

ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی نیکل / اکسید تیتانیوم / اکسید آلومینیوم به روش رسوب‌دهی الکتریکی

محمد میرک* و فرشید طهماسبی

دانشگاه صنعتی شیراز- گروه مهندسی مواد

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۰/۰۹/۰۶، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۱۳۹۰/۱۱/۰۹، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۰/۱۲/۲۵

چکیده

در این مطالعه، پوشش نانوکامپوزیتی نیکل - اکسید تیتانیوم - اکسید آلومینیوم به روش رسوب‌دهی الکتریکی از حمام وات در غلظت‌های مختلف ذرات اکسید، روی زیرلایه فولاد آلیاژی ایجاد شده است. افزایش ذرات تقویت‌کننده روی مورفولوژی سطح تاثیر گذاشت و سبب اصلاح دانه‌بندی ذرات پوشش شد. توزیع ذرات در پوشش روی خواص پوشش بررسی گردید. نتایج نشان داد با افزایش مقدار ذرات تقویت‌کننده در پوشش، میکروسختی افزایش می‌یابد و در حدود ۷/۹ درصد وزنی به بیشترین مقدار خود یعنی ۴۲۵ ویکرز می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: پوشش کامپوزیتی، اکسید تیتانیوم، اکسید آلومینیوم، رسوب‌دهی الکتریکی، میکروسختی.

۱- مقدمه

[۱،۲،۵] باشند. به طور کلی وجود فاز ثانویه در پوشش رسوب کرده، سبب بهبود خواص پوشش ایجاد شده مانند افزایش سختی [۱۰-۵]، استحکام تسلیم [۵]، استحکام کششی و افزایش مقاومت به خوردگی [۶-۴] شوند. روش‌های زیادی برای ایجاد پوشش‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. پوشش‌های کامپوزیتی توسط روش‌هایی از جمله اسپری حرارتی، رسوب‌دهی بخار به روش فیزیکی، رسوب‌دهی بخار به روش شیمیایی و رسوب‌دهی الکتریکی ایجاد می‌شوند. به دلیل اینکه رسوب‌دهی الکتریکی در فشار طبیعی، دمای محیط، همراه با هزینه پایین، نرخ رسوب‌دهی بالا و توزیع یکنواخت ذرات همراه می‌باشد، این روش به عنوان یک روش مهم

پوشش‌دهی کامپوزیتی از جمله روش‌هایی برای قرار دادن ذرات ریزفلزی، غیرفلزی و پلیمری در زمینه پوشش ایجاد شده جهت بهبود خواص ماده مانند مقاومت به سایش، مقاومت به خوردگی و افزایش خواص خوردگی می‌باشد [۵-۱]. در مدت زمان پروسه پوشش‌دهی، ذرات غیرقابل حل در محلول بصورت معلق نگه داشته می‌شوند تا با قرار گرفتن در پوشش مانع از جلوگیری رشد ذرات زمینه پوشش شوند. ذرات فاز ثانویه می‌توانند شامل اکسیدهای سخت (اکسید آلومینیوم، اکسید تیتانیوم، اکسید سیلیسیم) [۳-۱]، ذرات کاربیدی (کاربید سیلیسیم، کاربید تنگستن)

