

بررسی تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار، سختی و رفتار خوردگی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار

فاطمه ایرانمنش^۱، مریم احتشام زاده*^۱، سهیل سروشیان^۱

^۱بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید باهنر کرمان

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۱/۰۹/۰۸، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۲/۰۳/۱۸، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۲/۰۳/۲۵

چکیده در این تحقیق تأثیر عملیات حرارتی مختلف شامل تمپر، پیرسازی و نرماله بر خواص آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار که یکی آلیاژهای مهم غیر آهنی پایه مس می باشد مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر زمان پیرسازی بر خواص مکانیکی و رفتار خوردگی آلیاژ ارزیابی شد. ترکیب فازی، ساختار و سختی نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از آنالیز پراش اشعه ایکس، میکروسوپ نوری و الکترونی و آزمون ریزسختی سنجی تعیین شد. مقاومت به خوردگی نمونه‌ها با انجام آزمون-های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک و طیف نگاری امپدانس الکتروشیمیایی در محلول ۳/۵٪ NaCl مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که عملیات حرارتی تمپر سبب حذف فاز مارتنزیتی ناپایدار β' از ساختار شده و در نتیجه رفتار خوردگی را بهبود می دهد. عملیات پیرسازی در دمای 400°C به مدت ۲ ساعت به واسطه رسوب گذاری بهتر فاز سخت κ بالاترین سختی را برای آلیاژ ایجاد نموداما به دلیل تعدد فازهاو تشکیل پیل های گالوانیک موضعی در ساختار آلیاژ، افزایش ناچیزی در دانسیته جریان خوردگی به وجود آورد. با این حال، عملیات حرارتی پیرسازی عملیات حرارتی کاربردی مناسبی برای آلیاژ است تا با ایجاد بیشترین مقدار سختی، مقاومت به خوردگی نیز افت چندانی پیدا نکند. چنین آلیاژی به دلیل بالا بودن سختی دارای مقاومت خوبی در برابر خوردگی سایشی می باشد.

کلمات کلیدی: برنز آلومینیوم نیکل دار، مقاومت به خوردگی، ریزساختار، پیرسازی.

Investigating the Effect of Heat Treatment on Microstructure, Hardness and Corrosion Behavior of Nickel-Aluminum Bronze

Fatemeh Iranmanesh¹, Maryam Ehteshamzadeh¹, Soheil Soroushian¹

¹Department of Materials Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract The influence of aging, tempering and normalizing heat treatments on the properties of nickel-aluminum bronze as an important copper base nonferrous alloy was studied and the effect of time during aging treatment was investigated. Phase composition, microstructure and hardness of the alloy were determined using X-ray diffraction analysis, optical and scanning electron microscopy and micro hardness measurements, respectively. Corrosion resistance of samples was evaluated by performing potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) techniques, which were carried out in 3.5% NaCl. The results showed that tempering heat treatment removed the unstable martensitic β' phase and improved corrosion performance of the alloy. Aging treatment for 2 hours caused formation of more amount of hard κ phase and resulted in the highest hardness. It seems that formation of different phases and establishing of more localized galvanic cells caused a little increasing of corrosion current density. However, increasing of hardness and negligible drop of corrosion resistance during aging heat treatment introduced it as an appropriate practical heat treatment for providing high resistance against erosion.

Keywords: Nickel-aluminum bronze, Heat treatment, Corrosion Resistance, Microstructure, Aging.

*عهده دار مکاتبات

نشانی: کرمان، بلوار جمهوری اسلامی، دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان، بخش مهندسی مواد.

تلفن: -، دورنگار: -، پیام نگار: ehtesham@uk.ac.ir

۱- مقدمه

عنوان مثال، نیکل مقاومت به خوردگی و آهن استحکام تسلیم برنز آلومینیوم نیکل دارا افزایش می‌دهد و نیکل و منگنز به عنوان تثبیت کننده ریزساختار عمل می‌کنند. مقاومت به خوردگی عالی این آلیاژ در آب دریا به دلیل تشکیل یک فیلم محافظ از محصولات خوردگی بر سطح آن می‌باشد. این لایه شامل اکسید آلومینیوم در فصل مشترک فلز/لایه و اکسید مس در فصل مشترک لایه/الکترولیت می‌باشد و به واسطه ی مقاومت لایه اکسیدی در مقابل عبور یون‌ها و الکترون‌ها، موجب کاهش نرخ خوردگی زیرلایه (آلیاژ) می‌شود. بررسی‌ها نشان داده است که حضور فازهای β و β' در زمینه ی فاز α موجب تشکیل پیل‌های موضعی می‌شود و فازهای β و β' با ایفا کردن نقش آند موجب کاهش مقاومت به خوردگی آلیاژ می‌شوند. حال آنکه در صورت تبدیل این فازها به فاز K ، مقاومت به خوردگی آلیاژ بهبود می‌یابد. شایان ذکر است عملیات حرارتی آنیل و نرماله سبب تبدیل هر چه بیشتر فاز β و β' به فازهای α و K و افزایش مقاومت به خوردگی آلیاژ می‌شود [۱۳-۶].

هدف از انجام این تحقیق مطالعه ی ریزساختار و تأثیر عملیات حرارتی مختلف بر رفتار مکانیکی و خوردگی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دارا با ترکیب شیمیایی خاص ریخته‌گری شده در شرکت صنایع مس شهید باهنر کرمان می‌باشد تا بتوان مناسب ترین عملیات حرارتی کاربردی را برای این آلیاژ به گونه ای که بدون ایجاد افت قابل ملاحظه در مقاومت به خوردگی موجب تقویت خواص مکانیکی آن شود انتخاب و پیشنهاد نمود.

