

بررسی تاثیر عملیات حرارتی بر سختی و رفتار خوردگی پوشش الکترولس نیکل - فسفر روی آلیاژ AZ31 منیزیم

مهناز تفضلی، محمود منیر واقفی و مهدی صالحی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله : ۸۹/۲/۱۹ - پذیرش مقاله : ۸۹/۶/۲۹)

چکیده

در این پژوهش برای بهبود سختی و مقاومت به خوردگی سطح، پوشش الکترولس نیکل-فسفر بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 اعمال گردید. آزمون خوردگی پلاریزاسیون قبل و بعد از پوشش دهی روی آلیاژ پایه بدون پوشش و پوشش داده شده در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم انجام شد و سختی پوشش و آلیاژ پایه قبل و بعد از عملیات حرارتی اندازه گیری شد. بررسی های میکروساختاری و مورفولوژی سطح با استفاده از آنالیز فازی XRD و میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM انجام گرفت. نتایج این تحقیق نشان می دهد که پوشش های الکترولس کم فسفر دارای ساختار نانو کریستالی و سخت هستند و سختی آنها با افزایش دما طی عملیات حرارتی به دلیل تشکیل فاز Ni_3P افزایش می یابد، هرچند سختی منیزیم پایه به دلیل رشد دانه کاهش و نرخ خوردگی پوشش افزایش می یابد. به همین خاطر بهترین محدوده برای عملیات حرارتی آلیاژ های منیزیم $230-270^{\circ}C$ می باشد. عملیات حرارتی در این محدوده دمایی موجب افزایش سختی پوشش به میزان 110 HV و کاهش سختی پایه تنها به میزان 14BHN می شود.

واژه های کلیدی: الکترولس نیکل، عملیات حرارتی، سختی، مقاومت خوردگی، منیزیم AZ31.

Investigation on effect of heat treatment on hardness and corrosion behavior of electroless Ni-P plating on AZ31 magnesium alloy

M. Tafazoly, M. Monirvaghefi and M. Salehi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract

In this study, Ni-P coating on the surface of AZ31 Mg alloy was proposed by electroless plating due to improve in surface hardness and corrosion resistance. Electrochemical polarization test was done before and after coating on base alloy, with and without coating in 3/5wt%NaCl solution. The hardness of EN coating and base alloy also were evaluated before and after heat treatment, and surface morphology was studied by scanning electron microscopy (SEM). Also, microstructural changes were evaluated by X-ray diffraction (XRD) analysis. The results of this study showed that EN coatings with low phosphorus content were nano-crystalline and hard and the hardness of the coating could be increased with increasing temperature in heat treatment process, while the hardness of base alloy decreased due to grain growth and the rate of the corrosion increased. So the best range for Heat treatment of mg alloys was $230-270^{\circ}C$. heat treatment in this range would increased 110 HV hardness of the coating and decreased only 14BHN hardness of the base alloy.

Keywords: Electroless Ni-P plating, Heat Treatment, Hardness, Corrosion Resistance, AZ31 Magnesium.

