



بررسی اثر نوع جریان بر پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ تولیدشده به روش رسوبدهی الکتریکی

محسن صالحی دولابی^۱ - سیدخطیب الاسلام صدرنژاد^۲ - مجتبی اسدی راد^۳

چکیده

پوشش‌های نانوکامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ با مقادیر مختلفی از نانوذرات آلومینا و به روش رسوبدهی الکتریکی متداول در یک حمام آبکاری الکتریکی کرم سه‌ظرفیتی پوشش داده شده است. هم‌چنین، اثر پارامترهایی نظیر مقدار ذرات افزوده‌شده به حمام، چگالی جریان و نوع جریان بر میزان حضور نانوذرات آلومینا در پوشش و بازدهی جریان کاتدی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نمایان‌گر این حقیقت بود که با افزایش مقدار نانوذرات آلومینا به حمام، بازده جریان کاتدی افزایش یافته و برآمد آن دست‌یابی به پوشش‌های با ضخامت بیش‌تر بوده است. بررسی‌ها مبین این مطلب است که نوع جریان اعمالی تأثیر بسیار مهمی بر بازدهی جریان کاتدی و میزان ذرات آلومینا در پوشش داشته است. در این پژوهش برای بررسی ریزساختار و نیز مشاهده‌ی موفولوژی پوشش از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و هم‌چنین برای تعیین درصد حضور نانوذرات آلومینا در پوشش از طیف-نگاری تفرق اشعه ایکس (EDS) استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی:

پوشش‌های نانوکامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ ، نانوذرات آلومینا، رسوبدهی الکتریکی، کرم سه‌ظرفیتی، بازدهی جریان کاتدی، FESEM، EDS.

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد، صندوق پستی ۹۴۶۶-۱۱۳۶۵، تهران

۲ استاد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد

۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی و علم مواد



۱. مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه فلزی تقویت شده با ذرات به طور معمول کاربردهای مهندسی گسترده‌ای یافته‌اند. چرایی این موضوع به خاطر سختی بهبود یافته، مقاومت به سایش و خوردگی بالاتر در مقام مقایسه با فلز خالص یا آلیاژ است [۸-۱]. در سال‌های اخیر، پوشش‌های کامپوزیتی با استفاده از ذرات فوق ریز مانند پودرهای فلزی (مانند Al_2O_3 ، SiO_2 ، TiO_2)، کاربیدها (مانند WC و SiC)، الماس و پلیمرها بر روی یک فلز یا زمینه‌ی آلیاژی تولید و هم‌چنین، خصوصیات و ساختارشان به وسیله‌ی پژوهشگران بسیاری مورد بررسی قرار گرفته‌است. هنگامی که این ترکیبات سرامیکی در یک زمینه‌ی فلزی که انعطاف پذیری بیشتر و استحکام کمتری دارد، رسوب داده می‌شوند، برآمد آن افزایش سختی است، این درحالی است که به علت پیوستگی زمینه‌ی فلزی انعطاف پذیری نیز حفظ می‌شود [۵-۳ و ۹]. در پوشش‌های نانو کامپوزیتی قطر ذرات تقویت کننده از ابعاد میکرومتری به زیر ۱۰۰ نانومتر کاهش پیدا می‌کند. مزیت کاهش قطر ذرات تقویت کننده افزایش سختی و استحکام، مقاومت به سایش و خوردگی پوشش به مقدار قابل توجه است. دستیابی به این خصوصیات مطلوب باعث کاربرد وسیع پوشش‌های نانو کامپوزیتی در صنایع مختلف شده‌است [۱۰]. پوشش‌های کامپوزیتی زمینه‌ی کرمی در پیستون‌های هیدرولیک، سیلندرها، رینگ پیستون‌ها، اجزای سایشی در خودرو، قطعات موتور فضاپیما و بخش‌هایی از راکتور هسته‌ای که در دماهای بالا کار می‌کنند، کاربردهای فراوانی دارند.

