



تأثیر میدان مغناطیسی بر ریز ساختار پوشش‌های نیکل حاصل از آبکاری الکتریکی

سید جواد سیدین نیا*، علیرضا نصر اصفهانی، شهاب ترکیان

دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع دانشگاهی علم مواد و مواد پیشرفته مغناطیسی

چکیده

پوشش‌های حاصل از آبکاری الکتریکی از دیر باز مورد استفاده صنعتگران و محققان زیادی بوده است. در راستای بهینه کردن پوشش‌های حاصل از این فرایند، تاکنون فعالیت‌های گوناگونی از جمله به کارگیری جریان منقطع، استفاده از یون‌های کمپلکس-ساز، آماده سازی زیرلایه، استفاده از اضافه شونده‌ها، تغییر پارامتر آبکاری و به کارگیری تجهیزات گوناگون انجام شده است. در این پژوهش از دو روش آبکاری الکتریکی مستقیم و منقطع پوشش‌دهی نیکل بر روی ورقه‌های مسی انجام شد. آنگاه میدان مغناطیسی ثابتی بر روی حمام اعمال و نتیجه آن بر روی سرعت پوشش‌دهی، هم پوشانی پوشش و ریز ساختار آن مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه پوشش‌های حاصله از نظر ریزساختار و مورفولوژی بررسی شد. جهت بررسی ریز ساختار و ضخامت پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) استفاده شد. برای فازبندی از پراش اشعه ایکس (XRD) و سختی‌سنجی از دستگاه میکروسختی ویکرز استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد، که پوشش آبکاری حاصل از میدان مغناطیسی تأثیر بسزایی در ریزساختار و ضخامت پوشش و تا حدودی سختی پوشش دارد، و با اعمال میدان مغناطیسی تا ۰/۵ تسلا باعث ریز شدن اندازه دانه‌ها و افزایش ضخامت نسبت به روش آبکاری ساده ۰/۲۵٪ و منقطع شده ۰/۷٪، و همچنین سختی پوشش در سمت S از ۰/۲ تا ۰/۵ تسلا ۰/۱۷٪ و در سمت N نیز ۰/۲۶٪ سختی بیشتر شده است. اندازه بلورک با اعمال میدان مغناطیسی ۰/۲ تسلا ۰/۳۲٪ نسبت به حالت آبکاری ساده تغییر داشته و در مقایسه با ۰/۵ تسلا ۰/۴۰٪ تغییرات دیده می‌شود.

واژگان کلیدی:

آبکاری الکتریکی
ریز ساختار
حمام‌های پوشش‌دهی
میدان مغناطیسی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۴/۲۵

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2036275.1620

The effect of magnetic field on the microstructure of nickel coatings obtained by electroplating

Abstract

Electroplating coatings have been used by many industrialists and researchers for a long time. In order to optimize the coatings resulting from this process, various activities have been carried out so far, including using intermittent current, using complexing ions, preparing the substrate, using additives, changing plating parameters and using equipment. It has been done in various ways. In this research, two methods of electroplating, direct and intermittent, were used to coat copper sheets with nickel. Then, a constant magnetic field was applied to the bath and its result on the coating speed, overlapping of the coating and its microstructure was investigated. Next, the resulting coatings were examined in terms of microstructure and morphology. A scanning electron microscope (SEM) was used to examine the microstructure and coating thickness. X-ray diffraction (XRD) and Vickers microhardness device were used for phasing. The obtained results showed that the electroplating coating obtained from the magnetic field has a significant effect on the microstructure and thickness of the coating and to some extent the hardness of the coating, and by applying a magnetic field up to 0.5 tesla, the grain size decreases and the thickness increases compared to the method. Simple plating is %25 and interrupted by % 7, as well as the hardness of the coating on the s side has increased from 0.2 to 0.5 tesla by % 17 and on the N side by % 26. The crystal size was changed by % 32 compared to simple electroplating by applying a magnetic field of 0.2 Tesla and % 40 changes were seen compared to 0.5 Tesla.

Keywords: electroplating, microstructure, coating baths.