۲- مواد و روش تحقیق

نمونه‌هایی با ابعاد $10 \times 10 \times 1$ سانتی‌متر از جنس برنز آلومینیوم نیکل دارا از ورق تولید شده در شرکت صنایع مس شهید باهنر کرمان بریده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ که به روش آنالیز کوانتومتری تعیین شده در جدول (۱) آورده شده است. جهت یکنواخت سازی، ابتدا تمامی نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای 900°C حرارت دیدند و سپس در آب 20°C کوئنچ شدند. با استفاده از نمونه‌های کوئنچ شده، عملیات حرارتی مختلف به شرح زیر انتخاب و اعمال شد:

برنز آلومینیوم یکی از مهمترین آلیاژهای پایه مس می‌باشد که علاوه بر آلومینیوم (حد اکثر ۱۴٪) به عنوان عنصر آلیاژی اصلی، حاوی عناصر آلیاژی دیگری مانند آهن، نیکل، منگنز و سیلیسیم نیز می‌باشد. شهرت این آلیاژ به واسطه ی استحکام بالا، مقاومت به خوردگی عالی و همچنین مقاومت به سایش و خسارت حبابی در محیط دریا می‌باشد و به همین دلیل به طور وسیعی برای کاربردهای مهندسی دریایی مانند ساخت زیردریایی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵-۱].

برنز آلومینیوم ساده که فقط حاوی مس و آلومینیوم با درصد آلومینیوم کمتر از ۸ می‌باشد دارای ساختار تک فاز α (محلول جامد غنی از مس با ساختار FCC) می‌باشد. با تجاوز درصد آلومینیوم از ۸٪، فاز دوم β (با ساختار BCC) شکل می‌گیرد. نسبت فازهای α و β در ساختار علاوه بر میزان آلومینیوم به شدت تحت تأثیر سرعت سرد شدن می‌باشد. علاوه بر آن، افزودن عناصر آلیاژی مانند آهن و نیکل به آلیاژ سبب می‌شود که ترکیب آن‌ها با آلومینیوم موجب تشکیل رسوبات بین فلزی K شود. در نتیجه با کاهش دما، فاز α و رسوبات بین فلزی K که حاصل استحاله ییوتکتوئید فاز β می‌باشند تشکیل می‌شوند. رسوبات K را می‌توان به دودسته غنی از آهن و غنی از نیکل تقسیم کرد که البته مورفولوژی آن‌ها به شدت متأثر از ترکیب شیمیایی آلیاژ است و به صورت زیر دسته‌بندی می‌شوند:

● فاز K_I که کرومی یا گُل شکل و غنی از آهن است و در مرکز فاز α شکل می‌گیرد و به دلیل تشکیل شدن در دمای بالا درشت می‌باشد.

● فاز K_{II} که کرومی شکل و غنی از آهن می‌باشد و در داخل فاز β و گاهی در فصل مشترک α/β جوانه زده و رشد می‌کند.

● فاز K_{III} که لایه‌ای شکل و غنی از نیکل است و در مرزها و بین دانه‌های α شکل می‌گیرد.

● فاز K_{IV} که رسوبات بسیار ریز غنی از آهن می‌باشد و در داخل دانه‌های α رسوب می‌کند.

بدیهی است مقاومت به خوردگی و خواص مکانیکی این آلیاژ تابع نوع فازها و ریزساختار آن که متأثر از عناصر آلیاژی و عملیات حرارتی انجام شده بر روی آن است می‌باشد. به

نگاری امپدانس الکتروشیمیایی نیز در محدوده فرکانس ۱۰۰ KHz تا ۱۰۰ mHz انجام شد.

جدول ۱. ترکیب شیمیایی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار ریخته‌گری شده در شرکت صنایع مس شهید باهنر کرمان

%Cu	%Al	%Ni	%Fe	%Si	%Mn	%Zn
۸۳/۸۳	۹/۱	۴/۲	۲/۸	۰/۰۳	۰/۰۲	>۰/۰۱

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تأثیر عملیات حرارتی بر ریزساختار و سختی آلیاژ

