

تولید پوشش کامپوزیتی کروم سخت - نانو آلومینا به روش آبکاری الکتریکی از حمام کروم شش ظرفیتی و بررسی خواص سایشی و میکروسختی پوشش

سید میثم میرقربانی^۱، مهرداد عباسی*^۲ و محمد صالح جمشیدی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۳/۰۴، ش.ص ۴۵-۵۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۲۶)

چکیده

هدف از این پژوهش، بررسی تاثیر دو پارامتر مهم در آبکاری پوشش‌های نانو کامپوزیت، یعنی مقدار نانو ذرات آلومینا در حمام و چگالی جریان الکتریکی بر درصد حجمی ذرات، مورفولوژی، میزان مقاومت به سایش، میزان سختی و میزان چسبندگی پوشش می‌باشد. در این تحقیق، پوشش کروم سخت و پوشش نانو کامپوزیتی کروم - آلومینا با استفاده از جریان مستقیم به روش آبکاری الکتریکی در حمام کروم شش ظرفیتی و با تغییر دو پارامتر غلظت نانو ذرات آلومینا و چگالی جریان بر حسب آمپر بر دسی متر مربع بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. بعد از آن با استفاده از تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نوری، آنالیز سطحی ED، آزمون XRD، آزمون سختی سنجی میکرو ویکرزو آزمون سایش پین روی دیسک پوشش‌ها مورد بررسی قرار داده شدند. نتایج نشان داد که بیش‌ترین مقدار نانو آلومینا در پوشش‌های نانو کامپوزیتی تولید شده در شرایط بهینه ۲۵ گرم بر لیتر نانو آلومینا در حمام، میانگین چگالی جریان ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع حاصل می‌شود. تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داده است، وجود ذرات نانو آلومینا موجب اصلاح مورفولوژی رشد پوشش می‌گردد. همچنین نتایج XRD از ریز شدن ساختار و کریستالیت‌ها با افزایش دانسیته نانو ذرات در پوشش حکایت می‌کند. مقایسه میان پوشش کروم سخت و پوشش نانو کامپوزیتی کروم - آلومینا نشان داد که پوشش حاوی ذرات نانو آلومینا به میزان ۴۶ درصد سخت‌تر و مقاومت به سایش بسیار بیشتری در برابر پوشش کروم سخت دارد.

واژه‌های کلیدی: پوشش نانو کامپوزیتی، جریان مستقیم، حمام کروم شش ظرفیتی، ذرات آلومینا.

^۱- کارشناس ارشد مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی کرج
^۲- استادیار، عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی کرج
^۳- کارشناس ارشد مهندسی مواد، مرکز توسعه فناوری پوشش
 *نویسنده مسئول مقاله: mabbasi@kiauo.ac.ir

پیشگفتار

مواد نانو در سال‌های اخیر موضوع فعالیت‌های تحقیقاتی زیادی قرار گرفته‌اند. با به کارگیری این گونه مواد کاربردهای جدید و متنوعی در زمینه‌های گوناگون علم و فناوری ایجاد گردیده است. در اوایل دهه ۱۹۵۰ و اواخر دهه ۱۹۶۰ پوشش‌های کامپوزیتی اعمال شده به روش آبکاری پیشرفت زیادی داشتند. در طول دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰، پژوهش‌ها بر روی نیاز به تولید پوشش‌هایی با خواص مکانیکی، خوردگی و سایشی بالا متمرکز شدند [۱]. هم‌نشانی ذرات نانو در زمینه فلزی، توسط نظریه سلیس به اثبات رسیده است که این نظریه به طور کامل طی پنج مرحله، از تشکیل ابر یونی به دور ذره نانو تا جذب آن به روی سطح کاتد را توضیح می‌دهد [۲]. تحقیقات بسیاری در زمینه پوشش نیکل-نانو آلومینا صورت پذیرفته است که نشان می‌دهد، ذرات نانو آلومینا درون پوشش می‌تواند، موجب اصلاح عیوب پوشش و بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی پوشش گردد. به طور مثال در پژوهش‌های چن^۱ و همکارانش افزایش استحکام و سختی پوشش زمینه نیکلی در حضور ذرات سرامیکی نانو آلومینا با مکانیزم تشکیل حلقه‌های نابجایی اوروان و همچنین در پژوهش‌های مین چوی^۲ و همکارانش نیز اصلاح مورفولوژی ساختار و ریز دانه شدن کریستالیت‌ها با مکانیزم هال پچ مورد تایید قرار گرفته است [۳ و ۴]. همچنین در زمینه پوشش کروم سخت-نانو آلومینا تحقیقات اندکی صورت گرفته است؛ اما در سال ۱۹۸۲ ناربان^۳ و همکارانش در زمینه پوشش کروم-میکرو آلومینا به نتایج جالبی دست یافتند. از جمله این دستاوردها، می‌توان به افزایش میزان سختی با افزایش ذرات میکرو آلومینا درون پوشش اشاره کرد [۵]. همچنین در تحقیق پوشش کروم سخت و انواع ذرات سرامیکی که توسط یوسف‌پور و همکارانش انجام پذیرفت، نشان داد بهترین شرایط سایش را پوشش کروم سخت-نانو آلومینا در مقایسه با دیگر ذرات نانو دارد [۶].

هدف از این پژوهش، تولید پوشش نانو کامپوزیتی، کروم - نانو آلومینا، اصلاح ساختار و همچنین مقایسه

سختی و مقاومت به سایش آن نسبت به پوشش‌های کروم سخت می‌باشد که تحقیقات کمی در مورد آن منتشر شده است. برای این منظور در این پروژه ضمن ثابت نگه داشتن و کنترل دقیق سایر پارامترهای آبکاری، دو عامل چگالی جریان الکتریکی بر حسب آمپر بر دسی متر مربع و میزان غلظت نانو ذرات آلومینا در حمام بر حسب گرم بر لیتر به صورت متغیر و موثر در نتایج آزمایشات در نظر گرفته شده است. فرآیند کلی تولید این پوشش نانو کامپوزیت و روند مطالعاتی و آزمایشگاهی با آماده سازی قطعات و حمام الکترولیت آغاز می‌شود و با توزیع یکنواخت مقدار معینی پودر نانو آلومینا، آبکاری و پوشش دهی قطعات با سه جریان مختلف انجام می‌شود. ادامه این روند با اضافه شدن میزان غلظت ذرات نانو آلومینا در حمام کروم شش ظرفیتی و آبکاری مجدد در سه جریان مختلف پیگیری می‌شود. بعد از پوشش دهی تمامی قطعات، پوشش‌ها مورد بررسی کامل قرار می‌گیرند. بررسی کیفیت و خواص پوشش‌ها در سه دسته کلی بررسی مورفولوژی، بررسی خواص سختی و بررسی مقاومت به سایش پوشش صورت می‌گیرد. بررسی سطح و ساختار پوشش به وسیله میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی و پراش اشعه ایکس صورت می‌پذیرد که به بررسی ساختار پوشش، روند تغییرات میکرو ترک‌ها و همچنین به نحوه توزیع ذرات نانو آلومینا در پوشش منجر می‌شود.