E-mail of corresponding authors: mah_tafazoly@yahoo.com

مقدمه

استفاده از آلیاژهای منیزیم در صنایع خودرو سازی و هوافضا رو به افزایش است. علت این امر کاهش وزن ناشی از جایگزینی این فلز به جای فولاد و آلومینیوم می باشد. منیزیم با دانسیته 1.7 gr/cm^3 ، ۳۵٪ سبک تر از آلومینیوم و ۴ برابر سبک تر از فولاد است. علاوه بر مزیت سبکی، این فلز دارای مزایای دیگری نظیر سفتی بیشتر نسبت به آلومینیوم، قابلیت جذب ارتعاش و صوت و همچنین خاصیت جذب نسبتاً کم برای نوترون های گرمایی است. به دلیل دمای شکل دهی بالای منیزیم و آلیاژهای آن وضعیت سطحی آن برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب نمی باشد [۱ و ۲]. علاوه بر اینکه فعال بودن این فلز باعث می شود که در برابر اکثر فلزات پیل گالوانیکی تشکیل داده و به صورت آند خورده شود. جلوگیری از خوردگی گالوانیکی نیاز به روش های سطحی دارد که منیزیم را در تماس با سایر فلزات ایزوله کند به علاوه سختی و مقاومت به سایش مناسب برای کاربرد های صنعتی را فراهم کند. از میان روش های سطحی ارایه شده برای آلیاژهای منیزیم الکترولس نیکل فسفر از مناسب ترین روش های پوشش دهی برای دستیابی به اهداف مورد نظر است [۳]. اکثر تحقیقات در مورد الکترولس نیکل فسفر روی فولاد و آلومینیم انجام گرفته است و گزارشات اندکی در مورد الکترولس نیکل فسفر روی منیزیم موجود است. از جمله کارهای انجام گرفته در زمینه الکترولس نیکل-فسفر روی آلیاژ منیزیم می توان به تحقیقات Shoemith و همکارانش در سال ۲۰۰۹ اشاره کرد. آنها تاثیر پارامتر های حمام را روی خوردگی پوشش الکترولس نیکل فسفر روی منیزیم در حمام های کربناته بررسی کردند و بهبود مقاومت به خوردگی و کاهش تخلخل را گزارش نمودند، با توجه به محدودیت در دسترس بودن حمام های کربناته و استفاده گسترده صنعت از حمام های سولفات در این پژوهش از حمام سولفات تجاری SLOTONIP 70 برای پوشش دهی استفاده شد و خواص سختی و مقاومت به خوردگی مورد بررسی قرار گرفت. از جمله قابلیت های پوشش های الکترولس نیکل-فسفر افزایش سختی آنها با افزایش دمای

عملیات حرارتی است [۴] اما مشکل این جاست که افزایش دما به علت کار سرد بودن آلیاژ پایه موجب کاهش سختی آن می گردد [۵]. با توجه به سختی اولیه پایین این آلیاژ و همچنین از آنجایی که سختی آلیاژهای منیزیم با افزایش دما کاهش می یابد، تعیین دمای مناسب عملیات حرارتی از اهمیت زیادی برخوردار است. این دما باید به نحوی انتخاب شود که با افزایش سختی پوشش کمترین افت سختی در آلیاژ پایه به وجود آید. از این رو سیکل های عملیات حرارتی مختلف روی نمونه ها اعمال گردید و سختی پوشش و آلیاژ پایه محاسبه شد. از آنجایی که مقاومت به خوردگی پایین آلیاژ های منیزیم از جمله عوامل محدودیت استفاده از این آلیاژ ها در صنعت محسوب می شود در مرحله بعدی این پژوهش نقش پوشش در بهبود خواص خوردگی آلیاژ منیزیم مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا تاثیر ضخامت پوشش و عملیات حرارتی روی مقاومت به خوردگی پوشش ارزیابی شد.

مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از آلیاژ کار شده منیزیم AZ31-H24 به شکل ورق استفاده شد. ترکیب شیمیایی این ورق در جدول ۱ آورده شده است.

جهت پوشش دهی از حمام تجاری SLOPONIP70 ساخت شرکت اشلوثر آلمان استفاده شد که مشخصات آن در جدول ۲ آورده شده است.

نمونه ها در ابعاد $20 \times 20 \times 2 \text{ mm}^3$ تهیه و سوراخی به قطر 1 mm برای آویزان نمودن نمونه ها در حمام آبکاری در یک گوشه آن ایجاد شد.

سپس نمونه ها توسط سمباده از جنس SiC تا شماره ۶۰۰ سمباده زنی شد و برای ایجاد زبری بیشتر تعدادی از نمونه ها تحت سند بلاست با ذرات SiO_2 با اندازه دانه $70 - 150 \mu\text{m}$ قرار گرفتند. سپس عملیات آماده سازی سطح مطابق با جدول ۳ روی نمونه ها انجام گرفت.

