

بررسی تاثیر آندایزینگ در افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم هوائی و دریائی

علی یزدانی*¹، آرمان زارعی²

1. دانشگاه صنعتی مالک اشتر

2. گروه شناورهای اثر سطحی، سازمان صنایع دریایی

تاریخ پذیرش: 89/7/27

تاریخ دریافت: 89/3/9

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 2000 و 7000)، مشکلات خوردگی آنها نیز حادثتر است. پوشش های مختلفی در این زمینه استفاده می شود. در محیط های دریائی 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 7075-T6، 2024-T3، 6061-T6 و 5083-H34، توسط تست پاشش مه نمک، بر طبق استاندارد ASTM B 117 بررسی شده است. نتایج بیانگر اهمیت میزان دانسیته جریان و پروسه ی آب بندی در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش های آندایز است.

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

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

1. 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 8 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 2024 از گروه 2xxx و 7075 از گروه 7xxx در صنایع هوایی، و آلیاژهای 6061 از گروه 6xxx و 5083 از گروه 5xxx در صنایع دریایی کاربرد زیادتری دارند. در آلیاژهای آلومینیوم هوایی T6-7075 و T3-2024، 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 (مثلاً Al_2CuMg) و زمینه، سبب ایجاد خوردگی موضعی در این آلیاژها می شود. آلیاژهای دریایی T6-6061 و H34-5083 آلومینیوم مقاومت به خوردگی بهتری دارند.

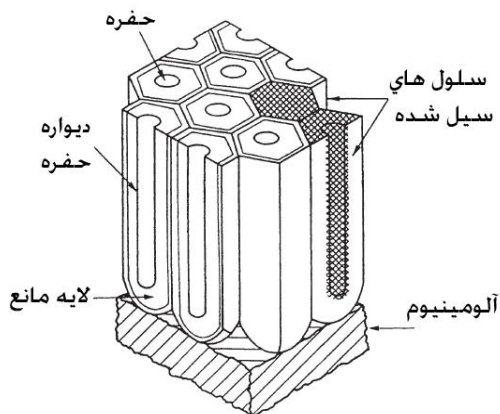
استفاده گسترده از آلیاژهای آلومینیوم در صنایع مختلف، لزوم اعمال عملیات سطحی مناسب

جهت حفاظت از خوردگی آنها را مشخص می کند (Davis, 1999; Deluccia, 1993). پوشش های مختلفی از جمله بوهمیت (C. 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 کروماتنه کردن (Zhao, 2001) صورت گرفته است، اما طبیعت سمی و سرطان زای یون کروم 6 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).

بر اساس آن تمام روش های آب بندی، مقاومت به خوردگی آلیاژهای آندایز شده را تا اندازه ای افزایش می دهند. Gonzalez گزارش کرده که حتی در محیط های به شدت خورنده، آب بندی با آب جوش می سبب افزایش زیاد مقاومت به خوردگی آلیاژها می شود (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 پوشش های آندایزینگ در نوع محلول الکترولیت و شرایط انجام عملیات پوشش دهی می باشد. پوشش آندایزینگ نوع اول در وان محتوی محلول الکترولیت اسید کرومیک انجام می شود و پوشش های آندایزینگ نوع دوم و سوم با استفاده از محلول اسیدسولفوریک انجام می شوند همچنین الکترولیت مورد استفاده می تواند اگزالیک اسید باشد. تفاوت پوشش های آندایزینگ نوع دوم و سوم در دمای عملیات و دانسیته جریان اعمالی می باشد. در جدول 1، شرایط پوشش آندایزینگ نوع دوم آورده شده است.



شکل 1. شماتیک ساختار پوشش آندایز ایجاد شده در محلول اسیدی.

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 ورقه ای آلیاژهای آلومینیوم است (Lopez, 2002). این نوع پوشش می تواند 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 1)، 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 مولکول های 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 می شود. این عملیات توسط محلول های مختلفی نظیر آب جوش، دی کرومات، استات نیکل، اسید استتاریک و فلئورید نیکل استفاده می شود. در این میان آب جوش مرسوم ترین، به صرفه ترین و رایجترین روش مورد استفاده می باشد.