* عهده‌دار مکاتبات: محمد میرک

نشانی: شیراز، دانشگاه صنعتی شیراز، گروه مهندسی مواد

تلفن: ۰۷۱۱-۷۳۵۴۵۰۹، فاکس: ۰۷۱۱-۷۳۵۴۵۲۰، پست الکترونیکی: mohammad.mirak@gmail.com

گرم در لیتر، کلرید نیکل ۳۰ گرم در لیتر، اسید بوریک ۲۶ گرم در لیتر، سدیم دو دسیل سولفات ۰/۲ گرم و ساخارین ۵ گرم در لیتر می‌باشند. در این حالت پس از تهیه محلول اسیدیته محلول را ثابت نگهداشته که برای این کار از محلول اسید نیتریک و اسید کلریدریک ده درصد وزنی استفاده می‌کنیم اسیدیته محلول را در مقدار ۴ ثابت نگه می‌داریم تا تمایل به هیدرولیز بوجود آمده و تولید نمک‌های بازی کاهش یابد. برای ایجاد پوشش کامپوزیتی از ۲۵-۴ گرم در لیتر پودر اکسید تیتانیوم و اکسید سیلیسیم با میانگین سایز ۴۰ نانومتر استفاده شد. پودر اکسید تیتانوم و اکسید سیلیسیم به محلول سوسپانسیون اضافه شد و برای جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات حین رسوب‌دهی قبل از انجام رسوب‌دهی محلول به مدت ۴۸ ساعت با سرعت ۶۰۰ دور در دقیقه توسط چرخش مغناطیسی بهم زده شد. علاوه بر این برای جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات و جلوگیری از حفره‌دار شدن از ماده کاهش دهنده سدیم دو دسیل سولفات به مقدار ۰/۲ گرم در لیتر استفاده شد. محلول را قبل از استفاده به مدت ۳۰ دقیقه توسط امواج مافوق صوت متلاطم می‌نماییم. صفحه فولاد آلیاژی با ابعاد $1 \times 16 \times 30$ میلیمتر به عنوان زیرلایه استفاده شد و صفحه‌ای از جنس نیکل با ابعاد $5 \times 30 \times 60$ میلیمتر و خلوص ۹۹/۹٪ به عنوان آند حل شونده مورد استفاده قرار گرفت. ابعاد آند تقریباً ۵ برابر کاتد انتخاب گردید تا از پلاریزاسیون آندی نیکل جلوگیری شود. آند و کاتد بصورت عمودی و با فاصله ۳ سانتیمتر از هم در محلول قرار داده شد. قبل از شروع عملیات پوشش‌دهی نمونه فولادی مورد عملیات آماده‌سازی قرار گرفت. بدین صورت که ابتدا تا سنباده ۲۰۰۰ پولیش شد و نمونه در محلول استون قرار گرفته و به مدت ۱۵ دقیقه تحت امواج مافوق صوت قرار گرفت و نهایتاً توسط آب مقطر شستشو شد. سطح کاتد در مخلوطی از ترکیب چند اسید فعال شد و بعد از شستن مجدد در آب مقطر سریعاً در حمام پوشش‌دهی قرار داده شد. حین انجام فرآیند پوشش‌دهی برای توزیع یکنواخت ذرات، محلول با سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه به چرخش درآورده شد. دمای فرآیند پوشش‌دهی ۴۵ درجه سانتیگراد می‌باشد و برای ثابت نگهداشتن دما از هیتر

در تولید پوشش‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۳،۱۱،۱۲]. بررسی‌های زیادی در رابطه با مکانیزم تاثیرگذاری ذرات در زمینه پوشش انجام پذیرفته است از جمله تاثیر نانوذرات اکسید آلومینیوم بر جوانه‌زنی الکتروشیمیایی ذرات نیکل و همینطور تاثیر بر پیوندهای شیمیایی زمینه نیکلی اشاره کرد [۸]. بررسی‌های دیگری روی خواص پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل - اکسید تیتانیوم انجام گرفته و بر اساس نتایج بدست آمده توزیع ذرات اکسید تیتانیوم در زمینه نیکل سبب اصلاح دانه‌بندی پوشش و همچنین سبب افزایش سختی پوشش می‌شوند [۹]. هدف از این بررسی‌ها افزایش سرعت قرار گرفتن نانوذرات در زمینه فلزی و توزیع یکنواخت نانوذرات در پوشش می‌باشد. Shrestha و همکارانش روی تاثیر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم بر خواص سایشی پوشش تولیدی مطالعه کردند و نشان دادند افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم سبب افزایش مقاومت به سایش می‌شود [۱۳]. علاوه بر این Gao و Balaraju تاثیر اکسید آلومینیوم روی خواص سختی پوشش را بررسی کردند و گزارش دادند که حضور نانوذرات اکسید آلومینیوم خواص سختی پوشش را افزایش می‌دهد [۱۴،۱۵]. تحقیقات دیگری روی خواص پوشش نانوکامپوزیتی نیکل - اکسید تیتانیوم انجام شده است که نتایج نشان می‌دهد که پوشش نیکل - اکسید تیتانیوم مقاومت به خوردگی بالاتری در مقایسه با پوشش نیکل خالص نشان می‌دهد [۱۶].