پوشش‌های کرم شش ظرفیتی که به صورت سنتی در حمام آبکاری تولید شده‌اند به طور وسیعی برای کاربردهایی از قبیل دکوراسیون، مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی و سختی بالا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱ و ۱۲]. با این وجود، پوشش‌های کرم شش ظرفیتی به دلیل سمیت بالا و سرطان‌زایی بایستی جایگزین دیگر ترکیبات گردند [۱۵-۱۱]. در ایالات متحده و هم‌چنین اتحادیه اروپا تا پایان سال ۲۰۱۰ کرم شش ظرفیتی به طور کامل از صنعت حذف خواهد شد. دستورالعمل‌هایی همچون "پس مانده‌های تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی" و "منع استفاده از قطعات خطرناک خاص در تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی" برای منع استفاده از این قطعات که حاوی یون‌های کرم شش ظرفیتی در تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی است صادر گردیده‌است. در کشورهایی هم‌چون چین و ژاپن نیز دستورالعمل‌های مشابهی برای منع استفاده از کرم شش ظرفیتی تصویب شده است [۲ و ۱۲]. مزیت اصلی حمام آبکاری یون‌های کرم سه ظرفیتی غیرسمی بودن آن است. همان‌طور که در مقالات گذشته آمده است، پوشش کرم سه-



ظرفیتی با ضخامت بالا به سادگی به دست نمی آید. بیشترین ضخامت کرم به دست آمده از حمام های کرم سه ظرفیتی به طور کلی کمتر از $10 \mu\text{m}$ بوده که پوشش هایی نامطلوب برای کاربردهای مقاومت به سایش به شمار می رود [۱۵].

تقریباً به طور قطع می توان ادعا نمود که پژوهشی در ارتباط با بررسی اثر نوع جریان اعمالی بر فرایند آبکاری الکتریکی پوشش نانوکامپوزیت $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ صورت نگرفته است. در تحقیق حاضر، ذرات نانومتری آلومینا در زمینه ی کرمی و در یک حمام الکترولیتی آبکاری الکتریکی کرم سه ظرفیتی با اعمال جریان مستقیم و پالسی پوشش داده شدند. سختی و مقاومت به سایش پوشش های کامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ هم چنین، مورفولوژی و ریزساختار پوشش ها به طور شدیدی به اندازه ی ذرات سرامیکی وابسته اند. یکی از پارامترهای مهم که اثر بسیار شدیدی بر ریزساختار و مورفولوژی پوشش های کامپوزیتی حاصل از فرایند رسوب دهی الکتریکی دارد نوع جریان اعمالی است. بنابراین، درصد حضور آلومینا، بازدهی جریان، ریزساختار پوشش ها پارامترهای مهمی به شمار می روند که بایستی تعیین شوند. در نهایت و برای مقایسه آزمایش هایی در شرایط مشابه و برای پوشش های کرم به تنهایی صورت خواهد گرفت.

۲. مواد و روش تحقیق

در تحقیق پیش رو، فرایند رسوب دهی الکتریکی به علت سادگی و ارزانی، دمای پایین فرایند، عدم محدودیت در شکل و اندازه ی زیرلایه، سادگی دستیابی به ساختار نانو و هم چنین تولید پوشش هایی با چگالی بالا و عاری از تخلخل به عنوان روشی مناسب برای تولید این پوشش ها انتخاب شده است. برای رسوب پوشش $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ از حمام کرم سه ظرفیتی استفاده شده است که ترکیب و شرایط آن در جدول شماره ۱ آمده است. پودر نانومتری $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (محصول شرکت امریکایی Nanostructured & Amorphous Materials Inc) با اندازه ذرات متوسط ۵۰ نانومتر مورد استفاده قرار گرفته است. مواد اولیه برای آماده سازی حمام کرم سه ظرفیتی به همراه مشخصات آن ها در جدول ۱ آمده است.