یک بررسی کلی بر انواع تکنیک های آب بندی توسط Hao و Cheng (2000) صورت گرفته است که

2. مواد و روش کار

در این تحقیق مقاومت به خوردگی آلیاژهای آلومینیوم هـوائی T6-7075، T3-2024 و آلیاژهای دریائی T6-6061 و H34-5083 در حالت بدون پوشش و آندایز شده بررسی شده است. ترکیب شیمیائی اسمی آلیاژها مصرفی در جدول 2 آورده شده است. جهت بررسی مقاومت به خوردگی آلیاژهای فوق، نمونه ها در ابتدا بر طبق استاندارد MIL8625F آندایزینگ نوع دوم شدند و سپس طبق استاندارد ASTM B 117 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 شده که در هر حالت نیز تعدادی از نمونه ها در حالت آب بندی مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول 2. ترکیب شیمیایی اسمی آلیاژهای 7075، 2024، 6061 و 5083 (درصد وزنی).

| نوع آلیاژ | 7075 | 2024 | 6061 | 5083 |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Si | 0/40 | 0/50 | 0/40-0/8 | 0/40 |
| Fe | 0/50 | 0/50 | 0/7 | 0/10 |
| Cu | 1/2-2/0 | 3/8-4/9 | 0/15-0/4 | 0/40-1/0 |
| Mn | 0/30 | 0/30-0/9 | 0/15 | 4/0-4/9 |
| Mg | 2/1-2/9 | 1/2-1/8 | 1/2-0/8 | 3/5-4/5 |
| Cr | -0/28 | 0/10 | 0/04-0/4 | 0/04-0/4 |
| Zn | 5/1-6/1 | 0/25 | 0/25 | 0/25 |
| Ti | 0/20 | 0/15 | 0/15 | 0/15 |
| AL% | باقیمانده | باقیمانده | باقیمانده | باقیمانده |

در زمینه عوامل موثر بر آندایزینگ از جمله، دما (Aerts, 2007)، اسید مصرفی (Hsing, 2000)، دانسیته جریان (Aerts, 2007)، ریزساختار و خواص مکانیکی پوشش های آندایز (Forn, 2007)، تحقیقات زیادی انجام شده است. همانطور که ذکر شد، یکی از خواص مهم این نوع از پوشش ها، بحث بهبود مقاومت به خوردگی آن ها 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، تست های مختلفی وجود دارد که با توجه به شرایط کارکرد قطعه تعیین می شود.

جدول 1. شرایط انجام عملیات آندایزینگ نوع دوم (II)

| | |
|---|-------------------|
| محلول الکترولیت اسید سولفوریک 15٪ اسید سولفوریک | درجه حرارت |
| $21 \pm 1^\circ\text{C}$ | زمان انجام عملیات |
| 40 تا 60 دقیقه | دانسیته جریان |
| $1/2-2/40 \frac{A}{dm^2}$ | ولتاژ |
| 24 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 ($1/6 \frac{A}{dm^2}$ و $2/6 \frac{A}{dm^2}$) و اهمیت آب بندی، در افزایش مقاومت به خوردگی پوشش های آندایزینگ نوع دوم در آلیاژهای T6-7075، T3-2024، T6-6061 و H34-5083، توسط تست پاشش مه نمک، بر طبق استاندارد ASTM B 117 بررسی شده است.

T3-2024 به مدت 38 دقیقه و بقیه آلیاژها به مدت 32 دقیقه در حمام اسیدسولفوریک قرار داده شده اند. قابل ذکر است که دانسیته جریان های فوق پس از آزمایش بر روی تعدادی از نمونه ها و مطالعه و بررسی بر روی شرایط پوشش حاصل از اعمال دانسیته جریان های مختلف انتخاب شدند.

نمونه های آندایز شده در دو حالت آب بندی و بدون آب بندی تست خوردگی شده اند. آب بندی در دمای 88°C آب داغ به مدت زمان 20 دقیقه انجام شده است. تمامی نمونه ها بوسیله دم ش هوا خشک شده و در نقاط مختلف ضخامت پوشش آنها اندازه گیری و سپس در دسیکاتور قرار داده شدند.