با توجه به مطالعات انجام شده و موارد ذکر شده هنوز بررسی جامع در خصوص تاثیر همزمان اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم در خواص پوشش انجام نشده است. در این تحقیق پوشش نانوکامپوزیتی نیکل - اکسید تیتانیوم - اکسید آلومینیوم به روش رسوب‌دهی الکتریکی روی فولاد آلیاژی ایجاد شد و تاثیر پارامترهای روش مانند درصد پودر روی خواص پوشش ایجاد شده بررسی گردید.

۲- فعالیت‌های تجربی

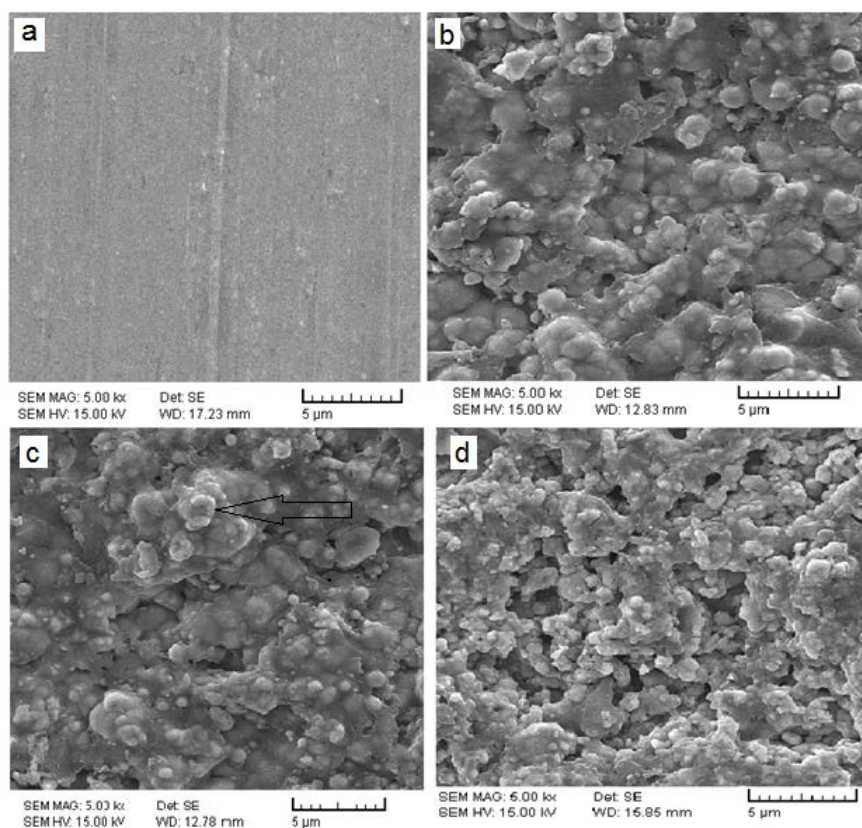
در روش رسوب‌دهی الکتریکی از حمام آبکاری که بر اساس حمام وات تشکیل شده است استفاده می‌کنیم. اجزای تشکیل‌دهنده حمام عبارتند از سولفات نیکل ۳۰۰

استفاده شد. مقدار جریان برای پوشش دهی ۱ آمپر بر دسی متر مربع و از نوع جریان مستقیم استفاده گردید. همچنین مقدار کل پودر مورد استفاده در محلول پوشش دهی ۲۵-۴ گرم در لیتر بود و نسبت ۵۰:۵۰ برای هر دو پودر استفاده شد. بعد از اتمام فرآیند پوشش دهی قطعه به مدت ۱۵ دقیقه در تماس با امواج مافوق صوت قرار داده شد تا ذراتی که پیوند منسجمی با پوشش ندارند جدا شوند. بررسی مورفولوژی سطح پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی TESCAN و آنالیز کمی آن توسط EDX انجام شد و سختی پوشش نانوکامپوزیتی توسط یک دستگاه میکرو سختی سنج WOLPERT WILSON با اعمال نیروی ۵۰ گرم که به مدت ۱۵ ثانیه اعمال شد و هر مقدار گزارش شده میانگین ۵ اندازه گیری در مناطق مختلف از هر نمونه می باشد.