* Corresponding author E-mail: Jv.sayedainnia@gmail.com

۱- مقدمه

فرآیند آبکاری الکتریکی روشی است که در آن نمونه‌ی مورد نظر به وسیله‌ی لایه‌های چسبیده و نازک از فلز دیگر پوشش داده می‌شود تا ظاهر و یا خواص مورد نظر آن بهتر شود. این فرآیند که شامل پوشش دادن یک فلز، آلیاژ و یا کامپوزیت بر روی فلزی دیگر با استفاده از جریان الکتریکی، از بیش از صد سال پیش مورد توجه محققان قرار گرفته است و هدف ایجاد پوششی با ویژگی‌های خاص از فلز است. با استفاده از این روش می‌توان لایه‌های نازک از مرتبه‌ی چند نانومتر هم تولید نمود [۱]. لایه‌نشانی یک فلز یا آلیاژ به وسیله‌ی جریان الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی اعمالی به‌عنوان الکترولیز مغناطیسی^۱ (ME) یا لایه‌نشانی الکترولیتی مغناطیسی^۲ شناخته می‌شود [۲]. وضعیت تحقیق و توسعه فناوری آبکاری الکتریکی تحت عمل میدان مغناطیسی خارجی معرفی شده است. ویژگی‌های اساسی و شیوه‌های کاربردی میدان مغناطیسی خارجی در فرآیند رسوب‌گذاری الکترومغناطیسی خلاصه می‌شود. اصل عمل میدان مغناطیسی خارجی، اثرات هیدرودینامیک مغناطیسی (MHD) ناشی از نیروی لورنتس، و اثر نیروی مغناطیسی بر روی یون‌ها و ذرات فلزی شرح داده شده است.

اعمال اصلی میدان مغناطیسی خارجی شامل اثر MHD، نیروی مغناطیسی، تأثیر بر خواص فیزیکی و شیمیایی حمام، تأثیر بر قابلیت پراکندگی و ظرفیت پوشش حمام، تأثیر بر فرآیند انتقال جرم الکترورسوب، تأثیر بر فرآیند واکنش شیمیایی و توزیع جریان سطح الکتروود می‌باشد. چند نمونه از پوشش‌های تک فلزی، پوشش‌های آلیاژی و پوشش‌های کامپوزیت تحت اثر میدان مغناطیسی توضیح داده شده است. در طول فرآیند آبکاری الکتریکی، میدان مغناطیسی خارجی درجات مختلفی بر خواص محلول، انتقال جرم، انتقال بار،

محتوای نانوذرات مرکب، رشد کریستال و جهت‌گیری کریستال و غیره تأثیر می‌گذارد. تأثیر ویژه میدان مغناطیسی در طول آبکاری الکتریکی نیز طبقه بندی و خلاصه می‌شود. مشکلاتی که در فرآیند آبکاری الکتریکی در حین اعمال میدان مغناطیسی و روند توسعه بعدی وجود داشت خلاصه شد [۳]. دانیلوک و همکاران [۴] منحنی‌های CV را که در طول آبکاری مس در میدان مغناطیسی $B = 0 - 0.178$ T بدست می‌آیند تجزیه و تحلیل کرد. آنها این پدیده را به اثر MHD نسبت دادند که فرآیند همرفت (و همچنین حرکت یون‌ها و مولکول‌ها) را در الکترولیت تشدید می‌کند و منجر به افزایش جریان فارادی و محدودکننده می‌شود. قبلاً مشاهده شده بود که میدان مغناطیسی ممکن است فرآیندهای الکتروشیمیایی را تحت تأثیر قرار دهد [۵-۶]. داده‌های به‌دست آمده نشان داد که چنین تغییراتی ناشی از اثر مغناطیسی هیدرودینامیکی (MHD) است. اثر MHD بر اساس نیروی لورنتس است که باعث القای حرکات الکترولیت و افزایش یا کاهش انتقال مولکول‌های الکترواکتیو به الکتروود می‌شود [۷]. هیندز^۳ و همکاران [۸] نشان دادند در حضور میدان مغناطیسی کوچک‌تر از ۰/۵ تسلا تغییر قابل ملاحظه‌ای در مورفولوژی سطح و بافت پوشش ایجاد نمی‌شود. همچنین با افزایش میدان مغناطیسی تا میزان ۰/۶ تسلا تأثیر میدان مغناطیسی بر فرآیند آبکاری الکتریکی مستقل از جهت میدان و نحوه‌ی قرارگیری الکتروود است. بریلاس^۴ و همکاران [۹] بیان کردند که اعمال میدان مغناطیسی در حین فرآیند آبکاری الکتریکی نیکل چه به صورت موازی و چه عمود بر سطح الکتروودها، منجر به افزایش تراکم دانه‌های نیکل و رشد با اندازه و شکل هندسی منظم‌تر می‌شود در نتیجه مورفولوژی سطحی به شدت تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. باند و همکاران [۱۰] تأثیر میدان مغناطیسی عمود بر رفتار الکتروشیمی مس و نیکل را بررسی کردند. مشاهده شد که

