



ایجاد پوشش ضد خوردگی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی

غلامرضا فغانی

دانشجوی دکتری، مدیر گروه مواد، دانشکده مکانیک دانشگاه خاتم الانبیاء (ص)
gfaghani@yahoo.com

چکیده

بهبود مقاومت به خوردگی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ هدف این پژوهش بود. بدین منظور، روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی به کار گرفته شد. آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، آلیاژ سازه‌ای مهم در صنایع هوایی بوده و بدلیل حساسیت بالای این صنعت، بایستی این آلیاژ را از خوردگی ناشی از اثرات مخرب محیطی محافظت نمود. حدود ۸ تا ۲۰ درصد از هزینه تعمیر و نگهداری یک هواپیما بطور مستقیم ناشی از خوردگی بوده و هزینه بسیار بالایی را در پی دارد. که البته مقدار زیادی از آن قابل پیشگیری می‌باشد. شرایط محیطی یک هواپیما به شدت متغیر می‌باشد. این گستردگی تغییرات، زمینه‌ساز بسیاری از مشکلات است. رطوبت و بخار آب موجود در هوا، تغییرات دمایی شدید، تنش‌های نوسانی و ... همگی سبب وقوع خوردگی در بدنه هواپیما می‌شوند. از این رو وقوع خوردگی سطحی، خوردگی مرزدهانه‌ای، خوردگی شیاری، خوردگی گالوانیکی، خوردگی تنشی، حفره‌دار شدن در یک سازه هوایی بسیار شایع است. در این تحقیق از روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به منظور جلوگیری از خوردگی استفاده شده و مقاومت به خوردگی نمونه‌ها به کمک آزمون پلاریزاسیون بررسی شد. مورفولوژی سطح و مقطع عرضی لایه پوشش به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مطالعه گردید. نتایج نشان داد که تقریباً دانسیته جریان خوردگی برای نمونه دارای پوشش 10^{-3} برابر نسبت به نمونه بدون پوشش کاهش پیدا کرد.

واژگان کلیدی: خوردگی، آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی

۱- مقدمه

۱-۱ خوردگی و ضرورت جلوگیری از آن

خوردگی اثر متقابل فعل و انفعالات شیمیایی فلزات با محیط پیرامون آنهاست. این پدیده بسیار مخرب بوده و خسارت‌های سنگینی به صنایع مختلف از جمله هوافضا وارد می‌سازد. استفاده از آلیاژها در بدنه و اجزای هواپیما بدین معنی است که حتماً از لحظه‌ای که هواپیما ساخته می‌شود، بایستی آن را از اثرات مخرب محیط اطرافش محافظت نمود. زیرا وجود مقادیر اندکی آب یا بخار آب به همراه اکسیژن، سبب وقوع خوردگی در بدنه هواپیما می‌شوند. هواپیماهایی که در محیط‌های دریایی و یا محیط‌های حاوی دود و گازهای خورنده صنعتی پرواز می‌کنند، بیشتر در معرض خوردگی هستند. بنابراین بروز خوردگی، منجر به از کار افتادگی زود هنگام آنها می‌شود. همچنین در قسمت‌هایی از هواپیما که در دماهای بالا قرار دارند، خزش و خوردگی داغ سبب از کار افتادگی سازه می‌گردد (Gerhardus, 2000). بست‌ها و پرچ‌ها به منظور اتصال پوسته هواپیما به بدنه آن استفاده می‌شوند و جنس آنها غالباً از آلیاژهای فولاد، آلیاژهای آلومینیوم ۷۰۷۵ و ۲۰۲۴ (Wei et al, 2000)، آلیاژهای تیتانیوم و فولادهای زنگ‌نزن است. این اتصالات دائماً تحت کشش، برش، خستگی و خوردگی قرار دارند. محافظت ممکن است با استفاده از یک آلیاژ مقاوم در برابر خوردگی و یا ایجاد یک پوشش سطحی (پوشش‌های تبدیلی، شیمیایی، فلزی و یا رنگ) باشد. اما هیچ یک از این موارد، بدنه هواپیما را بی‌نیاز از مراقبت و کنترل در برابر خوردگی نمی‌کنند (Roberge, 1999). بعضی از انواع خوردگی، بین پوشش و سطح فلز پنهان می‌شوند و زمانی که قطعه از کار افتاد، رویت می‌شوند. بنابراین بدترین نوع آسیب در این سازه‌ها، خوردگی است و کشورهای پیشرفته همیشه به دنبال راه‌حل‌های مناسب برای رفع این معضل بزرگ و پرهزینه بوده‌اند (Fontana, 1967).

در سال ۱۹۸۳ کمیته حمل و نقل هوایی بین‌المللی نتایج تحقیقاتی را منتشر نمود که حدود ۸ تا ۲۰ درصد هزینه‌های تعمیر و نگهداری هواپیما به‌طور مستقیم به خوردگی ارتباط دارد. هزینه مربوط به خوردگی برای هواپیماهای جدید حدود ۸ درصد و برای هواپیماهای قدیمی حدود ۲۰ درصد برآورد شده است. این هزینه‌ها شامل نیروی انسانی، مواد و کالاهای مصرفی می‌باشد. و شامل خسارت‌های مربوط به مدت از کار افتادگی تجهیزات نمی‌شود (Gerhardus, 2000). خوردگی سازه‌های هوایی یک مشکل فزاینده است که کاهش آن نیازمند به‌کارگیری روش‌های گوناگون کنترل خوردگی می‌باشد. این در حالی است که با به‌کارگیری روش‌های کنترل خوردگی می‌توان تا ۲۰٪ این خسارت‌ها را کاهش داد.

