



مطالعه اثرات فرآیند نورد در کانال‌های زاویه‌دار همسان بر رفتار خوردگی مس خالص تجاری

محمد هنرپیشه^{1*}، هادی منصوری²، سعید ساکی انتظامی³

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

2- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد جاسب، دلجان

3- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، باشگاه پژوهشگران جوان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خرم‌آباد، خرم‌آباد

*کاشان، صندوق پستی 8731751167، honarpishe@kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 20 خرداد 1396

پذیرش: 11 شهریور 1396

ارائه در سایت: 07 مهر 1396

کلید واژگان:

رفتار خوردگی

پلاریزاسیون

نورد در کانال زاویه‌دار همسان

چکیده

فرآیند نورد در کانال‌های هم مقطع زاویه دار یکی از جدیدترین روش‌های تغییر شکل پلاستیک شدید می‌باشد که موجب تغییر خواص مکانیکی و فیزیکی ورق‌های فلزی می‌شود. در این مقاله به بررسی اثرات فرآیند نورد در کانال‌های زاویه‌دار بر رفتار خوردگی مس خالص تجاری شده پرداخته شده است. برای این منظور، عملیات ایگر در پنج پاس به انجام رسید. همچنین جهت بررسی نرخ خوردگی نمونه‌های تا پنج پاس ایگر شده از جنس مس خالص تجاری، روش‌های امپدانس الکتروشیمیایی و پلاریزاسیون مورد مطالعه قرار گرفتند. نتایج حاکی از تأثیر مخرب فرآیند، بر مقاومت در برابر خوردگی نمونه‌ها می‌باشد. نتایج میکروسکوپ الکترونی روشی نشان داد که با افزایش تعداد پاس خوردگی سطحی افزایش یافته و در پاس‌های بالا خوردگی حفره‌ای به وضوح قابل رویت می‌باشد. همچنین با افزایش تعداد پاس خوردگی به صورت یکنواخت دیده می‌شود و از حالت موضعی خارج شده است. به‌طور کلی از پاس اول به پاس دوم میزان خوردگی بیشتر بوده و قطر و عمق حفرات ناشی از خوردگی بیشتر و به تعداد بیشتر مشاهده می‌گردد. در نمونه سه پاس ایگر شده میزان خوردگی افزایش یافته و نوع خوردگی ترکیبی از خوردگی یکنواخت و خوردگی حفره‌ای می‌باشد.

Investigation of ECAR process on the corrosion behavior of pure commercial copper

Mohammad Honarpisheh^{*1}, Hadi Mansouri², Saeed Saki Entezami³

1-Faculty of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

2-Department of Mechanics, Jasb Branch Islamic Azad University, Delijan, Iran

3-Young Researchers and Elite Club, Khorramabad Branch Islamic Azad University, Khorramabad, Iran

*P.O.B. 8731751167, Kashan, Iran, honarpishe@kashanu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 10 June 2017

Accepted 02 September 2017

Available Online 29 September 2017

Keywords:

Corrosion behavior

Polarization

Equal channel angular rolling

ABSTRACT

Equal channel angular rolling process (ECAR) is one of the newest processes in the severe plastic deformation methods (SPD) that changes the mechanical properties of the sheet metal. In this study, the effects of ECAR process have been investigated on the corrosion behavior of the pure commercial copper samples. Five routs have been applied on the samples to investigate the mentioned parameters. Also, the corrosion rates were examined by the polarization and electrochemical impedance methods. The results show that the process has destructive effect on corrosion resistance of the samples. The results from SEM examination indicate that, with increasing the number of passes, the surface corrosion increases too and with increasing the passes pitting corrosion is clearly visible. Although with increasing the number of passes the uniformity of corrosion can be seen and positional mode is exited. Generally, the corrosion increases from the first pass to the second pass. Also, more diameter and depth of corrosion is observed with increasing the pass number. The corrosion increase at the third pass and the corrosion type is pitting corrosion and uniform corrosion in the sample.

1- مقدمه

این فلزات دارای اهمیت می‌باشد. پدیده خوردگی یکی از عوامل مهم در تخریب مواد است که در واقع وابستگی زیادی به خواص مواد دارد [2]. فرآیند نورد در کانالهای زاویه‌دار همسان¹ یکی از جدیدترین روش‌هایی است که جهت اصلاح و پالایش ساختار مواد فلزی بکار برده می‌شود. این فرآیند که بر

فلزاتی همچون آهن، آلومینیوم، مس، منیزیم و... به دلیل دارا بودن خصوصیات فیزیکی و مکانیکی بالا مانند استحکام و سختی در بسیاری از سازه‌های صنعتی از جمله سازه‌های دریایی، هواپیما سازی، نیروگاه‌ها و... مورد استفاده قرار می‌گیرند [1]. به همین علت مقاومت در برابر خوردگی در

¹ ECAR

Please cite this article using:

M. Honarpisheh, H. Mansouri, S. Saki Entezami, Investigation of ECAR process on the corrosion behavior of pure commercial copper, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 39-46, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