مواد و روش‌ها

انجام این تحقیق شامل چهار مرحله کلی می‌باشد که عبارتند از:

الف- آماده سازی زیر لایه از جنس فولاد ۴۳۴۰ شامل: سمباده زنی، اسید شویی، چربی زدایی و آبکشی؛

ب- آماده‌سازی حمام شامل: مخلوط درصد دقیق مواد، همچنین انتخاب و انجام روش بهینه جهت توزیع یکنواخت ذرات نانو آلومینا در حمام؛

ج- کنترل پارامترهای ثابت آبکاری و اعمال پوشش؛

د- بررسی پوشش‌های اعمالی از نظر مورفولوژی، میزان سختی و مقاومت به سایش می‌باشد.

1 - Li Chen

2 - Seong-Min Choi

3 - Raj- Narayan

همزن مگنت، فاصله آند و کاتد و نسبت سطح آند به کاتد به صورت بهینه از نتایج پژوهش‌های دیگر توسط وینوکرو^۵ و همکارانش تعیین گردید [۹ و ۱۰].

ترکیب الکترولیت مذکور در جدول ۱، مشخصات و تصویر میکروسکوپ الکترونی ذرات نانو آلومینا مورد استفاده نیز در جدول ۲ و شکل ۱ آورده شده است.

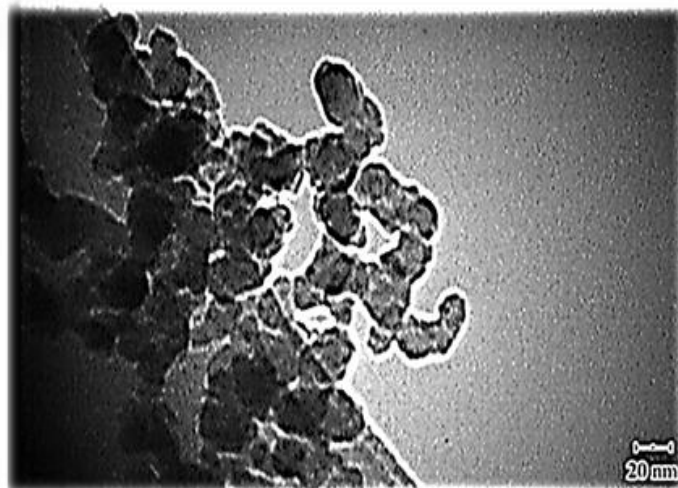
نحوه آماده‌سازی قطعات، حمام الکترولیت و پارامترهای ثابت در این پژوهش با استناد به پژوهش‌های اوسوالد و همکارانش که در زمینه پوشش کروم می‌باشد، انجام پذیرفت [۷ و ۸]. همچنین دمای بهینه حمام آبکاری در حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد و چگالی جریان اعمالی تا ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع برای پوشش میکرو آلومینا و کروم سخت در پژوهش‌های نارایان و همکارانش تعیین شده است [۵]. پارامترهای دیگر نظیر pH، سرعت همزدن

جدول ۱- ترکیب حمام مورد استفاده جهت پوشش کروم - نانو آلومینا

ترکیب	مقدار (گرم بر لیتر)
اسید کرومیک	۲۵۰
اسید سولفوریک	۲/۵

جدول ۲- مشخصات پودر نانو آلومینا مورد استفاده

ماده	اندازه	خلوص	شرکت سازنده
نانو آلومینای آلفا	۲۰-۳۰ نانو متر	بالاتر از ۹۹/۶ درصد	Degussa-Germany



شکل ۱- تصویر الکترون میکروسکوپ عبوری از پودر نانو آلومینا آلفا مورد استفاده

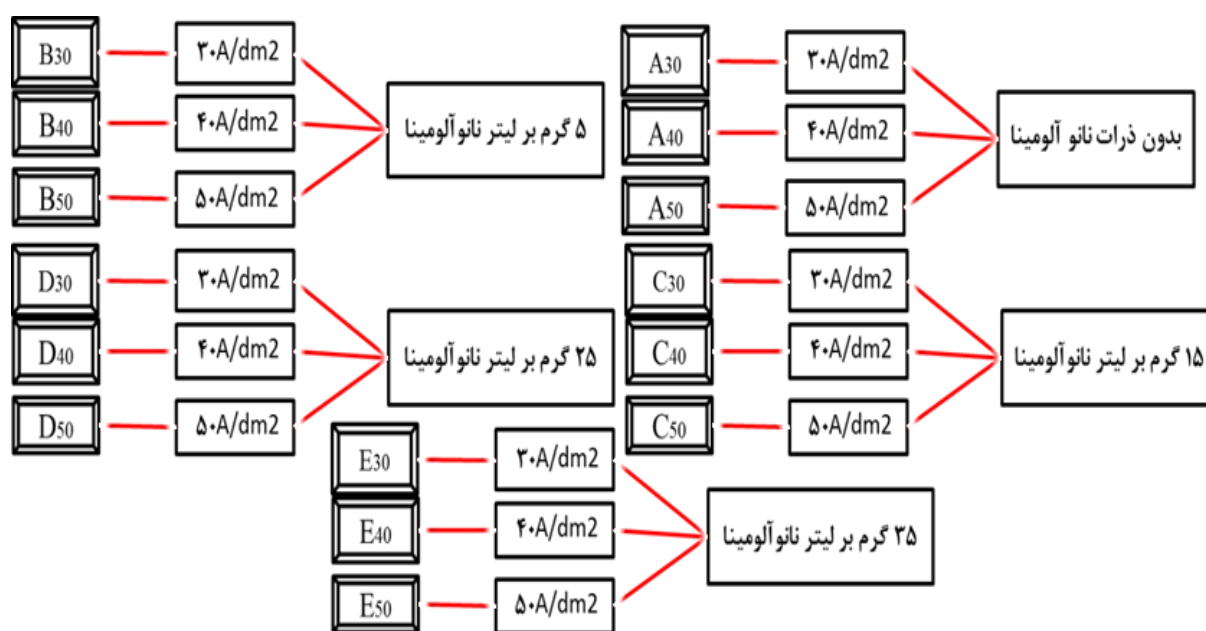
نتایج آزمایش در نظر گرفته شده است. شایان ذکر است که دقت کنترل میزان جریان بر حسب آمپر با تیرانس $\pm 0/1$ آمپر بر دسی متر مربع می‌باشد. چارت شکل ۲ نحوه آبکاری هر یک از نمونه‌ها را با پارامترهای مشخص نشان می‌دهد.