۱-۲ آلیاژهای کار شده سری ۷xxx در صنایع هوایی

آلیاژهای کار شده آلومینیوم سری ۷xxx شامل روی بوده و به دلیل مقاومت نسبتاً مناسب به خوردگی و استحکام بسیار بالا در صنایع هوایی کاربرد وسیعی دارند. آلیاژهای کار شده ریختگی سری ۷xxx به علت دارا بودن روی، نسبت به آلیاژهای کار شده سری ۱xxx آندی‌تر هستند و در بین آلیاژهای آلومینیوم بیشترین حساسیت را نسبت به SCC دارند. اگر چه می‌توان به‌وسیله انتخاب آلیاژ مناسب و انتخاب عملیات حرارتی مناسب از آن جلوگیری کرد. آلیاژهای حاوی مس سری ۷xxx مانند ۷۰۴۹، ۷۰۵۰، ۷۰۷۵ و ۷۰۷۸ دارای مقاومت پایین‌تری نسبت به خوردگی عمومی در مقایسه با آلیاژهای که دارای مس بالاتری هستند، می‌باشند. تمام آلیاژهای سری ۷xxx دارای مقاومت خوردگی بیشتری نسبت به سری ۲xxx بوده اما مقاومت کمتری نسبت به آلیاژهای کار شده دیگر گروه‌ها دارند (Davis, 1999; Wang and Koo, 2010; Malayoglu et al, 2011).

۱-۳ روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO)

استفاده از روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی کاملاً به‌روز بوده و تمامی کشورهای صنعتی دنیا بر روی این فرآیندها برای جلوگیری از خوردگی مشغول تحقیق و پژوهش می‌باشند (Yucel, 2012). بیش از یک دهه پیش فرآیند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی (PEO) در روسیه و جهت پوشش‌دهی قطعات اتومبیل که در معرض سایش بالا قرار دارند، مورد استفاده

قرار گرفته است. این فرآیند در صنایع هوایی و اتومبیل سازی و همچنین جهت ماشین آلات و قطعات مورد استفاده در استخراج نفت و گاز و دستگاه های پالایش به کار گرفته شده است (Hakimizad et al, 2012).

این تکنولوژی در سال ۲۰۰۵ به اروپا و امریکا راه یافت. اگر چه در ابتدا از این فرآیند فقط در زمینه کاربردهای تزئینی مانند وسایل آلومینیومی مقاوم به سایش مورد استفاده در آشپزخانه، جعبه های سبک وزن منیزیمی و چارچوبی برای مصارف الکترونیکی مورد استفاده قرار گرفت، اما امروزه به صورت گسترده ای در صنایع هوایی مورد استفاده قرار گرفته است و کم کم خواص مفید پوشش های PEO مورد تأیید قرار گرفت (Sreekanth et al, 2013).

برای کاربرد در این زمینه ها به طور معمول ویژگی کلیدی مورد نیاز یک پوشش مقاومت سایشی است و به ویژه در حالی که آلیاژهای آلومینیوم با منیزیم - مس به کار رفته اند، مقاومت خوردگی مدنظر قرار دارد، اگر چه پوشش های PEO در این موارد برتر هستند، ولی این موارد به تنهایی جهت افزایش کاربردشان در صنایع کافی نمی باشد (Dong, 2010). اصولاً امروزه فشارها جهت جایگزینی فرآیندهای پایه کروماته افزایش یافته است و همچنین به دلیل بالا بودن هزینه جهت ایمن سازی کار با آن ها، صنعت را به سمت بررسی بیشتر پوشش های PEO سوق داده است. روش اکسیداسیون پلاسمایی، بر پایه پلازماسیون آندی مواد تحت فرآیند در یک محلول الکترولیت آبی در شرایط تخلیه پلاسمایی بر سطح آند، استوار می باشد (Dunleavy and Golosnoy, 2009).

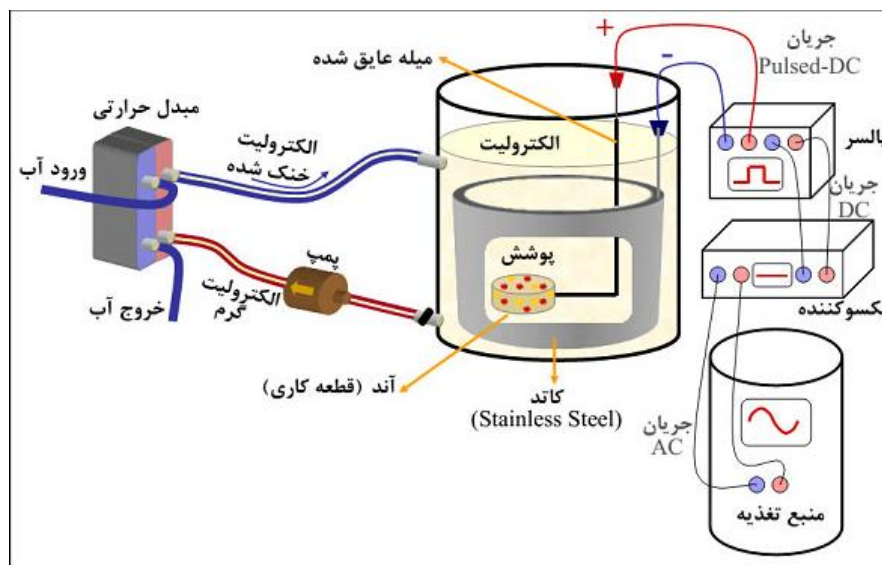
این فرآیند را می توان برای فلزاتی چون آلومینیوم، تیتانیوم، منیزیم و آلیاژهای آن ها به کار برد. اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی، فرآیندی کاملاً سازگار با محیط زیست بوده که جهت ایجاد پوشش های ضخیم و سخت، بر روی آلیاژ آلومینیومی مورد استفاده قرار گرفته است (Du et al, 2013; Wen et al, 2010; Liang et al, 2010; Matykinaz et al, 2009).

