

تولید پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ به روش رسوب الکتروشیمیایی جریان مستقیم

سیاوش ایمانیان قازانلو^{۱*}، علی شکوه فر^۲، حامد بخشی^۱

۱- کارشناسی ارشد مهندسی مواد، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد پیشرفته و نانو تکنولوژی، دانشکده مهندسی و علم مواد،

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

۲- استاد، آزمایشگاه تحقیقاتی مواد پیشرفته و نانو تکنولوژی، دانشکده مهندسی و علم مواد دانشگاه، صنعتی خواجه

نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

* s.imanian.kntu@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۲/۱۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۳/۳۰)

چکیده

پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ با روش الکتروشیمیایی جریان مستقیم تولید شد. آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD) و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FE-SEM) از یک پوشش آلیاژی نیکل-کبالت و پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ که همگی شرایط الکتروشیمیایی تولیدشان یکسان بود، تهیه شد و اندازه ی دانه و مورفولوژی سطح آن ها مورد مقایسه قرار گرفت و تحلیل شد. با افزودن نانوذرات به میزان ۱۵ گرم بر لیتر به الکترولیت در حین پوشش دهی و در نتیجه، تولید پوشش نانو کامپوزیتی، اندازه ی دانه ی زمینه Ni-Co در حضور نانوذرات SiO₂ از ۵۸ به ۳۹ نانومتر کاهش یافت. مورفولوژی سطح مربوط به پوشش نانو کامپوزیتی، نسبت به پوشش آلیاژی، کروی ریزتر و صاف تر بود. میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی ۴۵ ویکرز بیشتر از پوشش آلیاژی بود. اگر دمای الکترولیت ۵۰ درجه ی سیلیسیوس باشد، آنگاه پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ ماکزیمم مقدار سختی را دارد. افزودن سورفکتانت های CTAB و SDS هر کدام به میزان ۰/۳ گرم بر لیتر به الکترولیت، مانع از آگلومره شدن نانوذرات و در نتیجه افزایش میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ به ترتیب از ۳۸۱ ویکرز (نمونه ی بدون سورفکتانت) به ۳۸۴ و ۳۸۵ ویکرز شد. در مورد پوشش تولید شده در اینجا، تأثیر SDS بیشتر از CTAB بود و مقدار بهینه ی غلظت برای SDS در الکترولیت ۰/۳ گرم بر لیتر بود.

کلمات کلیدی:

پوشش نانو کامپوزیتی، رسوب الکتروشیمیایی، دما، سورفکتانت، میکروسختی.

۱- مقدمه

تولید مواد نانو ساختار هم شود. مثلاً با استفاده از استحالتهای فازی تبدیل مایع به جامد یا گاز به جامد، هر عاملی که بتواند منجر به

به طور کلی هر روش تولیدی که بتواند منجر به تولید مواد پلی کریستالین با اندازه ی دانه ی بسیار ریزتر شود، می تواند منجر به

زیرلایه سپس افزودن نانوذرات SiC به آن، میکروسختی بسیار بهبود می یابد [۴].

هدف اصلی هم زدن الکترولیت حین پوشش دهی، معلق نگه داشتن ذرات و جلوگیری از ته نشین شدن یا شناور شدن آن ها در سطح الکترولیت است. سرعت هم زدن به دوشکل روی خواص پوشش تأثیر می گذارد: الف) افزایش سرعت هم زدن موجب افزایش مقدار ذرات رسوب کرده در کامپوزیت می شود. ب) سرعت هم زدن خیلی بالا مقدار ذرات در کامپوزیت را کاهش می دهد [۴]. با افزایش غلظت نانوذرات در الکترولیت تا یک اندازه ی بهینه، درصد وزنی آن ها در پوشش، افزایش می یابد. چون نانوذرات بیشتری در فرایند شرکت می کنند اما با افزایش غلظت به مقادیر بیشتر، به دلیل کاهش قابلیت تر شوندگی نانوذرات، پدیده آگلومره شدن اتفاق می افتد [۵-۱۳]. پوششهای کامپوزیتی زمینه فلزی تولید شده به روش آبکاری الکترولیتی دارای مقاومت به خوردگی و سایشی بالا می باشند [۱۴].

سیرواستاوا و همکارانش [۵] در ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiC، یائوو همکارانش [۶] در ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-W/SiC، کرباسی و همکارانش [۱۵] در ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-TiC، لاجوردی و شهرابی [۱۶] در ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-TiO₂ و عبدل آل و همکارانش [۱۷] در ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-W-P/SiC گزارش کرده اند که نانوذرات هم مانع از حرکت مرزانه ها شده و هم به عنوان مکان های مناسب برای جوانه زنی عمل می کنند و در نتیجه موجب کاهش اندازه ی دانه می گردند.