پس از آماده سازی نمونه ها پوشش دهی در دمای 80°C و $\text{pH} 6/4$ در زمان های مختلف انجام شد. به منظور بررسی

جدول ۱. ترکیب شیمیایی ورق AZ31

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
3	1	0.5	1	0.005	0.4	0.005	bal

جدول ۲. مشخصات حمام تجاری SLOPONIP70

Nickel	6-8 (7) g/l
Reducer SH	40-50 (45) ml/l
Stabilizer	5-8 (7) ml/l
pH-range	6.4
Operating temperature	82

دانشیته جریان و پتانسیل خوردگی چهار نمونه تهیه شد. نمونه اول بدون پوشش و عملیات حرارتی تحت تست پولاریزاسیون قرار گرفت و نمونه های بعدی در ضخامت ۲۰ میکرون پوشش داده شدند و تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند. عملیات حرارتی نمونه ها با استفاده از یک کوره مقاومتی در محدوده دمای °C ۲۰۰-۴۰۰ انجام گرفت. برای- جلوگیری از اکسیداسیون، نمونه ها درون دو لایه فویل آلومینیومی قرار گرفتند و برای محافظت بیشتر بین دو جداره فویل پودر ذغال ریخته شد.

فازیابی پوشش با استفاده از دستگاه Philips Xpert MRD انجام گرفت و مورفولوژی سطح پوشش ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM PhilipsXL30 مورد بررسی قرار گرفت. سختی نمونه ها توسط دستگاه میکروسختی سنج (مدل BUEHLER) با بار ۱۰۰ گرم و زمان ۱۵ ثانیه اندازه گیری شد.

تأثیر ضخامت روی دانشیته جریان و پتانسیل خوردگی چهار نمونه تهیه شد. نمونه اول در حالت بدون پوشش تحت آزمون پولاریزاسیون قرار گرفت و نمونه های بعدی در ضخامت های ۱۰، ۱۵ و ۲۰ میکرون پوشش داده شدند و تحت آزمون پولاریزاسیون قرار گرفتند. آزمون پولاریزاسیون در محلول ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم انجام شد که شرایط استاندارد تست خوردگی پولاریزاسیون برای پوشش های الکترولس می باشد. این آزمون توسط دستگاه PARSTAT 2237 انجام گرفت. در مرحله بعدی برای بررسی تأثیر عملیات حرارتی روی

جدول ۳. مراحل آماده سازی سطح قبل از پوشش دهی

ردیف	مرحله	ترکیب و شرایط
۱	تمیز کاری التراسونیک	استون دمای محیط، 10 min
۲	تمیز کاری قلیایی	KOH Na ₃ PO ₄ Temperature Agitation Time 50 g/l 10 g/l 333 ± 5 K Mild, magnetic 10 min
۳	اکسید زدایی اسیدی	CrO ₃ HNO ₃ (70% V/V) Temperature Agitation Time 125 g/L 110 ml/L Ambient (293K) Vigorous, mechanical 45 s
۴	فعال سازی فلوریدی	HF (40%V/V) Temperature Agitation Time 385 ml/L Ambient (293K) Mild, magnetic 10 min

نتایج و بحث

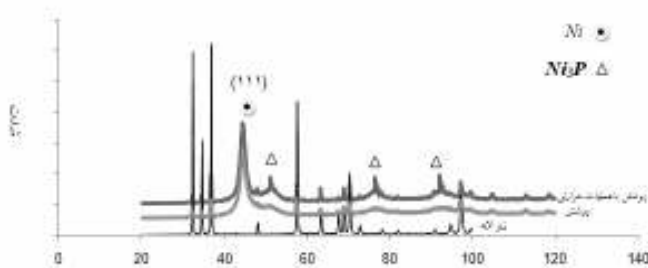
عملیات حرارتی پوشش

عملیات حرارتی با تعیین ساختار کریستالی یک مرحله تعیین کننده در تغییر خواص پوشش های الکتروکترولس با درصد های مختلف فسفر می باشد [6,7]. حتی در پوشش های کم فسفر که به صورت کریستاله ایجاد می شوند عملیات حرارتی با تغییر اندازه دانه خواص سطحی را تغییر می دهد. پارامتر عملیاتی تعیین کننده درصد فسفر و به تبع آن میزان کریستاله شدن پوشش، pH محلول و ترکیب آن می باشد. با افزایش pH، واکنش کاهش نیکل تسریع می شود و واکنش کاهش فسفر کند می گردد. به همین خاطر با افزایش pH محلول مقدار فسفر کاهش می یابد. از آنجایی که مقاومت به خوردگی آلیاژ منیزیم در محلول های اسیدی بسیار پایین است معمولاً از pH بیشتر از ۶/۴ برای پوشش دهی روی آنها استفاده می شود. پوشش دهی در این شرایط باعث ایجاد پوشش کم فسفر می گردد. بر اساس سایر پژوهش های انجام گرفته بر روی الکتروکترولس نیکل-فسفر از جمله تحقیقات Ray Taheri در سال ۲۰۰۲ پوشش های کم فسفر دارای سختی بالاتری نسبت به سایر پوشش های الکتروکترولس با درصد بالاتر فسفر می باشند [8]. ساختار پوشش کم فسفر ایجاد شده در شرایط ذکر شده در شکل ۱-الف نشان داده شده است. برای تعیین اندازه دانه الگوی پراش پوشش ها در حالت اولیه و پس از عملیات حرارتی به دست آمد. همان گونه که در شکل ۱-ب مشاهده می شود پس از پوشش دهی پیک باریک مربوط به پراش {۱۱۱} فاز نانو کریستالی نیکل در ۲۰، ۴۵ درجه مشاهده شد.