می توان گفت تقریباً تمامی پارامترهای موثر بر فرآیندهای الکترولیز شیمیایی در اینجا نیز صادق می باشند (Bajat et al, 2013). اساساً ویژگی های پوشش های ایجاد شده به این روش تحت تأثیر طبیعت فلز زیرلایه و عناصر آلیاژی به کار رفته در آن، نوع منبع قدرت، چگالی جریان اعمالی، دامنه ولتاژ آندی، ترکیب و غلظت الکترولیت، فاصله ی آند و کاتد از یکدیگر، گردش الکترولیت و غیره قرار دارند (Zalnezhad et al, 2012).

اصلی ترین پارامتری که در حین فرآیند باید کنترل شود، چگالی جریان اعمالی می باشد. به طور معمول جهت رسیدن به شرایط مورد نیاز برای الکترولیز پلاسمایی، چگالی جریان در محدوده ی بین ۰/۱ تا ۰/۳ آمپر بر سانتیمتر مربع تنظیم می گردد (Lu et al, 2006; Venugopal et al, 2012).

از آن جا که براساس قانون اول فارادی، میزان جرم رسوب کرده برابر است با حاصل ضرب جریان در زمان، می توان نرخ رشد پوشش را تعریف نمود (Sabatini et al, 2010).

پس از انجام عملیات آماده سازی ساده شامل تمیزکاری و چربی گیری سطحی، نمونه درون حمام و در عمق ۲۰ تا ۵۰ میلی متر غوطه ور شده و تجهیزات اعمال جریان به آن وصل می شوند. سپس سیستم های سرمایه گذاری، هم وزن الکترولیت و خروج گاز فعال شدند، ولتاژ کاری اعمال و در مقدار مورد نظر براساس نوع رژیم عملیاتی تنظیم می گردد. براساس نوع هدف، عملیات بین ۵ تا ۱۸۰ دقیقه طول می کشد. شکل ۱، شماتیک باز سیستم پوشش دهی PEO را نشان می دهد.



شکل ۱: شماتیک باز سیستم پوشش دهی PEO

۲- روش تحقیق

در این پژوهش، پوشش‌های PEO بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ و با استفاده از حالت جریان مستقیم پالسی تک قطب درون الکترولیت قلیایی رقیق ایجاد شد. تأثیر متغیرهای فرآیند شامل زمان انجام فرآیند، فرکانس پالس‌های اعمالی و چرخه کاری آن‌ها بر روی تشکیل، ساختار و خواص خوردگی پوشش‌های PEO در محلول متداول کلرید سدیم ۳/۵٪ وزنی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. مورفولوژی سطحی و ضخامت پوشش‌ها با استفاده از SEM تعیین گردید. برای بررسی خوردگی از روش الکتروشیمیایی پلاریزاسیون پتانسیل متحرک سود جسته و نتایج بدست آمده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در ادامه به بیان نحوه‌ی تهیه‌ی نمونه‌ها و محلول‌ها و روش انجام آزمایش‌ها می‌پردازیم.

۲-۱- تهیه و آنالیز نمونه‌ها

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تهیه گردید. ترکیب دقیق این آلیاژ توسط آزمایش کوانتومتری مطابق جدول ۱ تعیین شد.

جدول ۱: ترکیب دقیق کوانتومتری آلیاژ آلومینیوم مورد استفاده

Zn	Fe	Cu	Mg	Mn	Cr	Ni	Si	Ti	Co	Ca	Al
0.6	0.49	0.42	0.03	0.85	0.008	0.01	0.22	0.01	0.008	0.001	base

جهت انجام فرآیند از محلول الکل ۹۶٪ جهت چربی‌گیری استفاده شد. کاتد از جنس فولاد زنگ‌نزن بوده و همچنین نگهدارنده‌های آندی و کاتدی نیز از این جنس می‌باشند.

۲-۲- تهیه محلول‌ها

جهت انجام فرآیند صرفاً از محلول‌های قلیایی رقیق استفاده گردید. ترکیب تقریبی الکترولیت مورد استفاده در آزمایش‌ها شامل آلومینات سدیم (NaAlO_2) به میزان ۱۰ g/L و کلرید پتاسیم (KOH) به میزان ۱/۵ g/L بود. PH محلول‌ها در حد ۱۲-۱۳/۵ و توسط PHسنج دیجیتالی اندازه‌گیری گردید. ضمن این‌که با توجه به بررسی‌های قبل و بعد از انجام فرآیند

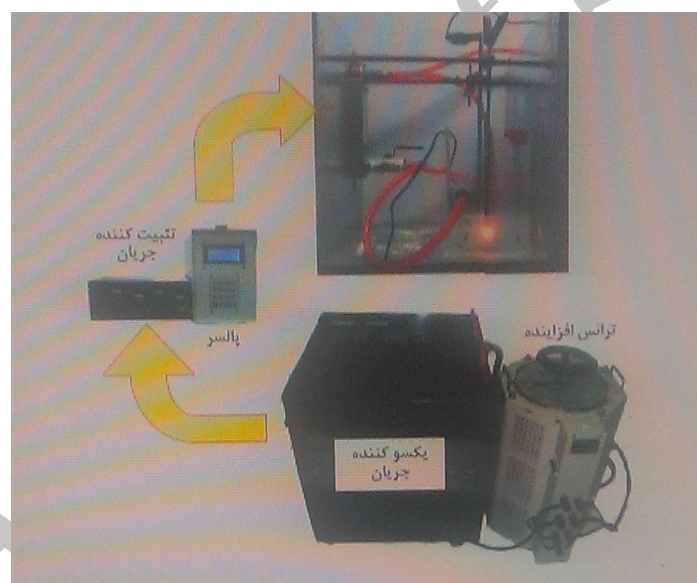
مشخص گردید که تفاوت PH در حد ۰/۱ تا ۰/۲ می باشد و تقریباً ثابت می ماند. برای تهیه این محلول هر یک از مواد موجود در آن توسط ترازوی دقیق توزین شده و سپس در ۴ لیتر آب مقطر به مدت ۳۰ دقیقه در دمای محیط بر روی همزن مغناطیسی حل گردید.