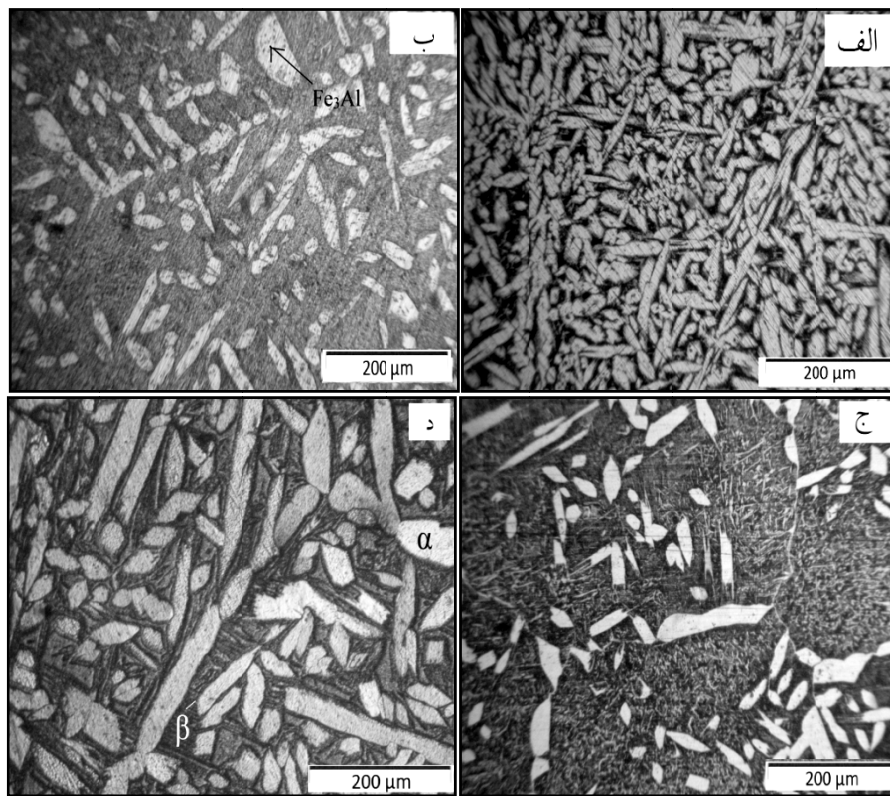
شکل (۱) تصاویر میکروسکوپ نوری برنز آلومینیوم نیکل دار را قبل و بعد از عملیات حرارتی مختلف نشان می‌دهد. ساختار این آلیاژ زیر نقطه ذوب (1030°C) و تا حوالی دمای 1000°C فاز β می‌باشد و در ادامه با کاهش دما، فاز α **Error! Bookmark not defined.** در مرز دانه‌های β جوانه‌زنی کرده و رشد می‌کند. در شکل (۱-الف) که متعلق به نمونه ریخته‌گری شده می‌باشد می‌توان دانه‌های سوزنی شکل α اولیه (ناحیه روشن) و فاز سیاه رنگ $\beta(\text{Cu}_3\text{Al})$ را مشاهده کرد. با توجه به غیرتعادلی بودن شرایط سرد شدن، امکان تبدیل تمام فاز β به محصولات اوتکتوئید (α و β) فراهم نشده است و مقادیری فاز β در ساختار باقی می‌ماند. از آنجا که این فاز در دمای کمتر از 800°C پایدار نیست به صورت β' نشان داده می‌شود که دارای ساختار مارتنزیتی است [۲ و ۱۳]. با توجه به الگوی پراش اشعه ایکس نمونه‌ها که در شکل (۳) آورده شده است می‌توان برای نمونه‌ی ریخته‌گری شده، فازهای α ، β' و رسوبات غنی از آهن (Fe_3Al) را شناسایی کرد که در زمینه‌ی β شکل گرفته است. شکل (۲) تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ را در حالت ریخته‌گری شده به همراه آنالیز نقطه‌ای (EDAX) نقاط مشخص شده از دو فاز α و β' نشان می‌دهد. در شکل (۱-ب) که ریزساختار نمونه تمپر شده‌ها نشان می‌دهد می‌توان شاهد توزیع همگن‌تر رسوبات در ساختار آلیاژ بود که ناحیه تیره در این نمونه شامل ساختار α ثانویه و رسوبات بین فلزی است و رسوبات ریز غنی از آهن نیز

- عملیات حرارتی تمپر: نمونه‌ها به مدت یک ساعت در دمای 700°C حرارت داده و سپس در هوا سرد شدند.
- عملیات حرارتی پیرسازی: نمونه‌ها به مدت ۲ ساعت در دمای 400°C قرار گرفتند و سپس در هوا سرد شدند.
- جهت بررسی تأثیر متغیر مهم زمان بر عملیات پیرسازی این عملیات در زمان‌های ۱، $1/5$ و ۳ ساعت نیز انجام شد.
- عملیات حرارتی نرماله: نمونه‌های ریخته‌گری شده به مدت یک ساعت در دمای 900°C قرار گرفتند و سپس در هوا سرد شد.

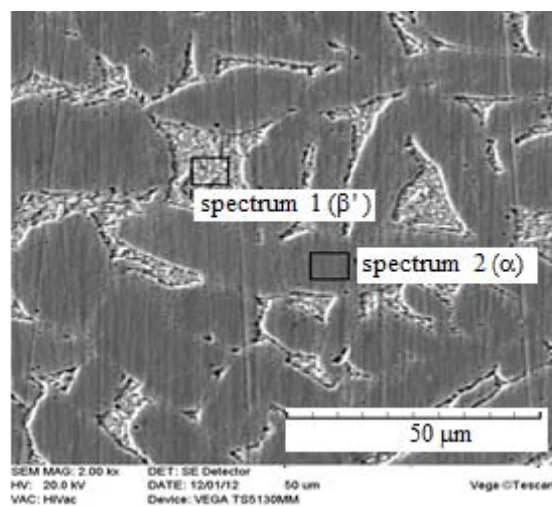
سطوح تمامی نمونه‌ها با کاغذ سمباده‌های شماره ۲۲۰ تا ۵۰۰۰ تمیز و صیقلی و سپس با استون و آب مقطر شسته شد. بررسی ساختار پس از اچ کردن نمونه‌ها در محلول $50\% \text{HNO}_3 + 50\% \text{H}_2\text{O}$ با استفاده از میکروسکوپ نوری مدل OLYMPUS و نیز میکروسکوپ الکترونی مدل CamScan 2300MV مجهز به آشکار ساز آنالیز عنصری شد. به منظور تعیین نوع فازها از دستگاه پراش اشعه ایکس Philips X'pert با پرتو $\text{Cu-K}\alpha$ در بازه زاویه 30 الی 85 درجه استفاده شد. ریزسختی سنجی به کمک دستگاه Shimadzu توسط فرورونده ویکرز با بار اعمالی 200g و مدت زمان 15 ثانیه در 8 نقطه از سطح انجام و مقدار متوسط آن گزارش شد.