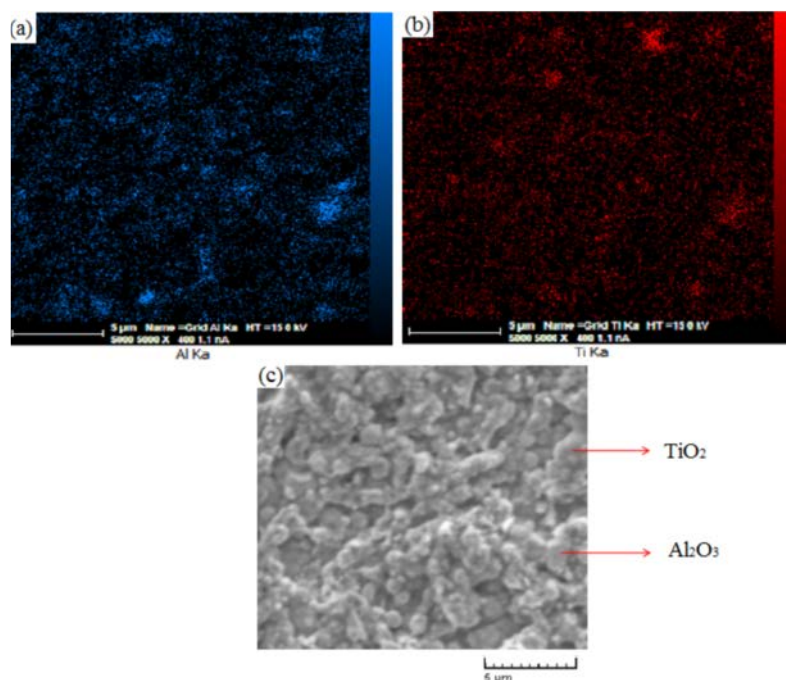
۳- نتایج و بحث

شکل ۱ مورفولوژی سطحی لایه رسوب داده شده توسط نیکل خالص و نانوکامپوزیت نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم در مقدار متفاوت ۱۰، ۱۵ و ۲۵ گرم در لیتر را نشان می دهد. پوشش نیکل خالص ساختار یکپارچه و منظمی را از خود نشان می دهد (شکل ۱a). با افزودن ذرات نانواکسید تیتانیوم و نانواکسید آلومینیوم، اندازه دانه ذرات کوچک شده و ساختار به شکل کریستال های کروی تغییر پیدا می کند (شکل ۱b) کاهش در اندازه دانه ذرات پوشش به سبب این می باشد که ذرات اکسیدی به عنوان منابع جوانه زنی دانه عمل کرده و نرخ جوانه زنی را افزایش می دهند. در صورت استفاده از ذرات تقویت کننده در پوشش جلو آمدگی در سطح ایجاد می شود که با فلش نشان داده شده مشاهده می شود (شکل ۱c). دلیل این امر تغییر در ساختار کریستالی که مربوط به تغییر حالت از جهت گیری ترجیحی در پوشش نیکل خالص به جهت گیری تصادفی پوشش کامپوزیتی می باشد [۱۷، ۱۸]. این تغییر در جهت گیری با افزایش مقدار نانوذرات در پوشش افزایش می یابد. علاوه بر این افزایش مقدار ذرات تقویت کننده سبب افزایش در تراکم پوشش نانوکامپوزیتی ایجاد شده می کند و کاهش در مقدار حفرات را شاهد