در این آزمایش حمام آبکاری، دمای آبکاری، میزان pH، سرعت همزدن همزن مگنت و فاصله بین آند و کاتد به طور کاملاً ثابت و با کنترل لحظه‌ای در نظر گرفته شده است که در جدول ۳ آورده شده‌اند.

پارامترهای مقدار جریان، غلظت ذرات نانو آلومینای موجود در محلول به صورت متغییر و تعیین کننده در

جدول ۳- شرایط حمام مورد استفاده جهت پوشش کروم-نانو آلومینا

دما	$(52 \pm 3)^\circ\text{C}$
زمان	۹۰ دقیقه
pH	$1/5 \pm 0/2$
سرعت همزن	۲۰۰ rpm
فاصله آند با کاتد	۵ cm
نسبت سطح آند به کاتد	۲
جنس کاتد	فولاد ۴۳۴۰
جنس آند	Pb-5% Sn



شکل ۲- چارت شرایط پوشش دهی نمونه‌ها

بالای الکترولیت، پوششی بر روی بشر (حمام آبکاری) قرار گرفت. بعد از اتمام فرآیند پوشش دهی نمونه‌ها به بررسی کامل پوشش‌ها پرداخته شد. بررسی تغییرات ساختاری از طریق روش پراش پرتو ایکس انجام گردید. برای آنالیز از پرتو ($\text{CuK}\alpha \lambda=1.54056 \text{ \AA}$) استفاده شد. نرخ روبش معادل ۱ درجه بر دقیقه، ولتاژ اعمالی برابر ۳۰ کیلو وات و جریان معادل ۳۰ میلی آمپر بود و زاویه پراش ۱۰ تا ۱۰۰ درجه انتخاب گردید. اندازه دانه با استفاده از رابطه دیبی - شرر محاسبه گردید. در این رابطه میزان پهن شدگی توسط نرم افزار موجود در دستگاه (Xpert) و نیز با لحاظ کردن خطاهای ممکن به دست آمده است. بنابراین میزان پهن شدگی را می‌توان تنها ناشی از از اندازه کریستالیت‌ها در پوشش نسبت داد.

(رابطه ۱): رابطه دیبی-شرر

$$t = \frac{0.9\lambda}{B \cos \theta_B}$$

در این رابطه، t اندازه ذره، B عرض پیک در نصف شدت بیشینه، λ طول موج پرتو ایکس و θ_B زاویه براگ مربوط به پیک ناشی از پراش است. B برحسب رادیان است که در این رابطه باید به واحد طول تبدیل شود.

همچنین از میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM (ZEISS, German) مجهز به آنالیز سطحی (Oxford EDS) برای مطالعه و بررسی مورفولوژی پوشش و تعیین ذرات نانو آلومینا استفاده شد.

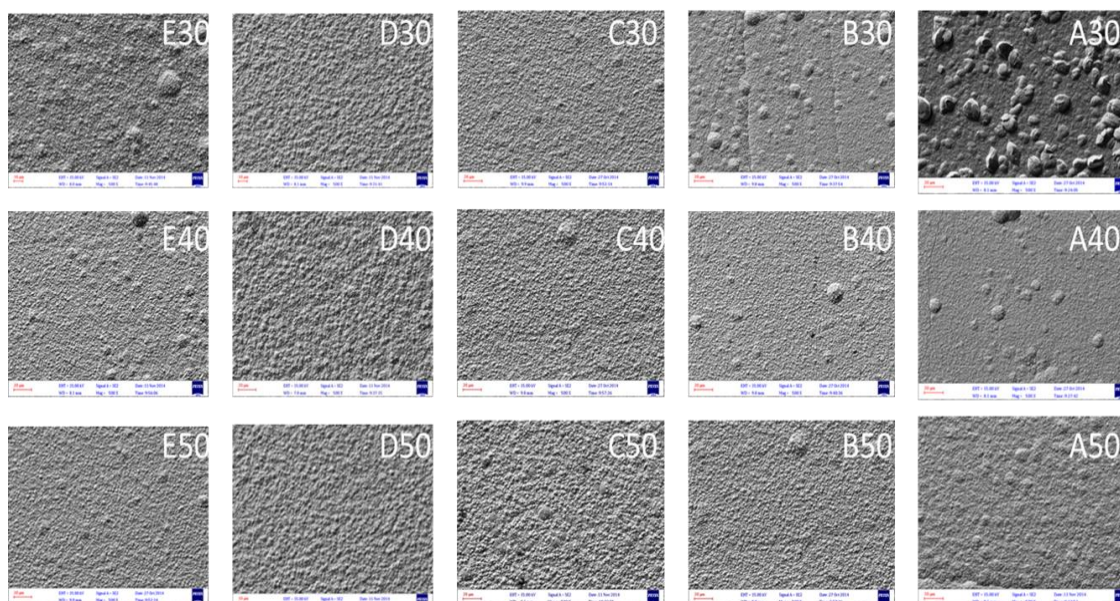
بحث و نتایج

بررسی مورفولوژی پوشش

مورفولوژی رشد پوشش‌ها به صورت گل کلمی بوده که از ویژگی‌های رشد پوشش‌های الکترولیزی محسوب می‌شود و از طرفی با افزایش میزان جریان و افزایش میزان ذرات نانو در حمام مورفولوژی و توزیع دانه‌های رشد یافته یکنواخت‌تر شده است.

یکی از عوامل مهم در اجرای موفقیت آمیز پوشش کروم - نانو آلومینا، علاوه بر فعال بودن سطوح ذرات پودر نانو آلومینا، توزیع یکنواخت ذرات و معلق نگه داشتن آن‌ها در محلول است. به منظور ایجاد پوشش، محلول استاندارد کروم سخت آماده می‌گردد و سپس پوشش‌دهی نمونه‌های بدون ذرات نانو آلومینا صورت می‌پذیرد و بعد از آن باید ذرات نانو به میزان مناسب درون حمام اضافه و کاملاً همگن شود.