^۳ Hinds

^۴ Brillas

^۱ magnetoelectrolysis

^۲ magnetoelectrolytic deposition

در حضور میدان مغناطیسی، دانه‌بندی پوشش ریزتر می‌شود این عامل ناشی از افزایش جریان همرفتی است که منجر به افزایش در نرخ لایه‌نشانی می‌شود. جیانگ و همکاران [۱۱] با استفاده از ابکاری پاششی در حضور میدان مغناطیسی پوشش کامپوزیتی Ni-SiC را بر روی آهنربای NdFeB ایجاد کردند. نتایج نشان داد که ابکاری پاششی مغناطیسی عیوب سطحی پوشش را کاهش و صافی آن را افزایش می‌دهد. هونگ و همکاران [۱۲] نیز با استفاده از فرایند پاشش الکترولیتی نسبت به پوشش‌دهی مس در حضور میدان‌های مغناطیسی متفاوت اقدام کردند. نتایج نشان داد شدت میدان مغناطیسی بر اندازه و شکل دانه‌ها بی‌تاثیر است. پارک و همکاران [۱۳] هم که از برای پوشش‌دهی مس از ابکاری الکتریکی منقطع در حضور میدان مغناطیسی و از حمام $CuSO_4$ استفاده کرده بودند، نشان دادند که وجود میدان مغناطیسی (با شدت صفر تا ۶۰۰ گوست) تاثیر چندانی بر مورفولوژی پوشش مسی ندارد.

۲- مواد و روش تحقیق

در آزمایش‌ها برای ایجاد پوشش نیکل از صفحات مسی با ضخامت ۰/۵ mm و ابعاد $2 \times 2/5 \text{ cm}^2$ به عنوان کاتد استفاده شد. با توجه به این‌که پوشش‌دهی فقط در یک سمت کاتد صورت می‌گرفت و سمت دیگر کاتد توسط عایق (لاک) پوشانده شده بود در نتیجه سطح کاتد معادل 5 cm^2 یا dm^2 است. مس به دلیل آماده سازی سطحی آسان، تفاوت رنگ محسوس با پوشش نیکل، قابلیت برش ورقه‌های نازک و رسانایی الکتریکی بالا فلز مناسبی برای استفاده به عنوان زیرلایه در پوشش نیکل به نظر می‌رسد. هم‌چنین به دلیل این‌که هدف در این تحقیق، بررسی خواص خود پوشش بود، لذا در ابکاری الکتریکی تمامی پوشش‌ها از این ورقه‌ها به عنوان زیرلایه استفاده شد. از سرب هم می‌توان به عنوان آند غیرمصرفی استفاده کرد. برای انجام فرآیند ابکاری الکتریکی به منظور تهیه پوشش نیکل از آند مصرفی به شکل سربی

ورقه‌ی مسی با مساحت 20 cm^2 به عنوان آند استفاده شد. حجم محلول ابکاری ۲۵۰ ml در نظر گرفته شد و محلول ابکاری مربوط به هر پوشش نیکل در بشری با حجم ابکاری ۲۵۰ ml ساخته شد، ابکاری الکتریکی با جریان پالسی توسط دستگاه تولیدکننده‌ی جریان پالسی که pulse generator نامیده می‌شود انجام شد. این دستگاه با محدوده‌ی جریان 11A - 100mA با دقت 0.1A جریان ضربانی اعمال می‌کند. آماده سازی کاتدهای بریده شده از ورقه‌های مسی به ابعاد $2 \times 5 \text{ cm}^2$ بر اساس استاندارد ASTM E انجام شد. بدین صورت که برای از بین بردن چربی‌ها و آلودگی‌های سطحی، ابتدا سطح ورقه‌های مسی توسط کاغذهای سمباده ۲۰۰۰، ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ سمباده‌زنی شد سپس توسط محلول چربی زدایی (metal wash)، چربی زدایی شده و در محلول استون والکل به مدت الی ۱۵ دقیقه قرار داده و در نهایت با آب مقطر شستشو داده شده و خشک می‌کنیم. برای ابکاری در شرایط مغناطیسی آند در یک طرف حمام و در سمت دیگر کاتد به فاصله ۳ cm در مقابل آند قرار گرفت ولی در شرایط ابکاری معمولی و پالسی آند در دو طرف حمام و به فاصله ۱/۵ سانتی متر در کنار کاتد قرار می‌گیرند. در ابکاری نیکل، فلز آند به شکل مکعب مستطیل پیش از قرار گرفتن در مدار با آب مقطر شسته و برای ابکاری مس هم ورقه‌ی مسی به-وسیله‌ی استون شسته شد و داخل محلول قرار گرفت و چون هدف دست‌یابی به پوشش یک رویه بود، آند در یک سمت کاتد (ورقه‌ی مسی) قرار گرفت. در این تحقیق کار با ساخت پوشش نیکل از ترکیب شیمیایی بیان شده در جدول (۱) و به وسیله‌ی روش ابکاری ساده، پالسی و ابکاری در حضور میدان مغناطیسی استفاده شد. با استفاده از حمام واتس، دما، تلاطم و غلظت فلز در محلول افزایش می‌یابد. این امر خصوصاً برای ایجاد پوشش‌های صاف و ریزدانه خیلی مهم است. اگر یون فلزی در محلول زیاد باشد، ممکن است رشد شاخه‌ای باشد و اگر کم باشد باعث پلاریزاسیون می‌شود و باید چگالی جریان کم‌تری به کار رود. برای تهیه یک لیتر

