

رابطه ساختار و رفتار خوردگی پوشش آمورف/ نانوکریستالی Fe-Ni-Cr، قبل و بعد از عملیات حرارتی

محسن نوری^{۱*}، امیر براهیمی^۲، احسان کریمی^۳، مجید کریمیان^۴، مجید طاووسی^۵

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سرامیک، بخش مهندسی مواد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

^۳ دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

^۴ استادیار مهندسی مکانیک، دانشکده مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

^۵ استادیار شناسایی و انتخاب مواد مهندسی، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

* نویسنده مسئول: mohsen.nouri@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۶/۲۸ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۱۰/۲۸

چکیده

هدف از این پژوهش بررسی رفتار خوردگی پوشش آمورف/نانوکریستالی Fe-Ni-Cr می‌باشد. در همین راستا فرایند رسوب نشانی الکتریکی در چگالی جریان‌های مختلف و همچنین فرایند عملیات حرارتی در دمای 250°C در مدت زمان‌های مختلف انجام شد. نمونه‌های تولیدی به وسیله روش پراش پرتو ایکس و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان مشخصه‌یابی شدند. رفتار خوردگی پوشش‌ها به روش آنالیز پتانسیو استات در الکترولیت ۳٪ NaCl مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که پوشش کاملاً آمورف Fe-Ni-Cr را می‌توان از حمام کلرایدی آن در چگالی جریان‌های بالاتر از 30 A/dm^2 ایجاد نمود. پوشش‌های تولیدی آمورف رفتار خوردگی خوبی با پتانسیل خوردگی و چگالی جریان به ترتیب در بازه $350-400\text{ mV}$ و $0.2-0.5\text{ }\mu\text{A/cm}^2$ به ترتیب از خود نشان می‌دهند. حین عملیات حرارتی فاز آمورف به صورت نانو بلورهای Fe و Fe-Ni متبلور می‌شود. مقاومت پوشش‌ها با بلوری کردن فاز آمورف کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: خوردگی، پوشش، رسوب‌دهی الکتریکی، آمورف/نانوکریستال، خوردگی؛

The Corrosion Behavior of Amorphous-Nanocrystalline Fe-Cr-Ni Coatings during Electrodeposition and Subsequent Annealing

M. Nouri ^{1*}, A. Barahimi ², M. Karimian ³, Eh. Karimi ⁴, M. Tavoosi ⁵

¹ graduate student, Department of Ceramics , Materials Engineering Department , Faculty of Engineering , Tarbiat Modarres University

² Graduate Student , School of Mechanical Engineering , Islamic Azad University of Khomeini Shahr

³ Student , Faculty of Materials Engineering, University of Malek Ashtar

⁴ Assistant Professor of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering , Islamic Azad University of Khomeini Shahr

⁵ Identification and selection of materials engineering professor , School of Materials Engineering, University of Malek Ashtar

* Corresponding Author: mohsen.nouri@modares.ac.ir

Submission: 2015, 09, 19 Acceptance: 2016, 01, 18

Abstract

The corrosion behaviors of electrodeposited Fe-Ni-Cr amorphous- nanocrystalline coatings were the aim of this study. For this regards, the electrodeposition process was done at different current density and the annealing process was also done at 250°C for different periods of time. The produced samples were characterized using X-ray diffraction (XRD) and field emission scanning electron microscopy (FE-SEM). The corrosion behaviors of coatings were also examined in NaCl 3.5% electrolyte by potansiostate analysis. The results showed that, the full amorphous Fe-Ni-Cr coating can successfully produced by electrodeposition processing from chloride bath at current density higher than 30 A/dm². The produced as-deposited amorphous coatings exhibit good corrosion resistance with the corrosion potential and current density in the range of 350-400 mV and 0.2-0.5μA/cm², respectively. By annealing the produced coating, the amorphous phase crystallized to nanocrystalline Fe and FeNi phases. The corrosion resistance of coatings decreases by crystallization of amorphous phase.

Keywords: Coating; Electrodeposition; Amorphous/Nanocrystalline; Corrosion;

۱- مقدمه

مواد آمورف/نانو کریستال به روش‌های مختلفی مانند تغییر شکل پلاستیک شدید، آسیا کاری مکانیکی، چگالش گاز خنثی و رسوب نشانی الکتریکی، سنتز می‌شوند. توجه ویژه به این مواد به دلیل سختی، چکش خواری، مقاومت به سایش و استحکام خستگی بالای آن‌ها می‌باشد [۱-۴]. از آنجایی که این مواد در ساختار خود فاقد نظم بلند دامنه بوده، بنابراین رفتار خوردگی آن‌ها با رفتار خوردگی مواد بلورین متفاوت خواهد بود. بنابراین، درک ارتباط بین ریزساختار و خواص خوردگی این مواد از هر دو نظر مهندسی و الکتروشیمیایی حائز اهمیت است.

گزارش‌های بسیاری مبنی بر تولید و مشخصه یابی آلیاژهای آمورف/نانوکریستال که به روش ذوب ریسی و آلیاژ سازی مکانیکی موجود است. اما این روش‌ها محصولاتی به شکل نوار یا پودر تولید می‌کنند که کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. روش دیگری که به صورت مرسوم برای تولید این آلیاژها استفاده می‌شود، رسوب نشانی الکتریکی می‌باشد. این روش قابلیت رقابت با دو روش دیگر را داراست.