ابتدا پوشش کروم سخت با جریان‌های مختلف ۳۰، ۴۰ و ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع و بدون نانو ذرات بر روی نمونه‌ها اعمال می‌شود، در تمامی نمونه‌ها ابتدا با نیمی از جریان مورد نظر به مدت ۳۰ ثانیه اچ آندی به منظور چسبندگی بهتر پوشش به زمینه انجام خواهد گرفت. برای آبکاری پوشش‌های نانو کامپوزیتی کروم - آلومینا به حمام موجود، ذرات سرامیکی نانو آلومینا اضافه خواهد شد. جهت توزیع یکنواخت ذرات نانو آلومینا مقدار لازم از آن را ابتدا با دقت صدم گرم وزن نموده که در این آزمایش‌ها با توجه به اینکه حجم حمام مورد استفاده ۱ لیتر می‌باشد، مقدار ۵ گرم ذرات نانو آلومینا انتخاب گردید. سپس توسط آلتراسونیک پروبی با توان حداکثر خود در حمام کروم سخت در مدت زمان ۱۲۰ دقیقه توزیع گردید. نحوه اضافه کردن پودر به حمام از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور می‌بایست ذرات پودر به صورت پراکنده و به آرامی اضافه شوند، در غیر این صورت ذرات به صورت آگلومره تبدیل شده و به سختی پراکنده و توزیع می‌شوند. پس از پایان یافتن این زمان بلافاصله محلول به حجم یک لیتر رسانده و پس از رسیدن دمای محلول به دمای کاری فرایند پوشش‌دهی انجام می‌گیرد. جهت نمونه‌های گروه C، D و E مراحل بالا با اضافه کردن ۱۰ گرم بر لیتر نانو ذرات آلومینا به حمام آبکاری انجام می‌شود. جهت کنترل pH حمام مورد استفاده از یک دستگاه pH سنج قلمی استفاده شد، همچنین عملیات پوشش‌دهی با استفاده از دستگاه رکتی فایر آبکاری با منبع تغذیه جریان مستقیم صورت گرفت. جهت جلوگیری از تبخیر به دلیل دمای



شکل ۳- تصاویر SEM از مقایسه پوشش‌های کروم سخت و کروم -نانو آلومینا

موجود در پوشش با میزان غلظت ذرات موجود در حمام تا مقدار ۲۵ گرم بر لیتر رابطه مستقیم خواهد داشت؛ اما با اضافه کردن بیش از ۲۵ گرم بر لیتر ذرات نانو آلومینا توزیع یکنواخت ذرات مشکل خواهد شد و موجب آگلومره شدن، افزایش وزن ذرات و تمایل بیش‌تر به ته نشین شدن ذرات نانو و در نهایت کاهش آن در پوشش می‌گردد که منحنی شکل ۴ نشان دهنده این رابطه برای نمونه‌های با دانسیته جریان ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع خواهد بود.

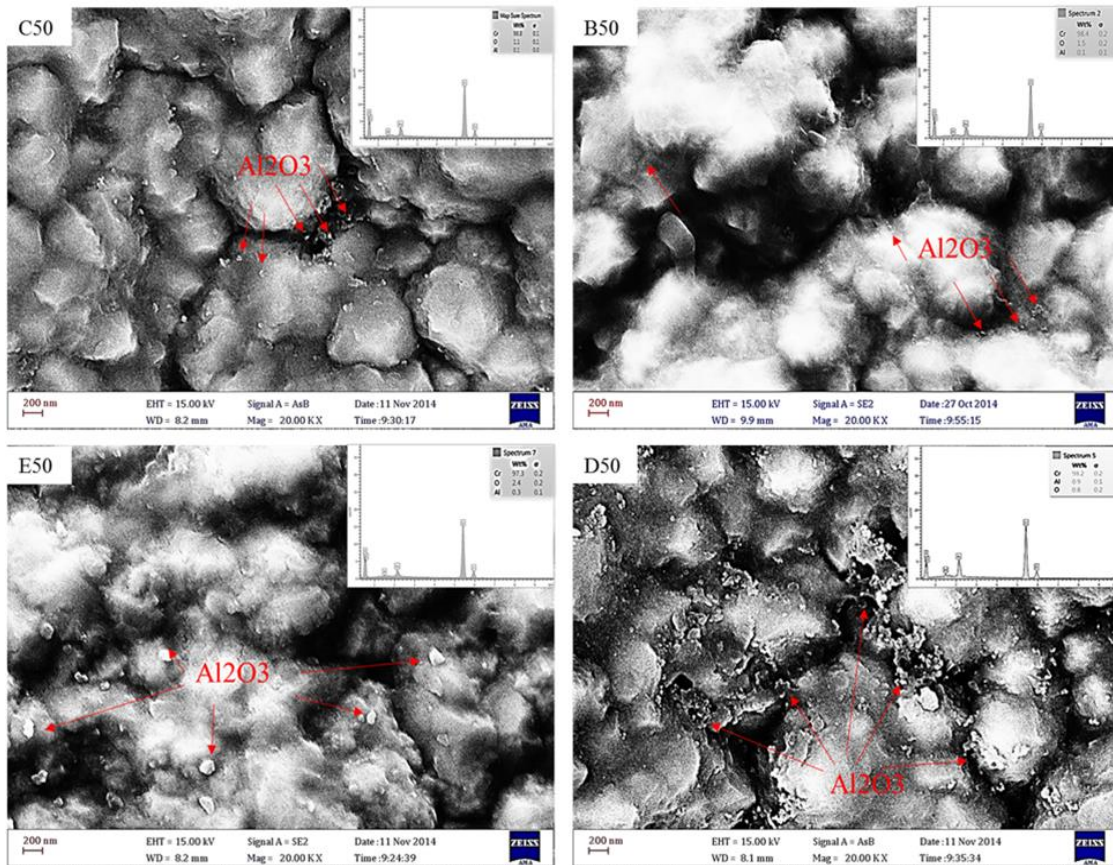
همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده شد، با اضافه شدن ذرات نانو آلومینا و توزیع یکنواخت آن در محلول ساختار پوشش به‌طور کامل متفاوت گردید. تصاویر میکروسکوپ الکترونی تاثیر افزایش جریان و وجود ذرات نانو آلومینا را بر اصلاح رشد ساختار رسوب کروم سخت به خوبی نشان داد.