در این تحقیق برای نخستین بار است که پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ با روش جریان مستقیم تولید شده است و تأثیر دمای پوشش دهی بر میکروسختی پوشش مزبور بررسی شده است که قبلاً هرگز بررسی نشده است. در حالت کلی به تأثیر دما بر خواص پوشش کمتر توجه شده است و همچنین تأثیر سورفکتانت های SDS و CTAB و تأثیر تغییرات غلظت SDS

افزایش سرعت جوانه زنی و کاهش سرعت رشد شود، می تواند منجر به تولید فازهای نانو ساختار شود. اولین بار نانو ساختارها، با دمیدن گاز به یک زیرلایه ی سرد و کندانسه شدن گاز و تشکیل فلزات و آلیاژهای نانو ساختار انجام شد. فرایندهای پلاسما، رسوب شیمیایی و فیزیکی بخار، رسوب الکتروشیمیایی، انجماد سریع، آلیاژ سازی مکانیکی، تغییر شکل پلاستیکی شدید (SPD) و ... روش های بعدی بودند. دومین گروه از مواد که از سال ۱۹۹۰ میلادی به طور وسیعی مورد مطالعه و توجه قرار گرفتند، نانو ساختارهای تولید شده به روش رسوب الکتروشیمیایی بودند [۱].

در این تحقیق از محلول واتس برای رسوب دهی استفاده شده است که دارای مزایای زیر می باشند: الف- ساده بودن نگهداری از الکترولیت، ب- وجود سولفات ها با میزان خلوص بالا و به نسبت ارزان ج- تشکیل لایه های با ویژگی کمتر [۲]. اولین مدل رسوب الکتروشیمیایی توسط گاگلیلی، در سال ۱۹۷۲ میلادی، ارائه شد که دارای دو مرحله بود:

۱) جذب سطحی فیزیکی ضعیف ذرات روی سطح کاتد اتفاق می افتد، بدون تخلیه ی الکترونیکی یون هایی که جذب سطح شده اند.

۲) جذب الکتروشیمیایی قوی ذرات که توسط اعمال میدان الکتروشیمیایی ایجاد می شود و این جذب در نتیجه ی تخلیه ی الکترونیکی یون های فعال الکترونیکی است [۳].

پوشش نانوکامپوزیتی Ni-SiC، یکی از مهم ترین پوشش های نانوکامپوزیتی تولید شده به روش الکتروشیمیایی است که مطالعات زیادی روی آن صورت گرفته است. این پوشش، کاربردهای وسیعی در صنعت اتومبیل، موتورها و مدول های ریختگی به دلیل حفاظت از قطعات در برابر سایش ناشی از اصطکاک و مقاومت بالای خوردگی دارد. مقادیر نانوذرات SiC، چگالی جریان و سرعت هم زدن محلول الکترولیت، تأثیر زیادی روی میکروسختی این پوشش ها دارد. نتایج سایر محققان نشان داده است که با کاهش اندازه ی نانوذرات SiC، میکروسختی بهبود می یابد و همچنین در صورت آلیاژ کردن

(۴) مگنت به طول ۲ سانتی متر
 (۵) صفحه‌ی فولادی به عنوان کاتد با ابعاد 1cm*1cm (اتصال به قطب منفی)
 (۶) صفحه نیکلی به عنوان آند با ابعاد 1cm*1cm (اتصال به قطب مثبت)
 پوشش نانو کامپوزیتی آلیاژ نیکل کبالت تقویت شده با نانوذرات اکسید سیلیسیم، توسط روش رسوب دهی الکتروشیمیایی بر روی فولاد ساخته شد. به دلیل آن که لایه های اکسیدی و چربی روی سطح فولاد، هادی جریان الکتروسیسته نیستند در ابتدا صفحات فولادی با کاغذ سمباده ی ۴۰۰، ۶۰۰ و ۱۰۰۰ پولیش شد و سپس به مدت ۱۵ ثانیه در محلول ۱۰ درصد حجمی هیدروکلریک اسید غوطه ور شد تا لایه های اکسید سطحی آن جدا گردد و سپس توسط آب مقطر و پس از آن توسط الکل شسته شد تا به طور کامل چربی گیری شود و مجدداً توسط آب مقطر شسته شد. سپس الکترولیت با مواد مذکور ساخته شد. در جدول (۲) مقادیر مورد نیاز برای ساخت الکترولیت و همچنین مقدار مورد نیاز آن ها آورده شده است.

جدول (۲): مواد مورد نیاز و مقدار آن ها در الکترولیت برای ساخت پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂

مواد مورد استفاده در ساخت الکترولیت	مقدار آن ها در الکترولیت بر حسب (گرم بر لیتر)
NiSO ₄ .6H ₂ O	۲۲۰
NiCl ₂ .6H ₂ O	۴۰
H ₃ BO ₃	۳۰
CoSO ₄ .7H ₂ O	۲۵
SiO ₂ nanoparticles	۱۵

علاوه بر این در جدول (۳) شرایط آزمایشگاهی متغیر در ساخت پوشش های تولید شده، آورده شده است.

در الکترولیت، بر میکروسختی این پوشش، مورد بررسی قرار گرفت که در کارهای دیگر، هرگز تأثیر این دو سورفکتانت بر میکروسختی پوشش های نانو کامپوزیتی مورد مقایسه قرار نگرفته است و به غلظت بهینه برای سورفکتانت در تولید پوشش های نانو کامپوزیتی کمتر توجه شده است. همچنین میکروسختی و اندازه ی دانه و مورفولوژی سطح پوشش های Ni-Co و Ni-Co/SiO₂ که در جریان مستقیم تولید شده اند نیز مورد مقایسه، بررسی و تحلیل قرار گرفت که در پژوهش های پیشین به ندرت اندازه ی دانه ی پوشش آلیاژی و نانو کامپوزیتی با هم مقایسه شده و هرگز به تأثیر افزودن نانوذرات بر مورفولوژی سطح پوشش توجه نشده است.