دو مزیت عمده آن تهیه آسان نمونه‌ها در اشکال و هندسه مختلف و همچنین تغییر ترکیب در دامنه‌ای وسیع، با تغییر ترکیب در دامنه‌ای وسیع، با تغییر پارامترهای رسوب دهی می‌باشد. علاوه بر این رسوب دهی یک روش ارزان برای تولید قطعات می‌باشد [۷، ۸].

مشاهده شده که آلیاژهای آمورف رسوب نشانی شده که حاوی عناصر پسو کننده مانند کروم هستند رفتار خوردگی بهتری از خود نسبت به مشابه بلوری شان نشان می‌دهند [۷]. آلیاژهای آهن-نیکل-کروم (Fe-Ni-Cr) مشهورترین پوشش‌های پایه آهن بوده و به دلیل خواص خوردگی، مکانیکی و فیزیکی ویژه‌ای که دارند بصورت گسترده‌ای در صنایع هوافضا، دفاعی و نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرند [۹-۱۲].

با وجود مطالعاتی درباره رسوب دهی الکتریکی و خواص فیزیکی آلیاژهای Fe-Ni-Cr، ارتباط بین ریزساختار و خواص خوردگی این آلیاژها تا کنون به خوبی مطالعه نشده است. علاوه بر این درک تأثیر عملیات حرارتی بر ساختار و خواص خوردگی و ساختار هنوز یک چالش بزرگ محسوب می‌شود. بنابراین، این مطالعه بر مشخصه‌یابی ساختاری و خوردگی پوشش آمورف/نانو کریستال Fe-Ni-Cr قبل و بعد از عملیات حرارتی متمرکز خواهد شد.

۲- مواد و روش تحقیق

فرایند رسوب دهی در یک حمام کلرایدی که حاوی منابع آهن، نیکل و کروم و افزودنی‌ها بود صورت گرفت. ترکیب حمام در جدول ۱ آمده است. این حمام قبلاً برای رسوب نشانی الکتریکی این آلیاژ آزموده شده بود [۱۱-۱۴]. تمامی آزمایش‌ها در 30°C و $\text{pH}=1$ و ضخامت ثابت $5\mu\text{m}$ انجام شد. آلیاژها بر روی زیر لایه مسی نشاند و از گرافیت فشرده به عنوان آند استفاده شد. عملیات حرارتی نیز در بازه $250-350^{\circ}\text{C}$ در زمدت زمان‌های مختلف انجام شد. قبل از عملیات حرارتی نمونه در یک لوله کوارتزی آب بندی شده و به خلأ $3-10\text{ Pa}$ رسانده شدند.

از یک دستگاه پراش پرتو ایکس (Cu K α radiation ($\lambda=0.15406\text{ nm}$; 40 kV; Philips PW3710)) برای بررسی ریزساختار استفاده شد. همچنین برای تخمین اندازه کریستالیت ها روش شرر مورد استفاده قرار گرفت [۱۵]. ساختار و مورفولوژی نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی گسیل میدان (VEGA-TESCAN-XMU) بررسی و آنالیز شیمیایی به وسیله روش EDS تهیه شد. برای اندازه گیری مقاومت به خوردگی پوشش‌های مختلف، آزمایش خوردگی الکتروشیمیایی به وسیله دستگاه پتانسیو استات (EG&G Model 273A) با نرخ روبش 1 mV/s ، پتانسیل اولیه -250 و پتانسیل نهایی 250 مورد استفاده قرار گرفت. محلول و الکترود مرجع به ترتیب $3\%/5\text{ NaCl}$ و Ag/AgCl انتخاب شد [۱۶].

جدول ۱- ترکیب حمام رسوب نشانی الکتریکی پوشش Fe-Ni-Cr

ماده	غلظت (mol/l)
$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.04-0.16
$\text{CrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.37-0.5
$\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.025-0.05
NH_4Cl	0.90
H_3BO_3	0.48
KBr	0.14
$\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0.25
HCOOH	0.75
$\text{C}_2\text{H}_4\text{O}_3$	0.65

۳- نتایج و بحث

۳-۱- فرایند پوشش دهی

عوامل گوناگونی مانند چگالی جریان، اختلاف پتانسیل، دما، ترکیب حمام، گردش محلول، فاصله بین آند و کاتد روی ساختار و مورفولوژی ساختار حاصله موثرند [۸]. تغییر اندکی در یکی از پارامترهای مذکور موجب تغییر ریز ساختار پوشش خواهد شد. در این تحقیق تمامی عوامل به استثناء چگالی جریان ثابت نگاه داشته شد و تأثیر آن بر روی ریز ساختار و خواص خوردگی مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱-۱- مشخصه یابی ساختاری