هستیم. همانطور که در تصویر ۱ دیده می شود مورفولوژی سطحی پوشش نیکل خالص با پوشش کامپوزیتی تشکیل شده تحت شرایط مختلف مقدار پودر متفاوت می باشد. باتوجه به میکروگراف نشان داده شده، سطح پوشش شامل توزیع یکنواختی از ذرات اکسیدی با دانه بندی نزدیک به ذرات اولیه می باشد که نشان می دهد ذرات بدون به هم چسبیدن در پوشش لایه قرار گرفته اند. با افزایش مقدار ذرات اکسیدی در لایه پوشش، دانه بندی سطحی نیز اصلاح می شود. شکل ۲ تصویر توزیع ذرات در پوشش را نشان می دهد. با توجه به شکل ذرات بصورت یکنواخت در تمام مناطق سطح توزیع شده اند. با تطبیق تصویر سطح و توزیع دانه ذرات اکسید تیتانیوم و اکسید آلومینیوم با فلش در شکل ۲ نشان داده می شود. با توجه به شکل در بعضی مناطق تجمع نانوذرات به چشم می خورد که وجود این مناطق در افزایش مقاومت به سایش موثر می باشد. شکل ۳ آنالیز EDX نمونه قسمت C شکل ۱ را نشان می دهد که با توجه به آنالیز EDX، پوشش شامل عناصر آلومینیوم، تیتانیوم، نیکل و اکسیژن می باشد که نشان می دهد هیچ گونه ناخالصی در پوشش قرار نگرفته است. وجود عناصر آهن و کربن در آنالیز EDX مربوط به زیر لایه فولادی می باشد. آنالیز EDX نمونه پوشش داده شده تحت دانسیته جریان اعمالی ۱ آمپر بر دسی متر مربع و مقدار پودر ۲۵ گرم در لیتر نشان می دهد که پوشش دارای ۴/۱٪ وزنی اکسید تیتانیوم و ۳/۸٪ وزنی اکسید آلومینیوم می باشد. همانطور دیده می شود مقدار اکسید تیتانیوم در پوشش بیشتر از اکسید آلومینیوم می باشد که این امر در توافق کامل با آنچه در آنالیز توزیع ذرات در شکل ۲ می باشد. شکل ۴ مقطع بریده شده نمونه پوشش داده شده تحت دانسیته جریان اعمالی ۱ آمپر بر دسی متر مربع و مقدار پودر ۲۵ گرم در لیتر را نشان می دهد که ذرات تقویت کننده بصورت مناطق تیره در شکل دیده می شوند. با توجه به شکل ۴ زیر لایه پیوند مناسبی با پوشش ایجاد کرده است و شکافی بین زیر لایه (Substrate) و پوشش دیده نمی شود همچنین تخلخلی در مقطع پوشش بوجود نیامده است که نشان دهنده این است که چسبندگی مناسبی بین زمینه پوشش و ذرات تقویت کننده وجود دارد که سبب افزایش استحکام پوشش



شکل ۱: تصویر میکروسکوپی الکترونی روبشی نمونه، (a) نیکل خالص، (b) ۱۰ گرم در لیتر نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم، (c) ۱۵ گرم در لیتر نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم و (d) ۲۵ گرم در لیتر نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم با دانسیته جریان ۱ آمپر بر دسی مترمربع و سرعت چرخش ۲۵۰ دور در دقیقه.



شکل ۲: (a) توزیع ذرات اکسید آلومینیوم در پوشش، (b) توزیع ذرات اکسید تیتانیوم در پوشش و (c) تصویر میکروسکوپی پوشش در دانسیته جریان ۱ آمپر بر دسی مترمربع و مقدار پودر ۲۵ گرم در لیتر.

