Coat. Tech. 202: 1139-1143.
- Brace, A.W., Sheasby P.G. 1979. The technology of anodizing aluminum. 2nd ed, Technicopy Limited, Stonehouse, p149.
- ABS. 2003. Rule requirements for materials and welding, Part 2, Copyright American Bureau of Shipping.
- Vargel C., Jacques M., Schmidt M.P., 2004. Corrosion of aluminium, Elsevier Ltd, p 200.
- Campestrini P., Westing E.P.M., Wit J.H.W. 2001. Influence of surface preparation on performance of chromate conversion coatings on Alclad 2024 aluminum alloy. Part I: Nucleation and growth. Elect. Acta. 46: 2553-2571.
- Campestrini, P., Westing, E.P.M., Wit J.H.W. 2001. Influence of surface preparation on performance of chromate conversion coatings on alclad 2024 aluminum alloy. Part I: Nucleation and growth, Elect. Acta. 46: 2631-2647.
- Wang D., Bierwagen G.P., 2009. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection, Progress in organic coatings. 64: 327-338.
- Andreatta F., Terrya H. 2004. Corrosion behavior of different tempers of AA7075 aluminum alloy. Elec. Acta. 49: 2851-2862.
- Hintze, P.E., Calle, L.M., 2006. Electrochemical properties and corrosion protection of organosilane self-assembled monolayers on aluminum 2024-T3. Elec. Acta. 51:1761-1766.
- Huang Y., Shih H., Huang H., Daugherty J., Wub S., Ramanathan S, et al. 2008. Evaluation of the corrosion resistance of anodized aluminum 6061 using electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Corr. Sci. 50: 3569-3575.
- Hsing-Hsiang, S., Shiang-Lin, T. 2000. Study of anodic oxidation of aluminum in mixed acid using a pulsed current, Surf. Coat. Tech. 124: 278-285.