۲-۳- ایجاد پوشش

در این تحقیق، واحد عملیات PEO شامل یک الکترولیزگر، منبع الکتریکی قدرت بالا، یکسو کننده جریان، تثبیت کننده جریان، واحد تولید کننده ی پالس و سیستم خنک کننده ی الکترولیت می باشد. منبع قدرت با توان ۲۰ KW مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲، واحد عملیات شامل الکترولیزگر و سیستم خنک کننده و تجهیزات مربوط به آن را نشان می دهد.

۲-۴- بررسی مورفولوژی و ترکیب پوشش

جهت بررسی مورفولوژی سطحی، مقطع عرضی و ترکیب پوشش ایجاد شده بر سطح قطعات آلومینیومی، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده گردید.



شکل ۲: واحد عملیات PEO و تجهیزات مربوط به آن

۲-۵- بررسی مقاومت به خوردگی

برای بررسی رفتار خوردگی نمونه های پوشش داده شده از روش پلاریزاسیون پتانسیل متحرک استفاده گردید. در بررسی های پلاریزاسیون پتانسیل متحرک از دستگاه پتانسیواستات استفاده شده و نرم افزار موجود بر روی سیستم با عنوان Softcorr 3 بوده است. در شکل ۳، تصویر دستگاه نشان داده شده است برای انجام آزمایش پس از تنظیم پارامترهای دستگاه به طور خودکار پتانسیل مدار باز را خوانده می شود. برای هر تست اکی والان گرم نمونه، چگالی نمونه و نیز سطحی از نمونه که در تماس با محلول قرار می گیرد، باید به دستگاه داده شود.



شکل ۳: تصویر دستگاه پتانسیواستات مدل A213 ساخت کارخانه EG&G

تمامی آزمایش‌ها در دمای محیط (25°C) انجام گرفت. آزمایش‌ها درون سل استاندارد پتانسیواستات انجام گرفت که در شکل ۴ نشان داده شده است. در شکل ۵ نیز محلول الکترولیت در درون لوله آزمایش نشان داده شده است.



شکل ۴: سل‌های مورد استفاده در دستگاه پتانسیواستات، سمت راست آب مقطر و سمت چپ محلول گرفته شده از محیط الکترولیت



شکل ۵: محلول الکترولیت در درون لوله آزمایش

برای بررسی دقیق میزان خوردگی، نمونه‌ها را درون دستگاه سانتریفیوژ قرار داده تا ناخالصی‌ها به دیواره سل مخصوص رسوب کرده و دقت آزمایش افزایش یابد. شکل ۶، نمونه‌های سل درون مخصوص دستگاه را نشان می‌دهد.



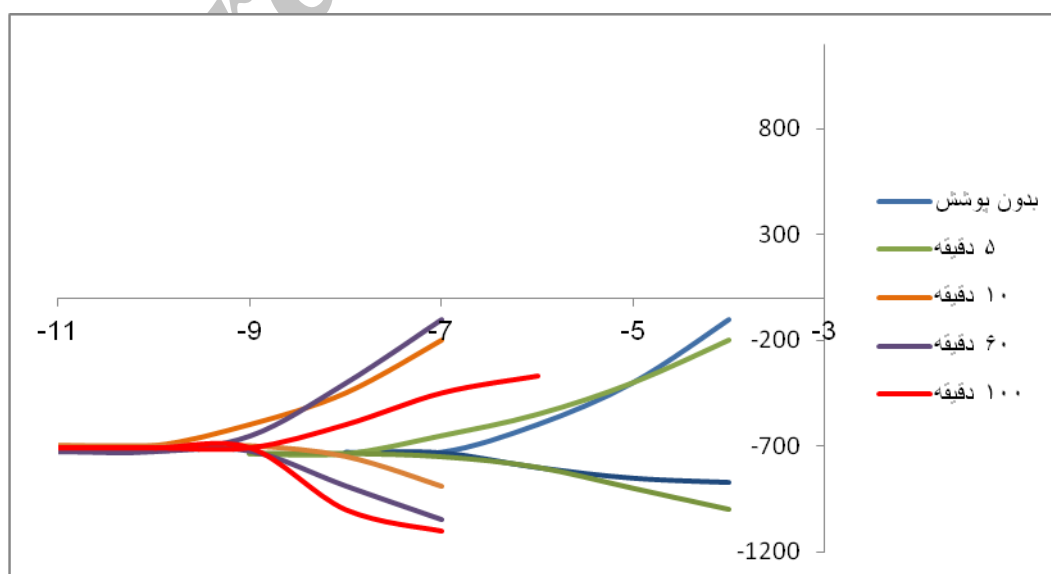
شکل ۶: نمونه‌های سل درون دستگاه سانتریفیوژ

۳- یافته‌ها

۳-۱- بررسی اثر پارامترهای مختلف بر مقاومت خوردگی پوشش‌های PEO

۳-۱-۱- زمان پوشش دهی

در این مرحله پوشش‌های ایجاد شده در چگالی جریان $0.45/0$ آمپر بر سانتیمتر مربع در فرکانس جریان اعمالی 10000 هرتز برای زمان‌های مختلف پوشش دهی تحت بررسی پتانسیل متحرک قرار گرفتند. زمان‌های پوشش دهی تحت بررسی به ترتیب ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۰۰ دقیقه بوده‌اند. جهت مقایسه‌ی بهتر نمودار پلاریزاسیون بدون پوشش نیز آورده شده است. نتایج آزمایش پس از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول $NaCl$ ۳/۵٪ وزنی در نمودار ۱ و جدول ۲ نشان داده شده است.