۲- مواد و روش انجام آزمایش

به منظور تولید پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفتند که در جدول (۱) آورده شده اند:

جدول (۱): مواد مورد نیاز برای ساختن الکترولیت و مشخصات آن ها

نام ماده	تولید کننده	خلوص (%)
نیکل سولفات ۶ آبه (NiSO ₄ .6H ₂ O)	Scharlou	۹۸
نیکل کلرید ۶ آبه (NiCl ₂ .6H ₂ O)	BDH	۹۸
اسید بوریک (H ₃ BO ₃)	Merk	۹۹/۸
کبالت سولفات ۷ آبه (CoSO ₄ .7H ₂ O)	Scharlou	۹۸
سدیم دو سدیل سولفات و CTAB	Scharlou	۹۸
نانوذرات اکسید سیلیسیم	Merck	۹۹/۵

همچنین تجهیزاتی که در این سنتر مورد استفاده قرار گرفتند در زیر آورده شده اند:

- (۱) پالس ژنراتور یا رکتی فایر (برای تولید جریان الکتریکی به صورت پالسی یا مستقیم)
- (۲) همزن مغناطیسی دیجیتال همراه با صفحه ی داغ (۳) بشر با حجم ۱۰۰ میلی لیتر

جدول (۳): شرایط آزمایشگاهی متغیر در ساخت پوشش ها

نمونه ها	دما (درجه ی سانتیگراد)	غلظت سدیم دو دوسیل سولفات (گرم بر لیتر)	غلظت CTAB (گرم بر لیتر)
Ni-Co	۵۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۵۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۳۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۴۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۶۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۵۰	۰/۳	۰
Ni-Co/SiO ₂	۵۰	۰/۲	۰
Ni-Co/SiO ₂	۵۰	۰/۴	۰
Ni-Co/SiO ₂	۵۰	۰	۰/۳

میکروسختی سنجی، بار اعمالی ۱۰۰ گرم و زمان اعمال بار ۱۰ ثانیه بود. از هر نمونه، ۵ بار میکروسختی گرفته شد و میانگین میکروسختی ها برای هر نمونه، به عنوان میکروسختی آن نمونه در نظر گرفته شد. همچنین آنالیز پراش اشعه ی ایکس (XRD) و تصویربرداری میکروسکوپ الکترونی روبشی (FE-SEM)، انجام شد. اندازه ی دانه ی زمینه پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ (یعنی اندازه ی دانه ی Ni-Co)، با استفاده از نتایج XRD نمونه ها محاسبه شد.

برای تعیین اندازه ی دانه، از رابطه ی شرر استفاده شد:

$$t = 0.9\lambda / B \cos\theta_B \quad (10)$$

در این رابطه (t) اندازه ی دانه، (λ) طول موج اشعه ی ایکس، θ_B زاویه ی براگ مربوط به پیک بیشینه و B عرض پیک در نصف شدت بیشینه است [۱۸]. مقادیر θ_B و B از نرم افزار X'Pert HighScor به دست آمد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج پراش اشعه ی ایکس