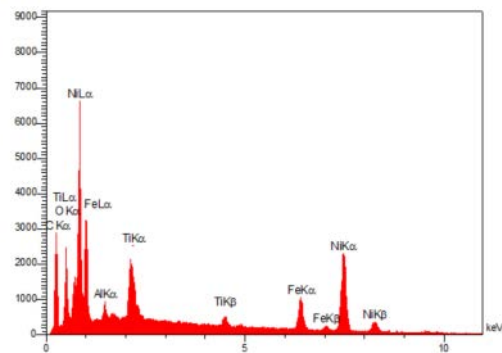
در پوشش نشان می‌دهد که مربوط به ذرات اکسیدی موجود در پوشش می‌باشد. با توجه به تصویر برش خورده مقطع، پوشش کامپوزیتی دارای ساختار فشرده‌ای می‌باشد. ضخامت پوشش از تصویر بدست می‌آید که در حدود ۴۰ میکرومتر می‌باشد.

بر اساس مدل ارائه شده توسط Guglielmi [۲۲-۲۴] در رسوبدهی کامپوزیتی، ذرات معلق در محلول طی دو مرحله متوالی جذب پوشش کامپوزیتی می‌شوند، در مرحله اول ذرات به آرامی جذب سطح کاتد می‌شوند و در مرحله بعد ذرات بصورت غیرقابل برگشت جذب سطح می‌شوند در بررسی‌ها نشان داده شده است که افزایش ذرات در پوشش سبب افزایش پلاریزاسیون کاتدی شده و رشد کریستالی ذرات پوشش را کاهش می‌دهد [۲۵].

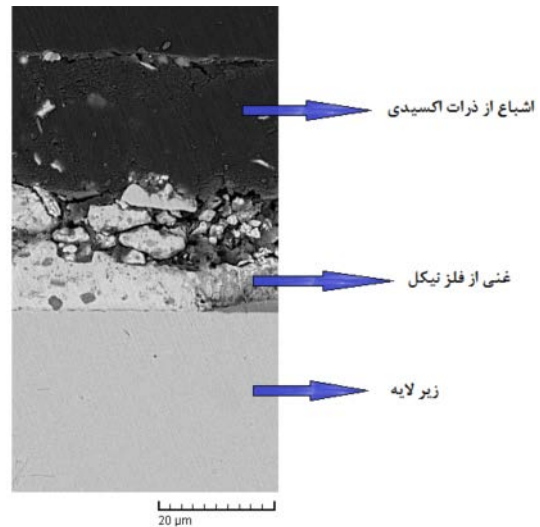
سختی پوشش نیکل خالص، پوشش کامپوزیتی نیکل-اکسید تیتانیوم، پوشش نیکل-اکسید آلومینیوم و پوشش نیکل-اکسید تیتانوم-اکسید آلومینیوم در شکل ۵ نشان داده شده است.

ضخامت نمونه‌های مورد مقایسه با هم برابر و حدود ۴۰ میکرومتر می‌باشد و نمونه‌های کامپوزیتی حاوی ۳ درصد وزنی پودر در پوشش می‌باشند. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود سختی پوشش نیکل خالص ۲۶۵ ویکرز است که در مقایسه با پوشش نانوکامپوزیتی نیکل اکسید تیتانیوم مقدار کمتری دارد. با افزودن اکسید آلومینیوم به محلول و ایجاد پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-اکسید تیتانوم-اکسید آلومینیوم سختی افزایش می‌یابد. دلیل این امر سختی بالاتر ذرات اکسید آلومینیوم در مقایسه با ذرات اکسید تیتانیوم می‌باشد که با قرار گرفتن ذرات اکسید آلومینیوم در پوشش سختی افزایش می‌یابد. با افزایش درصد وزنی ذرات اکسیدی در پوشش میکرو سختی افزایش می‌یابد که این مورد درباره پوشش‌های دیگر نیز بیان شده است [۲۶]. شکل ۵ ارتباط بین مقدار پودر در محلول و میکروسختی را بیان می‌کند. با توجه به شکل با افزایش مقدار پودر در محلول و متعاقب آن افزایش پودر در پوشش سبب افزایش میکروسختی می‌شود بطوریکه سختی پوشش در مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ و ۲۵ گرم در لیتر به ترتیب ۲۷۵، ۳۱۰، ۳۷۸، ۴۰۵ و

در برابر عوامل آسیب‌رسان می‌شود [۱۹،۲۰]. همچنان که از شکل ۴ برمی‌آید، در ابتدا نیکل در مقایسه با ذرات اکسیدی تمایل بیشتری برای رسوب بر روی فولاد از خود نشان می‌دهد که سبب می‌شود در ابتدای ایجاد لایه، پوشش غنی از نیکل باشد و با گذشت زمان مقدار ذرات اکسیدی در رسوب افزایش می‌یابد [۲۰].