تست های بررسی اثر و رفتار خوردگی براساس استاندارد ASTM B 117 انجام گردیدند. محلول نمک مورد نظر برای انجام تست بصورت 5 حجم کلریدسدیم در 95 حجم آب تهیه شد. فشار هوای دمیده شده در دستگاه تست پاشش مه نمک در حدود 25Psi-10 و درجه حرارت انجام تست در محدوده $3^{\circ}\text{C} \pm 35$ قرار داده شد. PH محلول نمک در محدوده 6/5-7/2 در نظر گرفته شد. با افزایش هیدروکسیدسدیم (0/01N) 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 8625F MIL مطابقت داده شدند. براساس استاندارد MIL 8625F تعداد حفره های مجزای بوجود آمده بر روی قطعات باید دارای شرایط زیر باشند:

الف) نمونه های تست شده نباید بیشتر از 15 حفره جداگانه در مجموع 968 cm^2 (150 in^2) از تعداد 5 نمونه و یا تعداد بیشتر نمونه های تست شده داشته باشند و قطر هیچ کدام از این حفره ها نباید

با توجه به استانداردها و اهداف مورد نظر تست، تعداد 25 نمونه از هر آلیاژ به ابعاد $10/2 \times \text{cm} 10/2 \times \text{cm} 0/1$ ($4'' \times 4'' \times 0/04''$) تهیه شد است. سطح نمونه ها با استفاده از حلال های مناسب کاملاً از چربی ها و آلودگی های سطحی پاک شده و بعد از شستشو با آب مقطر، نمونه ها خشک شده اند.

تعداد 20 نمونه از هر گروه از آلیاژها در حالت آندایز و 5 نمونه بدون آندایز تست خوردگی شده است. عملیات آندایزینگ نوع II، در دمای 21°C تحت دو دانسیته جریان مختلف انجام شده که نهایتاً ضخامت پوشش $18\mu\text{m}$ به دست آمده است. ضخامت پوشش ها بر طبق استاندارد ASTM B244 توسط دستگاه ضخامت سنج جریان گردابی اندازه گیری شده است. عملیات آندایزینگ نمونه ها در تانک محلول محتوی $190 \pm 2\text{ g/l}$ اسیدسولفوریک انجام شده است. برای دستیابی به پوششی مطلوب، محلول الکترولیت پیش از هر عملیات آندایزینگ آنالیز می گردید. همانطور که بیان شد آندایزینگ در دو شرایط مختلف زیر انجام شده است:

حالت 1

در این حالت عملیات آندایزینگ تحت دانسیته جریان $2/6 \frac{\text{A}}{\text{dm}^2}$ انجام گرفت که در این حالت برای رسیدن به ضخامت پوشش $18\mu\text{m}$ ، نمونه های آلیاژ T3-2024 به مدت 22 دقیقه و بقیه آلیاژها به مدت 20 دقیقه در حمام اسیدسولفوریک قرار داده شده اند.

حالت 2

در این حالت عملیات آندایزینگ تحت دانسیته جریان $1/6 \frac{\text{A}}{\text{dm}^2}$ انجام گرفت که در این حالت برای رسیدن به ضخامت پوشش $18\mu\text{m}$ ، نمونه های آلیاژ

3. نتایج

جهت بررسی و مقایسه نمونه‌های آندایز شده با نمونه‌های بدون پوشش، تعداد پنج نمونه از هر آلیاژ نیز بر اساس استاندارد ASTM B 117 تحت عملیات تست پاشش نمک قرار گرفتند. نتایج تست پاشش نمک آنها در جدول 3 آورده شده است (از هر آلیاژ 5 نمونه).

با بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های بدون پوشش مشخص شد که آلیاژ 5083 بدون پوشش، مقاومت به خوردگی بسیار خوبی دارد. در سایر نمونه‌های آلیاژی در مدت زمانی کمتر از 336 ساعت 3 حفره بوجود آمد، بنابراین با توجه استاندارد مقاوم به خوردگی نیستند. البته آلیاژ 6061 شرایط مطلوب‌تری را نشان می‌داد. با بررسی نتایج مشخص می‌شود که نمونه‌های آلیاژی 2024 و 7075 به هیچ عنوان شرایط مطلوبی از لحاظ مقاومت به خوردگی ندارند و اگر در اتمسفر دریایی و محیط خورنده 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 2024 و 7075 در محیط‌های صنعتی، شهری و دریایی نیز حاکی از مقاومت به خوردگی پائین این آلیاژها در اتمسفر دریایی است (Shuangqing Sun, 2009).

