

بررسی فاکتورهای دما، تلاطم و نوع محیط خورنده بر جریان خوردگی پوشش الکتریکی 87/Ni-13wt.:/P با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل

لاله رضازاده^{۱*}، مرتضی زنده‌رحیمی^۲

^۱ کارشناس ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

^۲ استاد گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

* نویسنده مسئول: Rezlaleh@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۳۱

چکیده

در این تحقیق، پوشش آلیاژی نیکل- فسفر با تکنیک رسوب‌دهی الکتریکی به روش جریان مستقیم، بر روی فولاد ضد زنگ ۳۰۴، ایجاد شد. به منظور تعیین ریزساختار و ترکیب اصلی پوشش از SEM و EDS و نیز جهت تعیین اندازه ذرات کریستالی از XRD و TEM استفاده گردید. مقاومت به خوردگی پوشش با آزمون پلاریزاسیون تافل مورد مطالعه قرار گرفت. در ادامه با استفاده از روش طراحی آزمایش «فاکتوریل» تأثیر پارامترهای دما، تلاطم و نوع محیط خورنده در دو سطح به صورت جداگانه و متقابل بر جریان خوردگی پوشش با ۱۳ درصد وزنی فسفر بررسی و نیز منحنی‌های تراز و سطح پاسخ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد دما، کمترین و محیط، بیشترین تأثیر را بر روی جریان خوردگی پوشش دارند. هم‌چنین، اندرکنش دو عاملی بین تلاطم و محیط، بیشترین و اندرکنش سه عاملی بین دما، تلاطم و محیط، کمترین تأثیر را بر میزان جریان خوردگی پوشش دارا می‌باشد و زمانی که سه پارامتر دما، تلاطم و محیط در پایین‌ترین و بالاترین سطح خود قرار دارند، جریان خوردگی پوشش به ترتیب ۱/۰۸ و ۴۹ میکروآمپر بر سانتیمتر مربع به دست آمد.

کلمات کلیدی: پوشش آلیاژی نیکل- فسفر، رسوب‌دهی الکتریکی، روش فاکتوریل، اندرکنش، منحنی تراز.

Investigation of Temperature, Agitation and Type of Corrosive Bath on Corrosion Current of 87%Ni-13%P Electrodeposited Coating by Using Factorial Method

Laleh Rezazadeh ^{1*}, Morteza Zandrahimi ²

¹ M.Sc. of Metallurgy Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.

² Professor of Metallurgy Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman.

* Corresponding Author: rezlaleh@yahoo.com

Submission: February 17, 2013 Acceptance: August 22, 2013

Abstract

In this study, nickel phosphorus coating was prepared by electrodeposition method on 304 stainless steel substrate. Microstructure and chemical composition of coating were investigated by SEM and EDS analysis. In order to identify the phases and calculating the nickel grain size, XRD and TEM analysis were used. Corrosion behavior of coating was studied by Tafel polarization experiments. Main effects and interaction between temperature, agitation and type of corrosive bath in two levels on corrosion current of Ni-13wt.%P coating was also investigated by using experimental designs such as Factorial method. The results demonstrated that the types of corrosive bath and temperature have the most and the least effect on corrosion current, respectively. In addition, the interaction between two parameters, namely the type of corrosive bath and agitation and also the interaction between three parameters have maximum and minimum effect on corrosion current, respectively. Investigation of contour plots and surface responses showed that an optimum state was obtained when three parameters were at low level and also, the maximum corrosion current of coating determined when the parameters were at high level.

Keywords: Ni-P alloy coating, Electrodeposition, Factorial method, Interaction, Contour plot.

۱- مقدمه

پوشش‌های آلیاژی نیکل- فسفر به علت پتانسیل بالقوه و خواص مناسب از جمله سختی بالا، خصوصیات مغناطیسی، مقاومت به سایش و خوردگی بالا به عنوان پوشش محافظ در صنایع ماشین‌سازی، هوا و فضا، غلتک‌ها، ماشین‌های نورد و شکل‌دهی و بسیاری از صنایع دیگر کاربرد دارد. بررسی انجام گرفته نشان دهنده آن است که میزان فسفر موجود در پوشش تنها فاکتور مؤثر بر مقاومت به خوردگی نیست و فاکتورهایی دیگری نیز اثرگذارند. تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه بررسی مکانیزم خوردگی پوشش نیکل- فسفر ایجادشده به روش الکتروکترولس و الکتریکی در محیط‌های اسیدی و قلیایی و در دماهای متفاوت به صورت تک پارامتری انجام گرفته است [۱-۴]. فلیس و همکارانش خوردگی پوشش آلیاژی الکتروکترولس نیکل- فسفر را در محلول ۰/۱ مولار نمک طعام به مدت ۵۰۰ ثانیه بررسی نمودند. در این تحقیق، فرورفتگی‌های ناشی از خوردگی همراه با ترک‌های داخلی، بر روی سطح پوشش مشاهده گردید و ترکیب $Ni_3(PO_4)_2 \cdot 8H_2O$ ، به عنوان لایه پسیوشده، گزارش شد [۵]. پتخو مقاومت به خوردگی پوشش را در محیط اسیدی (۰/۵ مولار سولفوریک اسید) بررسی نمود و برای پوشش حاوی ۶/۶ تا ۱۳/۴ درصد وزنی فسفر، پدیده روئین^۱ شدن را مشاهده نمود [۶]. در تحقیقی دیگر توسط بزینی، خوردگی فرسایشی پوشش آلیاژی نیکل- فسفر در محلول ۰/۶ مولار نمک طعام مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق محصول خوردگی در مقادیر پتانسیل کم (۱/۲- ولت)، ترکیب NiO و در مقادیر پتانسیل بالا (۰/۸+ ولت)، فسفات گزارش شد. فسفر در پوشش بصورت آندی اکسید می‌شود و باعث ایجاد یک لایه فیلم پسیو می‌گردد که حملات خوردگی را کاهش می‌دهد [۷]. لئو همکارانش خوردگی این پوشش را در محلول ۰/۵ مولار سولفوریک اسید بررسی نمودند و دلیل روئین شدن جزئی در مقادیر پولا ریزاسیون آندی کم را به تأثیرات شیمیایی

