

بررسی اثر دما و غلظت الکترولیت در فرآیند الکتروپولیش بر مقاومت به خوردگی آلیاژ اینکونل

۷۱۸

حامد رحیمی، احسان صائب نوری*

مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۵/۱۲/۱۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۶/۳/۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

چکیده بهبود مقاومت به خوردگی توسط فرآیند الکتروپولیش یکی از راه‌های مهم در فرآیند اصلاح سطح می‌باشد. در این تحقیق اثر دو متغیر غلظت اسید پرکلریک و دمای حمام بر فرآیند الکتروپولیش و تاثیر آن بر مقاومت به خوردگی آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بررسی شد. جهت بررسی ریزساختار و کیفیت زبری سطح، قبل و بعد از الکتروپولیش به ترتیب از تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و آزمون زبری‌سنجی سطح استفاده شد. جهت تعیین محدوده ولتاژ و جریان الکتروپولیش منحنی‌های I-V به کار گرفته شد. نتایج نشان داد دست‌یابی به سطحی یکنواخت و عاری از حفرات تنها در شرایطی حاصل می‌شود که ترکیب الکترولیت حاوی ۲۰ درصد حجمی اسید پرکلریک و دمای حمام برابر ۱۵ °C باشد. تحت شرایط مذکور سرعت الکتروپولیش در مرزخانه‌ها و درون دانه‌ها به یکدیگر نزدیک شده و منجر به ایجاد سطحی صاف و یکنواخت می‌گردد. حداقل زبری سطح بعد از الکتروپولیش در شرایط بهینه $0.026 \mu\text{m}$ به دست آمد. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافل در محلول $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M KSCN}$ نشان داد، الکتروپولیش موجب کاهش چگالی جریان خوردگی و نجیب‌تر شدن پتانسیل خوردگی در آلیاژ شده است. نمونه الکتروپولیش شده در شرایط بهینه بیشترین مقاومت به خوردگی را از خود نشان داد. دلیل افزایش مقاومت به خوردگی در اثر الکتروپولیش به تشکیل لایه اکسیدی یکنواخت و ریزساختار عاری از حفرات در سطح نسبت داده شد.

کلمات کلیدی: الکتروپولیش، آلیاژ اینکونل ۷۱۸، اسید پرکلریک، مقاومت به خوردگی.

Evaluation of Temperature and Electrolyte Concentration in Electropolishing Process on Corrosion Resistance of Inconel 718 Alloy

Hamed Rahimi, Ehsan Saebnoori*

Advanced Materials Research Center, Department of Materials Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

Abstract Improvement of the corrosion resistance capability by the electropolishing (EP) is one of the most importance process surface modification. In this paper, the effects of two variables perchloric acid concentration and bath temperature on the electropolishing process and the corrosion resistance performance of the Inconel 718 alloy were studied. Evaluation of microstructure and surface roughness quality before and after electropolishing process by the scanning electron microscopy (SEM) and surface roughness test were used, respectively. In order to determine voltage range and current electropolishing to I-V curves were used. The results showed that, obtain to uniform surface and without pores can be achieved only under the conditions has the electrolyte composition as 10 vol% H_2O - 70 vol% CH_3COOH - 20 vol% HClO_4 and bath temperature is 15 °C. Electropolishing rate in the above conditions at the grain boundaries and inside the grains came close together and lead to a smooth and uniform surfaces. The minimum surface roughness after electropolishing on the above condition amount $0.026 \mu\text{m}$ obtained. The results of the TOEFL polarization test in a solution of $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M KSCN}$ indicated, electropolishing Inconel 718 alloy reduces the corrosion current density and become more Noble in potential (E_{corr}). Electropolished samples under optimized conditions has exhibited the highest resistance to corrosion. The reason improving in the corrosion resistance Inconel 718 alloy by electropolishing that was attributed to the formation of very uniform oxide layer on surface and microstructure free of cavities.

Keywords: Electropolishing, Inconel 718 Alloy, Perchloric Acid, Corrosion Resistance.

۱- مقدمه

چند فازی بودن آلیاژ می‌باشد. سیمکا و همکارانش [۹] مقاومت به خوردگی آلیاژ NiTi را با استفاده از فرآیند الکتروپولیش ارتقا دادند. ایشان دلیل افزایش مقاومت به خوردگی را در نتیجه تشکیل یک لایه پیوسته TiO_2 روی سطح آلیاژ NiTi بیان کردند. هان و همکارانش [۱۰] با استفاده از روش الکتروپولیش مقاومت به اکسیداسیون فولاد ۳۱۶ را ارتقا دادند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد، یک لایه اکسیدی دولایه متشکل از اکسید آهن در لایه بیرونی و اکسید کروم در لایه داخلی در اثر الکتروپولیش ایجاد می‌شود که همین لایه اکسیدی منجر به افزایش مقاومت به اکسیداسیون فولاد می‌شود. در پژوهش دیگری هان و همکارانش [۱۱] اثر الکتروپولیش را روی مقاومت به خوردگی آلیاژ پایه نیکل ۶۰۰ بررسی کردند و نشان دادند که مقاومت به خوردگی آلیاژ ۶۰۰ در اثر تشکیل یک لایه Cr_2O_3 در سطح افزایش قابل توجهی یافته است. روتی و همکاران [۱۲] به بررسی کیفیت سطح الکتروپولیش شده سه نوع متفاوت فولاد زنگ‌نزن 316L تهیه شده به روش ریخته‌گری شده؛ افزودنی‌های تولید لایه‌ای (ALM^+) و پوشش‌دهی پاشش حرارتی (TSC^+) پرداختند. نتایج تحقیق ایشان نشان داد فرآیند ساخت تاثیر بسیار زیادی بر کیفیت سطح الکتروپولیش شده فولاد زنگ‌نزن دارد به طوری که کمترین زبری سطح در نمونه ریخته‌گری شده مشاهده شد. هان و همکارانش [۱۳] نشان دادند الکتروپولیش آلیاژ ۱۸۲ منجر به کاهش خوردگی، افزایش مقاومت به SCC و خوردگی بین‌دانه‌ای می‌شود. دلیل این اتفاق به شکل‌گیری لایه اکسیدی محافظ از جنس اکسید کروم در سطح می‌باشد. بابیلاس و همکاران [۱۴] در پژوهشی آلیاژ Ti-15Mo را به دو روش آندایزینگ و الکتروپولیش اصلاح سطح کردند. نتایج یافته‌های ایشان نشان داد مقاومت به خوردگی آلیاژ در هر دو روش افزایش می‌یابد ولی تنها در روش الکتروپولیش لایه اکسیدی به صورت یکنواخت تشکیل می‌شود که جنس این لایه ترکیبی از دو اکسید TiO_2 و MoO_3 می‌باشد. این محققین با اندازه‌گیری زاویه ترشوندگی، نشان دادند که در روش الکتروپولیش زاویه ترشوندگی افزایش بیشتری می‌یابد. لیو و همکارانش [۱۵] نشان دادند الکتروپولیش پوشش نیکل آبکاری شده روی فولاد