خالص را مورد تحقیق قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آلومینیوم خالص صنعتی با دانه‌بندی ریز، پتانسیل حفره‌ای شدن بیشتر، تراکم جریان خوردگی کمتر و غشاء مقاومتری 5 برابر بزرگتر از آلومینیوم با دانه‌بندی درشت دارد. در سال 2011 سانگ و همکارانش [10] بهبود مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای در آلیاژ Al-Cu، ایکپ شده را در محلول خورنده کلرید سدیم مطالعه کردند و دریافتند که فرایند شکل دهی شدید در نمونه های ریز دانه مقاومت به خوردگی حفره ای را بهبود می‌بخشد. در همان سال رالستون و همکارانش [11] تأثیر اندازه دانه را بر رفتار خوردگی آلومینیوم ایکپ شده را مورد تحلیل قرار دادند و نتیجه آنها حاکی از آن بود که با افزایش اندازه دانه نرخ خوردگی تمایل به کاهش دارد و به نظر نمی‌رسد که با تغییر اندازه دانه و مسیر عملیات، پتانسیل حفره ای شدن زیاد تغییر کند. در سال 2012 شریف و همکارانش [12] رفتار خوردگی آلومینیوم 1050 ایکپ شده را مطالعه کردند و فهمیدند که پس از فرایند ایکپ مقدار خوردگی کاهش می‌یابد و مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای افزایش می‌یابد. در سال 2013 آرگد و همکارانش [13] رفتار خوردگی آلیاژ فوق ریز دانه Al-Mg-Sc را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که فرایند اصطکاک جنبشی روش موثری برای بهبود مقاومت به خوردگی است. در همان سال نیکفام و همکارانش [14] دریافتند که مقاومت به خوردگی در مرحله اول کاهش و در مراحل بعد افزایش پیدا می‌کند و علت آن ریز دانه شدن نمونه بعد از مرحله چهارم می‌باشد. در سال 2015 هنرپیشه و همکارانش خواص مکانیکی و متالورژیکی ورق دو لایه‌ی AL/CU تولید شده به وسیله‌ی فرایند ایکپ را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که بعد از مرحله اول استحکام کششی و تسلیم افزایش چشمگیری می‌یابد ولی ازدیاد طول کاهش پیدا می‌کند همچنین دریافتند که تغییر شکل برشی باعث افزایش زاویه مرز دانه‌ها و کاهش اندازه دانه ها می‌شود [15]. وی و همکارانش در همان سال تأثیر فرایند بر روی هدایت حرارتی آلومینیوم 3003 در دو مسیر A و C طی ده پاس را بررسی کردند که دریافتند هدایت الکتریکی نمونه‌ها تا یک مرحله مشخصی افزایش پیدا می‌کند و استحکام تسلیم و نهایی نمونه افزایش چشمگیری می‌یابد [16]. در سال 2016 ساکی انتظامی و همکارش تأثیر فرایند ایکپ بر تغییرات سختی در آلیاژهای آلومینیوم 5052 و 7075 را مورد بررسی و مطالعه قرار دادند و دریافتند سختی سطحی و سختی در امتداد ضخامت آلیاژ نمونه به ترتیب 63% و 46% در مسیر A و 51% و 30% در مسیر C افزایش می‌یابد [17]. اگرچه تاکنون مطالعات بسیاری پیرامون تأثیر اعمال فرایند ایکپ بر روی مس خالص تجاری صورت پذیرفته است [18-20]، اما تأثیر این فرایند بر مقاومت در برابر خوردگی تاکنون گزارش نشده است. در این مقاله به بررسی تأثیر اعمال فرایند ایکپ بر مقاومت در برابر خوردگی ورق مس خالص تجاری در محیط 5٪ نمک سدیم کلراید⁴ پرداخته شده است.

2- مواد و روش‌ها

در فرایند ایکپ نمونه‌ها را می‌توان به دو روش اعمال فرایند نمود. روش اول مسیر A می‌باشد و شیوه عملکرد به گونه‌ای است که پس از هر بار خروج قطعه از قالب دستگاه، مجدداً به همان شکل قبل وارد دستگاه می‌شود ولی در روش دوم که مسیر C نام دارد به منظور دست یافتن به کرنش ایده آل‌تر، مابین هر پاس نمونه‌ها پیش از ورود به دستگاه 180 درجه حول محور طولی چرخانده می‌شوند. همچنین باید توجه داشت که طی فرایند ایکپ ابعاد نمونه‌ها پس از اعمال شکل دهی هیچگونه تغییری نمی‌کند. در این مطالعه

پایه‌ی فرایند پرس در کانال‌های زاویه‌دار همسان² می‌باشد، با اعمال کرنش بزرگی بر روی ورق‌ها و نوارهای فلزی موجب تولید دانه‌بندی و خواص مطلوب در آن می‌شود [3]. محدودیت در اعمال فرایند ایکپ به‌طور پیوسته و ناتوانی اعمال آن بر روی ورق‌های فلزی این فرایند را در مقیاس آزمایشگاهی نگه‌داشته است که در جهت رفع محدودیت‌های آن، فرایند ایکپ از آن مشتق شد و به همین دلیل فرایند ایکپ دارای قابلیت‌های صنعتی شدن می‌باشد. به دلیل نوظهور بودن این فرایند تاکنون مطالعات اندکی بر روی آن صورت پذیرفته است که به دفعات بالا خواص مکانیکی در آن‌ها بررسی شده است ولی جای خالی خوردگی در مقالات ارائه شده به شدت احساس می‌شود. خواص مکانیکی مس ایکپ شده در شکل (1) نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود استحکام تسلیم و استحکام کششی پس از اعمال فرایند ایکپ افزایش می‌یابد که روند افزایش در استحکام تسلیم چشمگیرتر می‌باشد. این روند افزایشی از اولین پاس با افزایش تدریجی تا مرحله هفتم ادامه می‌یابد در حالی که استحکام کششی تغییری زیادی را تجربه نمی‌کند. همچنین فرایند ایکپ موجب کاهش ازدیاد طول چشمگیری می‌شود [4].

در سال 2006 سون و همکارانش [5] مقاومت در برابر خوردگی حفره‌ای را در آلومینیوم فوق ریز دانه شده توسط فرایند ایکپ مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که فرایند ایکپ مقاومت به خوردگی حفره ای را بهبود می‌بخشد. در سال 2007 وی و همکارانش [6] خوردگی را در آلیاژ Al-Mn تولید شده به وسیله فرایند نورد تجمعی³ مورد مطالعه قرار دادند و نتایج نشان داد که مقدار و اندازه خوردگی حفره ای در آلیاژ آلومینیوم دانه درشت در مقایسه با آلومینیوم ریزدانه کاهش یافت و پتانسیل خوردگی در آلومینیوم ریزدانه بیشتر از آلومینیوم با دانه بندی درشت می‌باشد. در سال 2008 هوکاف و همکارانش [7] خواص مکانیکی و رفتار خوردگی آلیاژ AA6082 ریز دانه شده به وسیله فرایند ایکپ را مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که مقاومت به خوردگی حفره‌ای نمونه پس از فرایند ایکپ افزایش می‌یابد. در سال 2009 منگ و همکارانش [8] خوردگی حفره‌ای را در آلومینیوم خالص تجاری نانوکریستال شده را مورد بررسی قرار دادند و متوجه شدند که پتانسیل خوردگی نمونه آلومینیوم ریزدانه روند افزایشی داشته در حالی که تراکم جریان خوردگی خوردگی در مقایسه با آلومینیوم دانه درشت کاهش پیدا می‌کند. در همان سال دان و همکارانش [9] تأثیر فرایند ایکپ را بر رفتار خوردگی آلومینیوم

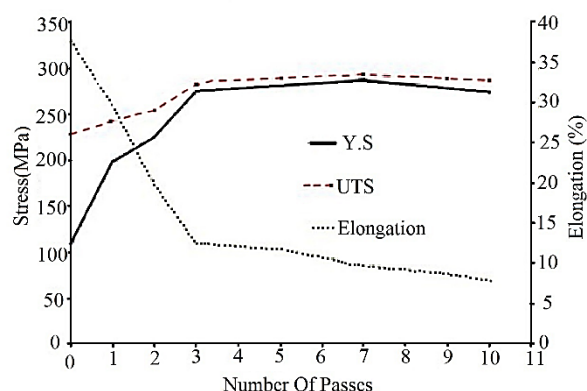


Fig. 1 Changes in tensile strength, yield strength and elongation in terms of the number of passes [4]

شکل 1 تغییرات مقاومت کششی، استحکام تسلیم و درصد ازدیاد طول برحسب تعداد پاس [4]

⁴ NaCl

² ECAP

³ ARB

فعال است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، دانسیته جریان خوردگی برای همه نمونه‌ها یکسان است. شیب ناحیه آندی نیز، رفتار یکسانی را نشان می‌دهد. تنها تغییر در منحنی‌های پلاریزاسیون، شیب ناحیه کاتدی است که با توجه به اینکه محیط اسیدی است و یون‌های خورنده Cl^- در محیط وجود دارند، بنابراین با کاهش شیب ناحیه کاتدی، شدت آزاد شدن هیدروژن نیز بیشتر است.