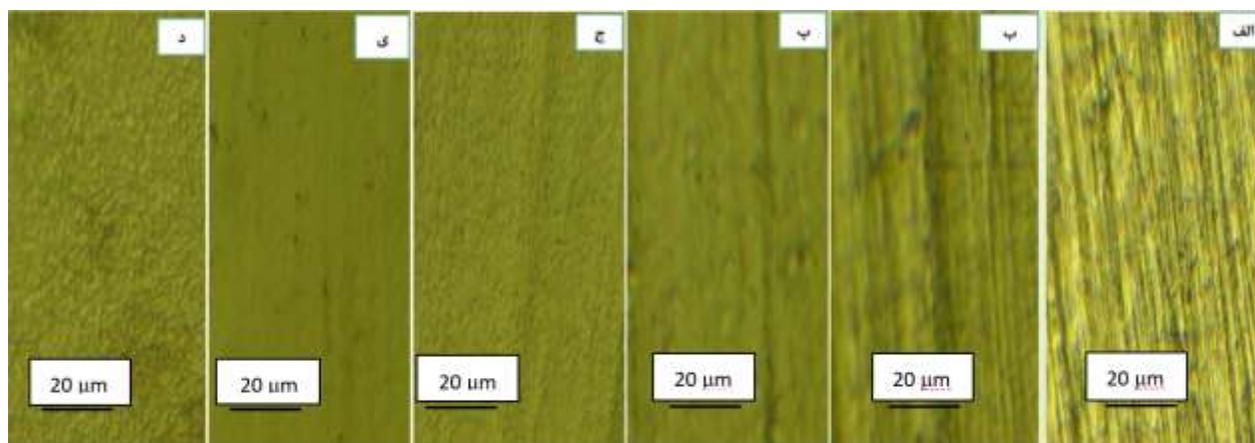
۳- نتایج و بحث

جهت بررسی ریز ساختار پوشش از میکروسکوپ نوری استفاده شد. شکل‌های (۱) تصاویر میکروسکوپ نوری در بزرگنمایی ۵۰۰ حاصل از پوشش نیکل حاصل از آبکاری الکتریکی در حضور میدان مغناطیسی گرفته شده است. زیر هر نمونه دارای دو سطح که به صورت چپ و راست جهت خطوط میدان مغناطیسی موازی (S-N) در نظر گرفته شده است.

محلول حمام واتس از سولفات نیکل، کلرید نیکل، اسید بوریک به ترتیب به ترتیب ۴۵،۲۴۰ و ۳۰ گرم بر لیتر به محلول آب مقطر اضافه شد. دمای آبکاری بر روی ۴۰ تنظیم شد تا طول آبکاری ثابت باشد. سپس حمام توسط همزن مغناطیسی با دور متوسط مخلوط شد و پس از تنظیم pH تحت عملیات آبکاری قرار گرفت. به منظور ارزیابی فازی و بررسی فازهای تشکیل شده حاصل از فرایند پوشش‌دهی، از آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده شد و جهت بررسی تغییرات سختی نمونه‌ها در اثر پوشش‌دهی، سختی‌سنجی توسط دستگاه میکروسختی سنج ویکرز انجام شده است.