قطعاتی که شکل‌های هندسی پیچیده دارند، همواره با مشکل عدم یکنواختی سطح روبرو می‌باشند. پولیش‌کاری مکانیکی نه تنها به افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژها کمکی نمی‌کند بلکه با تجمع هوا، ناخالصی، مواد چرب و اسیدها در سطوح ناهموار (از دید میکروسکوپی)، پوسیدگی آلیاژ را تسریع می‌نماید [۱]. هم‌چنین پولیش‌کاری مکانیکی منجر به ایجاد تنش‌های باقیمانده در سطح فلزات می‌شود که در کاهش عمر کاری آلیاژ موثر است [۲ و ۳]. الکتروپولیش راهی مناسب برای کاهش زبری سطح و درخشندگی، به دلیل یکنواختی سطح در اندازه‌های نانومتری برای شکل‌های هندسی پیچیده می‌باشد [۳]. فرآیند الکتروپولیش اولین بار توسط مدسن^۱ در سال ۱۹۲۵ انجام شد [۴]. در آن سال هدف از الکتروپولیش، بالابردن کیفیت سطح آبکاری شده بود. توسعه و تکامل فرآیند الکتروپولیش به‌طور گسترده توسط ژاکوت^۲ در سال ۱۹۳۵ روی آلیاژ مس و فلزات دیگر صورت گرفت [۵]. هدف از آن تحقیق میزان جلای سطح الکتروپولیش شده در غلظت‌های مختلف الکتروپولیش با ایجاد یک لایه اکسیدی غیرفعال مقاوم در برابر خوردگی، از خوردگی حفره‌ای و شکست هیدروژنی قطعه جلوگیری می‌کند [۶ و ۷].

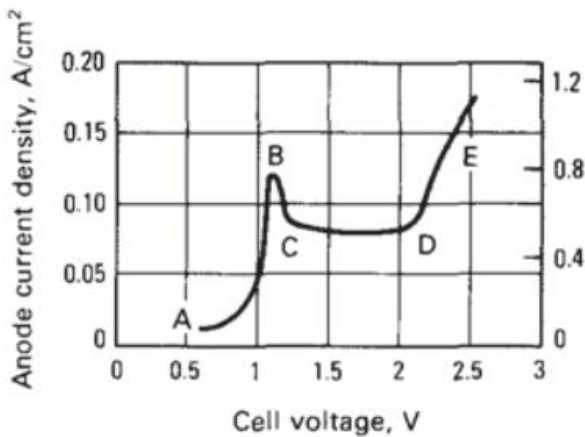
محلول‌های متداول مورد استفاده برای الکتروپولیش بیشتر روی اسیدهای مثل پرکلریک، سولفوریک، فسفریک و اسید استیک متمرکز شده است [۲-۷]. جین و همکاران پژوهشی را روی الکتروپولیش نیوبیوم انجام دادند و اثر پارامترهای مختلف الکتروپولیش را روی زبری سطح و سرعت الکتروپولیش بررسی کردند [۸]. نتایج حاصل از آن پژوهش نشان داد، الکتروپولیش خواص سطحی بسیار مطلوبی در آلیاژ ایجاد کرده و می‌تواند راه‌حل مناسبی برای رفع حفره و عیوب سطحی در ورقه نیوبیوم باشد.

پژوهش‌های انجام شده در خصوص الکتروپولیش فلزات خالص و تک‌فاز بسیار زیاد است ولی در کمتر پژوهشی به الکتروپولیش آلیاژها و ترکیبات چند فازی پرداخته شده است. یکی از مشکلاتی که در ارتباط با الکتروپولیش آلیاژها وجود دارد، سرعت جدایش مواد از سطح نمونه با توجه به

³Additive Layer Manufacturing⁴ Thermal Spray Coating¹ Madsen² Jacquet

این محدوده ثابت است. منطقه D-E: حباب‌های گاز اکسیژن به آرامی تشکیل می‌شود. این حباب‌ها باعث تخریب فیلم و ایجاد حفرات بر روی آن می‌شود. هرچه محدوده جریان پایدار بیشتر و مقدار جریان در این محدوده کمتر باشد شرایط الکترولیت برای انجام فرآیند الکتروپولیش بهتر می‌شود [۱۹]. راحمان و همکارانش [۲۰] نشان دادند که الکتروپولیش در ناحیه C-D نسبت به ناحیه D-E منجر به ایجاد سطحی با زبری حداقل و کمترین انرژی آزاد سطح می‌شود.

در این تحقیق سعی شده، با مطالعه و بررسی رفتار آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در الکترولیت‌های مختلف، شرایط بهینه‌ای برای الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ حاصل شود.



شکل ۱. منحنی I-V برای نمونه الکتروپولیش شده [۱].

۲- روش تحقیق

۲-۱ آماده‌سازی نمونه‌ها

برای الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ نمونه‌هایی از این آلیاژ در ابعاد ۱/۵×۹ سانتی‌متر و ضخامت دو میلی‌متر با استفاده از وایرکات برش داده شد. نمونه‌ها قبل از انجام فرآیند الکتروپولیش با سمباده به ترتیب ۱۰۰ و ۴۰۰ سمباده‌زنی شدند. در انتها نمونه‌ها با استون به منظور چربی‌زدایی شستشو و سپس خشک شدند.

