

پوشش دهی پودر کاربید تنگستن با استفاده از روش الکترولس نیکل-فسفر و بررسی تأثیر غلظت پودر در حمام و عملیات اسیدشویی

محمود کارگرپور اصفهانی، مهدی صالحی و مجید جعفری

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله ۹۴/۰۴/۱۸ - پذیرش مقاله : ۹۴/۱۰/۲۲)

چکیده

در این پژوهش با استفاده از فرآیند آبکاری الکترولس نیکل فسفر، سطح ذرات پودر کاربید تنگستن پوشش دهی شد و تأثیر غلظت پودر اضافه شده در حمام و عملیات اسیدشویی بر درصد نیکل پودر پس از فرآیند الکترولس مورد بررسی قرار گرفت. درصد عناصر در نمونه‌های مختلف توسط آزمون طیف‌سنج فلورسانس پرتوی ایکس به دست آمد. به منظور بررسی تأثیر غلظت پودر اضافه شده، پودر کاربید تنگستن اسیدشویی شده با غلظت‌های ۲۰ و ۴۰ g/lit به حمام الکترولس اضافه شد و در این نمونه‌ها درصد نیکل به ترتیب برابر ۱/۱۴ و ۵/۷ به دست آمد. برای بررسی تأثیر عملیات اسیدشویی، پودر کاربید تنگستن با غلظت ۲۰ g/lit یکبار با عملیات اسیدشویی و یکبار بدون عملیات اسیدشویی به محلول الکترولس افزوده شد. مشاهده شد با انجام عملیات اسیدشویی درصد نیکل حدود ۲۷٪ افزایش پیدا کرد. برای محاسبه تقریبی ضخامت لایه الکترولس رابطه‌ای به دست آمد که با استفاده از آن ضخامت لایه الکترولس برای پودرهای E20، E20P و E40P به ترتیب برابر ۰/۰۸، ۱/۱ و ۰/۰۵ μm به دست آمد. در الگوی پراش پرتوی ایکس پودر کاربید تنگستن پس از فرآیند الکترولس، پیک‌های W₂C ظاهر شدند که دلیل آن را می‌توان نفوذ هیدروژن فرآیند الکترولس در عیوب ساختاری برشمرد.

واژه‌های کلیدی: فرآیند الکترولس نیکل-فسفر، عملیات اسیدشویی، پودر کاربید تنگستن، کاربید W₂C.

Ni- P Electroless Coating of WC Powder and Evaluating the Effect of Powder Concentration in Bath and Pickling process

M. Kargarpour Esfahani, M. Salehi and M. Jafari

Materials Engineering Department, Isfahan University of Technology

(Received 09 July 2015, accepted 12 January 2016)

Abstract

In this study the surface of WC powder particles coated by Ni-P electroless process and the effect of powder proportion immersed in Ni-P electroless bath and the activation pretreatment on the Nickel content was evaluated by X-Ray florescence analysis. To investigate the effect of powder proportion immersed in electroless bath, the activated powder with concentrations of 20 and 40 g/lit was added in electroless bath and the weight percent of Ni assessed to be 14/1 and 7/5% respectively. To evaluate the effect of activation process, WC powder with concentration of 20 g/lit was immersed in Ni-P electroless bath with and without activation process. By applying the activation process, the weight percent of Ni increased about 27%. An equation was proved to estimate the thickness of electroless layer. In this approach, the thickness of electroless layer in E20, E20P and E40P samples was calculated 0/08, 1/1 and 0/05 μm respectively. In XRD pattern of Ni-P coated WC, the W₂C peaks were exhibited, because of the diffusion of hydrogen in structural defects.

Keywords: Ni-P electroless process, activation treatment, WC powder, W₂C.

E-mail of corresponding author : m.kargarpour@ma.iut.ac.ir.

مقدمه

فرآیند پوشش‌دهی الکترولس نیکل-فسفر، رسوب نیکل روی سطوح فعال بدون استفاده از جریان الکتریکی است. فرآیند رسوب‌دهی در یک محلول آبی با انجام واکنش‌های شیمیایی اتفاق می‌افتد و در آن یون نیکل توسط هیپوفسفات سدیم در یک حمام اسیدی احیا می‌شود. پوشش الکترولس نیکل فسفر به صورت گسترده در صنایع مختلف به عنوان لایه محافظ برای سطوح داخلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