"شکل 5" منحنی‌های نایکویست، باد-فاز و باد-زد از نمونه مسی در شرایط مختلف در محیط نمک طعام را نشان می‌دهد. به منظور تحلیل داده‌های حاصل از منحنی‌های نایکویست و شبیه‌سازی رفتار خوردگی، بایستی نتایج بدست آمده را با یک مدار الکتریکی معادل، مطابقت داد. مدار معادل برای نمونه‌های تحت بررسی، در "شکل 6" نشان داده شده است. همچنین پارامترهای الکتروشیمیایی بدست آمده ناشی از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی نیز، در جدول (2)، آورده شده است. اجزای سازنده مدار شکل (6) مقاومت الکترولیت (R_s) و ظرفیت خازن (CPE) می‌باشند که CPE از رابطه (1) محاسبه می‌شود [21].

$$CPE = P \times (j\omega)^n \quad (1)$$

در رابطه بالا P به خاصیت خازنی و n به مورفولوژی سطح مربوط می‌شود. جهت تعیین خاصیت خازنی لایه دوگانه و همچنین لایه اکسیدی سطح از رابطه (2) کمک گرفته شده است [21].

$$C = (F \times (R_p)^{1-n})^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

هرچه میزان مقاومت پلاریزاسیون افزایش یابد مقاومت به خوردگی نیز افزایش می‌یابد. مطابق با مدار معادل و پارامترهای الکتروشیمیایی بدست

جدول 1 پارامترهای الکتروشیمیایی از آزمون پلاریزاسیون تافل

Table. 1 Electrochemical parameters from the Tofel

نمونه	بتای کاتدی (V)	بتای آندی (V)	دانسیته جریان خوردگی (A/cm^2)	پتانسیل خوردگی (V)
شاهد	0.261	0.07	9.474×10^{-7}	-0.24
1 پاس	0.179	0.07	9.476×10^{-7}	-0.24
2 پاس	0.227	0.07	9.471×10^{-7}	-0.24
3 پاس	0.225	0.07	9.473×10^{-7}	-0.24
4 پاس	0.143	0.07	9.474×10^{-7}	-0.24
5 پاس	0.201	0.07	9.472×10^{-7}	-0.24

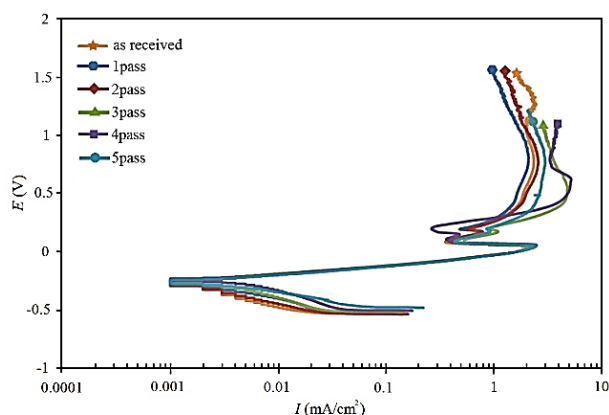


Fig. 4 Polarization curves of copper sample under different conditions in NaCl corrosive solution

شکل 4 منحنی‌های پلاریزاسیون از نمونه‌ی مسی در شرایط مختلف در محلول خورنده از نمک طعام

پنج نمونه از جنس مس خالص تجاری با ابعاد $400 \times 30 \times 3$ میلی‌متر در مسیر C تحت فرآیند ایگر قرار گرفت. "شکل 2" شماتیکی از مسیر C در فرآیند ایگر را نشان می‌دهد.

دستگاه مورد استفاده در این مطالعه متشکل از دو قسمت غلتک و قالب می‌باشد که در آن فاصله‌ی بین دهانه‌ی دو غلتک 2.97 mm ، ضخامت ورودی و خروجی کانال برابر با 3 mm و زاویه قالب 120° درجه می‌باشد. دستگاه و نمونه‌های ایگر شده در "شکل 3" نشان داده شده است. پس از فرآیند ایگر، تست‌های خوردگی شامل پلاریزاسیون و امپدانس الکتروشیمیایی بر روی سطوح نمونه‌ها در محیط 0.5% از نمک سدیم کلراید، انجام شد. به این منظور از دستگاه پتانسیواستات-گالوانواستات⁵ ساخت کشور هلند همراه با نرم‌افزار اجرایی⁶ جهت اندازه‌گیری‌های الکتروشیمیایی استفاده شد. بر طبق منحنی‌های تغییرات پتانسیل بر حسب جریان و سرعت خوردگی برحسب زمان غوطه‌وری در محلول خورنده، پوشش‌های بدست آمده مورد ارزیابی قرار گرفت.

3- نتایج و بحث

منحنی پلاریزاسیون مس ایگرشده برحسب تعداد پاس در "شکل 4" و نتایج بدست آمده از آزمون پلاریزاسیون در جدول (1) نشان داده شده است. رفتار فلز مس در محیط خورنده 0.5% از نمک سدیم کلراید رفتار

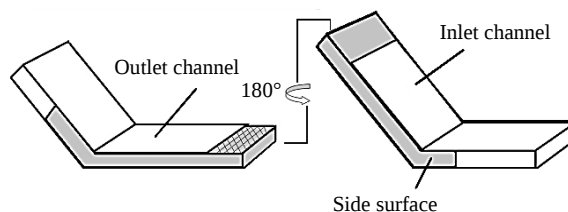


Fig. 2 A schematic of route C in ECAR process [4]

شکل 2 شماتیکی از مسیر C در فرآیند ایگر [4]



Fig. 3 The used ECAR device in this study and ECARed samples

شکل 3 دستگاه ایگر مورد استفاده در پژوهش و نمونه‌ها پس از اعمال فرآیند

⁵ IVIUMSTAT

⁶ IVIUMSOFT

جدول 2 پارامترهای الکتروشیمیایی بدست آمده از آزمون امپدانس الکتروشیمیایی

Table. 2 Electrochemical parameters obtained from EIS examination

مقاومت	خازن لایه	مقاومت	خازن مربوط	مقاومت	نمونه
محل	دوگانه	انتقال بار	به نفوذ (فاراد)	نفوذ	
(Ω)	(فاراد)	(Ω)		(Ω)	
47	2.67×10^{-5}	5492	2×10^{-4}	19317	شاهد
47	3.58×10^{-4}	4892	1.4×10^{-4}	13550	پاس 1
40	5.5×10^{-4}	4345	2.14×10^{-3}	8461	پاس 2
46	7.56×10^{-4}	3015	2.4×10^{-3}	7438	پاس 3
45	8.6×10^{-4}	1850	3.4×10^{-3}	6865	پاس 4
46	1.1×10^{-3}	824	6.4×10^{-3}	1942	پاس 5

آمده، دو ثابت زمانی وجود دارد. ثابت زمانی اول مربوط به لایه دوگانه است که هرچه تعداد پاس‌ها بالاتر رفته مقاومت به خوردگی کاهش می‌یابد، زیرا مقدار خازن افزایش و مقاومت انتقال بار کاهش یافته است.