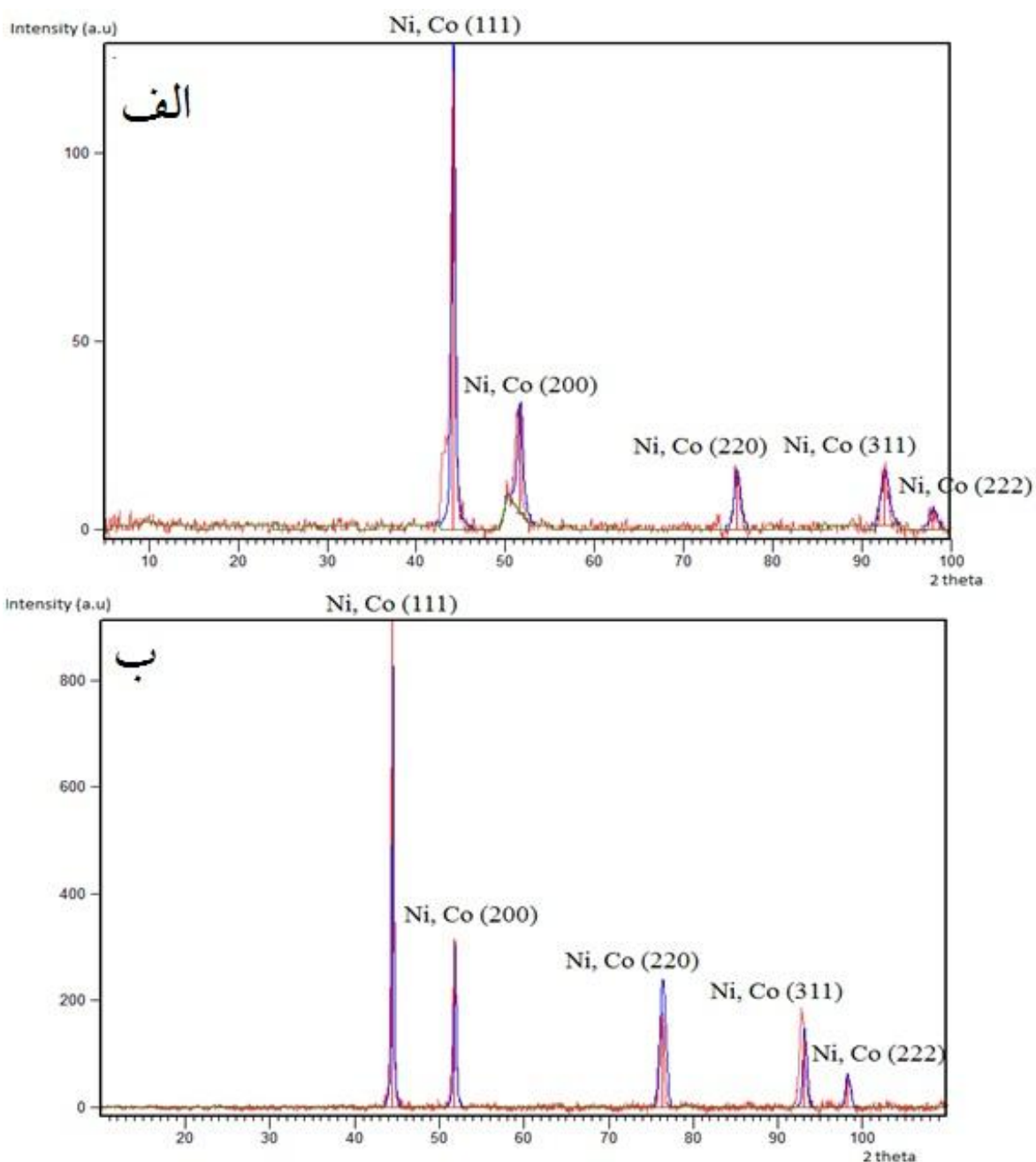
از دستگاه XRD، مدل (Stoe-stidy-mp)، با تابش Cu ka، با طول موج ۱/۵۴۰۶ نانومتر، استفاده شد. شکل (۱-الف) و شکل

تمامی نمونه ها در سرعت هم زدن ۳۰۰ دور بر دقیقه، pH=۴/۳، چگالی جریان متوسط ۴ آمپر بر دسی متر مربع و مدت زمان ۹۰ دقیقه ساخته شده اند. در ساخت الکترولیت برای تمامی نمونه ها، ابتدا در بشر به میزان ۵۰ میلی لیتر آب مقطر ریخته شد و سپس نانوذرات SiO₂ به همراه سدیم دو دوسیل سولفات (سورفکتانت یا پایدار کننده ی سطحی که نقش آن جلوگیری از آگلومره شدن نانوذرات است)، در داخل بشر ریخته می شود و سپس محتوی بشر در دمای محیط به مدت ۲۴ ساعت و با سرعت ۱۲۰۰ دور بر دقیقه توسط همزن مغناطیسی، هم زده شد و سپس سایر مواد مورد نیاز برای ساخت الکترولیت به بشر اضافه شد و برای به حجم رساندن الکترولیت آب مقطر به بشر اضافه شد و پس از تشکیل محلول پوشش دهی، دمای صفحه ی همزن مغناطیسی را بالا برده تا به دمای محلول به دمای مورد نظر رسید و سپس پوشش دهی آغاز شد. برای تنظیم دما از دماسنج جیوه ای و برای تنظیم پی اچ الکترولیت از نیکل کربنات (بالا بردن پی اچ) و هیدروکلریک اسید (پایین آوردن پی اچ) استفاده شد.

از دستگاه میکروسختی سنجی (ویکرز)، مدل Buehler برای میکروسختی سنجی پوشش استفاده شد. در تمامی موارد

پراش قابل دیدن هستند، عبارتست از (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) که نشان از مکعبی (fcc) بودن ساختار آلیاژ Ni-Co دارد. پیک های مربوط به نانوذرات SiO₂، به دلیل کم بودن درصد وزنی آن ها در پوشش نانوکامپوزیتی شکل (۱-الف)، در نتایج پراش اشعه ی ایکس دیده نمی شوند.

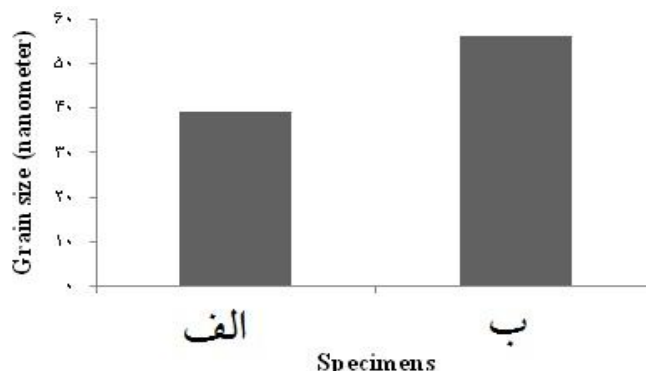
(۱-ب)، به ترتیب مربوط به نتایج پراش اشعه ی ایکس از نمونه ی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و نمونه ی پوشش آلیاژی Ni-Co می باشند. در این شکل ها پیک های مربوط به آلیاژ نیکل- کبالت و صفحات آن ها مشخص است و در هر دو نمونه ، رشد کریستال های آلیاژ نیکل کبالت از صفحه ی (۱۱۱)، آغاز می گردد. سایر صفحات مربوط به نیکل و کبالت که در الگوی