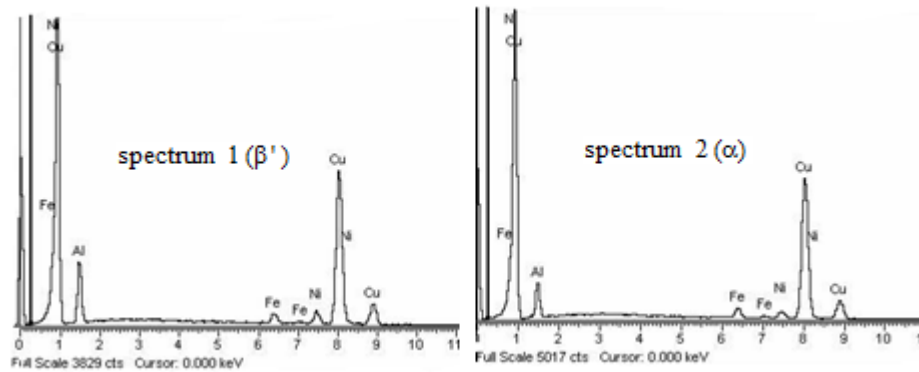
آزمون‌های الکتروشیمیایی شامل پلاریزاسیون تافل و طیف-نگاری امپدانس الکتروشیمیایی به کمک دستگاه پتانسیوگالوانواستات EG&G مدل 263A و مجهز به آنالیزکننده پاسخ فرکانس (Frequency Response Analyzer) در یک سل سه الکترودی شامل الکترود کاری (نمونه با سطح 1cm^2)، الکترود کالومل به عنوان الکترود مرجع و الکترود کمکی از جنس پلاتین و در محلول $3/5\% \text{NaCl}$ در دمای 25°C انجام شد. برای ثبت منحنی‌های پلاریزاسیون پس از رسیدن به حالت تعادل (60 دقیقه پایدارسازی) جاروب پتانسیل از 250mV پایین‌تر از پتانسیل مدار باز آغاز شد و پتانسیل به سمت مقادیر مثبت با سرعت روبش 1mV/sec به نمونه اعمال شد. طیف

در زمینه α اولیه تشکیل شده که بر روی شکل مشخص شده است.



شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ نوری آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار در حالات الف) ریخته گری شده، ب) تمپر شده، ج) پیرسازی شده و د) نرماله شده.



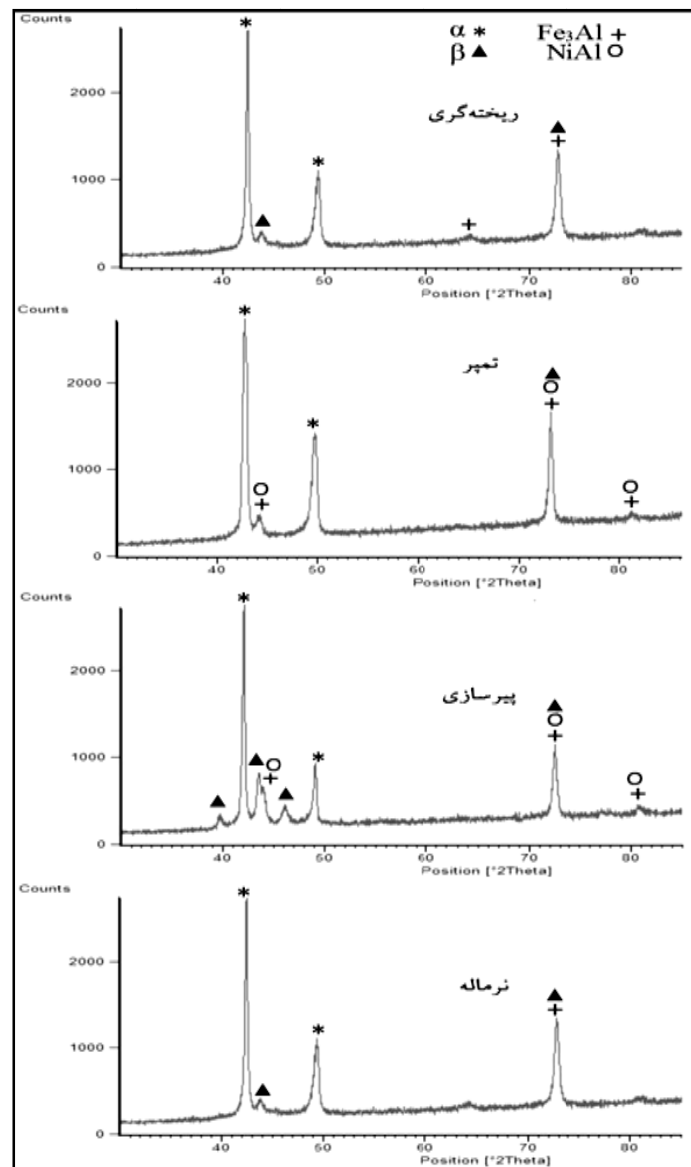


عنصر فاز	مس	آلومینیوم	نیکل	آهن
فاز β'	٪۷۸/۶۱	۱۱/۷۶	٪۵/۸۳	٪۳/۸
فاز α	٪۸۵/۹۴	٪۷/۶	٪۳/۶۸	٪۲/۷۷