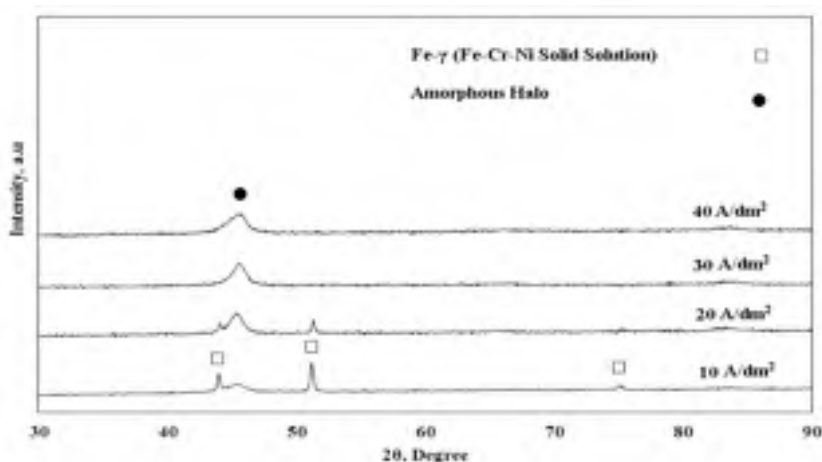
به منظور درک تأثیر سرعت رسوب نشانی بر ریزساختار و ترکیب پوشش های Fe-Ni-Cr، رسوب نشانی الکتریکی در چگالی جریان های مختلف در بازه $10-40 \text{ A/dm}^2$ انجام شد و پوشش های حاصل بوسیله XRD و EDS مورد بررسی قرار گرفت. الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش های Fe-Ni-Cr در شکل ۱ نشان داده شده اند. همانگونه که مشاهده می شود ساختار در چگالی جریان های کم شامل نانوبلورهای Fe- γ و ساختار آمورف می باشد. با افزایش چگالی جریان، شدت پیک Fe- γ کاهش یافته و بر پهنای آن افزوده می شود که حاکی از کاهش اندازه بلورها

می باشد (جدول ۲).

با توجه به شکل ۱، با افزایش چگالی جریان پیک Fe- γ کاملاً ناپدید شده و تنها هاله آمورف (در 2θ بین $40-50^\circ$ باقی می ماند). با توجه به این نکات با افزایش چگالی جریان ساختار از حالت کریستالی به حالت آمورف تبدیل می شود.

در واقع دو دلیل عمده برای تشکیل فاز آمورف در چگالی جریان بالا وجود دارد:

۱- افزایش سرعت رسوب گذاری با افزایش چگالی جریان: در طول رسوب گذاری الکتریکی کاتیون ها در فصل مشترک محلول- کاتد به اتم های فلزی احیاء می شوند. سپس، تعدادی اتم در سطح زیر لایه با مکانیزم نفوذ، مهاجرت کرده و تشکیل فیلم جامد را می دهند. اگر سرعت رسوب نشانی کم باشد (در چگالی جریان های پایین) اتم آزادانه در سطح زیر لایه مهاجرت نموده و جایگاهی را با کمترین انرژی آزاد برای خود خواهد یافت. در این شرایط فیلمی بلورین (فاز پایدار)، تشکیل می شود. با افزایش نرخ رسوب گذاری (افزایش چگالی جریان) تعداد کاتیون های احیاء شده به صورت تصاعدی افزایش می یابد. در این شرایط حرکت اتمی کاهش یافته و تشکیل ساختارهای غیر تعادلی محتمل خواهد شد [۱۰-۱۲].



شکل ۱- الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش های Fe-Ni-Cr.

جدول ۲- مشخصه یابی ساختاری پوشش های Fe-Ni-Cr در چگالی جریان های مختلف

چگالی جریان (A/dm^2)	فاز	اندازه کریستالیت (nm)
۱۰	آمورف + نانوکریستال	۵۰+۵
۲۰	آمورف + نانوکریستال	۱۵+۵
۳۰	آمورف	-
۴۰	آمورف	-

Fe-Ni به دلیل نزدیک بودن پتانسیل احیاء این دو عنصر مسطح و نرم خواهد بود. با افزایش چگالی جریان واحیاء بیشتر Cr، مورفولوژی پوشش تحت تأثیر قرار می گیرد. زیرا که پتانسیل احیاء Cr بسیار متفاوت از Fe و Ni است. در این شرایط محلول جامد Fe-Ni باعث می شود چگالی جریان به صورت غیر متقارن در سطح توزیع و موجب پدیده پلاریزاسیون شود. بنابراین چگالی جریان در نقاط مختلف کاتد، متفاوت خواهد بود. احیاء کروم روی نقاط Fe-Ni انجام می شود. به این مفهوم که واکنش الکتروشیمیایی در گوشه های تیزتر بیشتر اتفاق می افتد و منتهی به ساختار گل کلمی می شود [۱۸].