شکل (۱): نتایج پراش اشعه ی ایکس برای: (الف): پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و (ب): پوشش آلیاژی Ni-Co

مستقیم آورده شده است. همانطور که مشخص است اندازه ی دانه ی پوشش نانو کامپوزیتی کمتر از پوشش آلیاژی است.

در شکل (۲)، اندازه ی دانه ی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و پوشش آلیاژی Ni-Co تولید شده در جریان های



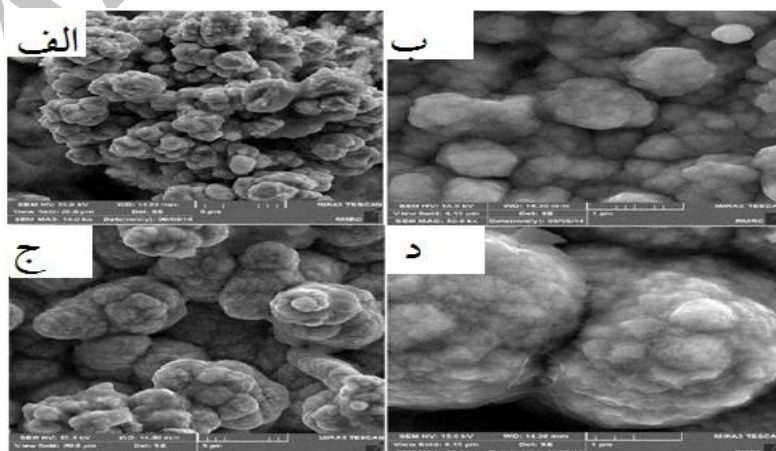
شکل (۲): اندازه ی دانه: (الف): پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و (ب): پوشش آلیاژی Ni-Co تولید شده در جریان های مستقیم

شود. همانطور که دیده می شود مورفولوژی مربوط به پوشش نانو کامپوزیتی، کروی ریزتر و صاف تر است ولی مورفولوژی مربوط به پوشش آلیاژی، کروی درشت تر و زبرتر است. چون نانوذرات در پوشش نانو کامپوزیتی مکان های مستعد برای جوانه زنی هستند و در نتیجه با ورود آن ها به ساختار باعث افزایش مکان های جوانه زنی برای نیکل و کبالت و در نتیجه، ریزتر شدن ساختار مورفولوژیکی آن نسبت به پوشش آلیاژی می شوند. ولی در پوشش آلیاژی مکان مستعد برای جوانه زنی فقط زیر لایه ی فولادی می باشد و در نتیجه ساختار کروی درشت تر و زبرتر خواهد بود.

دلیل این، از آن است که حضور نانوذرات در پوشش مانع از حرکت مرزدانه ها شده و در نتیجه مانع بزرگ تر شدن دانه می شود [۱۵-۲۰] و همچنین به عنوان مکان های مناسب برای جوانه زنی ناهمگن عمل می کنند و در نتیجه موجب افزایش سرعت جوانه زنی و کاهش اندازه ی دانه می گردند [۲۰].

۲-۳- بررسی ساختار پوشش توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی

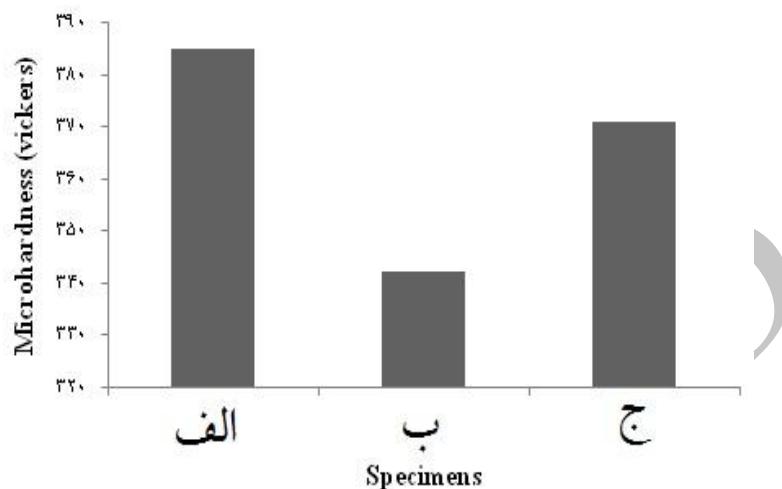
از دستگاه FE-SEM، مدل TESCAN MIRA3، جهت عکس برداری از پوشش استفاده شد. در شکل (۳) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی مربوط به پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و پوشش آلیاژی Ni-Co دیده می



شکل (۳): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی: (الف): بزرگنمایی ۱۰۰۰۰، (ب): بزرگنمایی ۵۰۰۰۰، پوشش برای نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂، چگالی جریان ۴ آمپر بر دسی متر مربع، (ج): بزرگنمایی ۱۰۰۰۰، (د): بزرگنمایی ۵۰۰۰۰، پوشش آلیاژی Ni-Co، چگالی جریان ۴ آمپر بر دسی متر مربع

۳-۳- مقایسه‌ی میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و پوشش آلیاژی Ni-Co

در شکل (۴) میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ و پوشش آلیاژی Ni-Co تولید شده در جریان های مستقیم و زیرلایه‌ی فولادی آورده شده است.