طریقه ی آماده سازی حمام آبکاری این گونه بود که ابتدا مقداری مشخص از پودر آلومینا که توسط ترازوی ۴ رقمی دیجیتال اندازه گیری شده بود به ۲۰ میلی لیتر آب مقطر در داخل یک بشر ۵۰ میلی لیتری اضافه و سپس توسط هم زن مغناطیسی و به مدت تقریباً یک ساعت هم زده می شد. سپس سوسپانسیون به دست آمده از فرایند هم زدن توسط هم زن مغناطیسی به مدت ۳۰ دقیقه تحت ارتعاش التراسونیک قرار



می‌گرفت تا با انجام این عملیات میزان آگلومراسیون ذرات آلومینا به حداقل میزان ممکنه برسد. پس از عملیات جداسازی ذرات توسط دستگاه التراسونیک سوسپانسیون حاصل دوباره به مدت ۱۲ ساعت توسط همزن مغناطیسی هم‌زده می‌شد. پس از آن محلول کرم سه‌ظرفیتی و آب مقطر به مقدار مناسب به سوسپانسیون آلومینا در آب مقطر اضافه می‌شد تا به حجم مناسب برسد.

علت این که پودر آلومینا قبل از اضافه‌شدن به محلول آبکاری کرم سه‌ظرفیتی به آب مقطر اضافه می‌شد این بود که از آگلومره‌شدن ذرات آلومینا تا حد امکان جلوگیری شود. زیرا ذرات سرامیکی تمایل زیادی به آگلومره‌شدن در الکترولیت‌های قوی دارند. نمونه‌های مسی پیش از پوشش‌دهی با سمباده‌های ۸۰۰ تا ۲۰۰۰ صیقل داده شده‌اند. سپس به منظور چربی‌زدایی سطح نمونه‌ها با استفاده از استن شستشو شدند. در مرحله‌ی نهایی آماده‌سازی، سطح نمونه‌ها قبل از وارد شدن در حمام، به مدت ۳۰ ثانیه در محلول ۲۰٪ اسید کلریدریک برای زدودن اکسیدهای سطحی اسیدشویی شدند و بلافاصله به منظور پوشش‌دهی وارد حمام شده و جریان برقرار می‌شود. از یک ورقه‌ی پلاتینی به‌عنوان آند استفاده شده است. کاتد و آند به صورت عمودی در سلول آبکاری قرار گرفتند. فاصله‌ی آن‌ها در تمام آزمایش‌ها ۲ سانتی‌متر حفظ شد. نمونه‌ها قبل و بعد از پوشش‌دهی با ترازوی ۵ رقم اعشار توزین شدند.

در این پژوهش برای مشاهده‌ی مورفولوژی سطحی پوشش نانوکامپوزیت $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ از میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) مدل HIT-S4۱۶۰. و برای به‌دست آوردن مقدار آلومینای رسوب-کرده در پوشش نانوکامپوزیتی از طیف‌نگاری تفرق اشعه ایکس (EDS) استفاده شده است.

۳. نتایج و بحث

۳.۱. اثر چگالی جریان میانگین بر درصدحجمی حضور نانوذرات آلومینا

شکل ۱ تغییر بازده جریان کاتدی حمام کرم را با چگالی جریان نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود بازده جریان کاتدی با افزایش چگالی جریان تا 25 A/dm^2 افزایش می‌یابد. نکته‌ی جالب توجه این است که به محض گذر چگالی جریان از 25 A/dm^2 بازده جریان کاتدی کاهش پیدا می‌کند. در پژوهش حاضر چگالی جریان‌های کمتر از 15 A/dm^2 به دلیل نرخ رسوب بسیار پایین مورد بررسی قرار نگرفت.

شکل ۲ ارتباط بین میزان نانوذرات آلومینای حاضر در پوشش و چگالی جریان میانگین را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش میانگین چگالی جریان تا 20 A/dm^2 ، درصدحجمی نانوذرات آلومینا در