به تازگی ذرات سرامیکی به منظور بهبود خواص سطح، توسط پوسته‌های فلزی پوشش‌دهی شده‌اند. در پژوهش‌های اخیر SiC [۲]، Al_2O_3 [۳-۵]، B_4C [۶، ۷] و سایر ذرات سرامیکی [۸-۱۰]، بیشتر با هدف افزایش ترشوندگی در مذاب فلزی، توسط فرآیند الکترولس پوشش‌دهی شده‌اند. در سال‌های اخیر تحقیقاتی جهت تولید پودر WC با پوشش الکترولس صورت گرفته‌است، که به عنوان پودر تغذیه فرآیند پاشش حرارتی و جوشکاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. لوی^۱ و همکاران [۱۱] با استفاده از فرآیند الکترولس کبالت، پودر WC-Co تولید کردند. این پودر کامپوزیتی در فرآیند لیزر کلدینگ^۲ مورد استفاده قرار گرفته‌است. به منظور افزایش پایداری حرارتی پوشش‌های WC-Co، جعفری^۳ و همکاران [۱۲] از فرآیند الکترولس نیکل فسفر جهت تشکیل لایه یکنواخت بر سطح ذرات پودر تجاری WC-Co استفاده کردند. پودر تولید شده به این روش، به عنوان پودر تغذیه فرآیند پاشش شعله‌ای پرسرعت (HVOF^۴) مورد استفاده قرار گرفته‌است.

سطح ذرات سرامیکی معمولاً از لحاظ کاتالیتیکی غیرفعال است، از این رو قبل از فرآیند الکترولس این ذرات، عملیات

حساس‌سازی و فعال‌سازی، روی ذرات اعمال می‌شود. میزان فعالیت کاتالیتیکی سطح، تابعی از تعداد عیوب سطحی در واحد سطح است [۱۲]. بنابراین ذرات با ابعاد کوچک به دلیل داشتن سطح زیاد، از لحاظ کاتالیتیکی فعال‌تر هستند. به این ترتیب، مورفولوژی سطح زیرلایه نقش مهمی بر میزان رسوب لایه الکترولس دارد. به عنوان مثال سطح پودر تجاری WC-Co مورد استفاده جهت فرآیند HVOF، فرورفتگی و برآمدگی‌های زیادی دارد که باعث افزایش فعالیت کاتالیتیکی سطح آن شده‌است. برای زیرلایه‌های مسطح و ذرات درشت، عملیات حساس‌سازی و فعال‌سازی سطح به ترتیب توسط $PdCl_2-HCl$ و $SnCl_2-HCl$ صورت می‌پذیرد. مواد مورد استفاده در این عملیات، گران‌قیمت هستند و کنترل آن‌ها مشکلاتی را به همراه دارد. در نتیجه در سال‌های اخیر تلاش‌هایی برای جایگزین کردن روش‌های دیگر صورت گرفته‌است [۱۳]. به منظور فعال‌سازی سطح آلومینا، دویس^۵ و همکاران [۸]، مقدار مشخصی از $NiNO_3$ و ۵ گرم از پودر آلومینا را در آب مقطر حل کردند. پس از خشک شدن این محلول، یک لایه NiO روی ذرات تشکیل می‌شود. این لایه جهت رسوب نیکل رو سطح مناسب است. زو^۶ و همکاران [۱۰] در پژوهش خود پودر گرافیت را در محلول ۲۰ درصد وزنی اسید هیدروفلوئوریک در دمای اتاق با استفاده از امواج فراصوت غوطه‌ور کردند و به این روش فعال‌سازی سطح را انجام دادند. در پژوهش لو^۷ و همکاران [۱۳] که با محوریت عملیات الکترولس بر زیر لایه کاربردتنگستن انجام شده‌است، تنها از یک پیش عملیات شستشو در مخلوط اسید نیتریک و اسید هیدروفلوئوریک استفاده شده‌است و لایه الکترولس نیکل-فسفر با موفقیت بر زیرلایه پودری کاربردتنگستن رسوب کرده‌است. ذرات پودر کاربردتنگستن پس از

1- Liu

2- Laser cladding

3- Jafari

4- High Velocity Oxy-fuel

5- Deuis

6- Xu

7- Luo

جدول ۱. مشخصات محلول الکترولس.

مقدار (ml/lit)	اجزای حمام
۱۵۰	S71
۷۰	S72
۷	S76
به مقدار لازم جهت تنظیم pH	آمونیاک
مقدار باقیمانده از حجم	آب مقطر

الکترولس، بین ۹۰ تا ۹۲ °C نگه داشته شد. این فرآیند در یک بشر با حداقل ظرفیت ۴۰۰ میلی‌لیتر و با استفاده از یک گرم کن/همزن انجام شد. سرعت تلاطم همزن در حدود ۶۰۰ دور بر دقیقه تنظیم شد. بشر، دماسنج و مگنت مورد استفاده برای همزن به مدت ۱۵ دقیقه با اسیدنیتریک ۲۰ درصد حجمی شستشو داده شد.

به منظور بررسی تأثیر درصد پودر، دو غلظت مختلف ۲۰ و ۴۰ g/lit از پودر کاربیدتنگستن در حمام مورد آزمایش قرار گرفت. برای بررسی تأثیر اسیدشویی و شستشوی پودر مورد آزمایش، مقدار ۲۰ g/lit پودر در حمام، یک بار با استفاده از فرآیند اسیدشویی و شستشو و یک بار بدون استفاده از فرآیند اسیدشویی و شستشو مورد آزمایش قرار گرفت. در جدول ۲، شرایط نمونه‌های مورد بررسی در این آزمایش مشخص شده‌اند.