مربوط به حضور فسفر در پوشش مربوط نمودند [۸]. بای و همکارانش رفتار خوردگی را با در نظر گرفتن سه پارامتر ثابت، یعنی محیط خورنده ۵ درصد نمک طعام، دمای ۳۷ درجه سلسیوس و مدت زمان ۲۴ ساعت و یک پارامتر متغیر (درصد فسفر)، مورد بررسی قرار دادند. در این گزارش، با افزایش مقدار فسفر در پوشش، افت جرمی پوشش، روند نزولی و مقاومت به خوردگی روند صعودی نشان داد. [۹]. در مطالعات انجام شده توسط لی و همکارانش، رفتار خوردگی پوشش الکتریکی و نانو کریستال نیکل- فسفر با لحاظ دو پارامتر متغیر یعنی دما (۲۵ و ۵۰ درجه سلسیوس) و پتانسیل اعمالی (۵۰۰- میلی ولت تا ۱ ولت) در محیط خورنده ۵ درصد وزنی نمک طعام توسط روش پتانسیودینامیک، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد پوشش‌های آلیاژی نیکل- فسفر در محلول خورنده نمک طعام در دما و پتانسیل‌های بالا، به علت داشتن جریان خوردگی بیشتر، به شدت مورد حمله خوردگی قرار می‌گیرند [۲-۳].

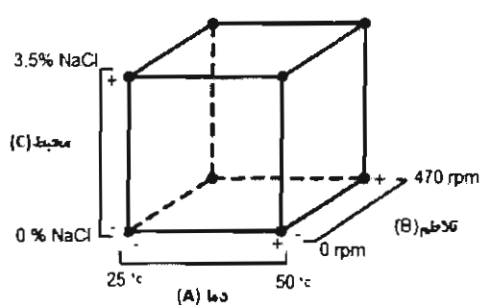
بررسی سوابق موضوع خوردگی پوشش‌های آلیاژی نیکل- فسفر نشان می‌دهد اگر چه محققین تأثیر پارامترهای مختلفی از جمله دما، درصد فسفر پوشش، پتانسیل اعمالی و نوع محیط خورنده (اسیدی و بازی) را بر میزان خوردگی پوشش به طور جداگانه بررسی نموده‌اند، اما تأثیر این پارامترها به طور همزمان بر روی هم و نهایتاً بر روی مقاومت به خوردگی پوشش گزارش نشده است [۱۰-۱]. لذا، در این پژوهش سعی شده است تأثیر سه پارامتر دما، تلاطم و نوع محیط خورنده در دو سطح ماکزیمم و مینیمم با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریل بر میزان خوردگی پوشش بررسی گردد. بدین منظور با استفاده از روش الکتروشیمیایی LSV و دستگاه پتانسیوستات و نیز با در نظر گرفتن سه پارامتر متغیر، و میزان فسفر ثابت در محدوده پتانسیل اعمالی ۱- و ۱+ ولت، میزان خوردگی پوشش بررسی شد.

۲- مواد و روش تحقیق

فلز پایه برای ایجاد پوشش الکتریکی نیکل- فسفر، فولاد ضد زنگ ۳۰۴ است که ترکیب شیمیایی آن با روش EDS تعیین

^۱ Passive

نرم افزار Minitab بهره برده شد. در این روش سه عامل دما، تلاطم و نوع محیط خورنده، در دو سطح، به عنوان فاکتورهای اصلی، در نظر گرفته شد. طراحی آزمایش، با ۲ بار تکرار انجام و تأثیر هر یک از پارامترها و اندرکنش بین آنها، با روش طراحی عاملی، محاسبه گردید. فاکتورها و سطوح مربوطه، در جدول ۲، نشان داده شده است. هم چنین، طرح هندسی آزمایش بررسی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل - فسفر، در شکل ۱، ارایه شده است.



شکل ۱- طرح عاملی 2³ برای بررسی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل - فسفر

رنوس هر وجه مکعب، بالاترین و پایین ترین سطح در نظر گرفته شده برای هر یک از پارامترها را، به صورت جداگانه نشان می دهد. با توجه به منحنی های تافل به دست آمده از آزمایشات خوردگی، مطابق شکل ۲ برای به دست آوردن مقدار جریان خوردگی، از محل تلاقی دو خط مماس بر منحنی تافل خطوطی عمود بر محورهای x و y رسم گردید و بدین ترتیب، مقادیر جریان و پتانسیل خوردگی مربوط به هر آزمایش تعیین گردید (جدول ۳).

و شامل آهن، نیکل، سیلیس، کروم و منگنز به ترتیب با مقادیر ۷۱/۴۱، ۷/۹۶، ۰/۷۳، ۱۸/۲۴ و ۱/۶۶ درصد وزنی می باشد. از نمونه هایی با ابعاد (۱cm×۱cm) به عنوان زیرلایه جهت پوشش دهی، استفاده شد. عملیات آماده سازی قبل از آبکاری طبق استاندارد ASTM B254 [۱۱] انجام و پوشش آمورف و نانو کریستال نیکل - فسفر با ۱۳ درصد وزنی فسفر طبق ترکیب شیمیایی حمام آبکاری در جدول ۱ جهت بررسی میزان خوردگی تهیه شد.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی حمام آبکاری الکتریکی نیکل - فسفر