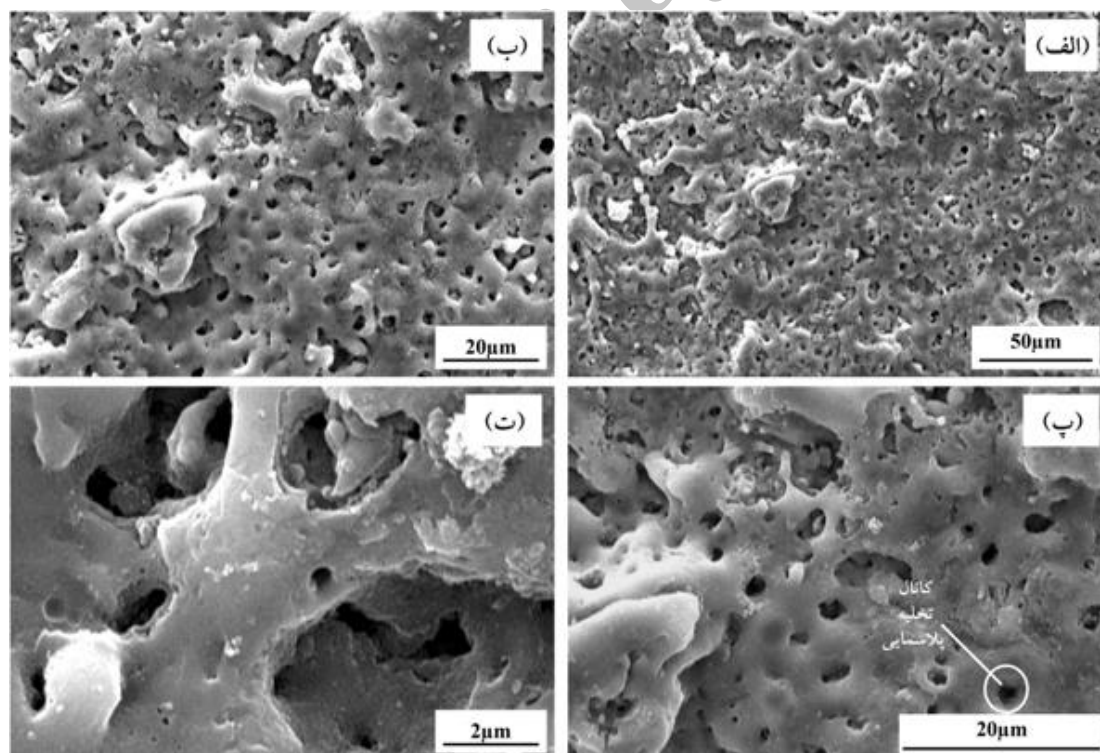


نمودار ۱: پلاریزاسیون پتانسیل متحرک برای نمونه‌های پوشش داده شده به روش PEO در زمان‌های مختلف

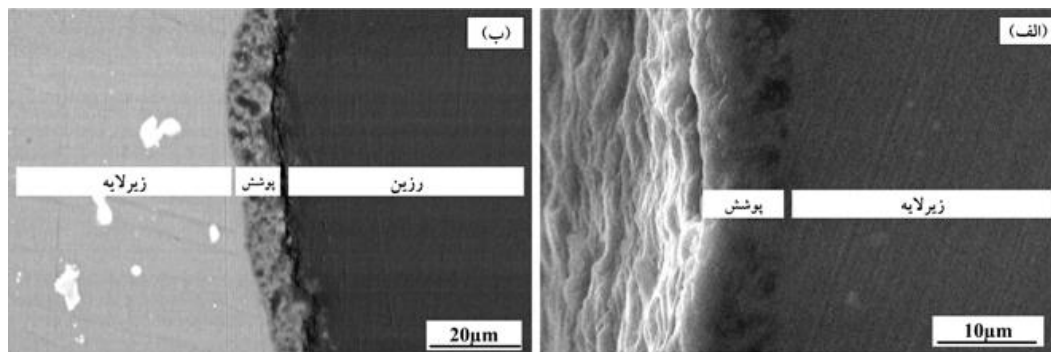
جدول ۲: نتایج تست پتانسیل متحرک در زمان‌های مختلف

زمان پوشش دهی	E _{corr} (mv)	I _{corr} ×10 ⁻⁷ A/cm ²
۰	-۷۳۱/۳	۳۱/۶۲۳
۵	-۷۳۵/۶	۱/۱۴۳
۱۰	-۷۰۰/۷	-۰/۳۶۶
۲۰	-۷۱۴/۴	۳/۳۵۷
۶۰	-۷۲۴/۷	۲/۹۷۸
۱۰۰	-۷۱۰/۶	۱/۰۷۶

با توجه به چگالی جریان خوردگی به طور کلی می‌توان گفت که در تمامی موارد اعمال پوشش PEO منجر به کاهش جریان خوردگی و لذا افزایش مقاومت قطعه در برابر خوردگی شده است. ولی باید دقت شود که چگالی در پتانسیل خوردگی تنها یک فاکتور نسبی است و کاهش آن به هیچ عنوان نمی‌تواند دلیل محکمی بر افزایش مقاومت خوردگی باشد. با توجه به این که رفتار شاخه آندی به عنوان اثر پوشش PEO بر مقاومت خوردگی مدنظر قرار گرفته است، همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه زمان پوشش‌دهی افزایش یافت، مقاومت خوردگی بهبود یافته و قطعه بیشتر محافظت شده است. در شکل‌های ۷ و ۸ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح و مقطع جانبی پوشش PEO بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در بزرگ‌نمایی‌های مختلف آورده شده است.