جدول ۱. ترکیب حمام واتس [۱۴]

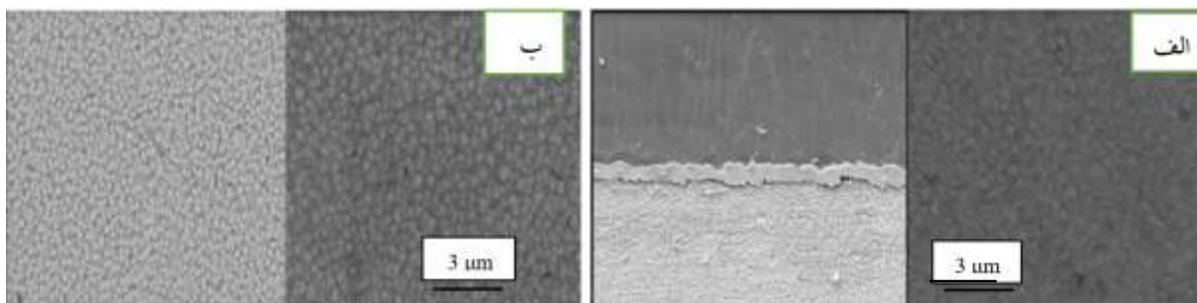
حمام pH کم	حمام pH زیاد	
۳۳۰	۲۴۰	سولفات نیکل (gr/lit)
۴۵	۴۵	کلرور نیکل (gr/lit)
۳۷/۵	۳۰	اسید بوریک (gr/lit)
۴/۵ تا ۱/۵	۶ تا ۴/۵	pH (الکترومتریک)
۴۵ تا ۴۱	۴۷ تا ۴۱	دما (°C)
۱۱ تا ۲/۷	۱۱ تا ۲/۲	چگالی جریان (A/dm ²)



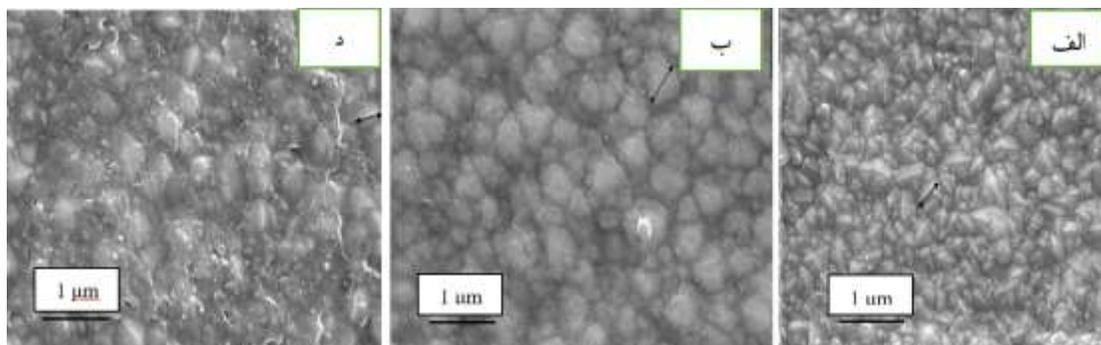
شکل ۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نوری حاصل از پوشش آبکاری الکتریکی در غیاب و حضور میدان مغناطیس، (الف) آبکاری ساده، (ب) پالسی ۷۶٪، (پ) ۰/۲، (ج) ۰/۳، (د) ۰/۴، (ی) ۰/۵ تسلا با بزرگنمایی ۵۰۰.

پوشش‌دهی افزایش می‌یابد. در حضور میدان مغناطیسی موازی سطح آند و کاتد، اندازه‌ی دانه‌های نیکل نسبت به پوشش در غیاب میدان کوچک‌تر شده و هم‌چنین تعداد دانه‌ها افزایش یافته است. در حالت اعمال میدان مغناطیسی به‌طوری که جهت خطوط میدان مغناطیسی موازی جهت جریان الکتریکی باشد، اندازه‌ی دانه‌های نیکل افزایش یافته و نسبت به پوشش در غیاب میدان مغناطیسی، رشد قابل ملاحظه‌ای یافته‌اند. افزایش نرخ پوشش‌دهی را می‌توان به ایجاد لایه‌های پوششی در نزدیکی سطح کاتد نسبت داد. در فرآیند آبکاری الکتریکی با اعمال جریان الکتریکی، یون‌های نیکل به سطح کاتد که می‌رسند پراکنده شده و در نزدیکی سطح کاتد احیاء می‌شوند.