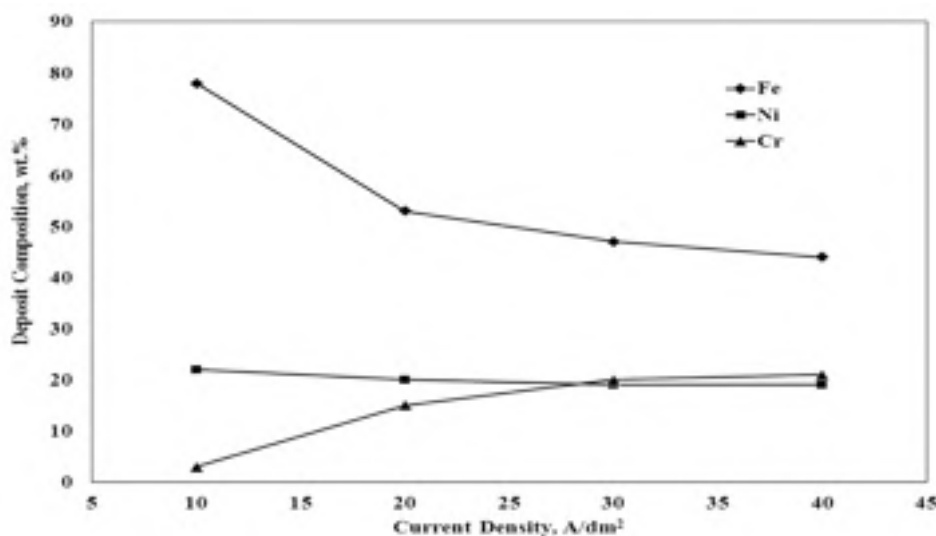
منحنی های پلاریزاسیون Fe-Ni-Cr آمورف/نانوکریستال رسوب نشانی شده در چگالی جریان های مختلف در شکل ۴ نشان داده شده اند. تغییرات پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی می شود. پتانسیل خوردگی و چگالی جریان نیز در شکل ۵ نشان داده شده اند. بر اساس این نمودار افزایش چگالی جریان منجر به تغییر در رفتار خوردگی می شود. پتانسیل و چگالی جریان خوردگی پوشش های ایجاد شده در چگالی جریان 10 A/dm^2 ، به ترتیب -635 mV و $5/2 \mu\text{A/cm}^2$ می باشد. می توان مشاهده کرد که با افزایش چگالی جریان (افزایش درصد کروم و تشکیل فاز آمورف) پتانسیل خوردگی از -635 mV به حدود -375 mV انتقال می یابد. در این شرایط، چگالی جریان خوردگی به وضوح از $5/2 \mu\text{A/cm}^2$ به $0/15 \mu\text{A/cm}^2$ کاهش می یابد. با توجه به مطالب بالا، پوشش های تولید شده در چگالی جریان های بالاتر مقاومت به خوردگی بهتری در محلول $3/5\% \text{ NaCl}$ از خود نشان می دهند.

۲- افزایش درصد Cr با افزایش چگالی جریان: درصد عناصر آهن، نیکل و کروم به صورت تابعی از چگالی جریان در شکل ۲ آمده است. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش چگالی جریان درصد Cr در پوشش افزایش می یابد. چرا که کروم در پتانسیل منفی تری نسبت به آهن و نیکل احیاء می شود. در واقع افزایش درصد کروم دلیل اصلی تشکیل فاز آمورف در چگالی جریان های بالا است. در همین زمینه مک بی و همکارانش گزارش نموده اند که ساختار ساختار پوشش Fe-Ni-Cr هنگامی که مقدار کروم بیش از $12/5\%$ است، از حالت کریستالی به حالت آمورف در می آید [۱۷].

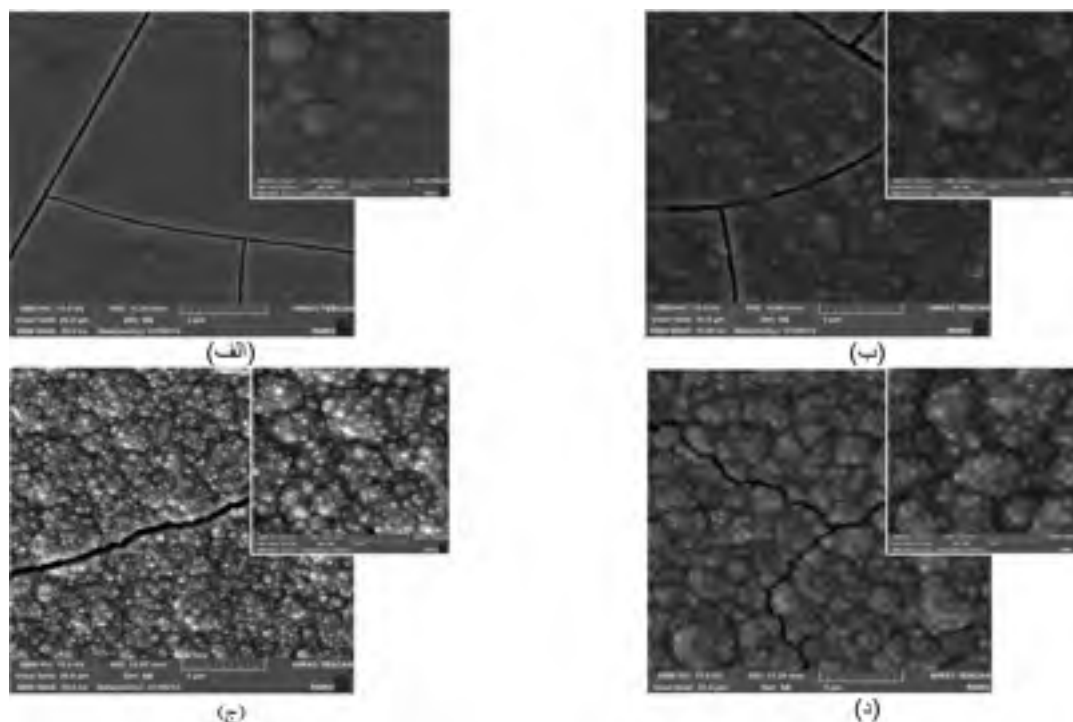
تصاویر SEM پوشش های رسوب نشانی شده در چگالی جریان های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده اند. همان گونه که ماهده می شود، بدون توجه به پارامترهای آبرکاری در تمامی پوشش ها تعدادی میکروتترک شبیه به میکروتترک های که در پوشش کروم سخت وجود دارد، دیده می شود [۱۸]. وجود میکروتترک ها این احتمال را به وجود می آورد که پوشش ها خواص مکانیکی و خوردگی خوبی نداشته باشند.