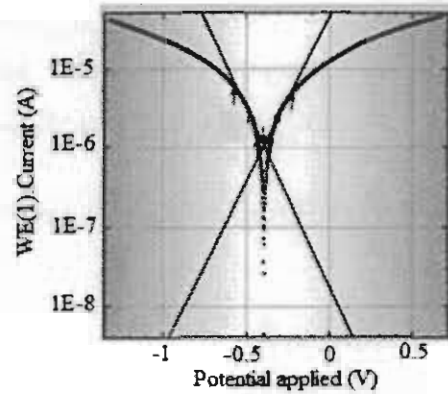
شوايط آبکاری الکتریکی	ترکیب محلول آبکاری (gr/lit)		
pH	۱/۵	سولفات نیکل ۶ آب	۱۳۰
دما °C	۶۰±۲	کلرید نیکل ۶ آب	۱۶
دانسیته جریان (mA/cm ²)	۲۰	اسید بوریک	۳۰
زمان آبکاری (min)	۲۰	اسید فسفرو	۵۰
سرعت همزن (rpm)	۴۰۰	سورفکتانت	۰/۰۵
		ساخارین	۰/۱

از دستگاه پراش سنج پرتوی ایکس (XRD, Philips) برای تعیین ساختار و نوع فازهای موجود در پوشش استفاده شد. اندازه دانه پوشش توسط اشعه ایکس (Cu-Kα, λ=۱/۵۴Å) و طبق معادله ویلیامسون - هال محاسبه گردید. هم چنین، اندازه ذرات کریستالی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM, LEO 902) تعیین و با نتایج آنالیز XRD مقایسه گردید. مورفولوژی سطح پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM, Tescan)، مشاهده شد. جهت تعیین جریان خوردگی پوشش از دستگاه پتانسیو استات و روش طراحی فاکتوریل (۲^۳) در

جدول ۲- حالات ترکیبی برای طراحی ۸ (۲^۳) آزمایش خوردگی.

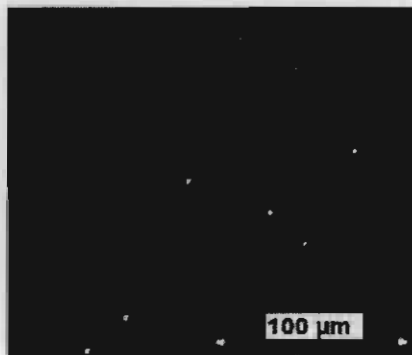
سطح فاکتورها	جریان خوردگی		فاکتورها			ردیف
	کم (-۱)	زیاد (+۱)	محیط C	تلاطم B	دما A	
	I ₂	I ₁	-۱	-۱	-۱	۱
A = ۵۰ (°C)	a ₂	a ₁	-۱	-۱	۱	۲
B = ۴۷۰ (rpm)	b ₂	b ₁	-۱	۱	-۱	۳
C = ۳/۵ (%NaCl)	ab ₂	ab ₁	-۱	۱	۱	۴
	c ₂	c ₁	۱	-۱	-۱	۵
	ac ₂	ac ₁	۱	-۱	۱	۶
	bc ₂	bc ₁	۱	۱	-۱	۷
	abc ₂	abc ₁	۱	۱	۱	۸

نانوکریستال و آمورف در این پوشش است. خواص آمورفی تابعی از میزان فسفر رسوب شده در پوشش می باشد. فسفر و نیکل هر دو دارای میل ترکیبی شیمیایی قوی می باشند، لذا تشکیل توده های متراکم با مرکزیت اتم فسفر که توسط اتم های نیکل احاطه شده اند، بسیار سهل و آسان است. نشست همزمان فسفر در طی فرآیند آبکاری، نظم پر دامنه اتم های نیکل را از بین می برد و هر چه مقدار فسفر بیشتر شود، این بی نظمی نیز بیشتر شده و به ساختار آمورف نزدیک تر می شود [۱۲-۱۳].



شکل ۲- منحنی پلاریزاسیون تافل آزمایش اول

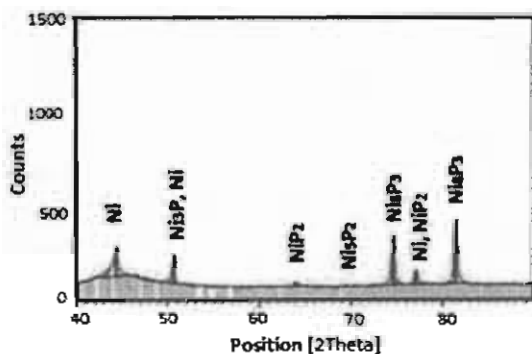
محاسبه تأثیرات اصلی و اندرکنش بین پارامترها و نیز ترسیم منحنی های تراز و ارایه مدل رگرسیون برای جریان خوردگی پوشش الکتريکی نیکل- فسفر در نرم افزار Minitab انجام شد.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی از پوشش الکتريکی نیکل- فسفر حاوی ۱۳ درصد فسفر.

جدول ۳- نتایج حاصل از آنالیزهای تافل.

تعداد	جریان خوردگی (μA)		پتانسیل خوردگی (mV)	
	تکرار اول	تکرار دوم	تکرار اول	تکرار دوم
۱	۱/۱۲	۱/۰۳	-۲۸۷/۹۹	-۳۹۸/۴۹
۲	۲/۷۰	۲/۰۲	-۳۵۷/۹۷	-۳۶۷/۹۱
۳	۲/۰۷	۲/۴۹	-۳۳۳/۵۶	-۳۵۲/۶۴
۴	۴/۸۷	۷/۶۰	-۳۵۵/۵۳	-۳۰۵/۱۳
۵	۸/۸۵	۷/۲۱	-۵۶۵/۳۹	-۶۰۷/۶۴
۶	۱۲/۸۸	۱۳/۰۲	-۶۰۱/۲۱	-۴۵۹/۵۵
۷	۲۲/۹۰	۲۲/۶۴	-۶۱۴/۴۴	-۳۷۶/۴۵
۸	۴۴/۱۶	۵۴/۴۸	-۵۶۰/۶۱	-۳۷۱/۸۱



شکل ۴- الگوی پراش اشعه X ترکیبات فازی در پوشش الکتريکی نیکل- فسفر حاوی ۱۳ درصد فسفر.