ثابت زمانی دوم مربوط به نفوذ یون خوردنده کلر است که هر چه این مقاومت بیشتر باشد مقاومت در برابر نفوذ کلرید بیشتر است و مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد پاس‌ها مقاومت به نفوذ کاهش یافته است. در واقع کاهش جریان در شاخه آندی به دلیل تشکیل فیلم در سطح مس می‌باشد. این فیلم توسط واکنش‌های انحلال آندی مس در منطقه فعال نمودار، به وجود می‌آید که این واکنش‌ها را می‌توان بصورت روابط (3) و (4) بیان کرد. همچنین واکنش کاتدی نیز در حالت (5) رخ می‌دهد [22]. فیلمی که در این حالت بوجود آمده، غیر محلول و با رسوب کردن بر سطح مس، سبب افزایش پتانسیل سطح به مقادیر مثبت‌تر می‌شود.



تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای نمونه‌های شاهد و دیگر شده در "اشکال 7 تا 9" نشان داده شده است. به طور کلی مشاهده می‌گردد میزان خوردگی سطحی با افزایش تعداد پاس افزایش یافته است. همچنین مشاهده می‌شود که خوردگی حفره‌ای در بعضی از مناطق در پاس‌های بالا به وضوح قابل رویت می‌باشد. در نمونه شاهد "شکل 7" خوردگی به صورت یکنواخت بوده و اثری از پیتینگ مشاهده نمی‌شود.

با اعمال فرآیند در پاس اول ملاحظه می‌گردد که تمام سطح نمونه دچار خوردگی نشده است و خوردگی به صورت موضعی بوده و به احتمال زیاد خوردگی از مناطق پر انرژی مانند مرز دانه‌ها شروع شده است. همچنین خوردگی به صورت پیتینگ نیز در این نمونه مشاهده می‌گردد که با علامت A در "شکل 8" نشان داده شده است. زمانی که ناحیه‌های موضعی یک ماده در معرض حمله سریع باشد، خوردگی به صورت پیتینگ اتفاق می‌افتد هر چند که سطح وسیعی از ماده بی‌تأثیر باقی می‌ماند [23].

همان‌طور که در "شکل 9" مشاهده می‌شود، از پاس اول به پاس دوم میزان خوردگی بیشتر بوده اما قطر و عمق حفرات ناشی از خوردگی بیشتر و به تعداد بیشتر مشاهده می‌گردد. در نمونه سه پاس دیگر شده میزان خوردگی افزایش یافته و نوع خوردگی ترکیبی از خوردگی یکنواخت و خوردگی حفره‌ای می‌باشد. همچنین تشکیل اولیه فیلم‌های لایه محافظ از جنس مس کلراید مشاهده می‌گردد. در پاس چهارم حجم خوردگی به روند افزایشی خود ادامه داده و تشکیل لایه خوردگی در بیشتر مناطق مشاهده می‌گردد که به دلیل تنش بسیار زیاد در نمونه در اثر اعمال فرایند مناطقی که دچار حمله خوردگی شده به شدت افزایش یافته است. پاس پنجم در این نمونه خوردگی

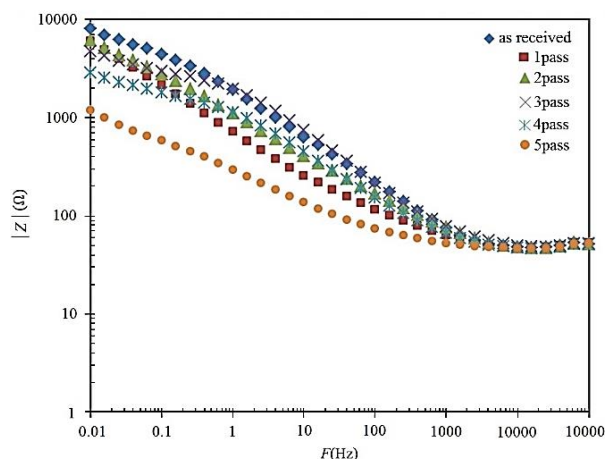
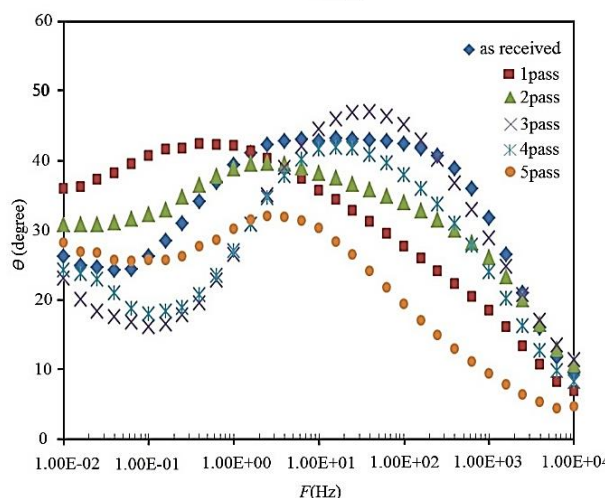
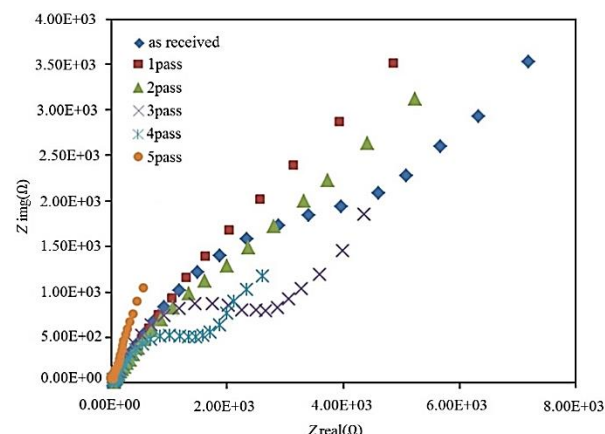


Fig. 5 Nyquist, bod-phase, bod_Z curves from copper samples under different conditions in NACL corrosive solution