با مشاهدتی که از تصاویر (۱) بدست آمده می‌توان به تاثیر میدان مغناطیسی و نوع میدان از ۰/۲ تا ۰/۵ تسلا بر روی پوشش پی‌برد، سطوح S نسبت به سطوح N صافی سطح بهتری دارند هرچه شدت میدان مغناطیسی بیشتر می‌شود، عیوب سطح پوشش را کاهش و صافی سطح را افزایش می‌دهد. جهت تعیین مورفولوژی و نوع عناصر موجود در پوشش آبکاری نیکل بر روی مس در غیاب و حضور میدان مغناطیسی ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ تسلا از میکروسکوپ الکترونی روبشی و آنالیز عنصری استفاده گردید. مشاهده می‌شود در شکل (۳) با اعمال میدان مغناطیسی تا ۰/۴ تسلا مورفولوژی پوشش نسبت به پوشش در غیاب میدان مغناطیسی شکل (۲) تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد و نرخ



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه (الف) سطح و مقطع نمونه در غیاب میدان مغناطیسی، (ب) از سطح نمونه در آبکاری پالسی در بزرگنمایی ۶۰۰.



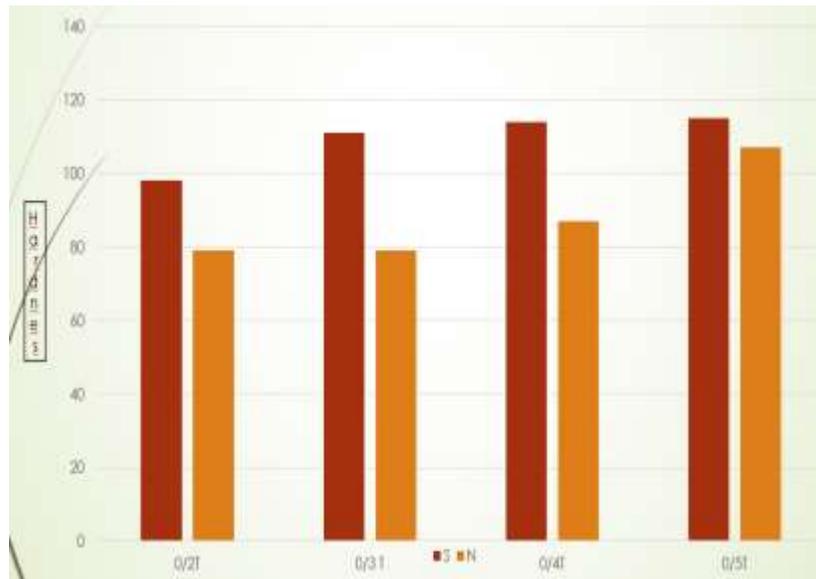
شکل ۳. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش به‌دست آمده از حمام آبکاری نیکل در حضور میدان مغناطیسی تسلا در بزرگنمایی، (الف) ۰/۲، (ب) ۰/۳، (د) ۰/۴. تسلا با بزرگنمایی ۶۰۰۰.

افزایش می‌دهند و پیش‌بینی می‌شود که با افزایش جریان یونی نزدیک سطح کاتد، نرخ پوشش‌دهی نیز افزایش یابد. تمایل به افزایش اندازه‌ی دانه در حضور میدان مغناطیسی عمود بر سطح الکترودها را نیز می‌توان به وسیله‌ی نیروی پارامغناطیسی توضیح داد. زیرا این نیرو با عمل بر گرادیان غلظت، شار یون‌های پارامغناطیس را افزایش داده و در نتیجه یون‌های بیش‌تری می‌توانند به لایه‌های پوششی وارد شوند.

با اعمال میدان مغناطیسی به‌طوری که جهت خطوط میدان هم راستا با جهت جریان الکتریکی از آند به کاتد باشد، نیروی پارامغناطیسی که پیش‌تر به آن اشاره شد بر یون‌های نیکل در لایه‌های پوششی نزدیک سطح کاتد تأثیر می‌گذارد. یون‌های نیکل در محلول پارامغناطیس هستند و نیروی پارامغناطیسی به دلیل این‌که همانند نیروی محرکه $(F_D = RT\vec{V}C)$ در راستای گرادیان غلظت عمل می‌کند، باعث افزایش سیلان یون‌های پارامغناطیسی می‌شود. در نتیجه، یون‌های بیش‌تری به سمت لایه‌های پوششی حرکت می‌کنند، جریان یونی را