۳- نتایج و بحث

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، مورفولوژی سطح پوشش، ساختار آینه ای شکل^۲، یکنواخت و منسجم را نشان می دهد. در الگوی پراش به دست آمده از سطح پوشش در شکل ۴، علاوه بر پیک های مربوط به کریستال های Ni و Ni₃P ترکیبات واسطه دیگری نظیر Ni₅P₃، Ni₃P₂ و Ni₅P₂ نیز وجود دارد که این امر نشان دهنده همزیستی ساختار

نتایج حاصل از محاسبه اندازه کریستال های نیکل از طریق معادله ویلیامسون- هال، بیانگر ساختار نانوکریستال می باشد. هم چنین، با توجه به تصویر TEM به دست آمده از پوشش الکتريکی نیکل- فسفر حاوی ۱۳ درصد وزنی فسفر

². Mirror Like

خوردگی نیز مثبت می‌باشد؛ با این تفاوت که میزان تأثیر نوع محیط نسبت به دو فاکتور دما و تلاطم، چشمگیرتر است و منحنی آن دارای شیب بیشتری می‌باشد.

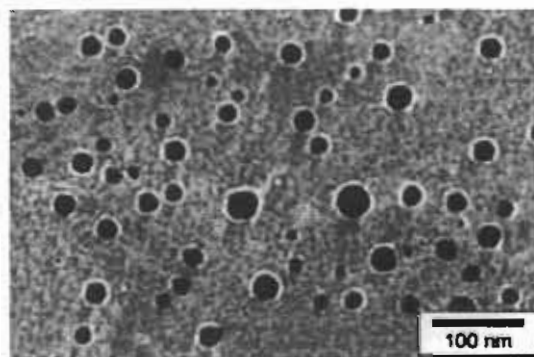
جدول ۴- مقادیر مربوط به تأثیر پارامترها و اندرکنش بین آن‌ها.

مقدار	عنوان تأثیر
۷/۹۳	A
۱۵/۲۳	B
۲۱/۵۳	C
۴/۸۳	AB
۵/۳۱	AC
۱۲/۷۷	BC
۳/۵	ABC

A: دما، B: تلاطم، C: محیط خورنده

نتایج نشان می‌دهد که پارامترهای دما، تلاطم و نوع محیط علاوه بر این که خود به تنهایی بر روی میزان جریان خوردگی مؤثرند، می‌توانند بر روی یکدیگر نیز تأثیر گذار باشند و اثرات یکدیگر را کاهش یا افزایش دهند. با ترسیم منحنی‌های اثرات متقابل پارامترها می‌توان دریافت که اندرکنش بین پارامترها مثبت، منفی یا صفر می‌باشد. با توجه به تأثیرات متقابل پارامترها در جدول ۴ و شکل ۷، می‌توان استنباط کرد که اندرکنش بین مقدار تلاطم و دما مثبت (۴/۸۳) می‌باشد؛ زیرا زمانی که تلاطم در سطح پایین است (۰ دور بر دقیقه)، مقدار افزایش دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سلسیوس نسبت به زمانی است که تلاطم در سطح بالا می‌باشد (۴۷۰ دور بر دقیقه)، کمتر است. هم‌چنین، تأثیر دما بر روی نوع محیط نیز مثبت بوده (۵/۳۱)، اما مقدار آن اندکی، بیشتر است. در بین تأثیرات مربوط به اندرکنش‌ها، بیشترین تأثیر (۱۲/۷۷) مربوط به نوع محیط و تلاطم می‌باشد. زمانی که محیط آب مقطر است، نسبت به حالتی که محلول ۳/۵ درصد نمک طعام می‌باشد افزایش میزان تلاطم از ۰ تا ۴۷۰ دور بر دقیقه بسیار ناچیز است مقدار این اختلاف در منحنی مربوط به تأثیر تلاطم و نوع محیط خورنده به وضوح قابل مشاهده است (۷۱-۷۲). به طور کلی در بین اثرات اصلی و تأثیر اندرکنش‌ها، تأثیر متقابل بین سه پارامتر با هم دارای کمترین اثر (۳/۵) می‌باشد.

(شکل ۵) و با کمک نرم افزار SIS^۳، اندازه متوسط کریستال‌ها (نقاط تیره) که در زمینه آمورف (زمینه روشن) شناور می‌باشند، مقدار ۱۴ نانومتر به دست آمد. نتایج به دست آمده از اندازه متوسط کریستال‌های نیکل با روش XRD و آنالیز TEM، بیانگر این مطلب است که اختلاف دو روش در مقیاس نانو، بسیار ناچیز و قابل چشم‌پوشی است و نتایج محاسبه شده در دو روش، یکدیگر را تأیید می‌کنند.

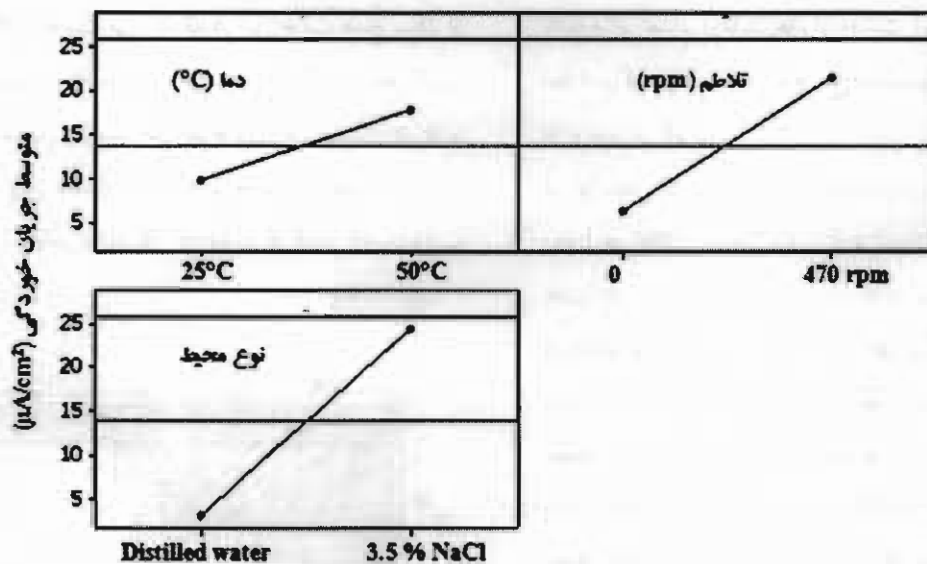


شکل ۵- تصویر TEM از اندازه ذرات کریستالی در پوشش الکترونیکی نیکل - فسفر حاوی ۱۳ درصد فسفر.