درصد وزنی ذرات در پوشش

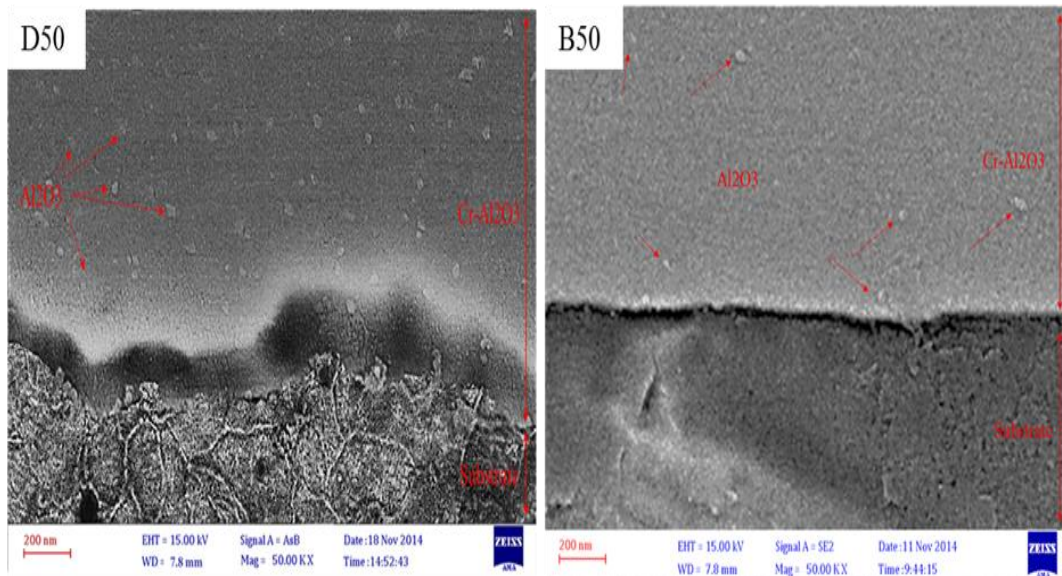
تعیین درصد وزنی ذرات نانو آلومینا درون پوشش با آزمون آنالیز سطحی EDS انجام شده است. میزان ذرات



شکل ۴- رابطه غلظت نانو ذرات در حمام و درصد وزنی آن در پوشش نهایی



شکل ۵- آزمون آنالیز سطحی EDS و تصویر SEM از سطح نمونه‌ها با تعیین ذرات و درصد وزنی نانو آلومینا در سطح



شکل ۶- تصویر الکترون میکروسکوپ روبشی از مقطع نمونه‌های B50 و D50

و کم‌ترین درصد وزنی ذرات نانو می‌باشند از مقطع و به- وسیله میکروسکوپ الکترونی با بزرگنمایی بالا مورد تصویر

به منظور ردیابی ذرات سرامیکی نانو آلومینا در حجم پوشش، نمونه D50 و B50 که به ترتیب دارای بیش‌ترین

باشد. پهن شدگی پیک در این طیف می‌تواند بیانگر ریزش ساختار پوشش باشد که مورد بررسی قرار گرفت.

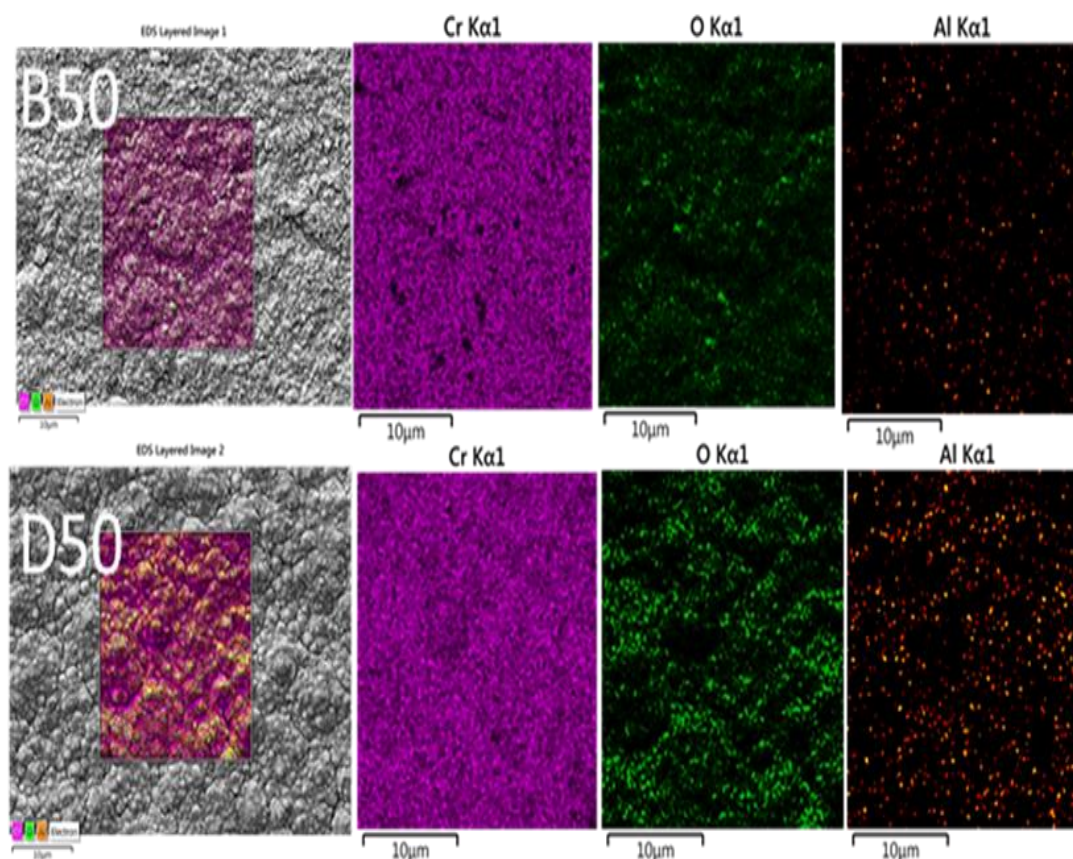
مقدار عددی پارامترها و نتایج محاسبات اندازه دانه در نمونه‌ها که از رابطه شرر محاسبه گردید، در جدول ۴ به تفکیک آمده است.

برداری قرار گرفت که تصویر مقطع به همراه تعیین ذرات نانو آلومینا در شکل ۶ آمده است.