جدول ۲. سختی پوشش‌های حاصل از آبکاری نیکل بر حسب ویکرز

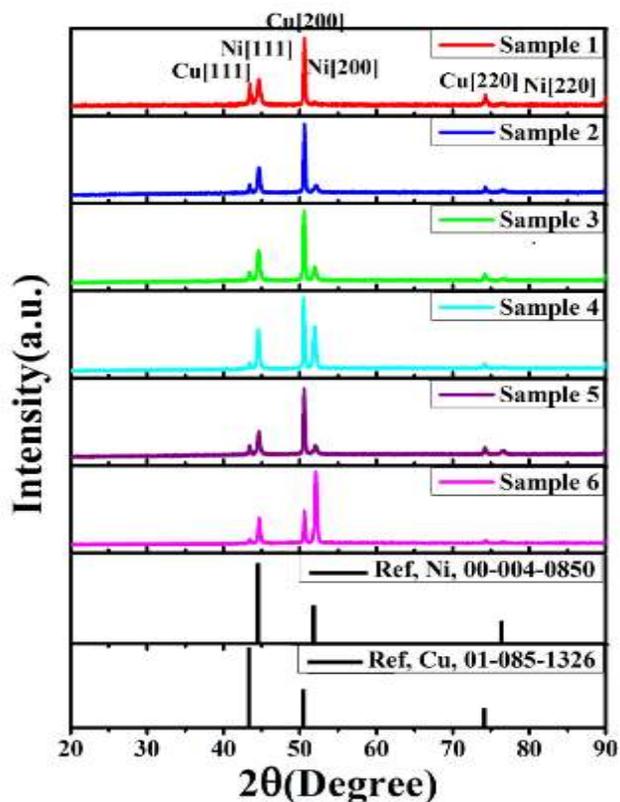
پوشش آبکاری	۰/۲ تسلا	۰/۳ تسلا	۰/۴ تسلا	۰/۵ تسلا
سمت S	۹۸	۱۱۱	۱۱۴	۱۱۵
سمت N	۷۹	۷۹	۸۷	۱۰۷
بار وارده (گرم)	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰



شکل ۴. نمودار سختی پوشش‌ها (N-S) نسبت به تسلا.

جهت خطوط میدان مغناطیسی موازی جهت خطوط جریان الکتریکی و از آند به سمت کاتد باشد را نشان می‌دهد. اندازه-ی بلورک‌های پوشش نیکل در این حالت نیز با استفاده از رابطه‌ی شرر محاسبه شد. اندازه بلورک‌ها به ترتیب شماره ۱ تا ۶ عبارتند از ۳۷، ۳۱، ۲۴/۲۸، ۲۳/۱، ۲۱/۸ میکرومتر بدست آمده است. الگوی پراش اشعه‌ی ایکس، به‌وضوح نشان می‌دهد که فلز نیکل دارای ساختار fcc است و صفحه‌ی (۱۱۱) دارای جهت اصلی می‌باشد. هم‌چنین در مورد تأثیر میدان مغناطیسی بر صفحات کریستالی بلور می‌توان گفت که میدان مغناطیسی باعث افزایش رشد ترجیحی در صفحه‌ی (۲۰۰) می‌شود. اندازه بلورک با اعمال میدان مغناطیسی ۰/۲ تسلا، ۳۲٪ نسبت به حالت آبرکاری ساده تغییر داشته و در مقایسه با ۰/۵ تسلا، ۴٪ تغییرات دیده شد.

با اعمال میدان مغناطیسی تا شدت ۰/۵ تسلا و در جهات مختلف، میکروسختی تاحدودی افزایش می‌یابد. این افزایش در حالت اعمال میدان موازی سطح الکترودها و از آند به کاتد در سمت S از ۰/۲ تا ۰/۳ تسلا به صعودی و از ۰/۳ تا ۰/۵ تسلا به صورت ملایم سختی افزایش پیدا کرده است. در سمت N نیز از ۰/۴ تا ۰/۵ تسلا افزایش ناگهانی سختی را شاهد هستیم. با توجه به جدول (۲) و شکل (۴) سختی پوشش در سمت S از ۰/۲ تا ۰/۵ تسلا ۱۷٪ و در سمت N نیز ۲۶٪ افزایش سختی مشاهده شده است. جهت اطمینان از آبرکاری الکتریکی پوشش‌های نیکل بر روی مس در حضور میدان مغناطیسی، آنالیز XRD به همراه تعیین اندازه‌ی کریستال، بر این پوشش‌ها صورت گرفت. شکل (۵) طیف XRD پوشش نیکل در غیاب و حضور میدان مغناطیسی است، به‌طوری که



شکل ۵. الگوی پراش پرتو ایکس حاصل از آبرکاری نیکل بر روی مس، (۱) ساده، (۲) پالسی با چرخه کاری ۶۶٪، (۳) ۰/۲ تسلا، (۴) ۰/۳ تسلا، (۵) ۰/۴ تسلا، (۶) ۰/۵ تسلا.