۲-۲ الکتروپولیش نمونه‌ها

جهت تهیه محلول الکتروپولیش از اسید پرکلریک (HClO_4) و اسید استیک (CH_3COOH) با نسبت‌های مختلف، به همراه ۱۰ درصد حجمی آب دیونیزه استفاده شد. روش تهیه به این صورت می‌باشد که در بشری به حجم ۴۰۰ میلی‌لیتر مقدار مشخصی اسید پرکلریک (از ۱۰ تا ۳۰ درصد حجمی)

Q235A منجر به افزایش مدول الاستیک و سختی پوشش می‌گردد.

آلیاژ اینکونل ۷۱۸ نیز یکی از سوپراآلیاژهای پایه نیکل است که به‌طور گسترده در صنایع هوایی و هسته‌ای استفاده می‌شود. خواص مکانیکی این آلیاژ فوق‌العاده بوده و مقاومت خوبی در برابر خوردگی در دماهای بالا از خود نشان می‌دهد. خواص مکانیکی بالای این آلیاژ باعث شده تا رسیدن به سطحی صاف و درخشنده با استفاده از روش‌های مکانیکی کار دشواری باشد [۱۶]. از آنجایی که در صنایع هوایی و هسته‌ای، سطح و ویژگی‌های سطح جزء مهمترین عوامل تاثیرگذار برای کاربرد آلیاژ می‌باشد لذا دستیابی به روش مطمئن و مقرون به‌صرفه برای افزایش کیفیت سطح بسیار حائز اهمیت است.

در روش الکتروپولیش در صورت استفاده از یک الکترولیت مناسب، ناهمواری‌های سطح به بهترین شکل زدوده شده و نیکل موجود در ریزساختار به صورت رقابتی با کروم حل می‌شود. در نتیجه یک سطح کامل براق با کیفیت آینه باقی می‌ماند که غنی از کروم بوده و در مقابل خوردگی به شدت مقاوم است. اساس این فرآیند بر این اصل استوار است که سرعت پرداخت در نقاطی که بالاترین نسبت سطح را دارند، بیشتر است [۱۷]. الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در یک چگالی جریان مشخص اتفاق می‌افتد. این چگالی جریان در یک محدوده خاصی از ولتاژ می‌باشد که ولتاژ بیشتر باعث انحلال لایه پسیو و کمتر از این محدوده ولتاژ باعث عدم پرداخت مناسب می‌گردد [۱۷]. رابطه بین چگالی جریان و پتانسیل در فرآیند الکتروپولیش توسط منحنی‌های I-V بیان می‌شود. در شکل (۱) رفتار منحنی نشان داده شده را می‌توان به چهار ناحیه طبقه‌بندی کرد. منطقه A-B: در این محدوده جریان به‌صورت خطی با ولتاژ افزایش می‌یابد و عمل اچ بر روی سطح آلیاژ اتفاق می‌افتد. در این محدوده مرزدهانه‌ها و مناطق بین‌فازی خورده می‌شود. رفتار جریان در این منطقه بیشتر به ماهیت الکترولیت برمی‌گردد [۱۸]. منطقه B-C: این محدوده به منطقه ناپایدار جریان معروف است، بسته به ماهیت الکترولیت متفاوت می‌باشد. هرچه مقدار این ناحیه کمتر باشد یک ویژگی خوب برای الکترولیت محسوب می‌شود [۱۸]. منطقه C-D: محدوده الکتروپولیش می‌باشد. جریان در

فرآیند الکتروپولیش نمونه‌ها با آب یونیزه شستشو و در دمای ۱۰ درجه سانتی‌گراد خشک شدند.

۲-۳ مشخصه‌یابی

برای بررسی سطح نمونه‌های الکتروپولیش شده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل LEO-VP435 با ولتاژ ۱۰ kV استفاده شد. به منظور اندازه‌گیری زبری سطح بعد از فرآیند الکتروپولیش از زبری سنج مدل الکومتر-۷۰۶۱ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شد.

جهت بررسی نمودار I-V و تاثیر فرآیند الکتروپولیش بر مقاومت به خوردگی آلیاژ از آزمون پلاریزاسیون Tafel استفاده شد. آزمون‌های الکتروشیمیایی بر اساس سیستم سه الکترودی صورت گرفت و اندازه‌گیری با دستگاه پتانسیواستات مدل Parstat 2273 A انجام شد. الکتروود مرجع از نوع کالومل اشباع (SCE)، کاتد از جنس پلاتین و الکتروود کاری آلیاژ الکتروپولیش شده با سطح در معرض یک سانتی‌متر مربع انتخاب شد.

محل مورد استفاده برای انجام آزمون پلاریزاسیون Tafel مطابق پژوهش‌های گذشته جهت بررسی خواص خوردگی آلیاژی‌های حاوی نیکل و کروم به صورت $0.5M H_2SO_4 + 0.01M KSCN$ [۲] انتخاب شد. محدوده پتانسیل انتخابی ۲۵۰- تا ۵۰۰ میلی‌ولت نسبت به کالومل اشباع و نرخ روبش $1 mV/s$ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. زمان غوطه‌وری نمونه برای رسیدن به حالت تعادل توسط آزمایش E vs T مشخص و برابر ۳۰ دقیقه انتخاب شد. از نرم‌افزار corr view جهت استخراج پارامترهای الکتروشیمیایی استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱ اثر غلظت اسید پرکلریک و دما بر الکتروپولیش آلیاژ

اینکونل ۷۱۸

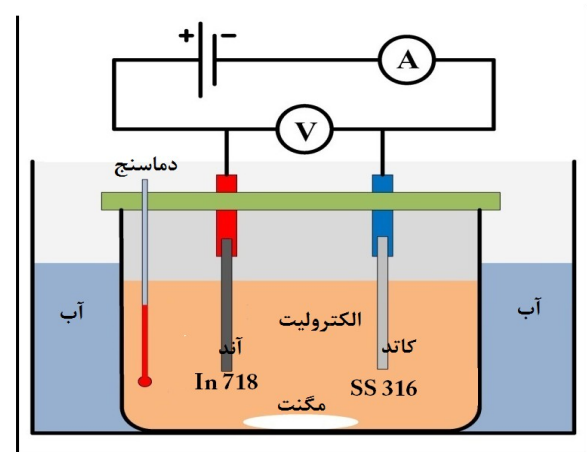
شکل (۳) رفتار منحنی I-V برای نمونه‌های آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در الکتروولت اسیدپرکلریک/اسید استیک/آب در غلظت‌های مختلف اسید پرکلریک (مطابق جدول ۱) نشان