شکل 5 منحنی‌های نایکوویست، فاز و باد - زد از نمونه‌های مسی در شرایط مختلف در محیط خورنده نمک طعام

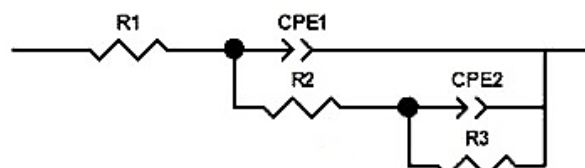


Fig. 6 Equaled orbit of covered samples after electrochemical impedance test

شکل 6 مدار معادل نمونه‌های پوششی داده شده پس از آزمون امپدانس

گفت اعمال کرنش پلاستیک شدید در حین فرآیند ایگر و در پی آن ریز دانه شدن و افزایش چگالی نابجایی‌ها موجب افزایش سطح انرژی آلیاژ شده که از عمده‌ترین عامل کاهش مقاومت در برابر خوردگی این آلیاژ محسوب می‌شود. زیرا این مناطق پر انرژی، تمایل به جذب بیشتر یون CL^- دارند و خوردگی در آن مناطق شروع می‌شود [6].

این مطلب که کار مکانیکی اثر مخربی بر مقاومت در برابر خوردگی مواد دارند در مراجع [28,27] نیز گزارش شده است. هر چند که این موضوع را نمی‌توان قانونی کلی دانست زیرا در بعضی از مواد که قابلیت تشکیل لایه پسیو را به صورت فعال داشته گزارش گردیده که این افزایش انرژی سطحی باعث افزایش سرعت تشکیل این لایه شده و در نتیجه مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد [8-10].

نکته قابل توجه دیگر این‌که همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مشاهده می‌شود با افزایش تعداد پاس به علت آنکه تغییرات بر روی سطح به صورت یکنواخت اعمال شده به همین دلیل خوردگی به صورت یکنواخت دیده می‌شود و از حالت موضعی خارج شده است.

همچنین تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مربوط به سطح نمونه‌های ایگر شده قبل از خوردگی در "شکل 10" قابل مشاهده است.

دلیل دیگری که برای توجیح کاهش مقاومت در برابر خوردگی این فلز می‌توان به آن اشاره کرد این است که تنش‌های پس ماند با تغییر در انرژی آزاد فلزاتی که تحت کار مکانیکی شدید قرار گرفته‌اند، در تماس با محیط خورنده موجب افزایش نرخ خوردگی در آن‌ها می‌شوند [29, 30]. مطابق با نتایج حاصل از مطالعه [31-33]، گزارش شده است که اعمال فرآیند ایگرموجب افزایش تنش پسماند در نمونه می‌شود.

4- جمع‌بندی

در این مطالعه مقاومت در برابر خوردگی ورق مس ایگرشده با استفاده از روش امپدانس الکتروشیمیایی مورد بحث و مطالعه قرار گرفت که در طی آن نتایج زیر حاصل شد:

- در اثر اعمال فرآیند دانه‌های درشت و کشیده شکسته شده و دانه‌های فرعی با چگالی نابجایی بالا تشکیل می‌شود. این امر موجب تشکیل شدن دانه‌های ریز و هم‌محورتری نسبت به ساختار اولیه می‌شود و چگالی نابجایی در داخل و مرز دانه‌های اولیه افزایش می‌یابد و با توجه به اینکه خوردگی در این مناطق آغاز می‌شود این امر موجب افزایش نرخ خوردگی می‌شود.

- تنش‌های پس ماند ایجاد شده در حین فرآیند با تغییر در انرژی آزاد فلز در تماس با محیط خورنده موجب افزایش نرخ خوردگی در آن‌ها می‌شود.

- در بعضی از مواد که قابلیت تشکیل لایه پسیو را به صورت فعال داشته این افزایش انرژی سطحی باعث افزایش سرعت تشکیل این لایه شده و در نتیجه مقاومت به خوردگی افزایش می‌یابد.

- میزان خوردگی سطحی با افزایش تعداد پاس افزایش می‌یابد. همچنین خوردگی حفره‌ای در بعضی از مناطق در پاس‌های بالا تشکیل شده است.

- با افزایش تعداد پاس به‌علت آنکه تغییرات بر روی سطح به صورت یکنواخت اعمال شده به همین دلیل خوردگی به صورت یکنواخت دیده می‌شود و از حالت موضعی خارج شده است.

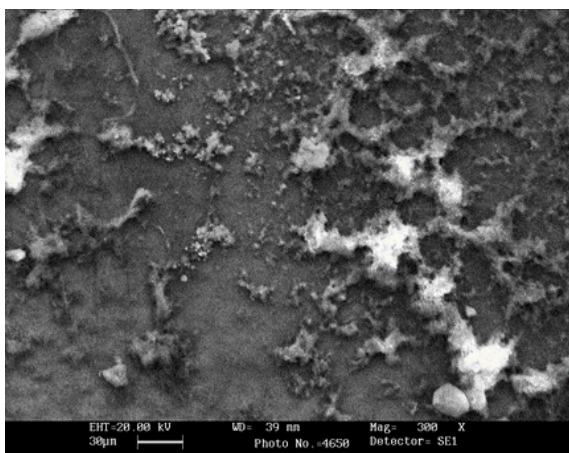
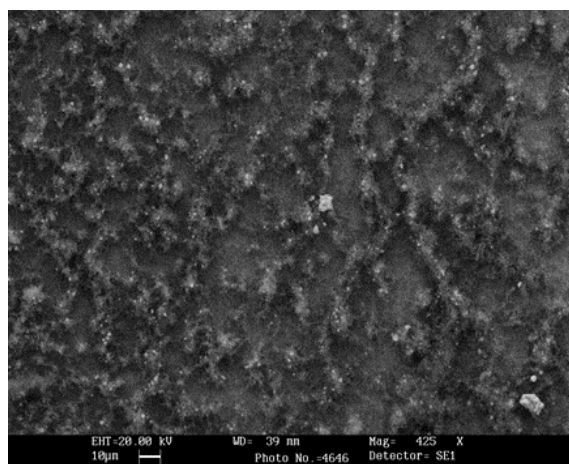
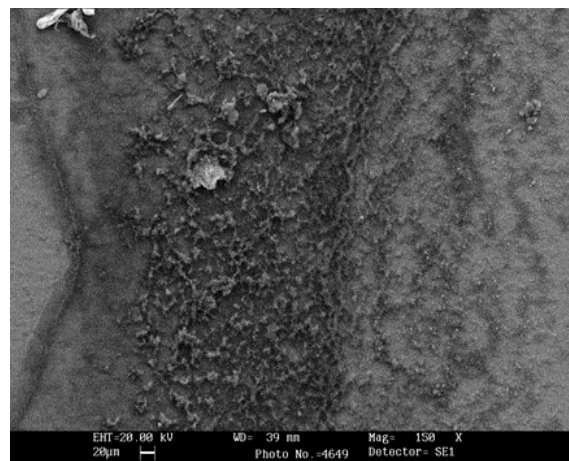


Fig. 7 Corrosion area on unECARed samples

شکل 7 سطح خوردگی نمونه شاهد

یکنواخت و تشکیل فیلم خوردگی به وضوح قابل رویت بوده که برخی از مناطق خوردگی حفره‌ای با عمق بالا در نمونه‌ها اتفاق افتاده که نشانگر مقاومت پایین نمونه در برابر خوردگی در محلول می‌باشد. این کاهش مقاومت در برابر خوردگی را می‌توان به ریز دانگی نمونه در اثر اعمال فرآیند نسبت داد. در مطالعات گزارش شده است که فرآیند ایگر موجب کاهش اندازه دانه در مس [5, 18] و همچنین فلزات دیگر [24-26] می‌شود.