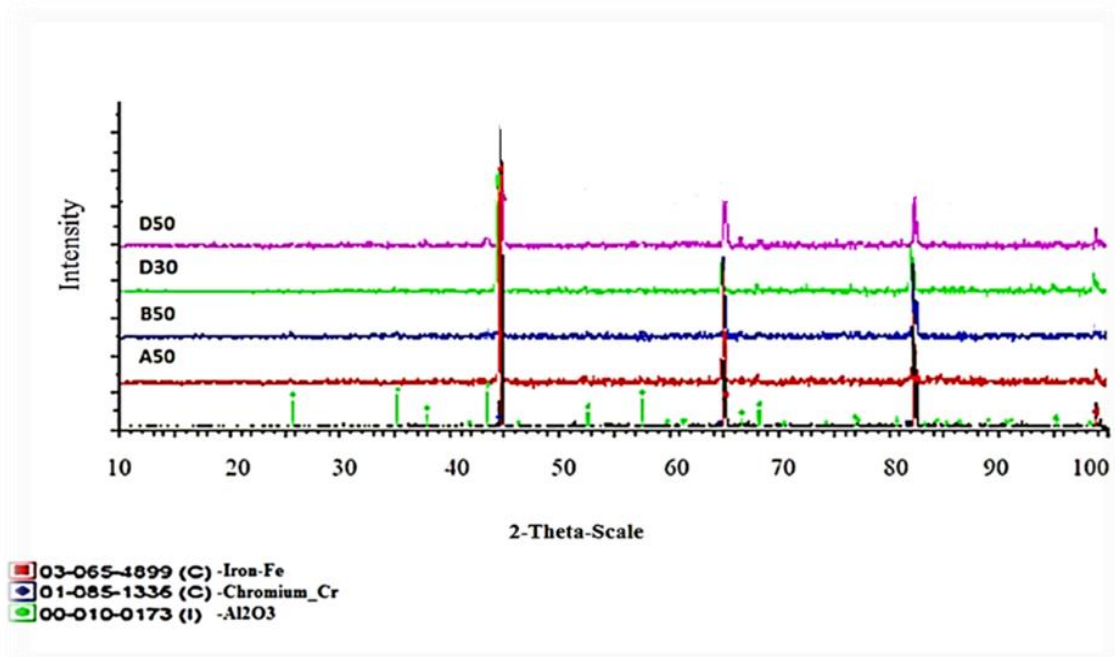
همچنین تصویر آنالیز عنصری صورت گرفته از نمونه‌ها نیز به خوبی افزایش میزان درصد وزنی ذرات نانو با افزایش میزان غلظت آن در الکترولیت را نشان در شکل ۷ می‌دهد.

بررسی XRD پوشش

یکی از روش‌های به‌دست آوردن اندازه کریستالیت-های مواد بررسی طیف حاصل از پراش اشعه ایکس می-



شکل ۷- آنالیز عنصری نمونه‌های B50 و D50



شکل ۸- طیف XRD از پوشش کروم سخت و کروم-نانوآلومینا

دام افتادن بیش تر ذرات نانو آلومینا به درون پوشش می-شود که مطابق با نظریه هال پیچ افزایش ذرات نانو درون پوشش و پراکندگی یکنواخت آن‌ها، موجب جلوگیری از رشد ستونی پوشش و ریزدانه تر شدن آن خواهد شد [۱۱].

ب-افزایش جریان، موجب افزایش سرعت پوشش‌دهی و افزایش میزان نرخ جوانه‌زنی در ساختار خواهد شد که افزایش میزان جوانه‌زنی، ریزدانه شدن ساختار را در پی خواهد داشت.

همان‌گونه که در جدول ۴ دیده می‌شود، اندازه دانه با افزایش میزان ذرات نانو در محلول و در پوشش کاهش پیدا می‌کند. بنابراین به طور کلی می‌توان گفت: نمونه‌های دارای دانسیته جریان بالاتر موجب ریزدانه تر شدن پوشش و بهبود خواص پوشش شده‌اند، برای علت این پدیده دو مکانیزم ذیل قابل ارائه می‌باشد:

الف-همان‌گونه که در بررسی میزان ضخامت پوشش بیان شد، افزایش جریان موجب افزایش نرخ پوشش دهی و به

جدول ۴- تاثیر افزودن نانو ذرات بر ریزدانه تر شدن ساختار

اندازه دانه t=(نانو)	2θ	B	کد نمونه
۴۰/۵۴	44.808°	0.213°	A50
۲۲/۶۲	44.834°	0.381°	B50
۲۱/۹۳	44.811°	0.393°	D30
۱۶/۲۹	44.935°	0.529°	D50

بررسی‌های میکروسختی

آلومینا در جریان‌های ثابت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ آمپر رسم گردیده است.

با مقایسه نتایج میکروسختی نمودار شده در شکل ۹ از نمونه‌های کروم - نانو آلومینا در دانسیته جریان‌های مشابه ملاحظه می‌شود، با افزایش میزان جریان و ذرات نانو آلومینا تا میزان ۲۵ گرم بر لیتر سختی افزایش می‌یابد. علت سخت شدن با افزایش درصد وزنی ذرات نانو آلومینا را می‌توان به علل مختلفی دانست که عبارتند از:

(الف) ترغیب پوشش به رشد در جهات کریستالی مختلف؛

(ب) کاهش اندازه دانه؛

(ج) سختی انتشاری به دلیل حضور ذرات سخت پراکنده شده در سطح و تشکیل حلقه‌های نابجایی دانست.

میکروسختی پوشش‌های ایجاد شده توسط دستگاه MITECH HV-100 و بر طبق استاندارد ASTM E 384-11 در دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و در مقیاس ویکرز انجام شد. بدین منظور از هر نمونه سختی سنجی با بار ۲۵ گرم و مدت زمان ۱۵ ثانیه اعمال نیرو و از مقطع پوشش صورت پذیرفت که نتایج حاصل از آن‌ها در جدول ۵ آمده است:

نتایج آزمون که در جدول ۵ آمده است نشان می‌دهد، افزایش میزان جریان به جهت افزایش میزان رسوب نشانی، موجب افزایش سختی شده اما به جهت نمایان کردن تاثیر میزان غلظت آلومینا در میزان سختی نمودارهای شکل ۹ بر حسب سختی بر میزان غلظت

جدول ۵- نتایج آزمون سختی هر نمونه به همراه میانگین سختی آن بر حسب میکرو ویکرز

نمونه	A30	A40	A50	B30	B40	B50	C30	C40	C50	D30	D40	D50	E30	E40	E50
میانگین سختی	۷۱۶	۷۲۷	۷۴۲	۷۲۸	۷۴۵	۷۵۰	۷۹۴	۸۰۶	۸۲۸	۹۵۹	۱۰۲۷	۱۰۸۴	۹۰۲	۹۸۷	۱۰۰۲



شکل ۹- نمودار تغییرات سختی در جریان ثابت ۳۰، ۴۰ و ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع

انجام آزمون فوق بر روی پوشش‌های کروم-نانو آلومینا و کروم سخت نشان داد که هر دو پوشش از چسبندگی بالایی برخوردار است و تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند. اگرچه بررسی‌های میکروسکوپی پوشش‌ها نشان داد (شکل ۱۰) که پوشش کروم-نانو آلومینا دارای تخلخل‌های کمتری بوده و فصل مشترک صاف و مطلوب-تری با زمینه دارد و به نظر می‌رسد که دارای چسبندگی بهتری باشد؛ اما آزمون فوق این تفاوت را در مقیاس استاندارد نشان نداده است.