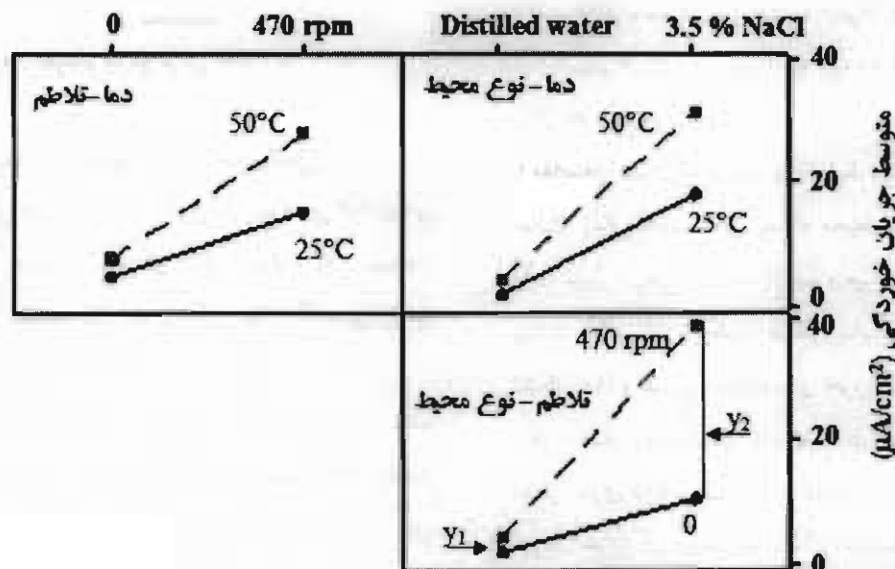
برای برآورد تأثیر اصلی هر یک از پارامترهای دما؛ (A)، تلاطم؛ (B)، نوع محیط خورنده؛ (C) و تأثیر اندرکنش دو و سه‌عاملی پارامترها بر روی میزان خوردگی پوشش از نرم‌افزار Minitab استفاده شد [۱۴]. نتایج حاصل از محاسبات انجام شده توسط نرم‌افزار در جدول ۴ نشان می‌دهد در بین سه پارامتر، دما با مقدار ۷/۹۳، کمترین و نوع محیط خورنده با مقدار ۲۱/۵۳، بیشترین تأثیر را بر جریان خوردگی پوشش دارا می‌باشد.

هم‌چنین، با توجه به شکل ۶ زمانی که دما از ۲۵ به ۵۰ درجه سلسیوس افزایش پیدا می‌کند، میزان جریان خوردگی هم افزایش پیدا می‌کند. بنابراین تأثیر دما بر روی خوردگی پوشش، مثبت بوده و زمانی که تلاطم از ۰ به ۴۷۰ دور بر دقیقه می‌رسد، میزان جریان خوردگی افزایش می‌یابد؛ با این تفاوت که میزان افزایش، نسبت به حالت قبل بیشتر است. علاوه بر این، تأثیر دو نوع محیط خورنده، یعنی آب مقطر و آب حاوی ۳/۵ درصد نمک طعام، بر روی میزان جریان

³. Soft Imaging System



شکل ۶- تأثیرات اصلی پارامترهای دما، تلاطم و نوع محیط بر روی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل- فسفر.



شکل ۷- تأثیرات متقابل پارامترهای دما، تلاطم و نوع محیط بر روی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل- فسفر.

شکل ۸ اثرات استاندارد شده فاکتورها و اندرکنش بین آن‌ها را برای $\alpha=0/05$ نشان می‌دهد. در این نمودار، مقدار $2/31$ ، مرز پذیرش یا رد تأثیرات، با احتمال مهندسی 95% می‌باشد. بنابراین، در اینجا تأثیر اندرکنش بین سه پارامتر دما، تلاطم و محیط قابل صرف‌نظر کردن است، در حالی که سایر تأثیرات اعم از تأثیرات اصلی و متقابل حائز اهمیت می‌باشند. در صورتی که احتمال مهندسی 90% ($\alpha=0/1$) لحاظ شود، مرز

برای مقایسه اثرات فاکتورها و هم‌چنین، اندرکنش بین آن‌ها و نیز ارایه یک مدل رگرسیون، می‌توان از نمودار استاندارد پارتو^۱ استفاده کرد. در این نمودار، با احتساب احتمال‌های مهندسی متفاوت (به‌عنوان مثال؛ $\alpha=0/05$ و $\alpha=0/1$) می‌توان پارامترهایی را که اثرات یا اندرکنش‌های کمتری دارند، شناسایی و در محاسبات و بررسی نتایج، آن‌ها را حذف نمود.

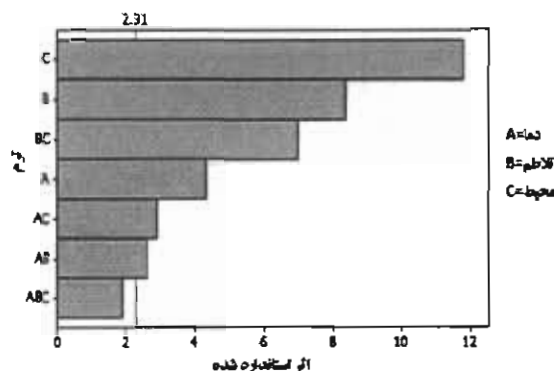
^۱ Pareto Plot

پاسخ‌ها بر تعداد آزمایش‌ها را، به‌دست آورد. بر این اساس، معادله رگرسیون مربوط به پاسخ مدل، به صورت رابطه ۲ بازنویسی می‌شود.