ریخته می‌شود در ادامه اسید استیک به همراه آب دیونیزه به محلول اضافه می‌گردد. محلول بالا توسط یک هم‌زن مغناطیسی با سرعت ۵۰۰ rpm به مدت ۱۲ ساعت هم‌زده می‌شود. خلاصه شرایط آماده‌سازی الکتروولت‌ها در جدول ۱ آمده است. هم‌چنین به منظور بررسی اثر دما، محلول‌های S5، S4 و S6 مطابق جدول (۱) ساخته شد.

جدول ۱. شرایط الکتروولت‌ها برای انجام الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸.

کد الکتروولت	اسید پرکلریک (vol.%)	اسید استیک (vol.%)	دما (°C)
S1	۱۰	۸۰	۲۵
S2	۲۰	۷۰	۲۵
S3	۳۰	۶۰	۲۵
S4	۲۰	۷۰	۳۵
S5	۲۰	۷۰	۱۵
S6	۲۰	۷۰	۰

شکل (۲) شماتیکی از تصویر سلول الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد. کاتد از جنس فولاد زنگ‌نزن 316L [۹] می‌باشد. جنس بدنه سلول از پیرکس و جنس درپوش پلیمری است. هم‌چنین به منظور اعمال جریان و تنظیم ولتاژ از رکتیفایر مدل PSIP 3032 استفاده شد.



شکل ۲. شماتیکی از سلول الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸.

زمان الکتروپولیش برای تمامی نمونه‌ها پنج دقیقه، سرعت چرخش الکتروولت در سلول برابر ۱۵۰ rpm و فاصله بین آند و کاتد ۱۵ سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. مقدار جریان و پتانسیل اعمالی به سلول الکتروپولیش پس از استخراج داده‌ها از نمودار I-V مطابق جدول (۲) اعمال شد. پس از

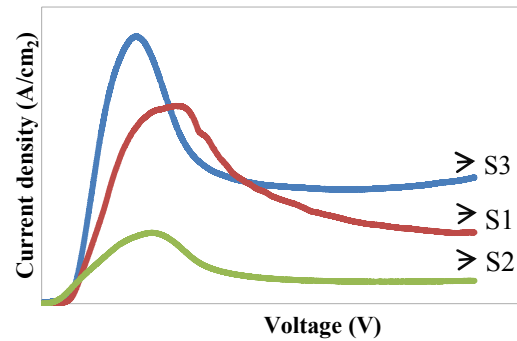
الکترولیت، جهت الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ را نشان می‌دهد.

می‌دهد. الکترولیت‌های S1 تا S3 به ترتیب حاوی ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد حجمی از اسید پرکلریک می‌باشد.

جدول ۲. مقدار چگالی جریان و ولتاژ جهت الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در الکترولیت‌هایی با غلظت‌های مختلف اسید پرکلریک.

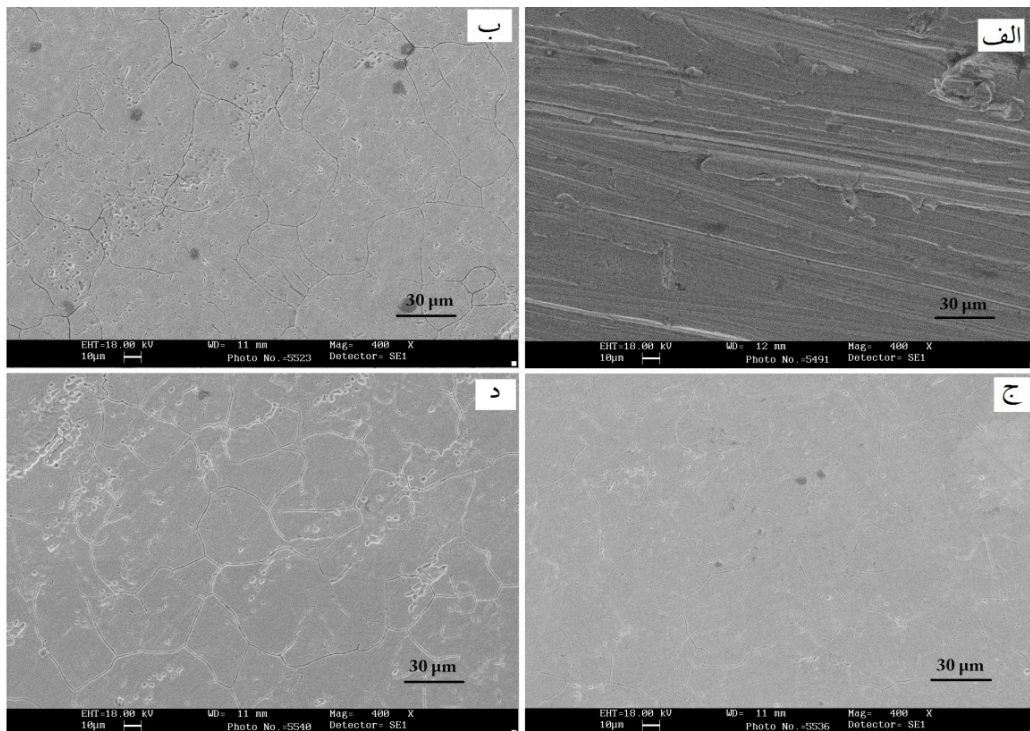
کد الکترولیت	ولتاژ الکتروپولیش (V)	جریان الکتروپولیش (A/cm^2)
S1	۹,۷۴۱	۰,۱۰۸
S2	۶,۱۷۳	۰,۰۳۵
S3	۶,۸۹۵	۰,۱۷۳

شکل (۴) تصاویر تهیه شده توسط SEM از سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸ قبل و بعد از الکتروپولیش در الکترولیت‌های S1 تا S3 را نشان می‌دهد. با توجه به شکل الکتروپولیش به میزان قابل توجهی باعث یکنواختی سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸ شده است. شیارهای ناشی از مرحله آماده سباده‌زنی به میزان قابل توجهی در نمونه‌های الکتروپولیش شده کاهش یافته است. با دقت در تصاویر شکل (۴-ب) و (۴-د) مشخص می‌شود که انجام فرایند الکتروپولیش منجر به ایجاد حفرات در درون دانه‌ها به خصوص نواحی نزدیک مرز دانه‌ها شده است.