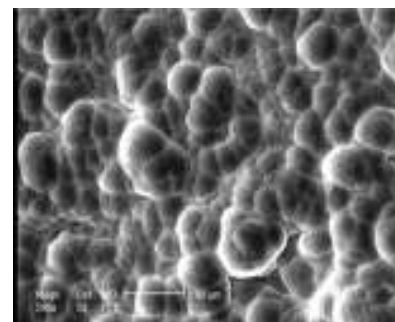
اندازه دانه با توجه به معادله شرر (معادله ۱) ۲۲ nm در حالت اولیه محاسبه شد. چون رشد دانه یک فرآیند نفوذی است و ضریب نفوذ ارتباط مستقیمی با دما دارد [9]، با انجام عملیات حرارتی رشد دانه های فاز نانو کریستالی مشاهده شد و اندازه دانه به ۲۵nm رسید.

$$d_{xao} = \frac{k\lambda}{\beta \cos(\theta)} \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن k مقدار ثابت ۰/۹، λ طول موج اشعه X استفاده شده بر حسب نانومتر، β عرض پیک در نیم ارتفاع و θ زاویه تفرق می باشد برای اندازه گیری پارامتر β از نرم افزار Sigma Plot.V9.01 استفاده شد که یک نرم افزار برای رسم نمودار و برازش منحنی است. اطلاعات پیک هایی که به منظور اندازه گیری اندازه دانه باید عرض آنها در نیم ارتفاع شان مشخص می شد به نرم افزار داده شد و نرم افزار پیک مورد نظر را با تابع گوسی چهار متغیره برازش، و معادله ریاضی پیک تعیین شد. برای بررسی تغییرات سختی، پس از هر سیکل عملیات حرارتی سختی پوشش و پایه محاسبه شد (جدول ۴). برای محاسبه سختی، سطح مقطع نمونه پوشش دارای محل آلیاژ پایه و قسمت پوشش دار تحت تست میکروسختی قرار گرفت بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده می شود افزایش دمای عملیات هر چند به دلیل رسوب فاز سخت کریستالی Ni₃P با استحکام و مدول برشی بالا منجر به افزایش سختی پوشش می شود، اما به طور هم زمان دلیل افزایش اندازه دانه منیزیم افزایش یافته و سختی آلیاژ پایه کاهش می یابد (شکل ۲ و ۳).



(ب)



(الف)

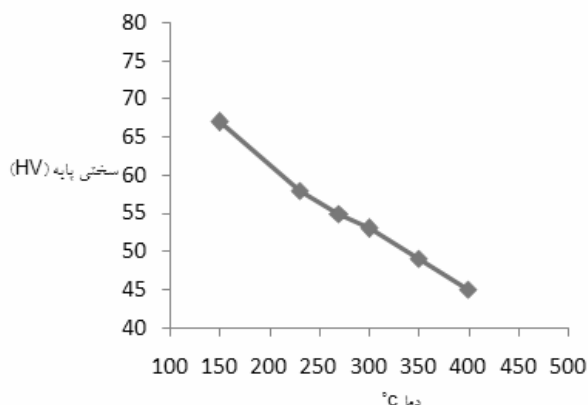
شکل ۱. الف تصویر SEM از سطح پوشش، ب الگوی پراش زیر لایه و پوشش در حالت اولیه و پس از عملیات حرارتی