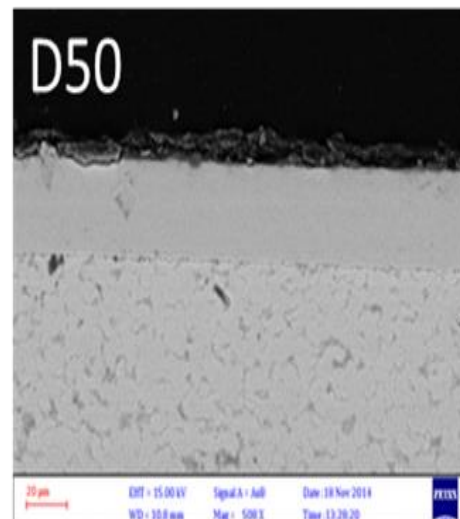
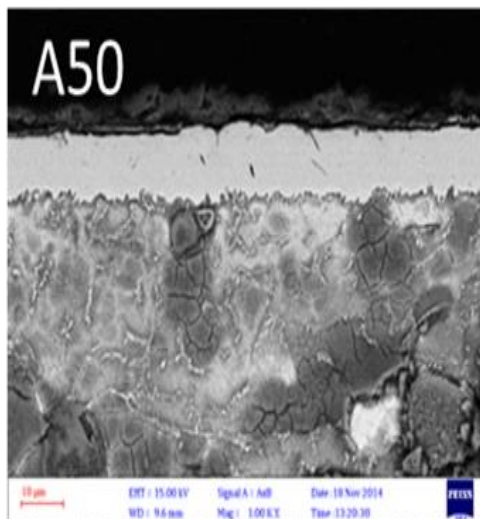
بررسی مقاومت به سایش

به منظور بررسی خواص سایشی پوشش کروم-نانو آلومینا و مقایسه آن با پوشش کروم سخت از روش تست سایش پین روی دیسک استفاده شد. مقدار نیرو و سرعت حرکت پین بر روی پوشش بر اساس استاندارد DIN 50324، نیروی ۲۰ نیوتن و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه انتخاب گردید. همچنین پین مورد استفاده از یک فولاد ابزار سخت شده ۵۲۱۰۰ با سختی بالاتر از RC ۶۴ و به قطر ۲ میلی متر انتخاب گردید. آزمایش‌ها تا از بین رفتن کامل پوشش ادامه یافتند. نتایج بهترین خواص سایشی در هر گروه در جدول ۶ گزارش شده است.

ذرات نانو مواعی در مقابل حرکت نابجایی‌ها محسوب می‌شوند و نابجایی‌ها در اطراف ذرات تجمع می‌کنند و برای تحرک مجدد نیاز به افزایش انرژی اولیه دارند که همین امر موجب افزایش سختی پوشش می‌شود [۳]؛ اما با افزایش بیش‌تر مقدار نانو آلومینا در حمام به واسطه تشکیل آگلومره و کاهش درصد وزنی نانو آلومینا در پوشش کاهش سختی رخ خواهد داد. از طرفی با کاهش دانسیته جریان به ۳۰ آمپر بر دسی مترمربع همان‌گونه که در شکل ۸ ملاحظه شد، حداکثر سختی به دست آمده برابر با ۹۵۹ ویکرز می‌باشد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که با کاهش دانسیته جریان در فرایند پوشش کروم-نانو آلومینا، میزان ذرات نانو به دام افتاده در زمینه کروم کاهش می‌یابد.

بررسی چسبندگی پوشش

جهت بررسی چسبندگی پوشش‌ها از آزمون استاندارد چسبندگی ASTM D3359 استفاده شد. در این روش به‌وسیله اعمال و جدا نمودن چسب نواری (حساس به فشار) بر روی بریدگی یا چاک ایجاد شده بر سطح پوشش، چسبندگی پوشش بر سطح فلز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.



شکل ۱۰- SEM از فصل مشترک پوشش و زمینه در پوشش کروم سخت (A50) و پوشش کروم نانو آلومینا (D50)

جدول ۶- میزان مقاومت نمونه‌ها در مقابل سایش بر حسب مسافت طی شده

مسافت طی شده (متر)	نمونه
۹	A50
۵۵	B50
۹۰	C50
۱۶۱۱	D50
۸۳	E50

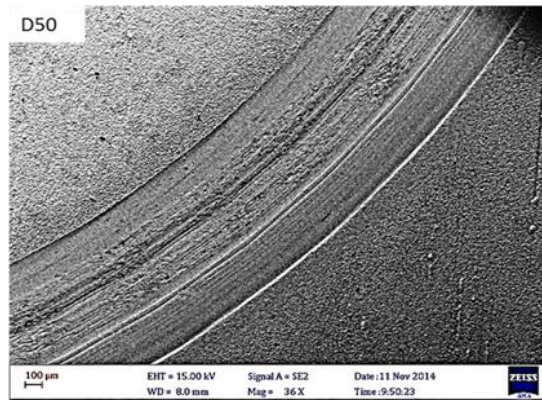
نمونه‌ها بعد از مانع و عملیات پولیش با محلول نایتال ۳٪ به مدت ۳۰ ثانیه اچ خواهند شد تا ترک‌ها در صورت وجود با وضوح بهتری دیده شوند.

مقطع پوشش‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی کامل قرار گرفت که در نمونه‌های D ترک و تخلخلی مشاهده نگردید در حالی که در پوشش کروم سخت بدون ذرات نانوالومینا، ترک‌های پیوسته و پراکنده در پوشش تشکیل شده است. وجود میکرو ترک به شدت بر کاهش چسبندگی پوشش بر زیر لایه موثر بوده به گونه‌ای که در تست سایش نیز ملاحظه گردید، پوشش-های کروم سخت در مسافت‌های کوتاهی از بین رفته و از زیر لایه جدا می‌شوند. همچنین به وضوح مشاهده می‌شود که در نمونه‌های گروه B، C و D کاهش تعداد و قطر ترک‌ها با افزایش میزان غلظت نانوالومینا رابطه کاملاً مستقیم دارد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که یکی از اثرات مهم افزودن ذرات نانوالومینا به پوشش کروم سخت، کاهش و یا حذف میکرو ترک‌های آن است که این امر باعث افزایش خواص پوشش و چسبندگی آن به زیرلایه می‌گردد.