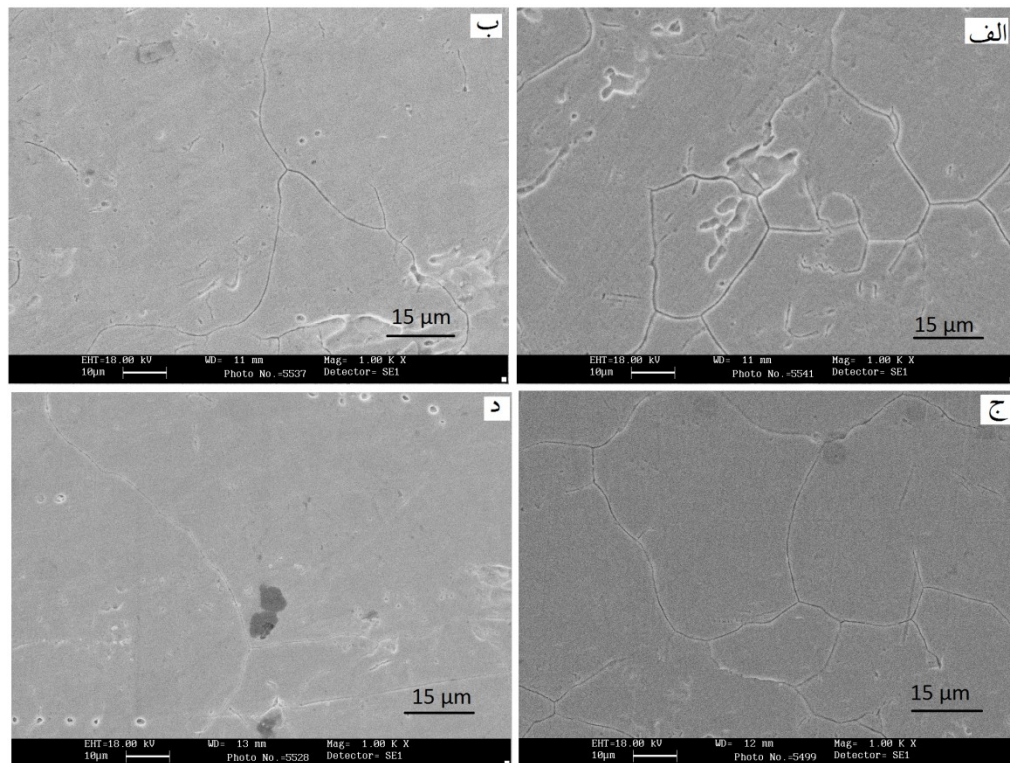


شکل ۳. اثر غلظت اسید پرکلریک بر منحنی I-V نمونه‌های آلیاژ اینکونل ۷۱۸ (سرعت اسکن ۳۰ میلی‌ولت بر ثانیه و دمای آزمایش ۲۵ درجه سانتی‌گراد).

با توجه به شکل (۳) در محلول حاوی ۲۰ درصد حجمی اسید پرکلریک (محلول S2) منحنی I-V رفتار بهینه‌تری برای الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸ از خود نشان می‌دهد. طول منطقه B-C (منطقه ناپایدار) در این الکترولیت کمتر و طول منطقه C-D (منطقه الکتروپولیش) بیشتر از دو الکترولیت دیگر می‌باشد. جدول (۲) چگالی جریان و ولتاژ انتخاب شده در محدوده پایدار منحنی I-V برای هر



شکل ۴. تصاویر SEM از سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸: الف) قبل از الکتروپولیش، ب) الکتروپولیش شده در محلول S1، ج) الکتروپولیش شده در محلول S2 و د) الکتروپولیش شده در محلول S3.



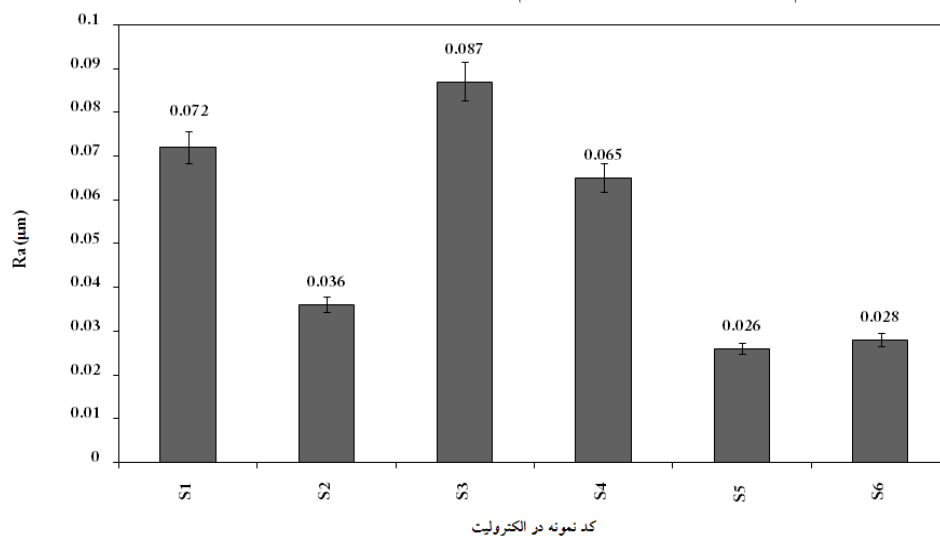
شکل ۵. تصاویر SEM از سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بعد از الکتروپولیش با الکترولیت S3 در دماهای مختلف حمام: الف) ۳۵ °C، ب) ۲۵ °C، ج) ۱۵ °C و د) ۰ °C.