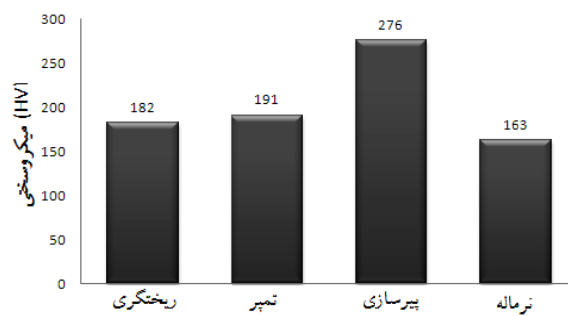
شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار در حالت ریخته‌گری شده به همراه آنالیز نقطه ای (EDAX) نقاط مشخص شده از دو فاز α و β'.

از ۴٪ آهن تشکیل می‌شود. شکل (۱-ج) تصویر نمونه پیرسازی شده را نشان می‌دهد و ذرات ریز و سوزنی شکل α ثانویه در زمینه β' قابل مشاهده است و الگوی پراش اشعه ایکس مربوط به این نمونه نیز حضور کسر بالایی از β' و رسوبات بین فلزی را در ساختار نشان می‌دهد. رسوبات NiAl تنها در نمونه‌های تمپر و پیرسازی شده مشاهده شد که البته کسر آن در نمونه تمپر شده بیشتر است. دلیل این امر می‌تواند بالاتر بودن حد حلالیت نیکل در آلیاژ برنز آلومینیومی باشد که در دمای پایین رسوب می‌کند. این مطلب نشان‌دهنده امکان تشکیل این فاز در دمای ۷۰۰°C می‌باشد. عملیات حرارتی نرماله (شکل ۱-د) در دمای بالا سبب کاهش محصولات استحاله ی اوتکتوئید، به ویژه رسوبات بین فلزی و تشکیل هر چه بیشتر ساختار ویدمن اشتاتن می‌شود.

بررسی الگوی پراش نمونه تمپر شده در شکل (۳) نشان می‌دهد که فاز β' به طور قابل توجهی از ساختار حذف شده و با توجه به شدت یافتن پیک‌های مربوط به رسوبات بین فلزی، کسر بالایی از رسوبات Fe₃Al و NiAl در ساختار شکل گرفته است. قابل ذکر است که مورفولوژی رسوبات K برای آلیاژ مورد مطالعه در این تحقیق به طور کامل مطابق با موارد ذکر شده در گزارش‌های محققان گذشته نیست و دلیل آن نیز کمتر بودن درصد عناصر آلیاژی آن نسبت به آلیاژهای مطالعه شده می‌باشد. اما آنچه مسلم است با توجه الگوهای پراش اشعه ایکس مربوط به نمونه‌های مختلف، رسوبات غنی از آهن و غنی از نیکل در این آلیاژ قابل شناسایی است. از سوی دیگر، رسوبات درشت غنی از آهن (فاز K₁) در آلیاژ مورد مطالعه در این تحقیق مشاهده نشد زیرا این فاز در آلیاژهای حاوی بیش



شکل ۳. الگوهای پراش اشعه ایکس آلیاژ برنز آلومینیوم قبل و بعد از عملیات حرارتی های متفاوت



شکل ۴. تأثیر عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار.

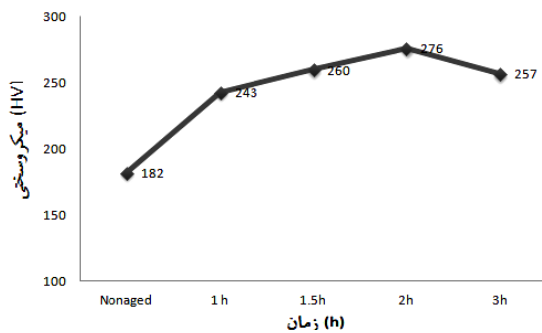
۲- تأثیر زمان عملیات پیرسازی بر سختی آلیاژ