پوشش‌های نانو کامپوزیتی افزایش یافته است و در چگالی جریان‌های بیشتر از 20 A/dm^2 کاهش می‌یابد. برای توضیح اثر چگالی جریان میانگین بر درصد حجمی نانوذرات آلومینا در پوشش، مدل گوگلیلی جزء اولین مدل‌هایی است که در این رابطه می‌تواند مدنظر قرار گیرد. گوگلیلی فرض کرد که هم رسوبی بر اساس دو مرحله جذب پی‌درپی انجام می‌گیرد. در مرحله آغازین که ماهیت فیزیکی دارد ذرات به گونه‌ای که پیوند بسیار ضعیفی با سطح کاتد دارند بر سطح کاتد جذب می‌شوند. این ذرات جذب‌شده با پیوندهای ضعیف با ذرات داخل سوسپانسیون که به وسیله یون‌های جذب‌شده احاطه شده‌اند در تعادل هستند. در مرحله دوم که ماهیت آن الکتروشیمیایی است، ذرات از توده یونی‌شان جدا شده و به صورت بسیار محکم به سطح کاتد جذب می‌شوند. به طور کلی، قبل از مقدار بیشینه، مرحله تعیین‌کننده سرعت میزان جذب نانوذرات آلومینا در پوشش‌های نانو کامپوزیتی مرحله جذب قوی است. چراکه این پدیده بسیار مشکل‌تر از جذب ضعیف رخ می‌دهد به ویژه برای رسوب الکتریکی کرم زیرا که بازده جریان کاتد برای رسوب کرم بسیار کم است. برعکس، درست پس از میزان بیشینه ذکر شده در بالا، جذب ضعیف پارامتر تعیین‌کننده سرعت جذب نانوذرات آلومینا در پوشش‌های کامپوزیتی است. هنگامی که چگالی جریان به مقادیر بیش‌تر از 20 A/dm^2 می‌رسد، کاهش میزان نانوذرات آلومینا در پوشش کامپوزیتی به وسیله این واقعیت که افزایش چگالی جریان منجر به رسوب بیش‌تر زمینه‌ی فلزی و کمتر ذرات در پوشش می‌شود قابل تفسیر است.

۳.۲. بررسی اثر افزودن نانوذرات آلومینا به حمام

شکل ۳ بیان‌گر تغییر در بازده جریان کاتدی با اضافه کردن نانوذرات آلومینا به حمام است. با حضور نانوذرات آلومینا در سطح کاتد، شرایط مساعدی برای تشکیل پوشش به وجود آمده که سبب افزایش بازده جریان کاتدی می‌شود [۱].

شکل ۴ ارتباط بین درصد حجمی نانوذرات آلومینای رسوب کرده در پوشش و میزان ذرات افزوده شده در حمام را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از شکل برمی‌آید درصد وزنی نانوذرات آلومینا در پوشش کامپوزیتی با افزایش میزان نانوذرات آلومینا در حمام تا مقدار ۱۰ گرم بر لیتر با شیب زیادی افزایش می‌یابد. با بیشتر شدن میزان آلومینا در الکترولیت از ۱۰ گرم بر لیتر، درصد وزنی نانوذرات آلومینا در پوشش کامپوزیتی کاهش می‌یابد. چنین رفتار مشابهی نیز در پوشش‌های کامپوزیتی با زمینه فلزی نیکل



مشاهده شده است [۱۵]. همان گونه که از شکل ۳ برمی آید، درصودزنی ذرات آلومینای رسوب کرده به بیشینه‌ی خود می‌رسد هنگامی که غلظت نانوذرات آلومینا در میزان بهینه‌ی ۱۰ گرم برلیتر نگه داشته شود. بر اساس مدل دو مرحله‌ای گوگلیلمی [۱۵]، غلظت‌های بالاتر از ذرات آلومینا در الکترولیت باعث افزایش نرخ جذب می‌شود که منتج از درصودزنی بالاتر نانوذرات آلومینا است. این درحالی است که در غلظت‌های بالاتر از ۱۰ گرم برلیتر درصد وزنی نانوذرات آلومینا کاهش می‌یابد. که این امر به علت آگلومراسیون شدید ذرات آلومینا در الکترولیت است.

۳.۳. اثر چرخه‌ی عملکرد دستگاه بر پوشش‌های نانوکامپوزیتی

برای بررسی اثر چرخه‌ی عملکرد دستگاه بر درصدحجمی حضور نانوذرات آلومینا، پوشش‌های نانوکامپوزیتی تحت شرایط پوشش‌دهی با جریان مستقیم و پالسی تهیه گردید. شکل ۶ تاثیر چرخه‌ی عملکرد دستگاه بر درصدحجمی نانوذرات آلومینا درپوشش کامپوزیتی را در فرکانس ۱۰ هرتز، نشان می‌دهد. همان گونه که از این شکل برمی آید کاهش چرخه‌ی عملکرد دستگاه منجر به حضور بیش‌تر آلومینا در پوشش کامپوزیتی شده است. هم‌چنین کامپوزیت‌های رسوب کرده تحت شرایط پالسی درصد حضور بالاتری از نانوذرات آلومینا را در مقایسه با آن‌هایی که با جریان‌های مستقیم به‌دست آمده‌اند را نشان می‌دهند.