به طور کلی مواد ریز دانه به دلیل وجود چگالی بالای عیوب در مقایسه با مواد درشت دانه مقاومت به خوردگی پایین‌تری دارند [6]. در واقع می‌توان

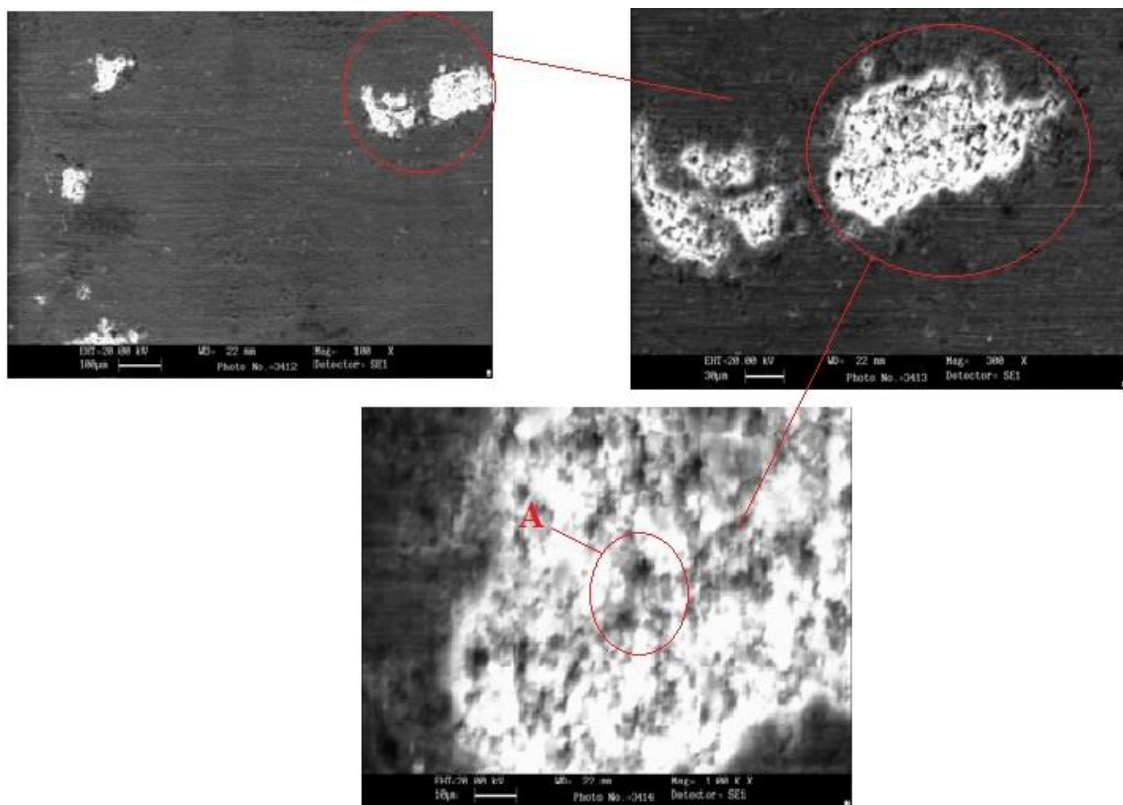
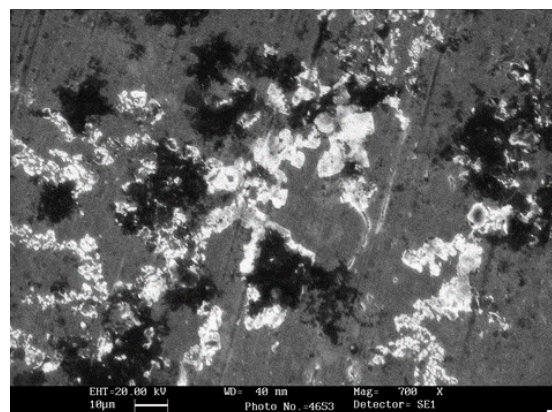
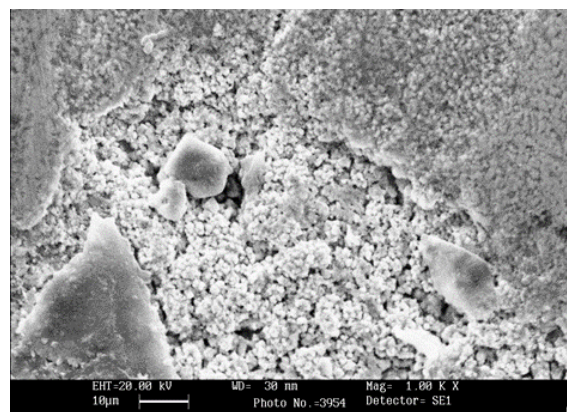


Fig. 8 Corrosion area on 1 pass ECARed samples

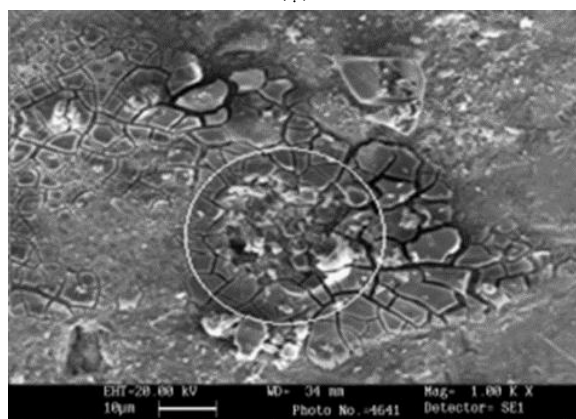
شکل 8 خوردگی نمونه‌های مسی یک پاس ایگر شده