در نهایت، برای تعیین شرایط بهینه‌ی سه پارامتر دما، تلاطم و محیط می‌توان از منحنی‌های تراز و نمودار سطح پاسخ سه بعدی جریان خوردگی پوشش، استفاده نمود. جهت رسیدن به حالت بهینه بایستی میزان جریان خوردگی پوشش صفر یا نزدیک به صفر باشد. برای این منظور، منحنی‌های تراز و سطح پاسخ در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. به‌عنوان مثال، شکل ۹ شرایطی را نشان می‌دهد که دمای محیط خوردگی ۲۵ درجه سلسیوس ثابت لحاظ شده و تأثیر دو پارامتر محیط و تلاطم بر جریان خوردگی پوشش به صورت منحنی‌های تراز با میزان جریان خوردگی متفاوت ترسیم شده است. در این حالت میزان جریان خوردگی از ۱/۰۸ بیشتر است و می‌تواند به حدود ۲۷/۵ میکروآمپر بر سانتی‌متر مربع نیز برسد.

با مقایسه‌ی منحنی‌های تراز در شرایط مختلف، ایده‌آل‌ترین حالت زمانی به‌دست می‌آید که محیط در سطح پایین باشد (آب مقطر)؛ یعنی میزان ماکزیمم و مینیمم جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل-فسفر، پایین‌ترین مقدار را دارد (شکل ۱۰) و بدترین حالت برای خوردگی پوشش الکتریکی نیکل-فسفر زمانی است که، محیط در سطح بالا است (آب مقطر حاوی ۳/۵ درصد نمک طعام). زیرا مینیمم و ماکزیمم جریان خوردگی در مقایسه با سایر حالت‌ها، بیشترین مقدار را دارا است (شکل ۱۱). اهمیت منحنی‌های تراز و سطوح پاسخ در این است که می‌توان با استفاده از آنها میزان جریان خوردگی مربوط به پوشش الکتریکی نیکل-فسفر را در شرایط مختلفی که در بین دو محدوده‌ی انتخابی می‌باشند و مورد آزمایش قرار نگرفته‌اند، را تعیین نمود.

جدایش ۱/۸۶ به‌دست می‌آید که در این حالت هیچ یک از تأثیرات اصلی و متقابل بین پارامترها، قابل صرف‌نظر کردن نیست و باید در بررسی جریان خوردگی پوشش در نظر گرفته شود. ولی معمول است که در محاسبات مهندسی α را برابر با ۰/۰۵ لحاظ نمایند. هر چه میزان α کمتر باشد، دقت کار بالاتر است.



شکل ۸- نمودار پارتو برای حالت $\alpha = 0.05$

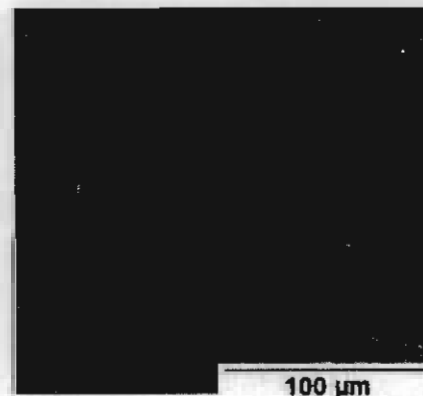
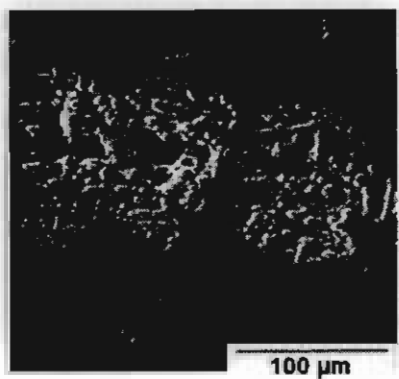
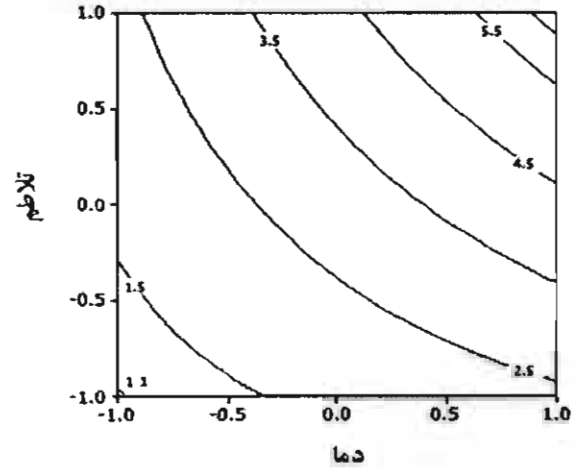
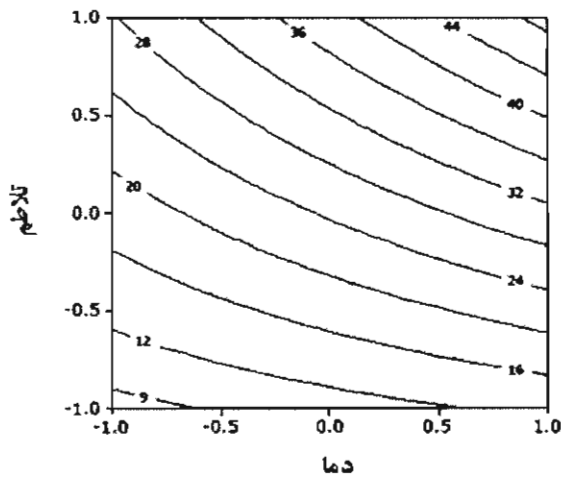
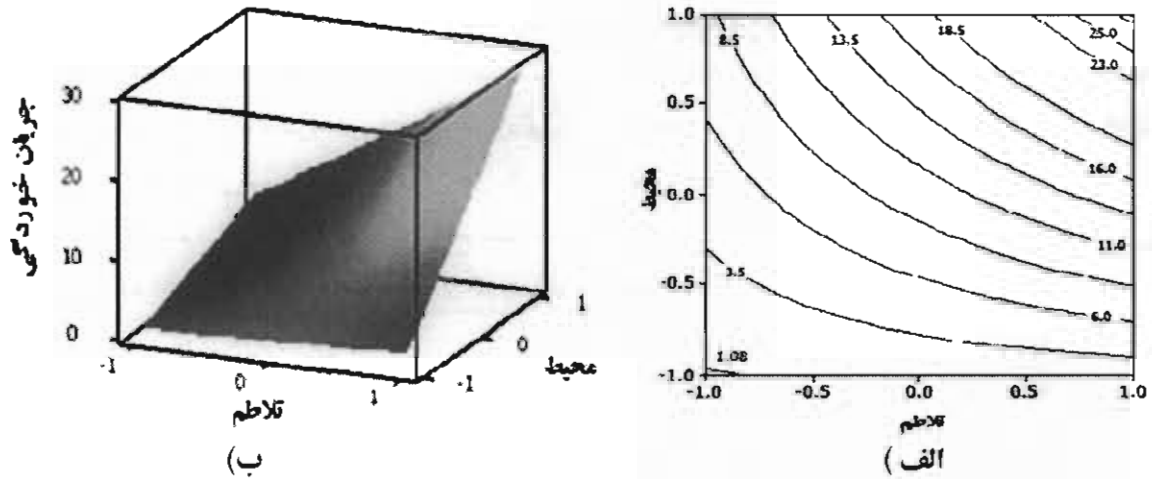
۱-۳- آرایه مدل رگرسیون و سطح پاسخ