شکل ۷ نمایان‌گر اثر چرخه‌ی عملکرد دستگاه در حالت پالسی بر بازده جریان کاتدی کرم خالص و پوشش‌های نانوکامپوزیتی $Cr-Al_2O_3$ به‌دست آمده در چگالی جریان میانگین $20 A/dm^2$ است. مشاهدات به‌دست آمده از این شکل حاکی از آن است که چگالی جریان کرم خالص و پوشش نانوکامپوزیتی $Cr-Al_2O_3$ با افزایش چرخه‌ی عملکرد دستگاه تا ۴۰ درصد، افزایش می‌یابد. با گذر از میزان ۴۰ درصد، بازدهی جریان کرم خالص و پوشش نانوکامپوزیتی $Cr-Al_2O_3$ کاهش می‌یابد. همان گونه که چرخه‌ی عملکرد دستگاه افزایش می‌یابد، جریان زمان خاموشی افزایش و زمان روشنی کاهش می‌یابند. در چرخه‌ی عملکرد دستگاه پایین به دلیل این که زمان اعمال جریان بسیار کم است، میزان رسوب تشکیل شده نسبت به مقادیر بالاتر آن کم است. هم‌چنین در مقادیر خیلی زیاد چرخه‌ی عملکرد دستگاه جریان پالسی بسیار کم بوده و به همان نسبت بازده جریانی که به‌دست می‌آید کاهش می‌یابد. همان گونه که در شکل ۷



آمده است، بیشینه‌ی بازده جریان برای کرم خالص و پوشش نانوکامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ حاصله در چرخه‌ی عملکرد دستگاه ۴۰ درصد حاصل می‌شود.

۴. نتیجه‌گیری

ذرات آلومینا می‌توانند با موفقیت همراه با فلز کرم در پوشش هم‌رسوبی کرده و پوشش نانوکامپوزیت $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ را تولید کنند. مقدار ذرات آلومینا در حمام بر بازده جریان کاتدی تأثیرگذار است به طوری که با افزایش مقدار ذرات در حمام بازده جریان کاتدی نیز افزایش می‌یابد. اگر میزان حضور ذرات آلومینا در حمام از ۱۰ گرم بر لیتر بیش تر شود به علت آگلومره شدن ذرات میزان حضور ذرات در پوشش کامپوزیتی کاهش می‌یابد. با کاهش چرخه‌ی عملکرد مقدار ذرات به دست آمده در پوشش افزایش می‌یابد به طوری که بیشترین حضور ذرات در پوشش تولید شده با چرخه‌ی عملکرد ۲۰ درصد به دست می‌آید. بیشترین بازده جریان کاتدی برای پوشش‌های کرم و کامپوزیتی $\text{Cr-Al}_2\text{O}_3$ در چرخه‌ی عملکرد ۴۰ درصد حاصل می‌شود.

مراجع

۱. M.R. Vaezi , S.K. Sadrnezhad, L. Nikzad, "Electrodeposition of Ni-SiC nano-composite coatings and evaluation of wear and corrosion resistance and electroplating characteristics", Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects ۳۱۵, ۲۰۰۸, ۱۷۶-۱۸۲.
۲. Zhixiang Zeng , Junyan Zhang , "Electrodeposition and tribological behavior of amorphous chromium-alumina composite coatings", Surface & Coatings Technology ۲۰۲, ۲۰۰۸, ۲۷۲۵-۲۷۳۰.
۳. Li Chen , Liping Wang , Zhixiang Zeng , Tao Xu , "Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni- Al_2O_3 composite coatings", Surface & Coatings Technology ۲۰۱, ۲۰۰۶, ۵۹۹-۶۰۵.
۴. P. Gyftou, E.A. Pavlatou, N. Spyrellis, "Effect of pulse electrodeposition parameters on the properties of Ni/nano-SiC composites", Applied Surface Science, article in press.