مقاومت به خوردگی پوشش

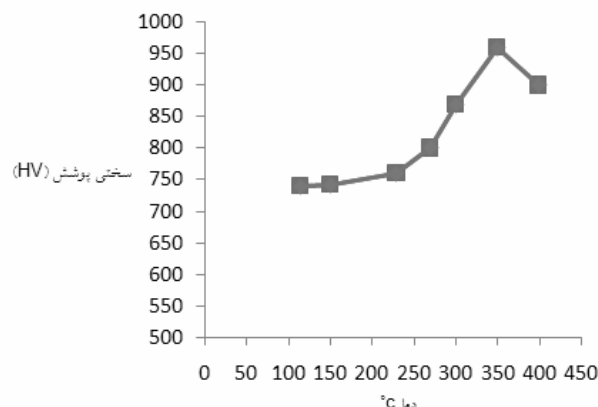
منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به آلیاژ پایه منیزیمی بدون پوشش و پوشش دار در ضخامت ها و عملیات حرارتی های مختلف در محلول ۳/۵wt% NaCl در شکل ۴ و ۵ آورده شده است. پارامترهای پتانسیل خوردگی و دانسیته جریان خوردگی با استفاده از روش برونیابی تافل در جدول ۵ و ۶ آورده شده است.

در طی قرارگیری نمونه در حمام، ذرات ناخالصی و حباب های هیدروژن تولید شده منجر به تشکیل حفره در پوشش می شوند. این حفره ها می توانند بسته یا باز باشند. از آنجایی که پوشش Ni-P ایجاد شده روی آلیاژ منیزیم مثالی از یک پوشش کاتدی روی زیر لایه آندی است، عیوب موجود در پوشش نظیر تخلخل (حفره های باز) و میکرو ترک ها می توانند مسیری برای ارتباط الکترولیت با پایه و وقوع خوردگی گالوانیک باشند. نواحی از آلیاژ پایه که در تماس با الکترولیت قرار می گیرد به عنوان نواحی آندی کوچک عمل کرده و به خاطر وجود نواحی کاتدی بزرگ پوشش به شدت خورده می شود. در این حالت ممکن است میزان خوردگی بیشتر از حالتی باشد که آلیاژ پایه بدون پوشش در تماس با الکترولیت قرار گیرد. در شکل ۶ نمونه آلیاژ پوشش داده شده در ضخامت ۱۰ میکرون پس از قرار گیری در محلول الکترولیت ۳/۵ درصد وزنی کلرید سدیم آورده شده است. همان طور که مشاهده می شود الکترولیت با عبور از عیوب و تخلخل های نشان داده شده در پوشش منجر به خوردگی آلیاژ منیزیم پایه شده است.

به همین دلیل دمای کمتر از ۳۰۰ °C برای عملیات حرارتی پوشش Ni-P روی آلیاژ AZ31 منیزیم پیشنهاد می شود. عملیات حرارتی در این محدوده دمایی موجب افزایش سختی پوشش و کاهش اندک سختی پایه می شود.



شکل ۲. نمودار تغییرات سختی پایه با افزایش دمای عملیات حرارتی



شکل ۳. نمودار تغییرات سختی پوشش با افزایش دمای عملیات حرارتی

جدول ۴. تغییرات سختی پوشش و فلز پایه در دماهای مختلف عملیات حرارتی

درصد فسفر	دما (°C)	زمان (h)	سختی پوشش (HV)	سختی پایه (BHN)
3	115	1	720	70
3	150	1	743	67
3	230	1	760	58
3	270	1	830	56
3	300	1	870	53
3	350	1	960	49
3	400	1	900	45