جدول شماره 3. خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی

نمونه‌های آلیاژی بدون پوشش

| نوع آلیاژ | میانگین زمان ایجاد 3 حفره بر روی نمونه‌ها در تست پاشش نمک (ساعت) |
|-----------|--|
| 2024-T3 | 15 |
| 5083-H34 | تا 2230 ساعت مشاهده نشد |

بزرگتر از $0/2\text{cm}^2$ ($0/031\text{in}^2$) باشد. مناطقی با فاصله $0/4\text{cm}^2$ ($0/062\text{in}^2$) 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^2 194 (30in^2) از تعداد یک یا چند نمونه تست شده نباید بیشتر از پنج حفره جداگانه با قطر بیشتر از $0/2\text{cm}^2$ داشته باشند. مناطقی با فاصله $0/4\text{cm}^2$ 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-8625F 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، 97cm^2 (in^2) 15) می‌باشد و برای داشتن مقاومت خوردگی مطلوب و مورد قبول باید بیشتر از 3 حفره وجود نداشته باشد. بر طبق استاندارد MIL-8625F جهت داشتن شرایط مقاومت به خوردگی قابل قبول، باید نمونه‌هایی که تحت شرایط پاشش نمک مطابق استاندارد ASTM B 117 قرار گرفته‌اند تا مدت زمان 336 ساعت شرایط الف و یا ب که در بالا توضیح داده شد را تامین نمایند. با توجه به ابعاد نمونه‌های تست، بر طبق استاندارد (MIL8625F) اگر در نمونه‌های تست شده در مدت زمان 336 ساعت تعداد سه حفره جداگانه تشکیل نشود آن نمونه‌ها مقاوم به خوردگی هستند، اما برای بررسی دقیقتر رفتار خوردگی تلاش شد تا برای مدت زمانی طولانی‌تر نمونه‌ها تحت تست پاشش نمک قرار بگیرند و مدت زمان تست پاشش نمک به سه ماه (2230 ساعت) افزایش یافت.

| | | |
|---|--------------|-------|
| | | نشده. |
| 2 | آب بندی نشده | 50 |

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های آندایزینگ شده آلیاژ T3-2024 در جدول 5 آورده شده است. همان گونه که مشخص است تمام نمونه‌های آب بندی نشده در 25 ساعت بیش از 3 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 پوشش‌های آندایز آلیاژهای 2024 می‌باشد. در مواردی که نمونه‌ها آب بندی شده‌اند مقاومت به خوردگی آنها افزایش یافته و تمامی نمونه‌ها و تحت هر دو شرایط انجام عملیات آندایزینگ، به مدت زمان 336 ساعت مشکلی نداشتند. نمونه‌هایی که تحت دانسیته جریان $1/6 \frac{A}{dm^2}$ آندایز و آب بندی شده بودند، پس از مدت زمان 1330 ساعت از نظر استاندارد مردود بودند، در حالی که نمونه‌های آندایز شده تحت شرایط 1 یعنی با دانسیته جریان $2/6 \frac{A}{dm^2}$ تا مدت زمان 2230 ساعت نیز هیچ گونه مشکلی نداشتند.

آلیاژ با درصد بالای مس 2024، یکی از آلیاژهای است که آندایز آن بسیار مشکل است. در آندایز این آلیاژ در ضخامت‌های بالا، اکسیژن یکی از عوامل ایجاد ترک خوردگی لایه آندایز (Dimogerontakis, 1998) و پائین آمدن مقاومت به خوردگی آن می‌باشد. ممکن است آندایزینگ تحت دانسیته جریان پائین، سبب ایجاد ترک در پوشش شده و مقاومت به خوردگی آنرا کاهش داده باشد.

| | |
|---------|-----|
| 6061-T6 | 315 |
| 7075-T6 | 30 |

همانطور که ذکر شد، آلیاژ 7075 آلومینیوم، به دلیل اختلاف پتانسیل شدید بین ترکیبات بین فلزی Fe، Cu 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 Zuo, 2003). خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های آندایزینگ شده آلیاژ T6-7075 در جدول 4 آورده شده است. بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌ها نشان داد که با آب بندی نکردن نمونه‌های آندایز شده در هر دو شرایط آندایز (دانسیته جریان های $1/6 \frac{A}{dm^2}$ و $2/6 \frac{A}{dm^2}$)، نمونه‌ها در مدت زمان 50 ساعت خورد می‌شوند، بنابراین بر طبق استاندارد مقاوم به خوردگی نیستند. نمونه‌های آندایز و آب بندی شده تحت هر دو شرایط 1 و 2 تا مدت زمان استاندارد یعنی 336 ساعت هیچگونه مشکل خوردگی نداشتند و با ادامه تست پاشش نمک تا مدت زمان 2230 ساعت هم مشکلی برای آنها بوجود نیامد. بنابراین بر طبق استاندارد، با این شرایط آندایز، مقاومت به خوردگی مناسبی دارند.