با توجه به تصاویر SEM در بزرگنمایی های بالاتر، پوشش هایی که در چگالی جریان بالاتری ایجاد شده اند، ساختار گل کلمی از خود نشان می دهند. در مقابل پوشش های تهیه شده در چگالی جریان های پایین تر دارای ساختار خاصی نیستند. به وضوح مشاهده می شود که سطح گل کلمی متشکل از مرتبه های مختلف میکرو/نانوساختارهاست که خود شبیه ساختار گل کلمی اند.

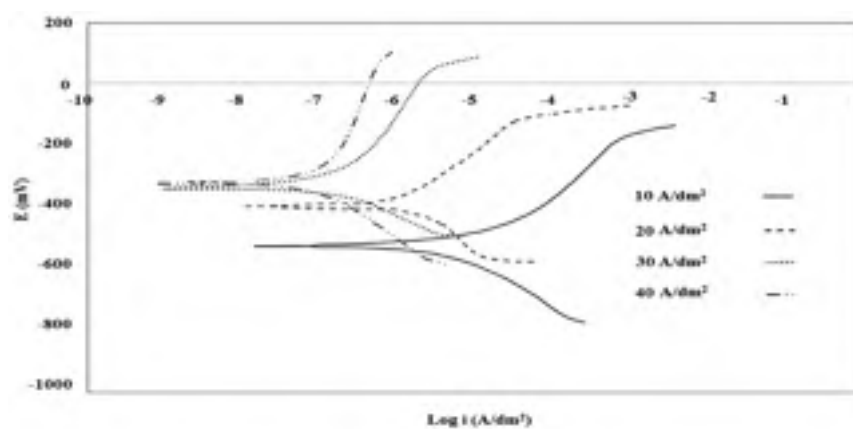
در واقع افزایش درصد Cr دلیل اصلی تشکیل مورفولوژی گل کلمی است. درصد Cr در پوشش های تولیدی در چگالی جریان های پایین تر کم بوده و احیاء این عنصر فرایند احیاء Fe-Ni را تحت تأثیر قرار خواهد داد [۱۶]. در این شرایط مورفولوژی سطح پوشش



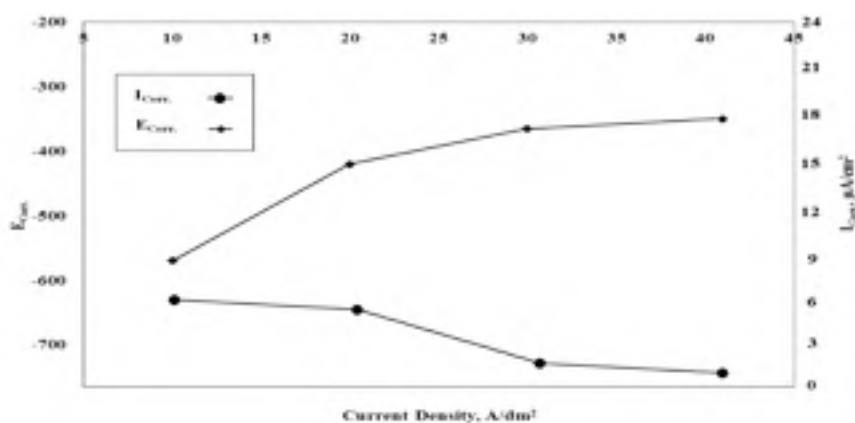
شکل ۲- درصد Fe, Ni و Cr بر حسب چگالی جریان در پوشش های رسوب نشانی شده.



شکل ۳- تصاویر SEM پوشش‌های رسوب نشانی شده در چگالی جریان‌های مختلف الف) ۱۰ (ب) ۲۰ (ج) ۳۰ و د) ۴۰ A/dm^2 .



شکل ۴- منحنی‌های پلاریزاسون تافل پوشش‌های رسوب نشانی الکتریکی در الف) ۱۰ (ب) ۲۰ (ج) ۳۰ و د) ۴۰ A/dm^2 .



شکل ۵- پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی بر حسب چگالی جریان پوشش‌دهی.

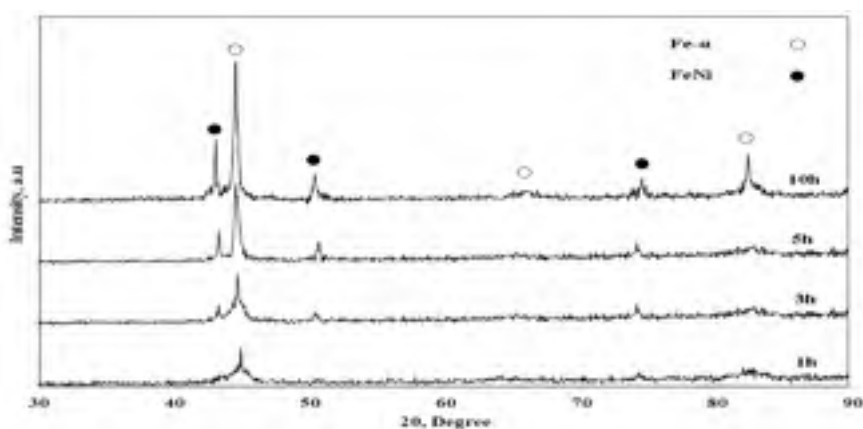
خوردگی پوشش‌های تولیدی، پوشش آمورفی که در 40 A/dm^2 ایجاد شده بود مورد، عملیات حرارتی در مدت زمان‌ها و دماهای مختلف قرار گرفت.