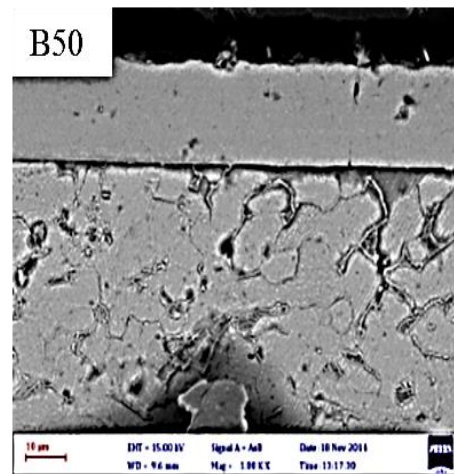
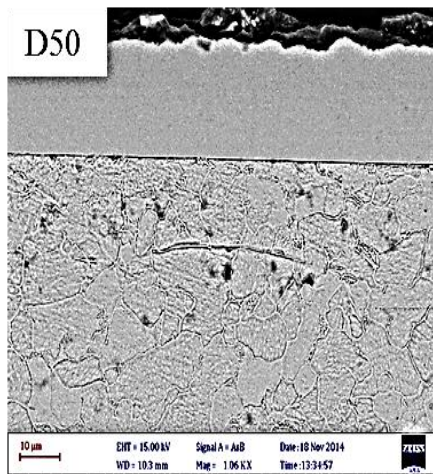
با بیش‌تر شدن ذرات نانوالومینا درون پوشش، افزایش مقاومت به سایش نتیجه شده است که با توجه به نتایج حاصل از افزایش میزان درصد وزنی ذرات، اصلاح ساختار و همگن ساختن پوشش کاملاً مطابق انتظار می‌باشد. افزایش ذرات نانوالومینا درون پوشش علاوه بر خاصیت ذاتی خود که به پوشش انتقال می‌دهند، با کاهش میکرو ترک‌ها و ریزدانه کردن سطح نیز مقاومت به سایش مطلوبی را ایجاد می‌کنند.

بررسی میکرو ترک پوشش‌ها

به منظور بررسی میکرو ترک در پوشش‌های کروم - نانوالومینا و مقایسه آن با پوشش کروم سخت، مقطع نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بعد از تصویر برداری از سطوح نمونه‌ها که در مراحل اولیه انجام پذیرفت، نمونه‌ها برای بررسی سطح مقطع برش خواهند خورد.



شکل ۱۱- تصویر SEM از سطح سایش نمونه D50



شکل ۱۲- تصویر SEM مقطع پوشش نمونه B50 و D50

نتیجه گیری

۲- افزودن بیش از ۲۵ گرم بر لیتر نانو آلومینا درون حمام آبکاری به جهت افزایش آگلومره شدن ذرات، موجب کاهش خواص پوشش می‌گردد.

۳- آزمایشات نشان می‌دهد که پوشش کامپوزیتی کروم - نانو آلومینا در مقایسه با پوشش کروم سخت دارای سختی بالاتر به میزان ۴۶ درصد و مقاومت به سایش بالاتر به میزان ۱۷۹ برابر می‌باشد.

۱- آزمون‌های مختلف بیانگر این است که پوشش نانو کامپوزیتی کروم- آلومینا در شرایط حمام کروم شش ظرفیتی استاندارد، هنگامی دارای بیشترین درصد وزنی ذرات نانو آلومینا در پوشش، ساختار همگن‌تر و ریزدانه‌تری خواهد بود که دارای شرایط ۲۵ گرم بر لیتر ذرات نانو آلومینا در حمام و دانسیته جریان ۵۰ آمپر بر دسی متر مربع باشد.

References:

- 1-C.T.J. Low, R.G.A. Wills, F.C. Walsh, "Electrodeposition of composite coatings containing nanoparticles in a metal deposit", *J. Surface & Coatings Technology* 201, pp 371-383, 2006.
 - 2.J.P.Celis,J.R.Roos,andC.Buelens,"A Mathematical Model For the Electrolytic Codeposition of Particles with a Metallic matrix", *J. Electrochemical Science and Technology*, June 1987.
 - 3.SeongMinChoi,HideoAwaji,"Nanocomposites-a new material design concept" *Science and Technology of Advanced Materials* 6, pp 2-10, 2005.
 - 4-Li Chen, Liping Wang ,Zhixiang Zeng , Tao Xu," Influence of pulse frequency on the microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-Al₂O₃ composite coatings", *J. Surface & Coatings Technology* 201 ,pp 599-605, 2006.
 - 5-Raj. Narayan, " Electrodeposited Composite Metal Coatings", *Reviews on Coatings and Corrosion*, Vol.4, No. 2, pp 113-155, 1981.
 - 6.M.Yousefpoor,A.Rahimi,"Characterization and selection of optimal parameters to achieve the best tribological performance of the electrodeposited Cr nanocomposite coating", *J. Materials and Design* ,pp382-389,2014.
 - 7-Book,Greenwood, J. David, "Hard chromium plating", publisher Robert Draper Ltd, 1964.
 - 8-Book,Morisset Oswald, "Chromium Plating", publisher: Robert Draper Ltd, 1954.
 - 9-E. G .Vinokurov, A. M. Arsenkin, K. V. Grigorovich,V.V Bondar,"Electrodeposition and Physico-Mechanical Properties of Chromium Coatings Modified with Disperse Particles", *Protection of Metals*,, Vol. 42, No. 3, pp. 290-294,2006.
 - 10-V.H. NGUYEN, T. HOANG, N. NGUYEN, S. KWO, M. KIM, J. LEE, "Cr/nano(ND)composite plating with cobalt cation additive", *Trans. Nonferrous Met. Soc. Chian*, Vol79 , pp. 975-978,2009.
- ۱۱-ص. کفاش یزدی ، م. بحر العلوم، بررسی تاثیر دانسیته جریان و غلظت مواد افزودنی بر خواص پوشش نانو ساختار روی تولید شده به روش آبکاری الکتریکی، مجله مواد نوین، شماره ۹، ص ۲۳-۳۳، پاییز ۹۱.