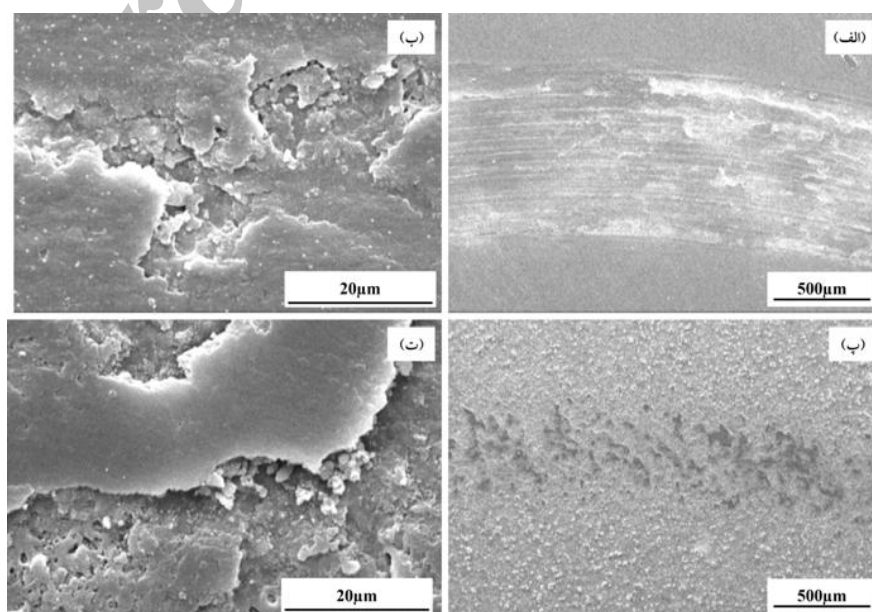


شکل ۷: تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح پوشش PEO بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در بزرگ‌نمایی‌های مختلف: الف) ۵۰۰ برابر ب) ۱۰۰۰ برابر پ) ۲۰۰۰ برابر ت) ۱۰۰۰۰ برابر



شکل ۸: تصاویر SEM از مقطع عرضی پوشش PEO بر روی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵

با توجه به نمودارها می‌توان گفت هر چه زمان عملیات افزایش یابد، ضخامت پوشش نیز بیشتر گردیده است. اما باید توجه داشت که این شرط لازم ولی ناکافی جهت افزایش خوردگی می‌باشد. مهم‌ترین دلایلی این افزایش، متراکم شدن لایه‌ی اکسیدی و کاهش چگالی تخلخل‌ها بر روی سطح پوشش و همچنین بسته شدن کانال‌های تخلیه در عرض ضخامت پوشش می‌باشد. اصلی‌ترین مدل خوردگی برای آلومینیوم در این شرایط، خوردگی حفره‌دار شدن می‌باشد. مشاهده نمودار پلاریزاسیون نمونه بدون پوشش موید این مطلب است که سطح قطعه به سرعت تحت تهاجم قرار گرفته و نمودار با شیبی تند به سمت چگالی جریان خوردگی بالا حرکت کرده است. در مورد نمونه‌های پوشش داده شده مشاهده می‌گردد که اولین اثر در تمامی موارد، آن است که شاخه‌ی آندی به سمت چپ کشیده شده، اما به دلیل وجود حفرات، ترک‌ها پلاریزاسیون آندی نسبت به پتانسیل مدار باز این شاخه‌ها دچار شکست شده و به سمت چگالی جریان خوردگی بالا متمایل می‌شوند. البته در این موارد شیب سیر شاخه‌ی آندی کمتر از نمونه بدون پوشش می‌باشد. این حالت برای تمامی زمان‌های پوشش‌دهی اتفاق افتاده است، اما در زمان ۱۰۰ دقیقه پوشش‌دهی حاصل شده شیب کمتری را نشان می‌دهد. در مورد این پوشش‌ها بحث روئین شدن و ایجاد لایه‌ی پسیو را نمی‌توان به صورت گسترده به کار برد، زیرا با توجه به منحنی‌های بدست آمده، اکثراً یا ناحیه‌ی پسیو دیده نمی‌شود و یا بسیار کوچک است. در حقیقت خود این پوشش‌ها به صورت سدی در برابر خوردگی قرار دارند.