شکل ۳: آنالیز EDX پوشش نانوکامپوزیتی نمونه ۱c.



شکل ۴: مقطع بریده شده پوشش نانوکامپوزیتی در شرایط ۱ آمپر بر دسی متر مربع و غلظت ۱۰ گرم بر لیتر از هر یک از اکسیدها در محلول.

اشباع شدن پوشش کامپوزیتی از ذرات را می‌توان به تاثیر غربال‌گری پوشش تولید شده مربوط دانست که بدلیل ضعیف شدن جاذبه الکترواستاتیکی بین ذرات اکسیدی و زیرلایه در محلول نیکیلی ایجاد می‌شود [۲۱]. همچنین تصویر قسمت منقطع پوشش دانه‌بندی یکنواخت ذرات را

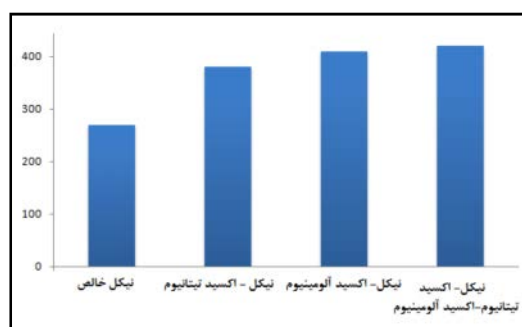
- پوشش نانوکامپوزیتی نیکل-اکسید تیتانیوم-اکسید آلومینیوم بصورت دو لایه مجزا تشکیل می‌شود که در ابتدا لایه‌ای از نیکل روی زیرلایه ایجاد شده و سپس لایه کامپوزیتی روی آن تشکیل می‌شود.

- با افزایش مقدار پودر در پوشش میکروسختی افزایش پیدا می‌کند و در مقدار ۲۵ گرم در لیتر از پودرهای اکسیدی به مقدار ۴۲۵ ویکرز می‌رسد.