۳-۲-۱- مشخصه یابی ساختاری

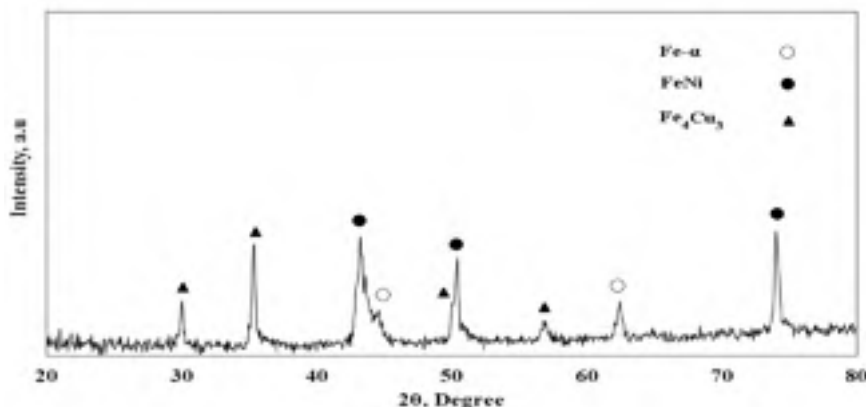
الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش‌ها بعد از آنیل در 250°C در مدت زمان‌های متفاوت در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. بر اساس الگوهای XRD در مرحله آغازین عملیات حرارتی، تنها پیک $\text{Fe-}\alpha$ در پوشش ظاهر می‌شود. با افزایش زمان عملیات حرارتی در این دما، هاله آمورف ناپدید شده و چندین پیک که مربوط به فاز بین فلزی Fe-Ni ظاهر می‌شوند. بنابراین تغییر فاز پوشش Fe-Ni-Cr را حین عملیات حرارتی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:



با افزایش بیشتر زمان آنیل، تنها پیک‌های $\text{Fe-}\alpha$ و FeNi باریک‌تر شده و به شدت آن‌ها افزوده می‌شود که حاکی از بزرگ‌تر شدن اندازه کریستالیت‌ها و کاهش کرنش شبکه می‌باشد. از این رو سائز کریستالیت‌ها Fe-Ni و Fe بعد از آنیل در 250°C به مدت ۱۰h به ترتیب ۷۰ و ۵۵nm می‌رسد.



شکل ۶- الگوهای پراش پرتو ایکس پوشش‌ها بعد از آنیل در 250°C در مدت زمان‌های متفاوت.



شکل ۷- الگوی XRD پوشش آمورف بعد از عملیات حرارتی در 350°C .

به هر حال این اثرات مربوط به عنصر پسیو کننده Cr و نسبت حجمی بالاتر فاز آمورف می‌باشد (شکل ۱ و ۳). در واقع، آلیاژهای آمورف بدون عناصر پسیو کننده، مانند Fe-B و Co-B، مقاومت به خوردگی پایین‌تری نسبت به همتای بلوری خود دارند [۱۱]. این مقاومت به خوردگی بالاتر به خوردگی که در آلیاژ آمورف تحقیق حاضر دیده می‌شود می‌تواند دو دلیل عمده داشته باشد؛ ایجاد غیر یکنواختی شیمیایی در آلیاژهای بلوری که از تشکیل فیلم یکنواخت جلوگیری می‌کند، و انحلال فعال مواد آمورف که تجمع ذرات پسیو را در فصل مشترک آلیاژ-محلول قبل از تشکیل فیلم پسیو تضمین می‌کند که این امر باعث ایجاد سریع فیلم پسیو بسیار محافظ می‌شود [۱۱ و ۱۴].

۳-۲-۲- فرایند آنیل

آلیاژهای آمورف در حالت ناپایداری قرار دارند و هنگامی که تحت فشار یا دما قرار گیرند، متبلور خواهند شد. اگرچه توزیع مناسب فاز بلوری در ماتریس آمورف می‌تواند باعث بهبود خواصی مانند سختی و مقاومت به سایش شود، اما برخی از خواص ذاتی مانند مقاومت به خوردگی ممکن است حین فرایند آنیل از بین بروند [۲]. به منظور بررسی تأثیر فرایند آنیل بر ساختار و رفتار

زمان آنیل (تبلور فاز آمورف به Fe و Fe-Ni)، پتانسیل خوردگی به صورت نامطلوبی از -375mV به -572mV انتقال می یابد. در این شرایط چگالی جریان خوردگی از $0.15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ به $4.82\mu\text{A}/\text{cm}^2$ می رسد. با در نظر گرفتن مطالب مذکور، می توان نتیجه گرفت که پوشش آمورف Fe-Ni-Cr در محلول 3.5% NaCl مقاومت به خوردگی بهتری از همتای بلوری خود نشان می دهد و متبلور نمودن آن اثرات مخربی بر رفتار خوردگی پوشش ها دارد. افت مقاومت به خوردگی پوشش های آمورف را بعد از تبلور می تواند به دلیل افزایش کسر حجمی مرزخانه و نقاط برخورد سه تایی (به عنوان مکان های مستعد برای خوردگی) باشد [۲۰-۲۲].