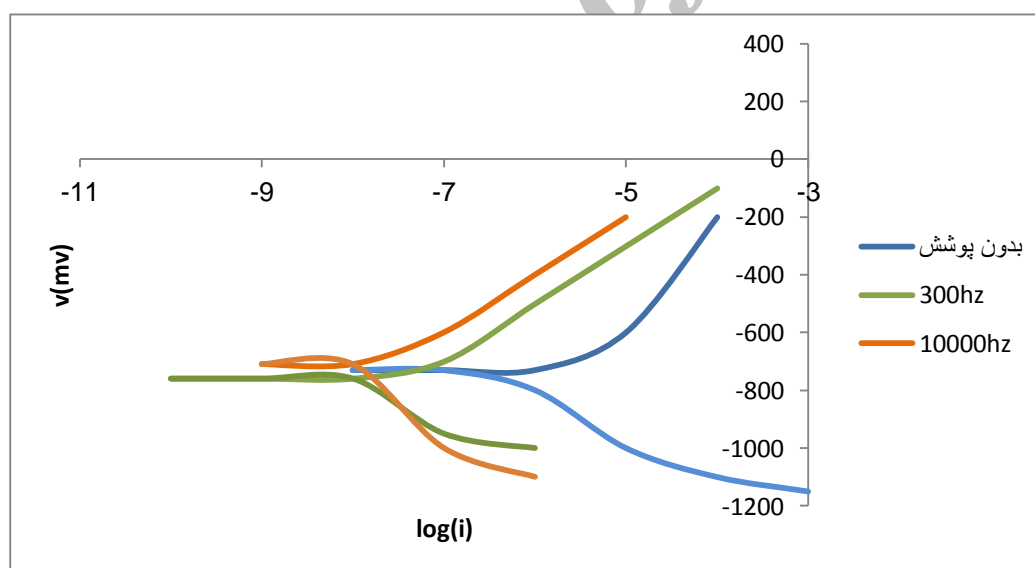


شکل ۹: تصاویر SEM از سطح نمونه (الف) و (ب) بدون پوشش و (پ) و (ت) نمونه پوشش‌دار

گمان بر این است که علاوه بر وجود برخی از کانال‌های تخلیه، خلل و فرج سطحی سبب آن می‌شود که تا حدودی محلول خورنده با سطح قطعه در تماس قرار گیرد. وجود برخی ناخالصی‌ها و ترکیبات دیگر که نسبت به خوردگی ضعیف می‌باشند، منجر به تولید عناصر آلیاژی همچون سیلیکون (Si)، اثر مخربی بر روی خوردگی و به ویژه حفره‌دار شدن آلیاژهای آلومینیوم دارند. مقادیر کم سیلیکون تقریباً بی‌تأثیر است، ولی زیاد شدن آن سبب کاهش مقاومت حفره‌دار شدن می‌گردد. به طور کلی چنان چه ذرات سیلیکون موجود در آلیاژ در حین فرآیند PEO ذوب شده و درون شبکه‌ی آلومینیومی اکسید شوند، لایه‌ی پوششی دارای ترکیبی یکنواخت شده و بازدارنده‌ی مناسبی در برابر خوردگی می‌باشد. اما اگر این ذرات بدون آن که اکسید شوند یا فقط به مقدار کمی اکسید گردند وارد لایه‌ی پوششی ایجاد شده گردند، منجر به ایجاد آشفستگی در پوشش شده و مقاومت خوردگی را کاهش می‌دهند. علاوه بر آن وجود برخی ترکیبات بین فلزی همانند ترکیبات آهن‌دار در آلیاژهای آلومینیومی، اغلب سبب کاهش مقاومت به خوردگی موضعی می‌گردد.

۳-۱-۲- فرکانس جریان اعمالی

برای بررسی اثر این پارامتر دو فرکانس ۳۰۰ و ۱۰۰۰۰ هرتز در چگالی جریان ۰/۴۵ آمپر بر سانتیمتر مربع در مدت زمان پوشش‌دهی ۱۰۰ دقیقه تحت بررسی قرار گرفت. جهت مقایسه بهتر نمودار پلاریزاسیون، قطعه بدون پوشش نیز آورده شده است. نتایج آزمایش پس از ۳ ساعت غوطه‌وری در محلول NaCl ۰/۳٪ وزنی در نمودار ۲ و جدول ۳ آورده شده است.



نمودار ۲: پلاریزاسیون پتانسیل متحرک برای نمونه‌های پوشش داده شده به روش PEO در فرکانس‌های مختلف جریان اعمالی

جدول ۳: نتایج تست پتانسیل متحرک در فرکانس‌های مختلف جریان اعمالی

فرکانس جریان	$E_{corr}(mv)$	$I_{corr} \times 10^{-7} A/Cm^2$
-	-۷۳۱,۳	۳۱,۶۲۳
۳۰۰	-۷۵۹,۹	۲,۷۲۳
۱۰۰۰۰	-۷۱۰,۶	۱,۰۷۶

علاوه بر چگالی جریان خوردگی که نشان دهنده‌ی کاهش سرعت خوردگی در پتانسیل خوردگی می‌باشد، همان‌گونه که در نمودار ۲ مشاهده می‌شود، در هر دو حالت منحنی پلاریزاسیون تقریباً به میزان سه واحد به سمت چپ کشیده شده است. یعنی چگالی جریان خوردگی در حدود ۱۰۰۰ برابر کم‌تر گشته است و این حالت حدوداً تا ۳۰۰ میلی‌ولت بالای پتانسیل مدار باز برقرار است. اما هر چه میزان پلاریزاسیون آندی افزایش می‌یابد، اختلاف در دو منحنی بیشتر به چشم می‌آید، به طوری که مشخص است در فرکانس‌های بالا، مقاومت به خوردگی لایه‌ی ایجاد شده بهتر از حالتی است که این لایه با جریان اعمالی در فرکانس پایین ایجاد شده است. به عنوان دلیل بر این ادعا، ضخامت پوشش ایجاد شده در هر دو حالت و مورفولوژی و نحوه‌ی توزیع حفرات و گستردگی ترک‌های سطحی تحت بررسی قرار گرفت که نتیجه آن نشان داد که ضخامت بیشتر پوشش در حالی که از جریان با فرکانس بالاتر استفاده شده است، می‌تواند دلیل دیگری بر بالاتر بودن مقاومت خوردگی پوشش در این حالت باشد و این لایه دارای تراکم بیشتری می‌باشد. توزیع کمتر حفرات و ترک‌ها در مقطع عرضی پوشش می‌تواند یکی دیگر از عوامل بالاتر بودن مقاومت خوردگی باشد. دلایل ذکر شده می‌توانند توجیه‌کننده‌ی تفاوت مقاومت خوردگی در هر دو حالت باشد. ولی به طور کلی وجود ساختار معیوب و ترکیبات ناخواسته در ترکیب پوشش در هر دو مورد سبب شکست منحنی پلاریزاسیون شده و مقاومت خوردگی در پتانسیل‌های بالاتر را کاهش می‌دهد.

با توجه به جداول و نمودارها، می‌توان گفت که در نمونه پوشش‌دار، دانسیته جریان خوردگی کاهش چشم‌گیری داشت و تقریباً به صورت میانگین، ۱۰^۳ برابر کاهش پیدا کرد که نشان‌دهنده تأثیر بسیار مثبت پوشش می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج بدست آمده، قابلیت‌های بالای فرآیند PEO در جهت ایجاد پوشش‌هایی با کیفیت بالا و خواص بسیار مطلوب را نشان داد که مطابق با نتایج محققان دیگر در این زمینه بود. در نهایت با توجه به آزمایش‌های انجام شده نتایج زیر حاصل شد:

- ۱- با افزایش زمان فرآیند و افزایش ضخامت پوشش و در نتیجه متراکم‌تر شدن لایه‌ی میانی، مقاومت خوردگی پوشش ایجاد شده افزایش یافت.