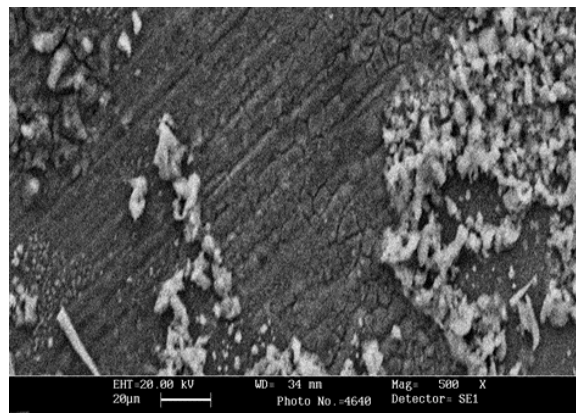
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

Fig. 9 Corrosion area on ECARed copper samples a) 2 pass ECARed sample b) 3 pass ECARed sample c) 4 pass ECARed sample d) 5 pass ECARed sample

شکل 9 خوردگی نمونه‌های مسی ایگر شده (الف) نمونه دو پاس ایگر شده، (ب) نمونه سه پاس ایگر شده، (ج) نمونه چهار پاس ایگر شده و (د) نمونه پنج پاس ایگر شده

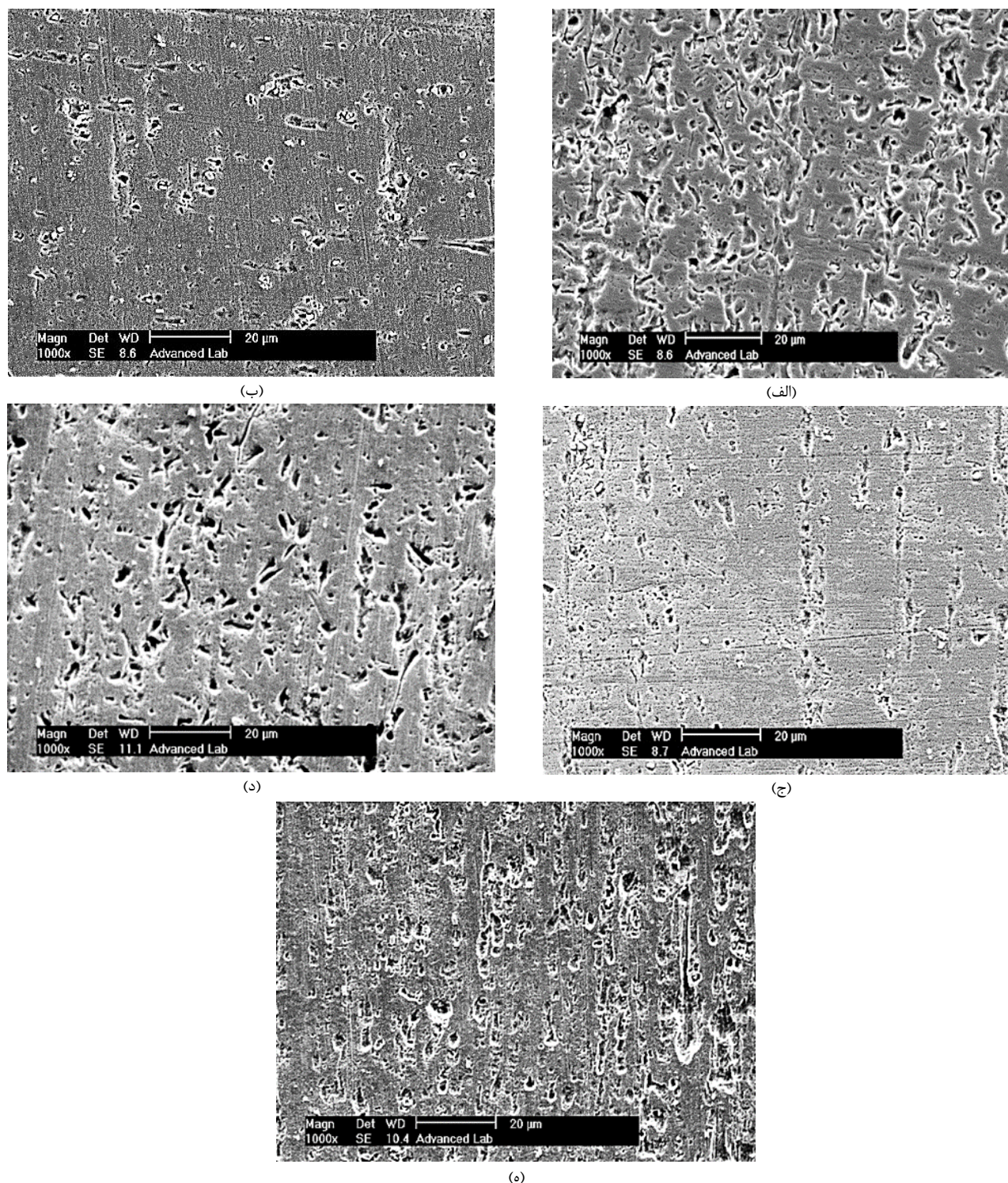


Fig. 10 The SEM graphs of ECARed copper samples a) unECARed samples b) 1 pass ECARed sample c) 2 pass ECARed sample d) 3 pass ECARed sample e) 4 pass ECARed sample

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌ها (الف) نمونه شاهد (ب) نمونه یک پاس ایگر شده (ج) نمونه دو پاس ایگر شده، (د) نمونه سه پاس ایگر شده، (ه) نمونه چهار پاس ایگر شده

5- منابع

- International Journal of Advanced Design and Manufacturing Technology*, Vol. 5, No. 4, pp. 71-76, 2012.
- [4] A. Habibi, M. Ketabchi, M. Eskandarzadeh, Nano-Grained pure copper with high-strength and high-conductivity produced by equal channel angular rolling process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 211, No. 6, pp. 1085-1090, 2011.
 - [5] I. J. Son, H. Nakano, S. Oue, Sh. Kobayashi, H. Fukushima, Z. Horita, Pitting corrosion resistance of ultrafine-grained aluminum processed by severe plastic deformation, *Materials Transactions*, Vol. 47, No. 4, pp. 1163-1169, 2006.
 - [1] D. Wang, G. P. Bierwagen, Sol-Gel coatings on metals for corrosion protection, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 64, No. 4, pp. 327-338, 2009.
 - [2] B. S. Broujeni, E. A. Kharaji, E. Akbari, Investigation of time effect in surface mechanical attrition treatment (SMAT) process on commercial pure copper behavior, *New Processes of Material Engineering*, Vol. 9, No. 4, pp. 63-73, 2016. (in Persian فارسی)
 - [3] M. Sedighi, M. Mahmoodi, Experimental and numerical study of through thickness residual stresses distribution in sheet metals produced by ECAR,