شکل (۵) تصویر SEM از آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بعد از الکتروپولیش در الکترولیت S2 در سه دمای ۰، ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل با کاهش دما از ضخامت مرزخانه‌ها کاسته شده و در نمونه الکتروپولیش شده در دمای صفر درجه سانتی‌گراد (شکل ۵-د) مرزخانه‌ها تا حدود زیادی ناپدید شده‌اند. مورالی و همکارانش [۱۹] نشان دادند با کاهش دمای الکتروپولیش طول منطقه پایدار (ناحیه C-D) در منحنی I-V افزایش می‌یابد، ولی این مقدار کاهش دما باید در حد بهینه در نظر گرفته شود. کاهش شدید دما، منجر به افت جریان و پرداخت ضعیف فرآیند الکتروپولیش می‌شود. با دقت در شکل ۵ مشخص می‌شود که با کاهش دما از ۳۵ به ۱۵ درجه سانتی‌گراد میزان حفرات تشکیل شده در درون دانه‌ها کاهش یافته است. از طرفی با کاهش مجدد دمای الکتروپولیش از ۱۵ به صفر درجه سانتی‌گراد تعداد حفرات افزایش یافته است. به عبارت دیگر در دمای صفر درجه سانتی‌گراد سرعت فرآیند الکتروپولیش در بعضی نواحی به صورت ترجیحی افزایش یافته و منجر به شکل‌گیری حفرات در سطح شده است. پژوهش‌های گذشته در زمینه الکتروپولیش فلزات نشان می‌دهد که جنس لایه تشکیل شده در سطح فلز، اکسیدی و هیدرواکسیدی می‌باشد [۹، ۱۱ و ۲۱]. این لایه در

یکی از دلایل ایجاد این حفرات غلظت بالای عناصر آلیاژی در این نواحی می‌باشد [۹]. مرزخانه‌ها به دلیل سرعت خوردگی بیشتر نسبت به درون دانه‌ها به‌طور مشخصی در تصاویر (ب) و (د) در شکل (۴) مشخص می‌باشد. در خصوص تصویر (۴-ج) که مربوط به نمونه الکتروپولیش شده در محلول S2 می‌باشد، شرایط به‌گونه‌ای دیگر است. ضخامت مرزخانه‌ها در این نمونه نسبت به دو نمونه دیگر از مقدار کمتری برخوردار است که نشان‌دهنده نزدیک بودن سرعت الکتروپولیش در درون دانه و مرزخانه می‌باشد. با توجه به منحنی I-V، کمترین میزان چگالی جریان در الکترولیت S2 مشاهده شد. جریان کمتر در محدوده پایدار منحنی I-V نشان دهنده سرعت یکنواخت فرآیند الکتروپولیش در مناطق مختلف ریزساختار می‌باشد [۱۹ و ۲۰]. همچنین میزان حفرات به وجود آمده در سطح نمونه الکتروپولیش شده در محلول S2 کمتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد. با توجه به بررسی‌های انجام شده مقدار بهینه اسید پرکلریک در الکترولیت به جهت داشتن سرعت برابر الکتروپولیش در نقاط مختلف ریزساختار، برابر ۲۰ درصد حجمی به‌دست آمد.

جهت دستیابی به ریزساختاری یکنواخت و عاری از حفرات ۱۵ درجه سانتی‌گراد انتخاب شد.

شکل (۶) نشان‌دهنده نتایج آزمون زبری‌سنجی سطح آلیاژ اینکونل ۷۱۸ بعد از الکتروپولیش در شرایط مختلف می‌باشد. با توجه به شکل (۶) در نمونه الکتروپولیش شده با الکترولیت با کد S5 حداقل زبری سطح و برابر ۰/۰۲۶ میکرومتر حاصل شده است که امری دور از انتظار نیست. با توجه به تصاویر شکل (۵)، ریزساختار عاری از حفرات با مرزانه‌هایی با ضخامت کم تنها در نمونه الکتروپولیش شده در الکترولیت با کد S5 مشاهده می‌شود.



شکل ۶. نتایج حاصل از آزمون زبری‌سنجی برای نمونه‌های آلیاژ اینکونل ۷۱۸، الکتروپولیش شده در الکترولیت‌های S1 تا S6.

جدول ۳. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون تافل از نمونه‌های الکتروپولیش شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸.

کد نمونه ها در الکترولیت	E_{corr} v.s SCE (mV)	I_{corr} (μ A/cm ²)	ba (mV/dec)	bc (mv/dec)	C.R (mpy)
قبل از الکتروپولیش	-۱۲۵۸	۳۴۵	۱۳۳	۳۲۵	۱۵۲/۱۳
S1	-۱۱۳۶	۱۱۷	۶۱	۲۷۱	۴۹/۰۵
S2	-۱۱۲۵	۶۸/۳	۵۴	۲۵۶	۲۹/۲۸
S3	-۱۱۰۲	۱۳۲	۴۱	۳۹۸	۱۴۴۸
S4	-۱۱۱۶	۱۶۸	۶۳	۳۳۷	۵۶/۹۲
S5	-۹۴۸	۸/۶	۵۲	۹۳۷	۳/۶۹
S6	-۱۱۰۶	۶۷/۶	۵۲	۳۳۷	۲۸/۹۷

قبل از الکتروپولیش کاهش یافته است. این مساله نشان‌دهنده افزایش مقاومت به خوردگی نمونه بعد از الکتروپولیش نسبت به نمونه قبل از الکتروپولیش می‌باشد. هم‌چنین پتانسیل خوردگی نیز در این نمونه‌ها بعد از الکتروپولیش به سمت مقادیر نجیب‌تر میل کرده است. با توجه به منحنی‌های