- ۲- در حالی که از پالس‌های با فرکانس بالاتر استفاده شد، مقاومت به خوردگی بهتری مشاهده گردید.

- ۳- با افزایش زمان غوطه‌وری، در ابتدا مقاومت خوردگی کاهش یافت، ولی با گذر زمان این مقاومت بهبود پیدا کرد.

- ۴- لایه‌ی ایجاد شده مقاوم به خوردگی می‌باشد ولی در نقاطی که عیوب وجود دارد، خوردگی حفره‌ای نسبی مشاهده می‌شود.
- ۵- تصویر نمونه‌ها در زیر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهد که با افزایش زمان پوشش‌دهی تا ۳ الی ۴ دقیقه، یکنواختی و ضخامت پوشش بیشتر می‌شود؛ اما با افزایش زمان پوشش‌دهی به بیش از ۳ الی ۴ دقیقه، با وجود افزایش ضخامت پوشش، چسبندگی پوشش به فلز پایه کمتر می‌شود.

پیشنهاد می‌شود برای ادامه کار، اثرات مقاومت به خوردگی پوشش‌های ایجاد شده به روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی بر روی دیگر آلیاژهای آلومینیوم و فلزات پرکاربرد دیگر در صنایع هوایی بررسی گردد.

۵- منابع

- Bajat R. V., Stojadinovic S. and Miškovic V. (2013). Corrosion Stability of Oxide Coatings Formed by Plasma Electrolytic Oxidation of Aluminum: Optimization of Process Time. *corrosion* 69. 693-702.
- Dong, H. (2010). *Surface Engineering of Light Alloys: Aluminum, Magnesium and Titanium Alloys*. Woodhead Publishing in materials. illustrated ed. Taylor & Francis.
- Du K., Gou X., Gou Q., Wang F. and Tian Y. (2013). A monolayer PEO coating on 2024 Al alloy by transient self-feedback control mode. *Materials Letters*. Vol. 91. 45-49.
- Dunleavy C.S., Golosnoy I.O., Curran J.A. and Clyne T.W. (2009). Characterization of discharge events during plasma electrolytic oxidation. *Surface & Coatings Technology*. Vol. 203. 3410-3419.



- Gerhardus H.K. 2000. Corrosion Control and Prevention in Aircraft. Ohio.
- Hakimizad A., K. Raeissi and F. Ashrafizadeh. (2012). A comparative study of corrosion performance of sealed anodized layers of conventionally colored and interference-colored aluminium. Surface and Coatings Technology. vol. 206. 4628-4633.
- J.R. Davis.(1999). Corrosion of Aluminum and Aluminum Alloys. ASM International. USA.
- Liang P. B., Blawert C. and Dietzel W. (2010). Influence of pH on the deterioration of plasma electrolytic oxidation coated AM50 magnesium alloy in NaCl solutions. Corrosion Science. vol 52. 540-547.
- Lu G., Gu W., Chen H., Feng W., Khosa M.L., Li L., Niu E., Zhang G. and Yang S.Z. (2006). Characteristic of ceramic coatings on aluminum by plasma electrolytic oxidation in silicate and phosphate electrolyte. Applied Surface Science. vol. 253. 2947-2952,
- M.G. Fontana and N.D. Greene. (1967). Corrosion Engineering. first edition. McGraw-Hill, New York.
- Malayoglu U., Tekin K. C., Malayoglu U. and Shrestha S. (2011). An investigation into the mechanical and tribological properties of plasma electrolytic oxidation and hard-anodized coatings on 6082 Aluminium alloy. Materials Science and Engineering. A 528. 7451-7460.
- Matykina, Arrabal R., Skeldon P. and Thompson G. E. (2009). Investigation of the growth processes of coatings formed by AC plasma electrolytic oxidation of aluminum. Electrochemical Acta. Vol. 54. 6767-6778.
- Roberge P.R. (1999). Handbook of Corrosion Engineering. first edition. McGraw-Hill, New York.
- Sabatini G., Ceschini L., Martini C., Williams J. A. and Hutchings I. M. (2010). Improving sliding and abrasive wear behavior of cast A356 and wrought AA 7075 aluminium alloys by plasma electrolytic oxidation. Materials & Design. 31816-828.
- Srekanth D., Rameshbabu N., Venkateswarlu K., Subrahmanyam C., Rama Krishna L. and Prasad Rao K. (2013). Effect of K₂TiF₆ and Na₂B₄O₇ as electrolyte additives on pore morphology and corrosion properties of plasma electrolytic oxidation coatings on ZM21 magnesium alloy. Surface and Coatings Technology. vol 222. 31-37.
- Venugopal R. P., Manwatkar S., Sreekumar R. K. and Ramakrishna G. (2012). Effect of micro arc oxidation treatment on localized corrosion behavior of AA7075 aluminum alloy in 3.5% NaCl solution Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 22. 700-710.
- Wang K. and Koo B.H. (2010). Nitrogen inducing effect on preparation of AlON-Al₂O₃ coatings on Al 6061 alloy by electrolytic plasma processing. Surface & Coatings Technology. vol. 205. S11-S14.
- Wei C.B., Tian X.B., Yang S.Q., Wang X.B., Ricky K.Y. and Paul K.C. (2007). Anode current effects in plasma electrolytic oxidation. Surface & Coatings Technology. vol. 201. 5021-5024.
- Wen L., Wang Y., Zhou Y., Ouyang J.H., Guo L. and Dechangia J. (2010). Corrosion evaluation of micro arc oxidation coatings formed on 2024 Aluminium alloy. Corrosion Science. Vol. 52. 2687-2696.
- Yucel A. (2012). The effect of Zn on the microarc oxidation coating behavior of synthetic Al-Zn binary alloys. Journal of Alloys and Compounds. 525. 159-165.
- Zalnezhad E., Sarhan A. D. and Hamdi M. (2012). Investigating the effects of hard electrolytic oxidation. Surface and Coatings Technology. vol 206. 2213-2219.