T. Z. Fahidy, J. App. Electrochem. 13 (1983) 553

۴- نتیجه گیری

[5] W. Szmaja, W. Kozłowski, K. Polański, J. Balcerski, M. Cichomski, J. Grobelny, M. Zieliński and E. Miękoś, Chem. Phys. Lett., 542 (2012) 117

۱- اعمال میدان مغناطیسی بر پوشش نیکل در حین فرآیند آبکاری الکتریکی باعث تغییر در ریزساختار و همچنین ضخامت پوشش نسبت نمونه آبکاری ساده و پالسی می‌شود.

[6] M. Zieliński, Mat. Chem. Phys., 141 (2013) 370-377

۲- اعمال میدان مغناطیسی موازی سطح الکترودها در حین آبکاری الکتریکی نیکل باعث ریزشدن اندازه دانه‌های پوشش می‌شود و افزایش ضخامت می‌شود.

[7] Hinds G., Spada F.E., Coey J.M.D, Michelin T.R, Lyons J, Magnetic field effects on copper electrolysis. *Phys. Chem. B* Vol.105,(2001), pp. 9487-9502.

۳- سختی، نیز با اعمال میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد.

[8] Brillas E., Rambla J., Casado J, Nickel electrowinning using a Pt catalysed hydrogen-diffusion anode. Part I: Effect of chloride and sulfate ions and a magnetic field, *Journal of Applied Electrochemistry* Vol.29, (1999),pp. 1367-1376.

۴- با اعمال میدان مغناطیسی ۰/۴ تا ۰/۵ تسلا بیشترین تغییر در ریزساختار و بیشترین ضخامت و بهترین سختی دارد.

[9] Bund A., Koehler S., Kuehnlein H.H., Plieth W, Magnetic field effects in electrochemical reactions, *Electrochimica Acta*, Vol. 49, (2003), pp. 147-152.

۵- نتایج حاصل از آنالیز XRD نشان می‌دهد که با اعمال میدان مغناطیسی موازی بر سطح الکترودها اندازه بلورک‌ها با افزایش شدت جریان مغناطیسی نسبت به آبکاری ساده و پالسی کمتر شده است.

[10] W. Jiang, L. Shen, M. Qiu, X. Wang, M. Fan, Z. Tian, Preparation of Ni-SiC composite coatings by magnetic field-enhanced jet electrodeposition, *J. Alloy. Comp*, Vol. 762,(2018),pp. 115–124.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای مهندس چمی، مدیر محترم آزمایشگاه مرکز تحقیقات دانشگاه آزاد نجف آباد جهت همکاری در استفاده از دستگاه SEM سپاسگزاری می‌شود.

[11] C.C. Hung, W.,H. Lee, S.C. Chang, G.J. Hwang, Y.L. Wang, Magnetic effect during copper electroplating using electrochemical impedance spectroscopy, *Jpn. J. Appl. Phys*, Vol. 48 (7),(2009),pp. 076506(1-5).

۵- مراجع

[12] B.N. Park, Y.S. Sohn, S.Y. Choi, Effects of a magnetic field on the copper metallization using the electroplating process, *Microelectron. Eng*, Vol. 85 (2), (2008),pp. 308–314

[1] Schlesinger M., Paunivic M., *Modern electroplating*. New York: John Wiley and Sons, Inc(2000).

[2] Fahidy T.Z., , “Characteristics of surfaces produced via magnetoelectrolytic deposition,” *Progress in Surface Science*, Vol. 68, pp. (2001)155-188.

[۱۳] قربانی. م، پوشش دادن فلزات، دانشگاه صنعتی

شریف، موسسه انتشارات علمی، ص ۱۰۵-۱۱۸، ۱۳۷۹

۱۴.

[3] M Wu, W Jia - MATEC Web of Conferences, 2016 - mtec-conferences.org

[4] A. L. Danilyuk, V. I. Kurmashev and A. L. Matyushkov, *Thin Solid Films*, 189 (1990) 247