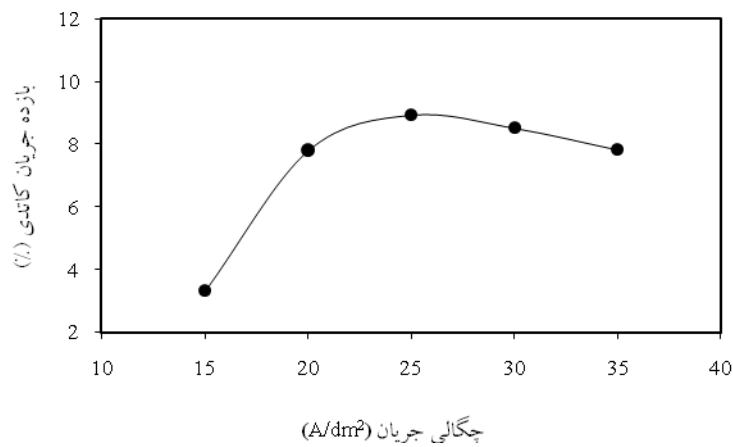
۵. S. Survilienė, L. Orlovskaja, G. Bikulcius, S. Biallozo, "Effect of MoO_3 and TiO_2 on electrodeposition and properties of chromium coating", Surface and Coatings Technology ۱۳۷, ۲۰۰۱, ۲۳۰-۲۳۴.
۶. P. Gyftou, M. Stroumbouli, E.A. Pavlatou, P. Asimidis, N. Spyrellis, "Tribological study of Ni matrix composite coatings containing nano and micro SiC particles", Electrochimica Acta ۵۰, ۲۰۰۵, ۴۵۴۴-۴۵۵۰.
۷. Bogdan Szczygieł, Małgorzata Kołodziej, "Composite Ni/ Al_2O_3 coatings and their corrosion resistance", Electrochimica Acta ۵۰, ۲۰۰۵, ۴۱۸۸-۴۱۹۵.
۸. Denny Thiemig, Andreas Bund, Jan B. Talbot, "Influence of hydrodynamics and pulse plating parameters on the electrocodeposition of nickel-alumina nanocomposite films", Electrochimica Acta, in press.
۹. R.Narayan, S.Chattopadhyay, Electrodeposited Cr- Al_2O_3 Composite coating, Surface Technology, ۱۶ (۱۹۸۲) ۲۲۷ - ۲۳۴.
۱۰. B. Du, B. Xu, S. Dong, H. Yang, Y. Wu, "Preparation, microstructure and tribological properties of nano- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ brush plated composite coating", Surface and Coating Technology, Vol. ۱۹۲, ۲۰۰۵, ۳۱۱-۳۱۶.
۱۱. G. Saravanan, S. Mohan, Pulsed electrodeposition of microcrystalline chromium from trivalent Cr-DMF bath, J Appl Electrochem, ۲۰۰۹, ۳۹, ۱۳۹۳-۱۳۹۷.
۱۲. Zhixiang Zenga, Aimin Lianga, Junyan Zhang, Electrochemical corrosion behavior of chromium-phosphorus coatings electrodeposited from trivalent chromium baths, Electrochimica Acta ۵۳, ۲۰۰۸, ۷۳۴۴-۷۳۴۹.
۱۳. J. Mcdougall, M. EL-SHARIF, S. MA, Chromium electrodeposition using a chromium (III) glycine complex, journal of applied electrochemistry, ۲۸, ۱۹۹۸, ۹۲۹-۹۳۴.
۱۴. A.A. Edigaryan, V.A. Safonov, E.N. Lubnin, L.N. Vykhodtseva, G.E. Chusova, Yu. M. Polukarov, "Properties and preparation of amorphous chromium carbide electroplates", Electrochimica Acta, ۴۷, ۲۰۰۲, ۲۷۷۵-۲۷۸۶.
۱۵. Sheng-Chang Wang, Wen-Cheng J. Wei, "kinetics of electroplating process of nano-sized ceramic particle/Ni composite", Materials Chemistry and Physics ۷۸, ۲۰۰۳, ۵۷۴-۵۸۰.