جدول 4. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T6-7075

| شرایط آندایزینگ | شرایط آب بندی | میانگین زمان ایجاد 3 حفره بر روی نمونه‌ها در تست پاشش نمک (ساعت) |
|-----------------|---------------|--|
| 1 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 1 | آب بندی نشده | 50 |
| 2 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده |

جدول 6. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T6-6061

| شرایط آندایزینگ | شرایط آب بندی | میانگین زمان ایجاد 3 حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت) |
|-----------------|---------------|--|
| 1 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 1 | آب بندی نشده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی نشده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی نشده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های آندایزینگ شده آلیاژ H34-5083 در جدول 7 آورده شده است. با توجه به نتایج جدول مشخص است که بر روی تمام نمونه‌ها تا مدت زمان 336 ساعت هیچ حفره ای تشکیل نشده بود. تحت تمامی شرایط و حالت های آندایزینگ عمر نمونه‌های آب بندی شده و آب بندی نشده بیشتر از 2230 ساعت بود و تا این مدت زمان که نمونه‌ها از محفظه تست پاشش مه نمک خارج شدند هیچ گونه 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 7. خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ H34-5083

| شرایط آندایزینگ | شرایط آب بندی | میانگین زمان ایجاد 3 حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت) |
|-----------------|---------------|--|
| 1 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 1 | آب بندی نشده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 2 | آب بندی نشده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |

بنابراین بهترین شرایط انجام عملیات آندایزینگ آلیاژ T3-2024، عملیات آندایزینگ آب بندی شده تحت دانسیته جریان $\frac{A}{dm^2}$ 2/6 می‌باشد.

جدول 5- خلاصه نتایج تست پاشش مه نمک بر روی چهار سری نمونه تست از آلیاژ T3-2024

| شرایط آندایزینگ | شرایط آب بندی | میانگین زمان ایجاد 3 حفره بر روی نمونه ها در تست پاشش نمک (ساعت) |
|-----------------|---------------|--|
| 1 | آب بندی شده | تا 2230 ساعت مشاهده نشد. |
| 1 | آب بندی نشده | 25 |
| 2 | آب بندی شده | 1330 |
| 2 | آب بندی نشده | 25 |

خلاصه نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های آندایزینگ شده آلیاژ T6-6061 در جدول 6 آورده شده است. با بررسی نتایج تست پاشش نمک بر روی نمونه‌ها مشخص گردید که تمامی نمونه‌ها تا مدت زمان 336 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 2230 ساعت نیز، تحت هر دو شرایط آندایزینگ، در نمونه‌های آب بندی شده و آب بندی نشده، مشکلی از لحاظ خوردگی بوجود نیامد و مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با عملیات آندایزینگ افزایش قابل توجهی یافته بود. تست های الکتروشیمیائی که در این زمینه بر روی آلیاژ 6061 انجام شده نیز تایید کنند این مطلب است (Huang, 2008).

Forn, A., Picas, J.A. and 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

4. بحث و نتیجه گیری

با انجام تست پاشش نمک بر روی نمونه‌های بدون پوشش مشخص شد که نمونه آلیاژی 5083 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 2024 و 7075 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 6061 در شرایط محیط‌های دریایی مقاومت به خوردگی بالاتری نسبت به نمونه‌های 2024 و 7075 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 2024 و 7075 ضروری است و نمونه‌های بدون آب بندی از این آلیاژها مقاومت به خوردگی مطلوبی ندارند. در مورد آلیاژ 2024 مشخص شد که تحت انجام عملیات آندایزینگ با دانسیته جریان $1/6 \frac{A}{dm^2}$ ، پس از گذشت 1330 ساعت تعداد 3 حفره ایجاد می‌گردد در حالی که نمونه‌های آندایز شده با دانسیته جریان $2/6 \frac{A}{dm^2}$ تا مدت زمان 2230 ساعت هم مشکلی ندارند. یعنی اینکه آلیاژ 2024 در دانسیته جریان $2/6 \frac{A}{dm^2}$ شرایط تشکیل لایه آندی بهتری دارد.

منابع

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, P:250.

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 6061 using electrochemical impedance spectroscopy. *Corr. Sci.* 50:3569-3575.

Zhao, J., Xia, L., Sehgal, A., Lu, D., McCreery, R.L., Frankel, G.S., 2001. Effects of chromate and chromate conversion coatings on corrosion of aluminum alloy 2024-T3. *Surf. Coat. Tech.* 140: 51-57.

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, Pp: 278-285.

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 and Liber J, 2005. Understanding aircraft structures, Black Well Publishing.

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. in 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.