تأثیر عملیات حرارتی بر سختی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار در شکل ۴ نشان داده شده است که ترتیب سختی نمونه‌ها به ترتیب افزایش عبارت است از: نرماله شده، ریخته‌گری شده، تمپر شده و پیرسازی شده. طبق نتایج به دست آمده، کمترین سختی متعلق به نمونه نرماله می‌باشد که بدیهی است به دلیل حضور درصد بالای فاز نرم α در ساختار و درشت شدن دانه‌ها می‌باشد. افزایش سختی در نمونه‌های تمپر شده و پیرسازی شده به دلیل تشکیل رسوبات سخت بین فلزی Fe_3Al و $NiAl$ در زمینه است. از آنجا که انجام عملیات تمپر بر روی نمونه‌ی کوئنچ شده موجب تشکیل فازهای سخت K در زمینه آلیاژ می‌شود سختی نمونه‌ی پیرسازی از بقیه نمونه‌ها بیشتر است زیرا این عملیات سبب رسوب‌گذاری فازهای سخت K در ساختار می‌شود که در کنار آن فاز سخت β' نیز وجود دارد. به علاوه ایجاد دانه‌های بسیار ریز α ثانویه در زمینه نیز سبب افزایش سختی می‌شود. سختی نمونه ریخته‌گری شده نیز به دلیل ریزتر بودن دانه‌ها نسبت به نمونه نرماله شده بالاتر می‌باشد. شکل ۵ سختی آلیاژ را تحت زمان‌های مختلف عملیات حرارتی پیرسازی در دمای $400^\circ C$ نشان می‌دهد که با توجه به شکل، بالاترین میزان سختی در زمان ۲ ساعت ایجاد می‌شود و به طور کلی سختی نمونه‌های پیرسازی شده در زمان‌های مختلف بالاتر از نمونه ریخته‌گری شده (عملیات حرارتی نشده) است. عملیات پیرسازی در زمان کم (یک ساعت)، تنها سبب تشکیل مناطق گونیه-پرستون (مناطق اولیه تشکیل رسوب به محض خروج از محلول جامد) می‌شود [۱۶] و به مرور با افزایش زمان، سختی به دلیل تشکیل هر چه بهتر و بیشتر رسوبات سخت بین‌فلزی افزایش می‌یابد تا در زمان دو ساعت به حداکثر مقدار می‌رسد و هنگامی که زمان عملیات به ۳ ساعت افزایش می‌یابد، پدیده فرایبری رخ می‌دهد که موجب درشت شدن رسوبات و کاهش سختی می‌شود.

۳- ارزیابی رفتار الکتروشیمیایی و مقاومت به خوردگی آلیاژ

نوع خوردگی این آلیاژ به دلیل چند فازی بودن و متفاوت بودن پتانسیل الکتروشیمیایی فازها از نوع خوردگی‌فاز

انتخابی (Selective Phase Attack) می‌باشد که الویت با خوردگی فاز آندیمی باشد. البته میزان خوردگی بستگی به اختلاف پتانسیل میان فازها، پراکندگی و مقاومت به خوردگی ذاتی فاز آند دارد [۱ و ۲]. بررسی‌های انجام گرفته در مطالعات قبلی [۱۱] نشان داده‌اند که در برنزه‌های آلومینیوم حاوی عناصر آلیاژی آهن و نیکل در صورت آهسته سرد شدن آلیاژ، فاز فعال γ_2 شکل می‌گیرد که به ویژه اگر این فاز به صورت پیوسته شکل گیرد مقاومت به خوردگی را شدیداً کاهش می‌دهد اما در برنزه‌های آلومینیومی نیکل دار به دلیل وجود عناصر آلیاژی آهن و نیکل که سبب تشکیل رسوبات بین‌فلزی می‌شود، این فاز توانایی شکل‌گیری ندارد [۱۴ و ۱۵].

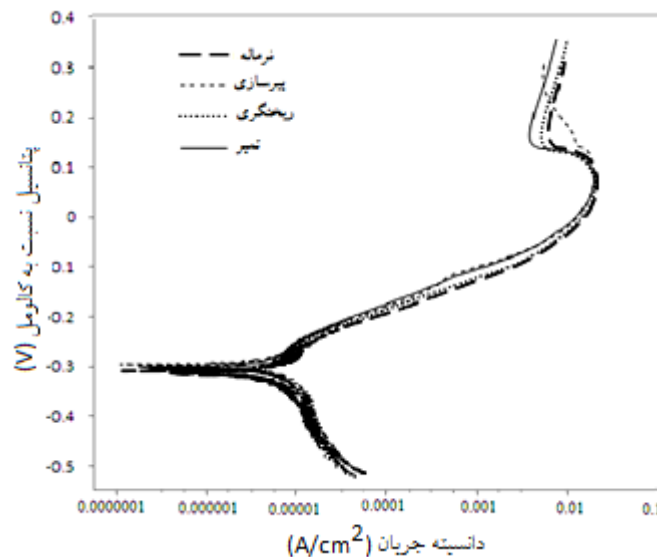


شکل ۵. تأثیر زمان‌های مختلف عملیات پیرسازی در دمای $400^\circ C$ بر سختی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار

حضور فاز β' سبب تسریع خوردگی می‌شود زیرا این فاز دارای ساختار مارتنزیتی و سطح انرژی بالاست و اگر بتوان با عملیات حرارتی مناسب آن را از ساختار حذف و ساختار را معطوف به فازهای α و K نمود رفتار خوردگی بهبود می‌یابد [۲ و ۱۳]. شکل ۶ منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به نمونه‌های مختلف را نشان می‌دهد و بیانگر تشابه بسیار بالای رفتار خوردگی نمونه‌ها می‌باشد و مقادیر پتانسیل و جریان خوردگی طبق جدول ۲ بسیار به هم نزدیک است. این مطلب نشان می‌دهد که رفتار پلاریزاسیون آلیاژ توسط فازهای حاوی مس و آلومینیوم (α و β) کنترل می‌شود. از آنجا که نمونه تمپر شده حداقل دانسیته جریانه خوردگی را نشان داد نتیجه می‌شود که مقاومت بالاتری در برابر خوردگی داراست. پتانسیل خوردگی این نمونه نسبت به سایر نمونه‌ها کمی منفی‌تر است که می‌تواند به دلیل حذف فاز ناپایدار β' از ساختار و ایجاد ساختار