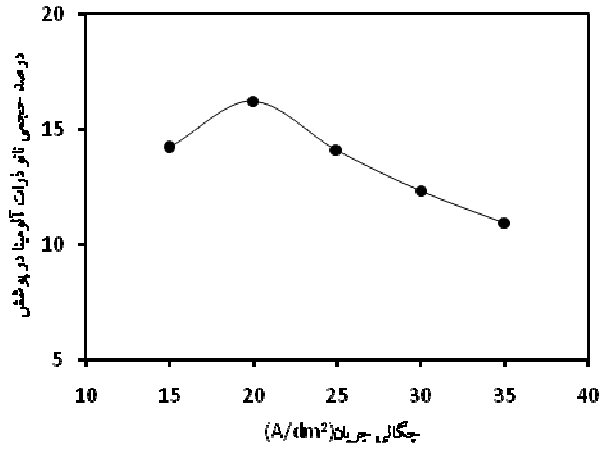
جداول، شکل ها و نمودارها

جدول ۱: ترکیب حمام کرم سه ظرفیتی و شرایط پوشش دهی

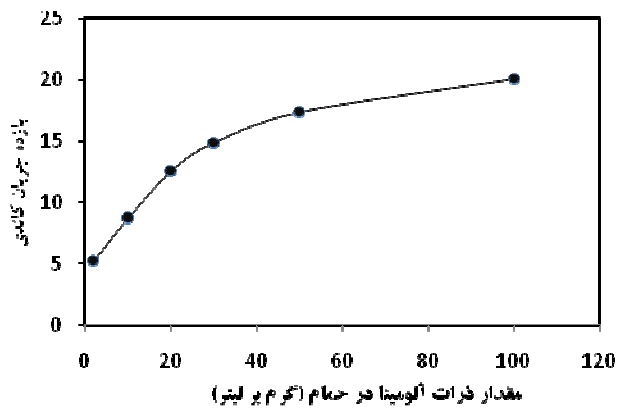
ترکیب	مقدار (مول برلیتر)	شرایط پوشش دهی	
		دما ($^{\circ}\text{C}$)	30 ± 1
$\text{CrCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۰/۴	pH	۲/۷
$\text{C}_7\text{H}_5\text{O}_2\text{N}$	۰/۵	سرعت هم زدن	۲۰۰ rpm
NH_4Cl	۰/۵	آند	پلاتین
NH_4Br	۰/۲	کاتد	مس
KCl	۰/۵	مقدار Al_2O_3 در حمام	۱g/l
H_2BO_3	۰/۵		
$\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	۰/۱		



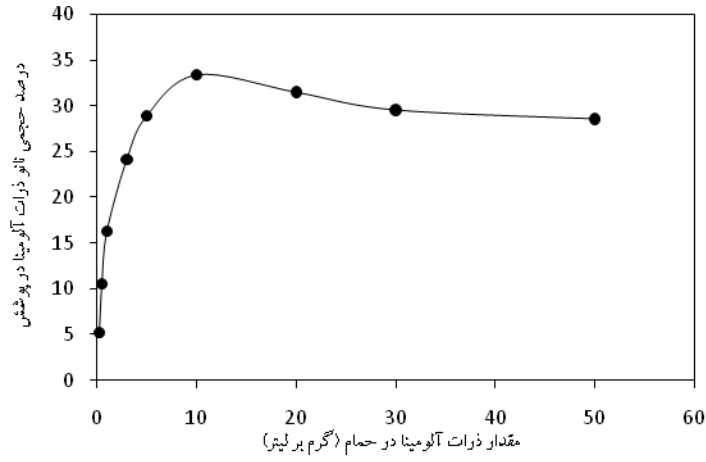
شکل ۱: تأثیر چگالی جریان بر بازده جریان کاتدی حمام کرم