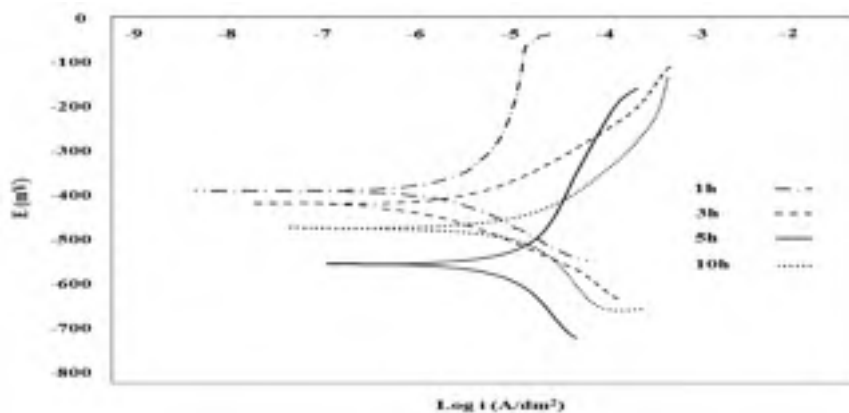
نتیجه گیری

پوشش آمورف/نانوکریستالی Fe-Ni-Cr را می توان به صورت موفقیت آمیزی از حمام کلرایدی رسوب نشانی کرد. پوشش های آمورف سه تایی متراکم و یکنواخت می باشند. ساختار پوشش های رسوب نشانی شده در کمتر از $20\text{A}/\text{dm}^2$ ترکیبی از محلول جامد بین فلزی و فاز آمورف می باشند. پوشش های آمورف ایجاد شده، مقاومت به خوردگی خوبی از خود نشان داده و پتانسیل

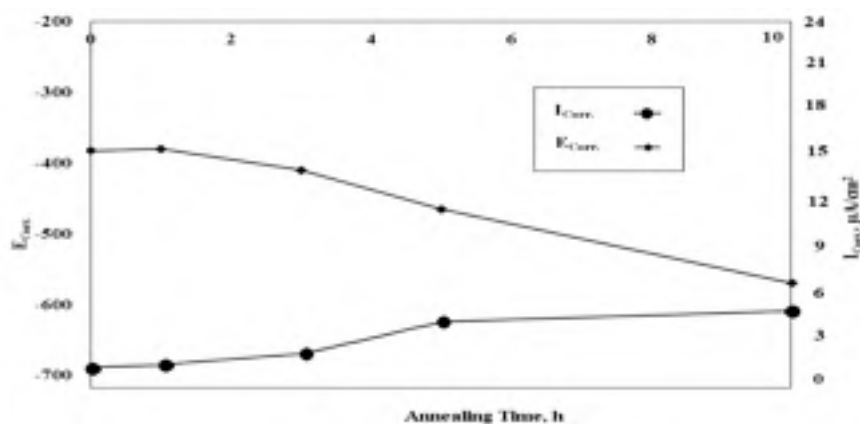
الگوی XRD پوشش آمورف بعد از عملیات حرارتی در 350°C چندین پیک Fe_4Cu_3 به مدت ۱ ساعت در شکل ۷ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می شود با افزایش دما به 350°C چندین پیک Fe_4Cu_3 هم زمان با پیک های Fe و Fe-Ni ظاهر می شوند. این بدین معنی است که، هنگام آنیل در دمای بالا، اتم های Cu می توانند از زیر لایه به پوشش نفوذ نموده اند. مشخص است که نفوذ اتم های مس به داخل پوشش اثرات مخربی خواهد داشت. با توجه به این نکته بهینه ترین دما برای عملیات حرارتی این پوشش 250°C پیشنهاد می شود.

۳-۲-۲- رفتار خوردگی

منحنی پلاریزاسون پوشش آمورف Fe-Ni-Cr بعد از عملیات حرارتی در 250°C در مدت زمان های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین تغییر پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی این نمونه ها بر حسب زمان آنیل در شکل ۹ به نمایش درآمده است. براساس این شکل ها آنیل نمونه های تولیدی منجر به تغییر رفتار خوردگی می شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، پتانسیل خوردگی و چگالی جریان پوشش های آمورف رسوب نشانی شده به ترتیب حدود -375mV و $0.15\mu\text{A}/\text{cm}^2$ می باشد. می توان مشاهده کرد با افزایش



شکل ۸- منحنی پلاریزاسون پوشش آمورف Fe-Ni-Cr بعد از عملیات حرارتی در 250°C در مدت زمان های مختلف.



شکل ۹- همچنین تغییر پتانسیل خوردگی و چگالی جریان خوردگی بر حسب زمان آنیل.

حرارتی به دلیل تبلور فاز آمورف و افزایش درصد حجمی مرزخانه‌ها و نقاط سه تایی که مکان‌های مستعد جهت ایجاد خوردگی می‌باشند، مقاومت به خوردگی پوشش کاهش می‌یابد.