حین فرآیند الکتروپولیش شکل می‌گیرد و تمام سطح آلیاژ را می‌پوشاند. ضخامت لایه اکسیدی به قابلیت تشکیل اکسید، هیدرواکسید و هم‌چنین به عدم انحلال در الکترولیت وابسته می‌باشد [۱۹] که تمامی این موارد وابسته به دمای فرآیند الکتروپولیش می‌باشد. لایه چسبناک باعث کنترل جریان و نقل انتقال یون‌های فلزی از نمونه در حین الکتروپولیش می‌شود. با کاهش ضخامت لایه اکسیدی جریان افزایش پیدا می‌کند و انتقال جرم سریع‌تر صورت می‌گیرد. به عبارتی عامل کنترل کننده سرعت الکتروپولیش لایه چسبناک اکسیدی می‌باشد [۲۲]. با توجه به بررسی‌های انجام شده مقدار بهینه دمای حمام

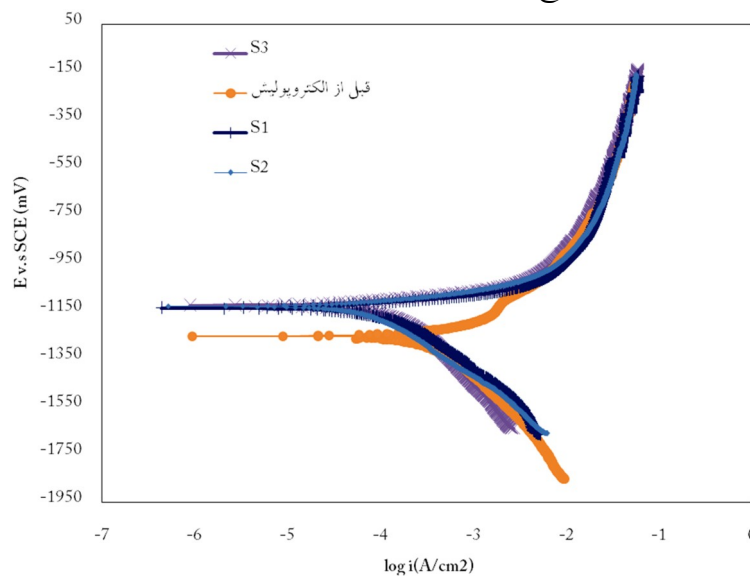
۲-۳ اثر الکتروپولیش بر مقاومت به خوردگی

منحنی پلاریزاسیون تافل برای نمونه‌های الکتروپولیش شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در شکل ۷ و ۸ نشان داده شده است. با مقایسه نمودارهای پلاریزاسیون نمونه‌ها، مشاهده می‌شود که چگالی جریان خوردگی نمونه‌های الکتروپولیش شده نسبت به

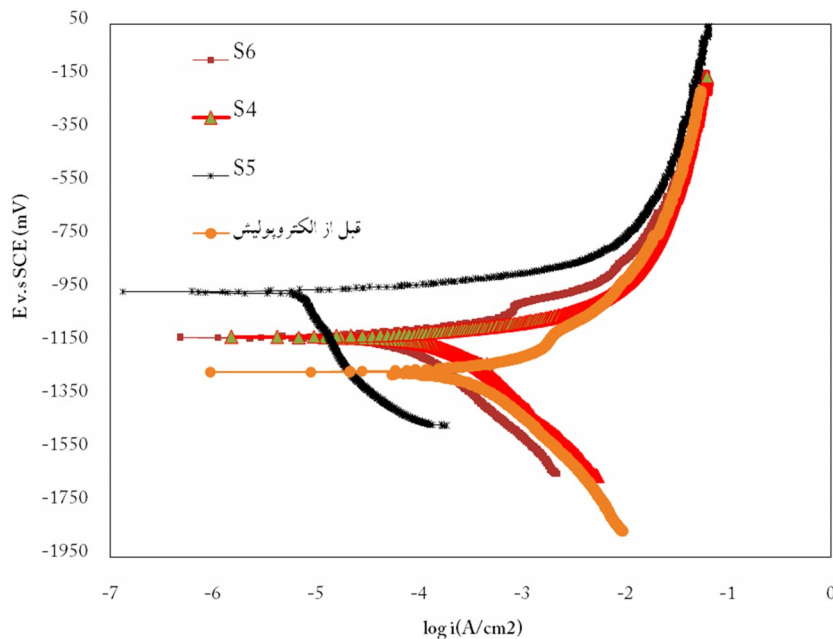
حفرات در ریزساختار و به طبع آن تشکیل لایه اکسیدی یکنواخت در ریزساختار آلیاژ، پتانسیل خوردگی به سمت مقادیر نجیب افزایش یافته است (اکسید کروم پایداری شیمیایی بالایی دارد). همچنین چگالی جریان خوردگی کاهش و به کمترین مقدار خود در نمونه الکتروپولیش شده با الکترولیت با کد S5 و برابر $8.6 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ می‌رسد. سرعت خوردگی در این نمونه عدد 3.69 mpy محاسبه شد که نسبت به سایر نمونه‌ها کمتر می‌باشد.

پلاریزاسیون در شکل ۱۰، شدت جریان آندی در کلیه نمونه‌ها به طور تقریبی ثابت ولی شدت جریان کاتدی متفاوت می‌باشد. بنابراین کنترل‌کننده خوردگی نمونه‌ها، واکنش کاتدی است.

جدول (۳) نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون Tafel نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در خصوص نمونه‌های الکتروپولیش شده، نجیب‌ترین پتانسیل مربوط به نمونه الکتروپولیش شده در الکترولیت با کد S5 و برابر -948 میلی‌ولت می‌باشد. با توجه به شکل (۶) و جدول (۳) با کاهش زبری سطح و کاهش



شکل ۷. منحنی پلاریزاسیون Tafel نمونه‌های الکتروپولیش شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با کد S1 تا S3 در محلول $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M KSCN}$ در دمای 25°C .



شکل ۸. منحنی پلاریزاسیون Tafel نمونه‌های الکتروپولیش شده آلیاژ اینکونل ۷۱۸ با کد S4 تا S6 در محلول $0.5\text{M H}_2\text{SO}_4 + 0.01\text{M KSCN}$ در دمای 25°C .