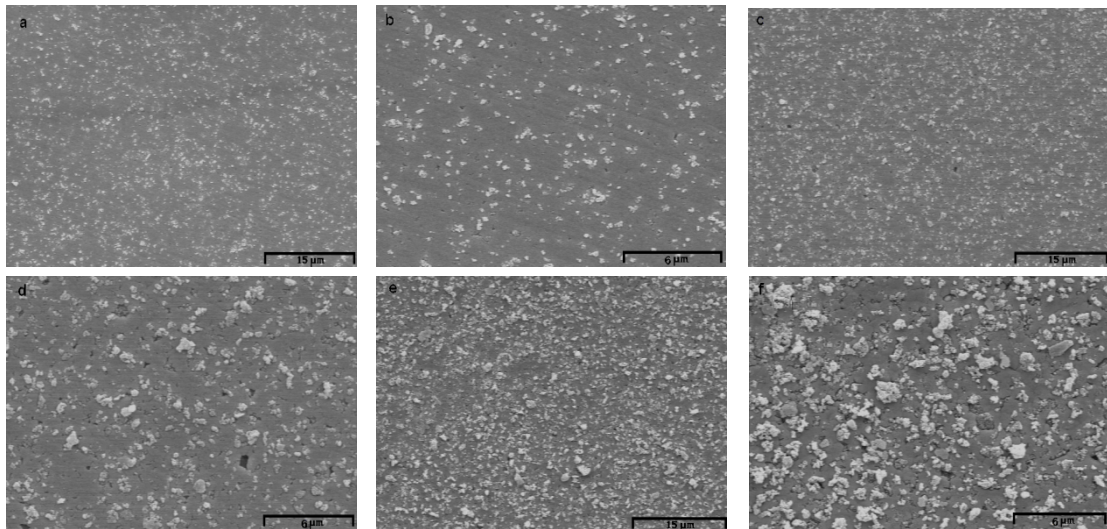
شکل ۲: تأثیر چگالی جریان میزان درصد حضور ذرات نانوذرات آلومینا در حمام کرم حاوی ۱ گرم برلیتر آلومینا



شکل ۳: تأثیر چگالی جریان بر بازده جریان کاتدی حمام کرم سه ظرفیتی

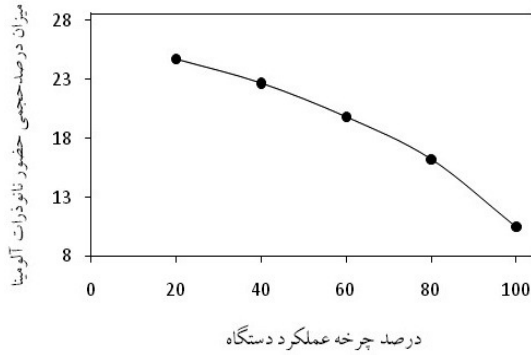


شکل شماره ۴: ارتباط بین میزان آلومینا در حمام و پوشش کامپوزیتی

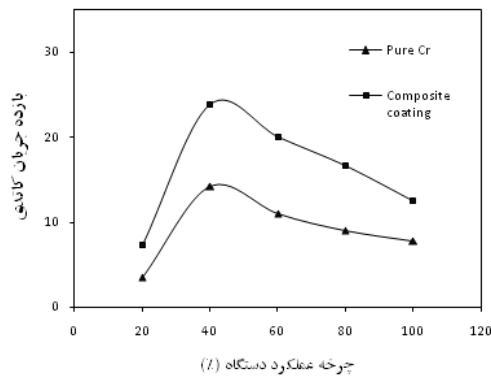


شکل ۵: میکروگراف مورفولوژی سطحی پوشش‌های نانو کامپوزیتی $Cr-Al_2O_3$ با مقادیر مختلف آلومینا در سوسپانسیون

(a), (b) ۰.۵ g/l; (c), (d) ۱ g/l; (e), (f) ۵ g/l



شکل ۶: اثر چرخه عملکرد دستگاه بر درصد حضور نانوذرات آلومینا در حمام کرم حاوی ۱ گرم برلیتر آلومینا



شکل ۷: اثر چرخه عملکرد دستگاه بر بازده جریان کاتدی پوشش کرم و Cr-Al₂O₃ در حمام کرم حاوی ۱ گرم برلیتر آلومینا