خوردگی و چگالی جریان خوردگی به ترتیب $350-400 \text{ mV}$ و $0.2-0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ را دارا می‌باشند. با عملیات حرارتی پوشش‌ها، فاز آمورف به نانوکریستال‌های Fe- α (۲۰ نانومتری) و Fe-Ni (۱۵ نانومتری) بین فلزی تبدیل می‌شوند. با افزایش زمان عملیات

مراجع

- [1] S.H. Whang, Nanostructured Metals and Alloys: Processing, Microstructure, Mechanical Properties and Applications, Woodhead Publishing Limited, New York, 2011.
- [2] C. Suryanarayana, A. Inoue, Bulk Metallic Glasses, Taylor and Francis Group, New York, 2011.
- [3] C. Suryanarayana, Mechanical Alloying and Milling, Taylor and Francis Group, New York, 2004.
- [4] C. Suryanarayana, Nonequilibrium Processing of Materials, Pergamon, Oxford, UK, 1999.
- [5] H.S. Kim, M.B. Bush, The effects of grain size and porosity on the elastic modulus of nanocrystalline materials, Nanostructured Materials, Vol. 11, 1999, Pp. 361-367.
- [6] K.D. Ralston, D. Fabijanic, N. Birbilis, Effect of grain size on corrosion of high purity aluminium, Electrochimica Acta, Vol. 56, 2011, Pp. 1729-1736.
- [7] T. Watanabe, Nano plating: Microstructure Control Theory of Plated Film and Data Base of Plated Film Microstructure, Elsevier, Tokyo, 2004.
- [8] L.P. Bicell, B. Bozzini, C. Mele, L.D. Urzo, A Review of Nanostructural Aspects of Metal Electrodeposition, Int. J. Electrochem. Sci., vOL. 3, 2008, Pp. 356-408.
- [9] B. Li, A. Lin, X. Wu, Y. Zhang, F. Gan, Electrodeposition and characterization of Fe-Cr-P amorphous alloys from trivalent chromium sulfate electrolyte, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 453, 2008, Pp. 93-101.
- [10] C.A.C. Souza, J.E. May, A.T. Machado, A.L.R. Tachard, E.D. Bidoia, Preparation of Fe-Cr-P-Co amorphous alloys by electrodeposition, Surface and Coatings Technology, Vol. 190, 2005, Pp. 75-82.
- [11] J.C. Kang, S.B. Lalvani, Electrodeposition and characterization of amorphous Fe-Ni-Cr-based alloys, Journal of Applied Electrochemistry, Vol. 25, 1995, Pp. 376-383.
- [12] A.G. Dolati, M. Ghorbani, A. Afshar, The electrodeposition of quaternary Fe-Cr Ni-Mo alloys from the chloride-complexing agents electrolyte, Surface and Coatings Technology, Vol. 166, 2003, Pp. 105-110.
- [13] F. Wang, K. Itoh, T. Watanabe, Relationship between the crystallographic structure of electrodeposited Fe-P alloy film and its thermal equilibrium phase diagram, Materials Transactions, Vol. 44, 2003, Pp. 127-132.
- [14] J.C. Kang, S.B. Lalvani, C.A. Melendres, Electrodeposition and characterization of amorphous Fe-Ni-Cr- based alloys, Applied Electrochemistry, Vol. 6, 1994, Pp. 376-383.
- [15] B.D. Cullity, Elements of X-ray Diffraction, Addison-Wesley Publishing Company, London 1956.
- [16] T. Yanai, K. Shiraishi, Y. Watanabe, M. Nakano, T. Ohgai, K. Suzuki, H. Fukunaga, Electroplated Fe-Ni films prepared from deep eutectic solvents, Magnetism, IEEE Transactions, Vol. 50, 2014, Pp. 1-4.
- [17] C. L. McBee, J. Kruger, Nature of passive films on iron-chromium alloys, Electrochimical Acta, Vol. 17, 1972, Pp. 1337-1341.
- [18] L. Sziraki, E. Kuzmann, K. Papp, C.U. Chisholm, M.R. El-Sharif, K. Havancsak, Electrochemical behavior of amorphous electrodeposited chromium coatings, Materials Chemistry and Physics, Vol. 133, 2012, Pp. 1092-1100.
- [19] Q. Yu, Z. Zeng, W. Zhao, M. Li, X. Wu, Q. Xue, Fabrication of adhesive superhydrophobic Ni-Cu-P alloy coatings with high mechanical strength by one step electrodeposition, Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects Vol. 427, 2013, Pp. 1-6.
- [20] L. Wang, Y. Lin, Z. Zeng, W. Liu, Q. Xue, L. Hu, J. Zhang, Electrochemical Corrosion Behavior of Nanocrystalline Co Coatings Explained by Higher Grain Boundary Density, Electrochimica Acta, Vol. 52, 2007, Pp. 4342-4350.
- [21] A. Vinogradov, T. Mimaki, D.S. Hashimoto, On the corrosion behaviour of ultra-Fine grain copper, Scripta Materialia, Vol. 41, 1999, Pp. 319-326.
- [22] L. Fu, J. Yang, Q. Bi, W. Liu, Electrochemical behavior of nanocrystalline Fe₈₈Si₁₂ Alloy in 3.5 wt% NaCl Solution, Material Science and Applications, Vol 2, 2011, Pp. 435-438.