الکترولیت اسید پرکلریک/اسید استیک/آب در شرایط مختلف الکتروپولیش شد و نتایج زیر به دست آمد:

۴ - نتیجه گیری

در این تحقیق نمونه‌هایی از آلیاژ اینکونل ۷۱۸ در

- Cairo University International Conference on Mechanical Design and Production (MDP-9), Cairo, Egypt, (2008) 992-1004.
11. Simka, W., and Kaczmarek, M., Electropolishing and passivation of NiTi shape memory alloy, *Electrochimica Acta*, 55 (2010) 2437-2441.
 12. Han, G., and Lu, Z., Improving the oxidation resistance of 316L stainless steel in simulated pressurized water reactor primary water by electropolishing treatment, *Journal of Nuclear Materials*, 467 (2015) 194-204.
 13. Han, Y., Mei, J., and Peng, Q., Effect of electropolishing on corrosion of Alloy 600 in high temperature water, *Corrosion Science*, 98 (2015) 72-80.
 14. Rotty, C., Doche, M.L., Mandroyan, A., Hihn, J.Y., Montavon, G., Moutarlier, V., Comparison of electropolishing behaviours of TSC, ALM and cast 316L stainless steel in H_3PO_4/H_2SO_4 , *Surfaces and Interfaces*, 6 (2017) 170-176.
 15. Han, Y., Han, E.H., Peng, Q., Ke, W., Effects of electropolishing on corrosion and stress corrosion cracking of Alloy 182 in high temperature water, *Corrosion Science*, 121 (2017) 1-10.
 16. Babilas, D., Urbanczyk, E., Sowa, M., Maciej, A., Korotin, D.M., Zhidkov, I.S., Basiagad, M., Borkowicz, M.K., Warszynska, L.S., Pamul, E., On the electropolishing and anodic oxidation of Ti-15Mo alloy, *Electrochimica Acta*, 205 (2016) 256-265.
 17. Liu, M., Meng, Y., Zhao, Y., Li, F., Gong, Y., Feng, L., Electropolishing parameters optimization for enhanced performance of nickel coating electroplated on mild steel, *Surface and Coatings Technology*, 286 (2016) 285-292.
 18. Paulonis, D.F., and Schirra, J., Alloy 718 at pratt and whitney historical perspective and future challenges, *The Minerals. Metals and Materials Society*, (2001) 13-23.
 19. Lee, S.J., Lee, Y., and Du, M., The polishing mechanism of electrochemical mechanical polishing technology, *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003) 280-286.
 20. Pelleg, J., Electropolishing Pure Vanadium, *Nuclear Research*, (1970) 457-460.
 21. Mural, S., Ramachandra, M., Murthy, K.S.S., and Ramant, K.S., Electropolishing of Al-7Si-0.3Mg Cast Alloy by Using perchloric and Nitric Acid Electrolytes, *Materials characterization*, 38 (1997) 273-286.
 22. Rahman, Z.U., Deen, K.M., Cano, L., Haider, W., The effects of parametric changes in electropolishing process on surface properties of 316L stainless steel, *Applied Surface Science*, 410 (2017) 432-444.
 23. Nazneena, F., Galvina, P., Arriganb, W.M., Thompsonc, M., Benvenutoc, P., and Herzoga, G., Electropolishing of medical-grade stainless steel in preparation for surface nano-texturing, *Journal of Solid State Electrochemistry*, 16 (2012) 1389-1397.
 24. Aihara, H., Surface and biocompatibility study of electropolished Co-Cr Alloy L605, Master's Theses and Graduate Research, San Jose State University, (2009) 36-99.
- ۱- از منحنی I-V بیشترین منطقه پایدار جریان جهت الکتروپولیش، در الکتروولیت حاوی ۲۰ درصد حجمی اسید پرکلریک به دست آمد.
- ۲- تصاویر حاصل از SEM نشان داد، فرآیند الکتروپولیش باعث بهبود کیفیت سطح و حذف آثار ناشی از عملیات سمباده‌زنی شده است.
- ۳- با توجه به تصاویر SEM دمای بهینه حمام جهت الکتروپولیش آلیاژ اینکونل ۷۱۸، ۱۵ درجه سانتی‌گراد به دست آمد.
- ۴- کمترین مقدار زبری سطح بعد از الکتروپولیش عدد ۰/۰۲۶ میکرومتر حاصل شد که مربوط به نمونه الکتروپولیش شده در شرایط بهینه غلظت و دما می‌باشد.
- ۵- منحنی پلاریزاسیون نمونه‌ها در حالت قبل و بعد از الکتروپولیش نشان داد، مقاومت به خوردگی در اثر فرآیند الکتروپولیش افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است.
- ### مراجع
1. Jacquet, P.A., Electrolytic Polishing of Metallic Surfaces, *Metal Finishing*, 47 (1949) 48-54.
 2. Lee, S.J., and Lai, J.J., The effects of electropolishing (EP) process parameters on corrosion resistance of 316L stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 140 (2003) 206-210.
 3. Taylor, E.J., Crabb, H.M., Garich, H., Hall, T., and Inman, M., A pulse/pulse reverse electrolytic approach to electropolishing and through-mask electroetching, *Faraday Technology*, 76 (2012) 768-780.
 4. Berns, H., Gavriljuk, V., and Riedner, S., Structure, *Engineering Materials*, (2013) 21-83.
 5. Saito, K., Development of electropolishing technology for superconducting cavities, Proceedings of the IEEE Particle Accelerator Conference, Portland, United States, (2003) 462-466.
 6. Sutow, E.J., The influence of electropolishing on the corrosion resistance of 316L stainless steel, *Journal of Biomedical Materials Research*, 14 (1980) 587-595.
 7. Momeni, M., Esfandiari, M., and Moayed, M.H., Improving pitting corrosion of 304 stainless steel by electropolishing technique, *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, 9 (2012) 34-42.
 8. Jin, S., Lu, X., Lin, L., and Zhao, K., Study of buffered electropolishing on niobium sheet, *Proceedings of SRF*, (2009) 859-863.
 9. Eozenou, F., Berry, S., Gasser, Y., and Charrier, J.P., More information concerning electro-polishing mechanisms in hydrofluoric-sulphuric acid mixtures, 14th International Conference on RF Superconductivity, Berlin, Dresden, (2009).
 10. Tash, M., Khalifa, W., and Hashash, A., Effect of metallurgical differences between 356 and 384 alloys on their mechanical properties, Proceedings of The 9th