برای پیش‌بینی میزان جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل-فسفر بر اساس فاکتورهای مؤثر باقیمانده که از نمودار پارتو به‌دست آمده‌اند، می‌توان یک مدل رگرسیون چند متغیره مطابق رابطه ۱، آرایه داد:

در این رابطه، متغیرهای x_1 ، x_2 و x_3 به ترتیب، سطح پارامترهای دما، تلاطم و محیط، ε ، مقدار خطا و لا، مقدار جریان خوردگی پوشش یا همان پاسخ، است. ضرایب β ، مربوط به تأثیرات اصلی و متقابل پارامترهای دما، تلاطم و محیط می‌باشند. مقدار پارامترهای β_1 ، β_2 و β_3 در این معادله، به ترتیب، نصف تأثیرات اصلی پارامترهای دما، تلاطم و محیط و مقدار پارامترهای β_{12} ، β_{13} و β_{23} ، به ترتیب، نصف تأثیرات متقابل پارامترهای دما، تلاطم و محیط می‌باشد. هم‌چنین، جهت تعیین مقدار β_0 ، باید مقدار میانگین

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_{12} x_1 x_2 + \beta_{13} x_1 x_3 + \beta_{23} x_2 x_3 + \varepsilon \quad (1)$$

$$y = 13.75 + 3.96 x_1 + 7.65 x_2 + 10.77 x_3 + 2.41 x_1 x_2 + 2.65 x_1 x_3 + 6.38 x_2 x_3 \quad (2)$$



۴- نتیجه گیری

۱) بررسی تصویر SEM پوشش الکتریکی نیکل- فسفر، ساختار آینه‌ای شکل، منسجم و یکنواختی را در ۱۳ درصد وزنی فسفر نشان می‌دهد.

۲) نتایج حاصل از XRD در الگوی پراش نشان می‌دهد علاوه بر پیک‌های مربوط به کریستال‌های Ni و Ni₃P ترکیبات واسطه دیگری نظیر Ni₃P₂، Ni₈P₃ و NiP₂ نیز در پوشش وجود دارد که این امر نشان‌دهنده‌ی همزیستی ساختار نانوکریستال و آمورف در این پوشش می‌باشد.

۳) مقایسه‌ی تصویر TEM پوشش الکتریکی نیکل- فسفر با نتیجه حاصل از محاسبه‌ی اندازه ذرات از طریق آنالیز XRD نشان داد که، اندازه‌ی متوسط ذرات کریستالی به‌دست‌آمده در دو روش، از تطابق بالایی برخوردار هستند.

۴) نتایج حاصل از ۱۶ آزمایش در ۲ تکرار با روش فاکتوریل، نشان داد که تأثیر اصلی و اندرکنش بین پارامترهای دما، تلاطم و محیط خورنده بر جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل- فسفر مثبت است.

۵) در بین پارامترهای ذکر شده، دما با مقدار (۷/۹۳) کمترین و نوع محیط خورنده با مقدار (۲۱/۵۳) بیشترین تأثیر را بر روی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل- فسفر دارند.

۶) ارزیابی اندرکنش بین پارامترها نشان داد که تأثیر متقابل بین پارامترهای دما- تلاطم، دما- محیط و تلاطم- محیط و نیز اندرکنش بین سه پارامتر به ترتیب مقادیر ۴/۸۳، ۵/۳۱، ۱۲/۷۷ و ۳/۵ می‌باشد که در این میان، بیشترین تأثیر بر میزان جریان خوردگی پوشش نیکل- فسفر مربوط به اندرکنش بین پارامترهای تلاطم و محیط، است.

هم‌چنین، تصاویر SEM از سطح پوشش در دو حالت فوق نشان می‌دهد که در حالت اول که دما، تلاطم و محیط در پایین‌ترین سطح می‌باشند، حفره‌های ناشی از خوردگی پوشش، در سطح دیده نمی‌شود (شکل ۱۲). اما در حالت دوم که دما، تلاطم و محیط در بالاترین سطح هستند، حفره‌های بزرگ ناشی از به‌هم پیوستن حفره‌های کوچک در سطح پوشش، دیده می‌شود (شکل ۱۳).