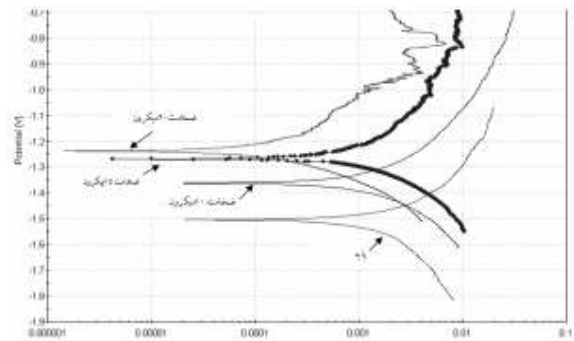
خوردگی آلیاژ پایه در ضخامت ۱۵ میکرون مشاهده نشد. پس می توان نتیجه گرفت تا ضخامت ۱۰ میکرون خوردگی آلیاژ پایه مشاهده می شود و افزایش ضخامت به ۱۵ میکرون باعث حذف خوردگی آلیاژ پایه می شود. در جدول ۵ پارامترهای محاسبه شده از نمودارهای پلاریزاسیون نمونه تهیه شده از آلیاژ پایه بدون پوشش و پوشش داده شده در ضخامت های مختلف آورده شده است. مطابق با داده های این جدول مشاهده می شود که با افزایش ضخامت پوشش دانسیته جریان خوردگی آن کاهش و در نتیجه مقاومت به خوردگی آن افزایش می یابد. دلیل این امر را می توان کاهش تخلل های موجود در پوشش، بسته شدن تخلل های باز و کاهش امکان رسیدن محلول الکترولیت به آلیاژ پایه عنوان کرد [10].

از آنجایی که عملیات حرارتی برای بسیاری از کاربردهای پوشش های الکترولس پیشنهاد می شود و انجام این عملیات منجر به آزادسازی تنش ها، انقباض پوشش و بهبود چسبندگی پوشش می گردد، تأثیر عملیات حرارتی روی مقاومت به خوردگی پوشش بررسی شد. با توجه به جدول ۶ مشاهده می شود که افزایش نرخ خوردگی با افزایش دمای عملیات حرارتی رخ می دهد. علت این امر را می توان تشکیل پیل های گالوانیک در اثر رسوب فسفید نیکل، رشد دانه های نیکل و همچنین تشکیل ترک های انقباضی در پوشش عنوان کرد.

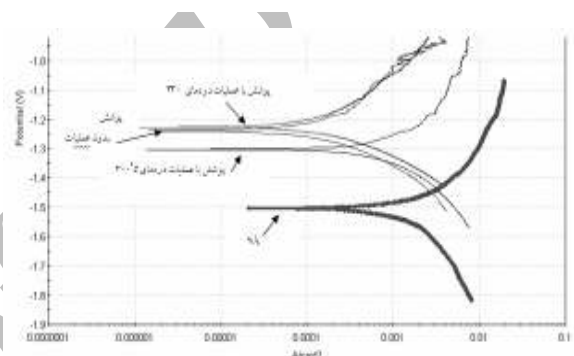
نتیجه گیری

۱- پوشش دهی در حمام سولفات در شرایط PH ۶/۴ و دمای ۸۰ °C باعث ایجاد پوشش کم فسفر نیکل- فسفر روی سطح می شود. این پوشش ها به دلیل نانو کریستال بودن از سختی اولیه ۷۲۰HV برخوردارند.

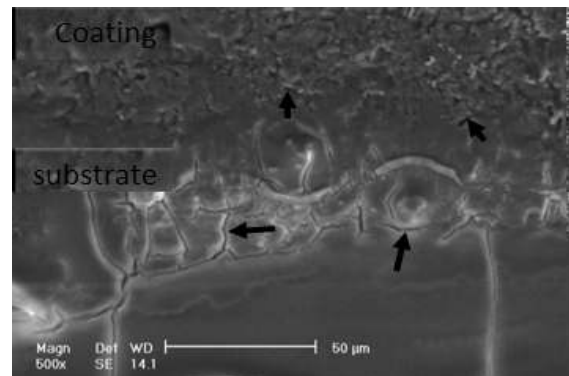
۲- انجام عملیات حرارتی به دلیل رسوب فاز Ni₃P باعث افزایش سختی می شود. افزایش دما هرچند موجب افزایش سختی پوشش می گردد اما سختی پایه را کاهش می دهد به همین دلیل معمولاً دمای کمتر از ۳۰۰ °C برای عملیات حرارتی منیزیم پیشنهاد می شود.