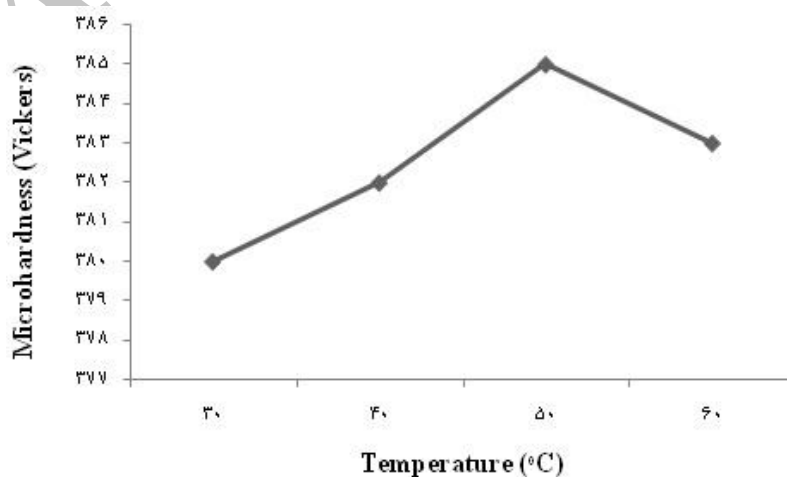


شکل (۴): نتایج میکروسختی برای: (الف): پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂, (ب): پوشش آلیاژی Ni-Co تولید شده در جریان های مستقیم و (ج): زیرلایه‌ی فولادی

در نتیجه افزایش تمرکز تنش و افزایش سختی پوشش می‌گردند [۲۲-۲۳].

۳-۴- تأثیر دما بر میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ در شکل (۵) تأثیر دما بر میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی آورده شده است.

میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی، بیشتر از پوشش آلیاژی است. دلیل آن وجود نانوذرات در پوشش نانو کامپوزیتی است که مانع از حرکت نابجایی ها و موجب قفل شدن آن ها شده و در نتیجه موجب افزایش میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی نسبت به پوشش آلیاژی می‌گردد [۲۱]. نانوذرات در زمینه‌ی ماتریکس پوشش نانو کامپوزیتی، حرکت نابجایی ها و لغزش مرزانه ها را محدود کرده و باعث انباشتگی نابجایی ها و

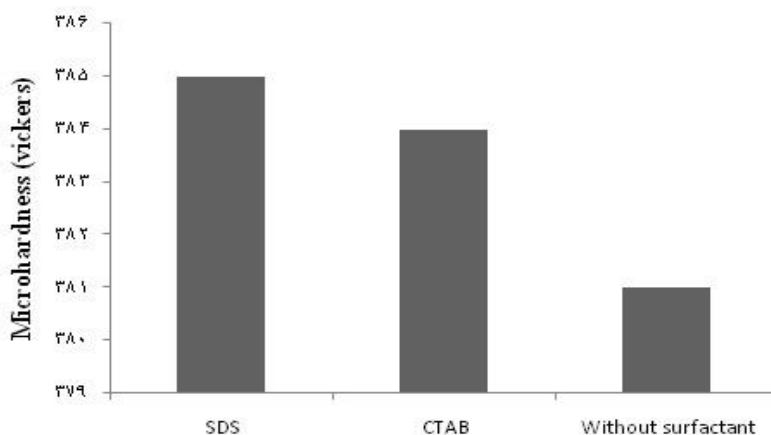


شکل (۵): تغییرات میکروسختی پوشش نانو کامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ با تغییرات دمای پوشش دهی

در کارهای دیگر و در ساخت پوشش های مختلف نیز برای دمای پوشش دهی یک مقدار بهینه وجود دارد [۷-۲۴].

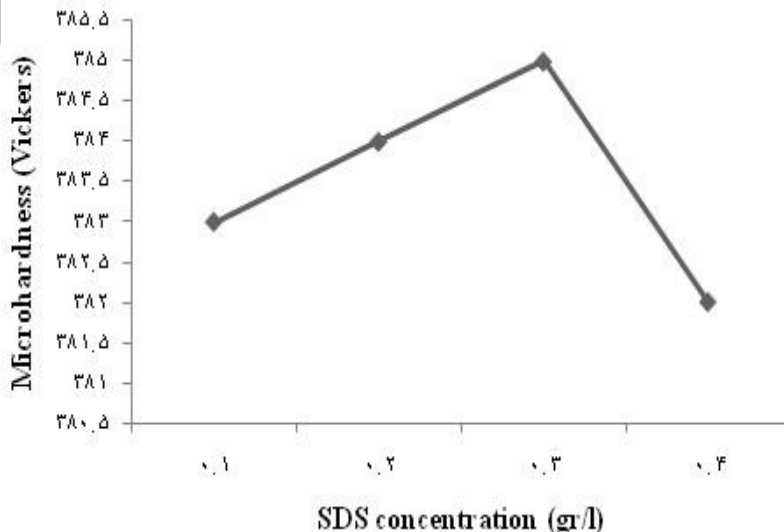
۳-۵- تأثیر افزودن سورفکتانت بر میکروسختی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂

در شکل (۶) تأثیر افزودن سورفکتانت های SDS و CTAB بر میکروسختی پوشش نانوکامپوزیتی مذکور نشان داده شده است.