- 661, 2017.
- [21] S. Adhami, M. Attarpour, A. Allafchian, Study of chloride ion concentration effect on the corrosion behavior of Alkoxysilane coating on copper substrate, *Corrosion Engineering Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 7-15, 2015. (in Persian فارسی)
- [22] S. Matin, M. Pakshir, R. B. Lari, K. M. Behbahani, The study of effect of ARB process on the corrosion behavior of AL-nano ZrO_2 composite, *New Processes of Material Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 87-94, 2015. (in Persian فارسی)
- [23] R. Baboian, *Corrosion Test and Standards: Application and Interpretation*, Second Edition, pp. 53-58, West Conshohocken, PA, ASTM International, 2005.
- [24] C. Y. Nam, J. H. Han, Y. H. Chung, M. C. Shin, Effect of precipitates on microstructural evolution of 7050 Al alloy sheet during equal channel angular rolling, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 347, No. 1, pp. 253-257, 2003.
- [25] Y. H. Chung, J. W. Park, K. H. Lee, An analysis of accumulated deformation in the equal channel angular rolling (ECAR) process, *Metals and Materials International*, Vol. 12, No. 4, pp. 289-292, 2006.
- [26] A. Azimi, S. Tutunchilar, G. Faraji, M. K. Besharati Givi, Mechanical properties and microstructural evolution during multi-pass ECAR of Al1100-O alloy, *Materials and Design*, Vol. 42, pp. 388-394, 2012.
- [27] M. Fadaie, M. Shariat, Evaluation of pitting corrosion of AA5050 nanostructure aluminum alloy produced by ARB in Chloride environment, *Material Engineering*, Vol. 2, pp. 75-85, 2010. (in Persian فارسی)
- [28] M. R. Sanaeian, R. S. Gharabagh, R. Sobhanverdi, M. Asadiasabad, An investigation of metallurgical factors effect on corrosion behavior of Zr-Nb alloy, *Corrosion Engineering Science*, Vol. 13, No. 3, pp. 71-77, 2015. (in Persian فارسی)
- [29] B. Davepon, J. W. Schultze, U. König, C. Rosenkranz, Crystallographic orientation of single grains of polycrystalline titanium and their influence on electrochemical processes, *Surface Coating Technology*, Vol. 169, pp. 85-90, 2003.
- [30] W. Li, D. Y. Li, Variation of work function and corrosion behaviors of deformed copper surfaces, *Applied Surface Science*, Vol. 240, No. 1, pp. 388-395, 2005.
- [31] M. Mahmoodi, M. Sedighi, D. A. Tanner, Investigation of through thickness residual stress distribution in equal channel angular rolled Al 5083 alloy by layer removal technique and X-ray diffraction, *Materials and Design*, Vol. 40, pp. 516-520, 2012.
- [32] M. Kotobi, M. Honarpisheh, Uncertainty analysis of residual stresses measured by slitting method in equal-channel angular rolled Al-1060 strips, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 52, No. 2, pp. 83-92, 2017.
- [33] M. Honarpisheh, E. Haghighat, M. Kotobi, Investigation of residual stress and mechanical properties of equal channel angular rolled St12 strips, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials Design and Applications*, 10.1177/1464420716652436, 2016.
- [6] W. Wei, K. Xia Wei, Q. Bo Du, Corrosion and tensile behaviors of ultra-fine grained Al-Mn alloy produced by accumulative roll bonding, *Materials Science and Engineering, A*, 454, pp. 536-541, 2007.
- [7] M. Hockauf, L. W. Meyer, D. Nickel, G. Alisch, T. Lampke, B. Wielag, L. Krüger, Mechanical properties and corrosion behavior of ultrafine-grained AA6082 produced by equal-channel angular pressing, *Journal of Materials Science*, Vol. 43, No. 23, pp. 7409-7417, 2008.
- [8] G. Meng, L. Wei, T. Zhang, Y. Shao, F. Wang, Ch. Dong, X. Li, Effect of microcrystallization on pitting corrosion of pure aluminum, *Corrosion Science*, Vol. 51, No.9, pp. 2151-2157, 2009.
- [9] D. Song, J. H. Jiang, P. H. Lin, D. H. Yang, Corrosion behavior of ultra-fine grained industrial pure Al fabricated by ECAP, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 19, No. 5, pp. 1065- 1070, 2009.
- [10] D. Song, J. H. Jiang, P. H. Lin, D. H. Yang, Improvement of pitting corrosion resistance for Al-Cu alloy in sodium chloride solution through equal-channel angular pressing, *Progress in Natural Science: Materials International*, Vol. 21, No. 4, pp. 307- 313, 2011.
- [11] K. D. Ralston, D. Fabijanic, N. Birbilis, Effect of grain size on corrosion of high purity aluminium, *ElectrochimicaActa*, Vol. 56, No. 4, pp. 1729-1736, 2011.
- [12] M. Sherif El-Sayed, A. El-Danaf Ehab, S. Soliman Mahmoud, A. Almajid Abdulhakim, Corrosion passivation in natural seawater of aluminum alloy 1050 processed by equal-channel-angular-press, *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 7, pp. 2846 - 2859, 2012.
- [13] G. R. Argade, N. Kumar, R. S. Mishra, Stress corrosion cracking susceptibility of ultrafine grained Al-Mg-Sc alloy, *Materials Science & Engineering, A*, 565, pp. 80-89, 2013.
- [14] A. Nikfahma, I. Danaee, A. Ashrafi, M. R. Toroghinejad, Effect of grain size changes on corrosion behavior of copper produced by accumulative roll bonding process, *Materials Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 1379-1386, 2013.
- [15] M. Honarpisheh, M. Dehghani, E. Haghighat, Investigation of mechanical properties of al/cu strip produced by equal channel angular rolling, *Procedia Materials Science*, Vol. 11, pp. 1-5, 2015.
- [16] M. Honarpisheh, M. R. Aghili, M. Kotobi, Experimental investigation of thermal conductivity of aluminum alloy 3003 produced by equal channel angular rolling process, *Journal of Modern Processes in Manufacturing and Production*, Vol. 4, No. 4, 2015.
- [17] S. Saki Entezami, M. Honarpisheh, A study on the hardness of 7075 and 5052 aluminum alloys in the equal channel angular rolling process, *Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège*, Vol. 85, pp. 879 - 889, 2016.
- [18] T. Kvackaj, A. Kovacova, M. Kvackaj, R. Kocisko, L. Litynska-Dobrzynska, V. Stoykac, M. Mihalikova, TEM studies of structure in OFHC copper processed by equal channel angular rolling, *Micron*, Vol. 43, No. 6, pp. 720-724, 2012.
- [19] A. Habibi, A. Ketabchi, Enhanced properties of nano-grained pure copper by equal channel angular rolling and post-annealing, *Materials and Design*, Vol. 34, pp. 483-487, 2012.
- [20] A. Habibi, A. Ketabchi, M. Eskandarzadeh, Fatigue behavior of nano-grained pure copper processed by equal channel angular rolling, *International Journal of Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, pp. 656-