همگن‌تر آلیاژ پس از عملیات حرارتی تمپر باشد. بالاترین دانسیته جریان خوردگی متعلق به نمونه پیرسازی شده (البته با اختلاف اندکی نسبت به سایر نمونه‌ها) است. دلیل این رفتار می‌تواند حضور مقدار زیاد فاز β' در ساختار و همچنین تعداد فازها می‌باشد که سبب ایجاد پیل‌های گالوانیک موضعی بین فازهای مختلف می‌شود. بهبود رفتار خوردگی نمونه‌های نرماله شده نسبت به نمونه‌های ریخته‌گری شده که هیچ‌گونه عملیات حرارتی بر روی آنها انجام نشده است می‌تواند به دلیل تشکیل دانه‌های درشت و کاهش مرز دانه‌ها پس از عملیات حرارتی نرماله باشد. با توجه به منحنی‌های پلاریزاسیون مربوط به تمامی نمونه‌های عملیات حرارتی مشاهده می‌شود که شاخه آندی در پتانسیل‌های بالا و حدود

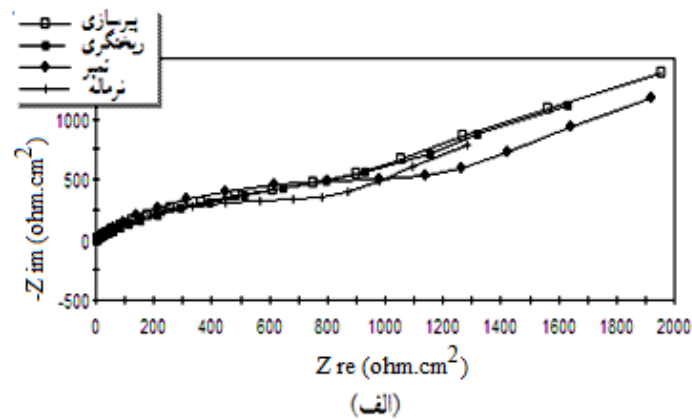
۱۴۰ mV اندکی به سمت دانسیته جریان‌های کوچکتر برمی‌گردد. این رفتار می‌تواند ناشی از تشکیل محصولات خوردگی همچون نمک‌های هیدراته مس باشد که در این شرایط سطح آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار را می‌پوشانند و به واسطه ی اختلالی که در انتقال یون‌ها و الکترون‌ها ایجاد می‌کند موجب کاهش دانسیته جریان خوردگی از 0.03 A/cm^2 تا 0.004 A/cm^2 (بیش از ۷ برابر) می‌شوند. با این حال، بلافاصله با افزایش قدرت اکسیدکنندگی محیط و افزایش پتانسیل به سمت پتانسیل‌های مثبت تر به دلیل قابلیت انحلال این نمک‌ها در محیط آبی $3/5\% \text{ NaCl}$ و ناپایداری آنها در این شرایط، دانسیته جریان شروع به افزایش سریع می‌نماید.



شکل ۶. منحنی‌های پلاریزاسیون آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار تحت عملیات حرارتی مختلف

جدول ۲. پارامترهای پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نمونه‌های عملیات حرارتی شده

نمونه پارامترها	بدون عملیات حرارتی (ریخته‌گری)	تمپر شده	پیرسازی شده	نرماله شده
E_{corr} (V versus SCE)	-۰/۲۹۹	-۰/۳۱۰	-۰/۲۹۵	-۰/۳۰۵
i_{corr} ($\mu\text{A/cm}^2$)	۱۰/۲۳	۸/۱	۱۱	۸/۹



شکل ۷. نتایج حاصل از طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار در محلول ۰.۵/۳٪ NaCl (الف) منحنی‌های نایکوئیست (ب) مدار معادل

جدول ۳. پارامترهای حاصل از طیف‌نگاری امپدانس الکتروشیمیایی

نمونه پارامترها	بدون عملیات حرارتی (ریخته‌گری شده)	تمپ شده	پیرسازی شده	نرماله شده
$R_s(\Omega)$	۵/۴۱	۵/۵۲	۶/۰۴	۵/۱۹۸
$R_{ct}(\Omega)$	۷۵۲	۱۰۲۰	۶۹۰	۷۲۸
$W(\Omega^{-1}S^{-0.5})$	۲۲/۸۰	۲۴/۷۰	۱۹/۲۸	۳۸/۸۰

عملیات حرارتی بر رفتار خوردگی نمونه‌های آلیاژ برنز آلومینیوم نیکل دار می‌باشد. میزان امپدانس واربرگ نیز در نمونه پیرسازی نسبت به بقیه نمونه‌ها کمتر است و می‌تواند بیانگر آن باشد که با افزایش عیوب و جاهای خالی در لایه اکسید سطح، انجام واکنش‌های نفوذی تسهیل شده است. با توجه به نتایج حاصله از آزمون‌های ریزسختی سنجی و الکتروشیمیایی می‌توان عملیات حرارتی پیرسازی را برای این آلیاژ پیشنهاد داد تا علاوه بر افزایش سختی، مقاومت به خوردگی آن کاهش پیدا نکند.