۲-۳- اعتبارسنجی و ارزیابی نتایج

از آنجا که در اکثر مطالعات صورت گرفته، نوع و مقدار پارامترها و شرایط آزمایش‌ها متفاوت است، شاید نتوان نتایج حاصل را با یکدیگر مقایسه کرد. تنها در یک مطالعه انجام شده، تأثیر دما بر میزان خوردگی پوشش بررسی شده است. طبق این تحقیق، با افزایش دما در محدوده ۲۵ تا ۵۰ درجه سلسیوس، میزان خوردگی پوشش افزایش می‌یابد. این نتیجه با نتایج حاصل از این پژوهش مطابقت دارد.

برای ارزیابی دقیق‌تر و اعتبارسنجی مدل ارایه شده، تحت شرایط میانگین پارامترها یعنی؛ دمای ۳۷/۵ درجه سلسیوس، تلاطم ۲۳۵ دور بر دقیقه و محلول ۱/۷۵ درصد نمک طعام، یک تست خوردگی انجام و مقدار جریان خوردگی با استفاده از مدل پیشنهادی طبق رابطه ۲ و منحنی پلاریزاسیون تافل، مطابق جدول ۵ محاسبه گردید.

همان‌گونه که از نتایج در جدول ۵ مشخص است، میزان خوردگی حاصل از آزمایش و مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل، با خطای ناچیزی تأییدکننده یکدیگر می‌باشند.

جدول ۵- نتایج اعتبارسنجی مدل.

شرایط آزمایش	جریان خوردگی (μA/cm ²) به‌دست آمده از منحنی تافل	جریان خوردگی (μA/cm ²) محاسبه‌شده توسط مدل پیشنهادی
دما = ۳۷/۵ °C	۱۳/۰۶	۱۳/۷۵
تلاطم = ۲۳۵ (rpm)		
نوع محیط خورنده = ۱/۷۵٪ نمک طعام		

(۸) بررسی منحنی‌های تراز و سطوح پاسخ نشان داد که، ایده‌آل‌ترین حالت (داشتن کمترین میزان جریان خوردگی در پوشش الکتریکی نیکل- فسفر) زمانی است که، سه پارامتر دما، تلاطم و محیط در پایین‌ترین سطح و نامناسب‌ترین حالت (داشتن بیشترین میزان جریان خوردگی) زمانی است که، سه پارامتر دما، تلاطم و محیط در بالاترین سطح خود، قرار دارند.

(۷) با استفاده از نمودار پارتو و با احتساب $\alpha=0/05$ (احتمال مهندسی ۹۵٪)، تأثیر اندرکنش بین سه پارامتر در مقایسه با بقیه‌ی اثرات، کم ارزش تشخیص داده شد و بر این اساس، با در نظر گرفتن تأثیرات اصلی و اندرکنش دو به دو پارامترها، یک مدل رگرسیون جهت پیش‌بینی جریان خوردگی پوشش الکتریکی نیکل- فسفر، ارائه شد.

مراجع

- [1] C.B Ma, F.H Cao, Z. Zhang, J.Q Zhang, Electrodeposition of amorphous Ni-P coating onto Nd-Fe-B permanent magnet substrates, Applied Surface Science, No. 253, 2006, Pp. 2251-2256.
- [2] H.B. lee, D.S. Wuu, C.Y. lee, C.S. Lin, Study of the corrosion behavior of nanocrystalline Ni-P electrodeposited coating, Metallurgical and materials transactions, Vol. 41A, 2009, Pp. 450-459.
- [3] H.B. lee, D.S. Wuu, C.Y. lee, C.S. Lin, Wear and immersion corrosion of Ni-P electrodeposit in NaCl solution, Tribology International, Vol. 43, 2010, Pp. 235-244.
- [4] K. Sridharan, K. Sheppard, Crystallization of amorphous iron-nickel-phosphorus alloys prepared by electrodeposition, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 68, 1997, Pp. 109-116.
- [5] J. Flis and D.J. Duquette, Effect of Phosphorus on Anodic Dissolution and Passivation of Nickel in Near-Neutral Solutions, Corrosion, Vol. 41, 1985, Pp. 700-706.
- [6] L.V. Petukhov, M.G. Shcherban, N.E. Skryabina and L.N. Malinina, Corrosion and Electrochemical Behavior of Ni-P Coatings in 0.5 M H₂SO₄, Protection of Metals, Vol. 38, 2002, Pp. 370-376.
- [7] B. Bozzini, P.L. Cavallotti, and G. Parisi, Corrosion and Erosion-Corrosion of Electrodeposited Ni-P/B₄C Composites, British Corrosion Journal, Vol. 36, 2001, Pp. 49-55.
- [8] G. Lu and G. Zangari, Corrosion resistance of ternary Ni/P based alloys in sulfuric acid Solutions, Electrochim. Acta, Vol. 47, 2002, Pp. 2969-2979.
- [9] A. Bai, P.Y. Chuang, and C.C. Hu, The corrosion behavior of Ni-P deposits with high phosphorous contents in brine media, Materials Chemistry and Physics, Vol. 82, 2003, Pp. 93-100.
- [10] Sh. Zhang, F. Cao, L. Chang, J. Zheng, Z. Zhang, J. Zhang and Ch. Cao, Electrodeposition of high corrosion resistance Cu/Ni-P coating on AZ91D magnesium alloy, Applied Surface Science, Vol. 257, 2011, Pp. 9213-9220.
- [11] Annual Book of ASTM Standards, ASTM B254 - Standard Practice for Preparation of and Electroplating on Stainless Steel, Vol. 02.05, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2009.
- [12] G. McMahon and U. Erb, Structural transitions in electroplated Ni-P alloys, Journal of Materials Science Letters, Vol. 8, 1989, Pp. 865-868.
- [13] K. Hou, M. Jeng, M. Ger, A study on the wear resistance characteristics of pulse electroforming Ni-P alloy coatings as plated, Wear, Vol. 262, 2007, Pp. 833-844.
- [14] D. C. Montgomery, Design and Analysis of Experiments, Fifth edition, Arizona state university, ISBN 0471316490, 2001.