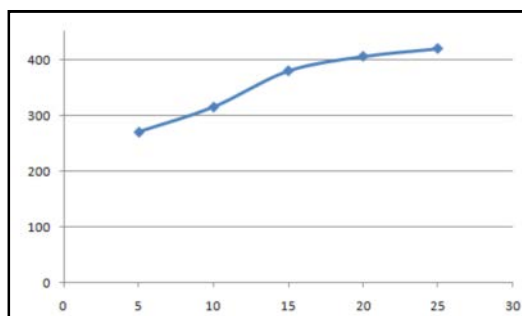
مراجع

- [1] H. Gul, F. Kilic, S. Aslan, A. Alp, *Wear*, **267**, 2009, 976.
- [2] I. Haq, T.I. Khan, *Surf. Coat. Technol.*, **205**, 2011, 2871.
- [3] P. Bagheri, M. Farzam, A.B. Mousavi, M. Hosseini, *Surf. Coat. Technol.*, **204**, 2010, 3804.
- [4] Y.J. Xue, H.B. Liu, M.M. Lan, J.S. Li, H. Li, *Surf. Coat. Technol.*, **204**, 2010, 3539.
- [5] E. Rudnik, L. Burzynska, L. Dolasinski, M. Misiak, *Appl. Surf. Sci.*, **256**, 2010, 7414.
- [6] K.H. Hou, M.D. Ger, L.M. Wang, *Wear*, **253**, 2002, 994.
- [7] M. Lekka, D. Koumoulis, N. Kouloumbi, P.L. Bonora, *Electrochim. Acta.*, **54**, 2009, 2540.
- [8] X. Ruidong, W. Junli, G. Zhongcheng, W. Hua, *J. Rare Earth*, **26**, 2008, 579.
- [9] M.A. Farzaneh, K. Raeissi, M.A. Golozar, *J. Alloys Compd.*, **489**, 2010, 488.
- [10] R. Sen, S. Bhattacharya, S. Das, K. Das, *J. Alloys Compd.*, **489**, 2010, 650.
- [11] L. Shi, C. Sun, W. Liu, *Appl. Surf. Sci.*, **254**, 2008, 6880.
- [12] B. Bahadormanesh, A. Dolati, M.R. Ahmadi, *J. Alloys Compd.*, **509**, 2011, 9406.
- [13] N.K. Shrestha, D.B. Hamal, T. Saji, *Surf. Coat. Technol.*, **183**, 2004, 247.
- [14] J.Q. Gao, Y.T. Wu, L. Liu, W.B. Hu, *Mater. Lett.*, **59**, 2005, 391.
- [15] J.N. Balaraju, Kalavati, K.S. Rajam, *Surf. Coat. Technol.*, **200**, 2006, 3933.
- [16] Q. Li, X. Yang, L. Zhang, J. Wang, B. Chen, *Journal of Alloys and Compound*, **482**, 2009, 339.
- [17] B. Ranjith, G.P. Kalaigan, *Appl. Surf. Sci.*, **257**, 2010, 42.
- [18] M. Srivastava, V.K. William Grips, K.S. Rajam, *Appl. Surf. Sci.*, **253**, 2007, 3814.
- [19] M.R. Vaezi, S.K. Sadmezhaad, L. Nikzad, *Coll. and Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects*, **315**, 2008, 176.
- [20] L. Li, M. An, G. Wu, *A new Electroless, Surf. Coat. Technol.*, **200**, 2006, 5102.
- [21] A. Abdel Aal, *Mater. Chem. Phys.*, **106**, 2007, 317.
- [22] T. Borkar, S.P. Harimkar, *Surf. Coat. Technol.*, **205**, 2011, 4124.
- [23] N. Guglielmi, *Electrochem. Soc.*, **8**, 1972, 1009.
- [24] M. Srivastava, J.N. Balaraju, B. Ravishankar, K.S. Rajam, *Surf. Coat. Technol.*, **205**, 2010, 66.
- [25] L. Shi, C. Sun, P. Gao, F. Zhou, W. Liu, *Appl. Surf. Sci.*, **252**, 2006, 3591.
- [26] L.P. Bicelli, B. Bozzini, C. Mele, L. Durzo, *Int. J. Electrochem. Sci.*, **3**, 2008, 356.

۴۲۵ ویکرز می‌باشد. دلیل افزایش سختی این است که نانوذرات اکسیدی موجود در زمینه نیکلی مانع از رشد کریستالی نیکل می‌شوند و نیز از تغییر پلاستیک در اثر اعمال نیروی ثابت در سطح ماده جلوگیری می‌کنند که اثر این مکانیزم‌ها با افزایش ذرات تقویت‌کننده افزایش می‌یابد. بنابراین افزایش ذرات اکسیدی در سطح سبب افزایش سختی می‌شود [۲۶]. افزایش سختی پوشش نانوکامپوزیتی براساس مدل Hall-Petch در مورد دانه‌های ریز در زمینه نیکل قابل بحث می‌باشد.



شکل ۵: میکروسختی پوشش‌های مختلف در پوشش در دانسیته جریان ۱ آمپر بر دسی متر مربع و ۲۵ گرم در لیتر ذرات اکسیدی در محلول.



شکل ۶: تغییرات میکروسختی با مقدار پودر در محلول در پوشش در دانسیته جریان ۱ آمپر بر دسی متر مربع.

۴- نتیجه‌گیری

- با افزایش مقدار ذرات TiO_2 و Al_2O_3 در حمام پوشش‌دهی، مورفولوژی سطح تغییر کرده و با افزایش مقدار ذرات در پوشش دانه‌بندی پوشش کاهش می‌یابد.