منحنی‌های نایکوئیست مربوط به عملیات حرارتی مختلف، به همراه مدار معادل آن‌ها که به کمک نرم افزار Zsimp Win به دست آمده‌اند در شکل ۷ آورده شده است. R_s مقاومت الکترولیت بین الکتروود کمکی و الکتروود کاری، R_{ct} مقاومت انتقال بار لایه‌دوگانه W بیانگر امپدانس واربرگ است که مقادیر آن‌ها در جدول (۳) درج شده است. وجود امپدانس واربرگ در این مدار بیانگر آن است که نفوذ از میان فیلم سطحی محصولات خوردگی مس کنترل کننده فرآیند خوردگی است. حضور یک ثابت زمانی در مدار نیز حاکی از مرحله کنترل کننده انتقال بار است. نتایج داده‌های امپدانس الکتروشیمیایی، داده‌های پلاریزاسیون را تأیید می‌کند. مقاومت انتقال بار نمونه‌ی پیرشده نسبت به سایر نمونه‌ها بیشتر است و مقاومت انتقال بار برای نمونه‌ی تمپ شده بالاترین مقدار را دارد که به معنی تأثیر مثبت این

6. A. Schussler and H. E. Exnert, "The corrosion of nickel-aluminum bronzes in seawater-I. Protective layer formation and the passivation mechanism", Corrosion Science, Vol. 34, (1993) 1793-1802.
7. Ashkan Vakili-pour Takaloo, Mohammad Reza Daroonparvar, Mehdi Mazar Atabaki, Kamran Mokhtar, "Corrosion Behavior of Heat Treated Nickel-Aluminum Bronze Alloy in Artificial Seawater", Materials Sciences and Applications. 2 (2011) 1542-1555.
8. R. Brooks, "Heat Treatment Structure and Properties of Nonferrous Alloys", American Society for metals. (1982).
9. A. Al-Hashem, W. Riad, "The role of microstructure of nickel-aluminum-bronze alloy on its cavitation corrosion behavior in natural seawater", Materials Characterization. 48 (2002) 37-41.
10. F. Hasan, A. Jahanafrooz, G. W. Lorimer, "The morphology, crystallography, and chemistry of phases in as-cast nickel-aluminum bronze", Metallurgical Transactions. 13 (1982) 1337-1343.
11. P. Sury and H. R. Oswald, "on the corrosion behavior of individual phases present in aluminum bronzes", Corrosion Science. 12 (1972) 77-90.
12. M. Kaplan, A. K. Yildiz, "The effects of production methods on the microstructures and mechanical properties of an aluminum bronze", Materials Letters. 57 (2003) 4402-4411.
13. C. Rui-ping, L. Ze-qin, Z. Wei-wen, "Effect of heat treatment on microstructure and properties of hot-extruded nickel-aluminum bronze", Transaction of Nonferrous Metals Society of China. 17 (2007) 1254-1258.
14. Aluminum Bronze Alloys – Corrosion Resistance Guide, CDA Publication. No 80 (1981).
15. Isaac Cenoz, "Metallography of aluminum bronze alloy as cast in permanent iron die", MJoM. 16 (2010) 115-122.
16. Mustafa Yasar, Yahya Altunpak, "The effect of aging heat treatment on the sliding wear behavior of Cu-Al-Fe alloys", Materials and Design. 30 (2009) 878-884.

۴- نتیجه گیری

۱. نتایج نشان داد که عملیات تمپر به واسطه حذف فاز ناپایدار β' از ساختار سبب ایجاد کمترین دانسیته جریان خوردگی و بالاترین مقاومت انتقال بار می‌شود.
۲. عملیات حرارتی در دمای پایین سبب ایجاد هر چه بیشتر رسوبات بین فلزی k در ساختار شده و در نتیجه سختی افزایش می‌یابد.
۳. رفتار پلاریزاسیون آلیاژ توسط فازهای حاوی مس و آلومینیوم کنترل می‌شود و به همین دلیل منحنی‌های پلاریزاسیون نمونه‌های عملیات حرارتی دارای اختلاف اندکی است.
۴. تحقیقات به عمل آمده نشان می‌دهد که عملیات حرارتی پیرسازی در دمای 400°C و به مدت ۲ ساعت، عملیات حرارتی مناسبی برای آلیاژ است تا با ایجاد بیشترین مقدار سختی، مقاومت به خوردگی نیز افت چندانی پیدا نکند و به واسطه ی سختی بالا، مقاومت خوبی در برابر خوردگی سایشی داشته باشد.

مراجع

1. J.A. Wharton, R.C. Barik, G. Kear, R.J.K. Wood, K.R. Stokes, F.C. Walsh, "The corrosion of nickel-aluminum bronze in seawater", Corrosion Science. 47 (2005) 3336-3367.
2. M.R. Daroonparvar, M. Mazar Atabaki, A. Vakili-pour, "Effect of pre-heat treatment on corrosion behavior of nickel-aluminum bronze alloy", Materials Sciences and Applications. 2 (2011) 1542-1555.
3. A.M. Alfantazi, T.M. Ahmed, D. Tromans, "Corrosion behavior of copper alloys in chloridimedia", Materials and Design. 30 (2009) 2425-2430.
4. J.A. Wharton, K.S. Tan, K.R. Stokes, R.C. Barik, R.J.K. Wood, "Erosion and erosion-corrosion performance of cast and thermally sprayed nickel-aluminum bronze", Wear. 259 (2005) 230-242.
5. Bernard Bayle, David Delafosse, Jean-Loup Heuze, Ste'phanie Fonlupt, "Role of second phases in the stress corrosion cracking of a nickel-aluminum bronze in saline water", Corrosion Science. 47 (2005) 2792-2806.