شکل (۶): مقایسه ی سختی دو نمونه تولید شده با سورفکتانت های SDS و CTAB با یک نمونه ی بدون سورفکتانت

سورفکتانت SDS، موجب افزایش بیشتر میکروسختی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ نسبت به سورفکتانت CTAB شد. در شکل (۷)، تأثیر تغییرات غلظت سورفکتانت SDS بر میکروسختی پوشش نشان داده شده است.



شکل (۷): تغییرات میکروسختی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ با تغییرات غلظت سورفکتانت SDS

اگر دمای الکترولیت ۵۰ درجه ی سیلیسیوس باشد، آنگاه پوشش ماکزیم مقدار سختی را دارد و می توان گفت با افزایش دمای الکترولیت تا ۵۰ درجه ی سیلیسیوس اکتیویته ی ذرات افزایش می یابد. در بالای ۵۰ درجه ی سیلیسیوس جنب و جوش ذرات به قدری افزایش می یابد که امکان جذب آنها وجود ندارد و دلیل آن هم مسائلی چون برخورد الاستیک با سطح الکتروود و یا حتی کندن پوشش توسط این ذرات پر جنب و جوش است.

افزودن سورفکتانت CTAB به الکترولیت به دلیل جلوگیری از آگلومره شدن نانوذرات موجب افزایش درصد وزنی نانوذرات SiC در پوشش و در نتیجه افزایش میکروسختی پوشش نانوکامپوزیتی می شود [۱۷-۲۲].

۵- مراجع

- [1] G. Injeti & L. Binder, "Electrodeposition of nanostructured coatings and their characterization—a review", *Science and Technology of Advanced Materials*, Vol. 9, No. 4, 043001, 2008.
- [2] ر. ابراهیمی، ع. سعیدی، س. م. سید النگی و ا. اسدی، " تولید نانوکامپوزیت Ni-TiC به روش الکتروشیمیایی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال دوم، شماره پنجم، تابستان ۱۳۸۷.
- [3] G. Anabela, et al. Electrodeposition of metal matrix nanocomposites: improvement of the chemical characterization techniques. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [4] S. Meenu, V. K. W. Grips & K. S. Rajam, "Electrochemical deposition and tribological behaviour of Ni and Ni-Co metal matrix composites with SiC nano-particles", *Applied Surface Science*, Vol. 253, No. 8, pp. 3814-3824, 2007.
- [5] P. Bagheri, et al. "Ni-TiO₂ nanocomposite coating with high resistance to corrosion and wear", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 204, No. 23, pp. 3804-3810, 2010.
- [6] Y. Yingwu, et al. "Electrodeposition and mechanical and corrosion resistance properties of Ni-W/SiC nanocomposite coatings", *Materials Letters*, Vol. 61, No. 1, pp. 67-70, 2007.
- [7] M. Karbasi, N. Yazdian & A. Vahidian. "Development of electro-co-deposited Ni-TiC nano-particle reinforced nanocomposite coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 207, pp. 587-593, 2012.
- [8] S. A. Lajevardi & T. Shahrabi, "Effects of pulse electrodeposition parameters on the properties of Ni-TiO₂ nanocomposite coatings", *Applied Surface Science*, Vol. 256, No. 22, pp. 6775-6781, 2010.
- [9] Abdel, S. M. El-Sheikh & Y. M. Z. Ahmed. "Electrodeposited composite coating of Ni-W-P with nano-sized rod-and spherical-shaped SiC particles", *Materials Research Bulletin*, Vol. 44, No. 1, pp. 151-159, 2009.

با افزایش غلظت سورفکتانت تا ۰/۳ گرم بر لیتر در الکترولیت، مقدار نانوذرات SiO₂، در پوشش افزایش می یابد چون این سورفکتانت موجب منفی شدن بار ذرات و در نتیجه افزایش بیشتر پتانسیل زتا و ایجاد نیروی دافعه بین آن ها می شود و فرایند پوشش دهی را بهبود می بخشد، زیرا در غیاب سورفکتانت ذرات آگلومره می شوند و به دلیل سنگین تر شدن در الکترولیت رسوب می کنند، یعنی وظیفه ی اصلی سورفکتانت جلوگیری از آگلومره شدن ذرات است [۱۹]. ولی با افزایش بیشتر سورفکتانت در الکترولیت، نانوذرات آگلومره می شوند. چون افزایش بیشتر ذرات SDS، موجب افزایش نیروی یونی بین آن ها می شود و بین آن ها یک پل ارتباطی ایجاد می گردد و حالتی مثل عدم وجود سورفکتانت در الکترولیت اتفاق می افتد. در کارهای دیگر نیز برای غلظت سورفکتانت، یک مقدار بهینه وجود دارد [۲۵].