شکل ۴. منحنی پلاریزاسیون تافل پایه منیزیمی و پوشش در ضخامت های مختلف



شکل ۵. منحنی پلاریزاسیون تافل پایه منیزیمی و پوشش با عملیات حرارتی



شکل ۶. تخلخل های موجود در پوشش و خوردگی زیر لایه

جدول ۵. پارامترهای محاسبه شده از نمودارهای پلاریزاسیون نمونه های آلیاژ پایه بدون پوشش و پوشش داده شده در ضخامت های مختلف

ضخامت (μm)	پتانسیل خوردگی (Vvs. SCE)	جریان خوردگی (mA/cm ²)
پایه	-۱/۵۱	۱/۳۲
۱۰	-۱/۳۵	۰/۶۶
۱۵	-۱/۲۳	۰/۵۸
۲۰	-۱/۲۲	۰/۱۱

جدول ۶. پارامترهای محاسبه شده از نمودارهای پلاریزاسیون نمونه های آلیاژ پایه بدون پوشش و پوشش داده شده در عملیات حرارتی های مختلف

ضخامت (μm)	دما	زمان	پتانسیل خوردگی (Vvs. SCE)	جریان خوردگی (mA/cm ²)
پایه	-	-	-۱/۵۱	۱/۳۲
۲۰	-	-	-۱/۲۲	۰/۱۱
۲۰	۲۳۰	۲	-۱/۲۲	۰/۱۶
۲۰	۳۰۰	۲	-۱/۳۲	۰/۴۹

منابع

1. M. K. Kulekci, *Magnesium and its alloys applications in automotive industry*, Int J Adv Manuf Technol 39(2008)851-865.
2. D. Eliezer, E. aghion, F. h. (SAM) froes, *Magnesium Science, Technology and Applications*, Advanced Performance Materials 5(1998)201-212.
3. KH. M. shartal, G. J. Kipouros, *Electroless Nickel Phosphorus Plating on AZ31*, Metallurgical and Materials Transactions B 40(2009)208-222.
4. E. Ghali, W. Dietzel, and K. U. Kainer, *General and Localized Corrosion of Magnesium Alloy A Critical Review*, Journal of Materials Engineering and Performance, 13(2003)354-363.
5. Z. Liu* and W. Gao, *The effect of substrate on the electroless nickel plating of Mg and Mg alloys*, Surface & Coatings Technology 200(2006)3553-3560.
6. J. Lia*, Z. Shaob, X. Zhanga and Y. Tian, *The electroless nickel-plating on magnesium alloy using NiSO₄·6H₂O as the main salt*, Surface & Coatings Technology 200(2006)3010-3015.
7. K. G. Keong, W. Sha* and S. Malinoy, *Hardness evolution of electroless nickel-phosphorus deposits with thermal processing*, Surface and Coatings Technology 168 (2003) 263-274.
8. M. Yan, H. G. Ying and T. Y. Ma, *Improved microhardness and wear resistance of the as-deposited electroless Ni-P coating*, Surface & Coatings Technology 202(2008)5909-5913.

۳- تا ضخامت ۱۰ میکرون پوشش دهی الکترولس نیکل فسفر روی آلیاژ منیزیم، خوردگی آلیاژ پایه مشاهده می شود و افزایش ضخامت به ۱۵ میکرون باعث حذف خوردگی آلیاژ پایه می شود.

۴- با افزایش ضخامت پوشش مقاومت به خوردگی آن افزایش و دانسیته جریان آن می یابد. بنحوی که افزایش ضخامت از ۱۰ میکرون به ۲۰ میکرون باعث می شود دانسیته جریان ۶ برابر کاهش پیدا کند. دلیل این امر را می توان ماهیت متخلخل پوشش و کاهش میزان تخلخل با افزایش ضخامت دانست.

۵- انجام عملیات حرارتی به دلیل تشکیل پیل های گالوانیک در اثر رسوب فسفید نیکل، رشد دانه های نیکل و همچنین تشکیل ترک های انقباضی در پوشش منجر به کاهش مقاومت به خوردگی پوشش می شود.

9. L. Xue-song, Z. Wen-xue, J. Zhong-hao, *Preparation and property evaluation of electroless Ni-P coatings on AZ91D magnesium alloy*, Trans. Nonferrous Metallurgy Society China 17(2007)835-840.

۱۰. سعید احمدی زاده، سید محمود منیر واقفی، تأثیر ضخامت پوشش و زبری زیر لایه روی رفتار خوردگی پوشش های الکترولس Ni-P ایجاد شده بر روی آلیاژ Al5083، پوشش های سطحی، زمستان ۸۷، شماره ۲۶ ۱۲-۱۷.