۴- نتیجه گیری

اندازه ی دانه ی پوشش نانوکامپوزیتی کمتر از پوشش آلیاژی است. چون نانوذرات هم مانع از حرکت مرز دانه ها شده و هم به عنوان مکان های مناسب برای جوانه زنی عمل می کنند و در نتیجه موجب کاهش اندازه ی دانه می گردند. مورفولوژی مربوط به پوشش نانوکامپوزیتی، کروی ریزتر و صاف تر است ولی مورفولوژی مربوط به پوشش آلیاژی، کروی درشت تر و زبرتر است. دمای بهینه برای ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂، ۵۰ درجه ی سانتیگراد می باشد. سورفکتانت SDS نسبت به CTAB، موجب افزایش بیشتر سختی پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂ می شود. وظیفه ی اصلی سورفکتانت، جلوگیری از آگلومره شدن نانوذرات با منفی کردن بار سطحی نانوذرات و جلوگیری از ته نشین شدن آن هاست و مقدار بهینه ی غلظت سورفکتانت SDS، برای ساخت پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Co/SiO₂، ۰/۳ گرم بر لیتر می باشد.

- Yan, L. I. U., et al. "Microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-SiO₂ nano-composite coatings on AZ91HP magnesium alloy substrate," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 21, pp. 483-488, 2011.
- [20] V. Zarghami & M. Ghorbani, "Alteration of corrosion and nanomechanical properties of pulse electrodeposited Ni/SiC nanocomposite coatings", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 598, pp. 236-242, 2014.
- [21] F. Kılıç, et al. "Effect of CTAB concentration in the electrolyte on the tribological properties of nanoparticle SiC reinforced Ni metal matrix composite (MMC) coatings produced by electrodeposition", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 419, pp. 53-60, 2013.
- [22] Y. Yang & Y. F. Cheng, "Fabrication of Ni-Co-SiC composite coatings by pulse electrodeposition—Effects of duty cycle and pulse frequency", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 216, pp. 282-288, 2013.
- [۲۳] م. رستمی، ر. ابراهیمی و ا. ساعتچی، " اثر افزایش مقدار نانوذرات SiC بر سختی پوشش های نانوکامپوزیتی Ni-SiC-Gr، حاصل از آبکاری الکتریکی"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال ششم، شماره اول، بهار ۱۳۹۱.
- [24] B. Tushar, "Electrodeposition of nickel composite coatings", *Diss. Oklahoma State University*, 2010.
- [25] Z. Shahri & S. R. Allahkaram, "Effect Of Particles Concentration and Current Density ON The Co/HEXAGONAL BORON NITRIDE NANO-COMPOSITE Coatings Properties", *Iranian Journal of Materials Science & Engineering*, Vol. 9, No. 4, 2012.
- [10] F. Golestani fard, M. A. Bahrevar & E. Salahi, "Materials characterization and analysis methods", central publication of Iran university of science and technology, Iran, 2013.
- [11] H. Ikram Ul, et al. "Electrodeposition of Ni-Fe₂O₃ nanocomposite coating on steel", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 235, pp. 691-698, 2013.
- [12] 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: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 315, No. 1, pp. 176-182, 2008.
- [13] M. Eslami, et al. "Effect of electrodeposition conditions on the properties of Cu-Si₃N₄ composite coatings", *Applied Surface Science*, Vol. 300, pp. 129-140, 2014.
- [14] Zh. Yue-Bo, G. G. Zhao & H. J. Zhang, "Fabrication and wear properties of co-deposited Ni-Cr nanocomposite coatings", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, No. 1, pp. 104-109, 2010.
- [۱۵] ع. نصر اصفهانی، س. ج. دانشی و خ. فرمنش، " تاثیر پتانسیل زتا بر نحوه ی رسوب نانوذرات خنثی در پوشش های نانوکامپوزیتی حاصل از آبکاری الکتریکی منقطع"، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی مواد مجلسی، سال سوم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۸۸.
- [16] S. Pouladi, M. H. Shariat & M. E. Bahrololoom. "Electrodeposition and characterization of Ni-Zn-P and Ni-Zn-P/nano-SiC coatings", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 213, pp. 33-40, 2012.
- [17] J. L. Wang, R. D. Xu & Y. Z. Zhang, "Influence of SiO₂ nano-particles on microstructures and properties of Ni-WP/CeO₂-SiO₂ composites prepared by pulse electrodeposition", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, No. 5, pp. 839-843, 2010.
- [18] M. Eslami, et al. "Study on tribological behavior of electrodeposited Cu-Si₃N₄ composite coatings", *Materials & Design*, Vol. 58, pp. 557-569, 2014.
- [19] L. Yan, Y. Si-rong, L. Jin-dan, H. Zhi-wu & Y. Dong-sheng, "Microstructure and wear resistance of electrodeposited Ni-SiO₂ nano-composite coatings on AZ91HP magnesium alloy substrate, *Trans.*