در این پژوهش عملیات اسیدشویی با استفاده از محلول آبی شامل ۳۰ میلی‌لیتر بر لیتر HF و ۲۰ میلی‌لیتر بر لیتر HNO₃ انجام پذیرفت. پس از اسیدشویی، شستشوی این پودر با آب مقطر و الکل هرکدام به مدت ۱۵ دقیقه انجام گرفت.

اسیدشویی به صورت لایه لایه تبدیل شده‌اند و در نتیجه فعالیت کاتالیتیکی سطح افزایش پیدا کرده‌است. ماندین^۱ و همکاران [۱۴] با اعمال یک پوشش پلیمری موسوم به پلی دوپامین^۲ بر سطح ذرات WC و Al₂O₃، توانستند روی سطوح زیرلایه، زنجیره‌های ناقص پلیمری ایجاد کنند که مکان‌های مناسبی برای رسوب نیکل فلزی در فرآیند الکترولس است. در نتیجه پس از ایجاد پوشش پلیمری، لایه یکنواخت الکترولس روی سطح ذرات تشکیل شده‌است.

در پژوهش حاضر، پودر کاربیدتنگستن با استفاده از فرآیند الکترولس پوشش‌دهی شد و تأثیر عواملی چون غلظت پودر در حمام و اسیدشویی بر میزان نیکل رسوب کرده مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر عملیات الکترولس بر ترکیب شیمیایی و ساختار پودر ارزیابی شد.

مواد و روش آزمایش‌ها

فرآیند الکترولس

در این پژوهش، از یک نوع پودر کاربیدتنگستن با مورفولوژی نیم‌کروی با اندازه ذرات بین ۱ تا ۴ μm استفاده شد.

به منظور انجام فرآیند الکترولس نیکل-فسفر، محلول استاندارد اشلوتر^۳ با سه جزو S71، S72 و S76 مورد استفاده قرار گرفت. درصد فسفر این حمام بین ۵ تا ۸٪ است که یک فرآیند الکترولس با فسفر متوسط محسوب می‌شود. جدول ۱ مشخص کننده ترکیب شیمیایی این حمام است.

در حمام الکترولس اشلوتر، با استفاده از آمونیاک، pH روی ۴/۷ تنظیم شد و دمای محلول مورد استفاده در فرآیند

1- Mondin
2- Poly-Dopamine
3- SLOTONIP

پژوهش از دستگاه پراش پرتوی ایکس Philips، مدل X' Pert استفاده شد.

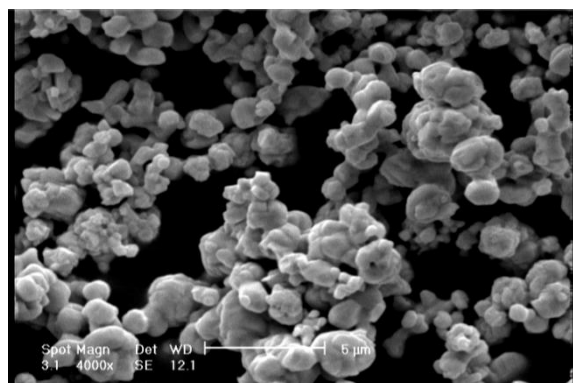
ارزیابی درصد عناصر موجود در پودرهای فراوری شده پس از انجام آزمایش الکترولس توسط آزمون طیف‌سنج فلورسانس پرتوی ایکس انجام پذیرفت. به این منظور از دستگاه S4 Pioneer شرکت Bruker آلمان استفاده شد.

به‌منظور تخمین متوسط اندازه ذرات پودر اولیه و درصد تخلخل پوشش، از نرم افزار MIP^۱ استفاده شد. این نرم‌افزار محصولی از شرکت نهمین پردازان آسیای دانشگاه فردوسی مشهد است. همچنین برای بررسی الگوی پراش پرتوی ایکس، نرم‌افزار X-Pert مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث

مورفولوژی اولیه ذرات WC

در شکل ۱، تصویر میکروسکوپ الکترونی پودر کاربرد تنگستن در بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر نشان داده شده‌است. مشاهده می‌شود که مورفولوژی این پودر به صورت نیم کروی است. با استفاده از این تصویر، در نرم افزار MIP مساحت متوسط ذرات محاسبه شد. جدول ۳، مشخص کننده مساحت متوسط و شعاع متوسط ذرات است.



شکل ۱. مورفولوژی پودر کاربردتنگستن در بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر.

جدول ۲. نمونه‌های مختلف فرآیند الکترولس نیکل فسفر.

کد نمونه	غلظت پودر پوشش داده شده (g/lit)	اسیدشویی و شستشو
E20	۲۰	ندارد
E20P	۲۰	دارد
E40P	۴۰	دارد

در این پژوهش به دلیل سخت بودن زیرلایه پودری، برش مقطعی ذرات پودر پوشش داده شده و بررسی میکروسکوپی آن امکان پذیر نبود. از این رو با استفاده از درصد وزنی اجزای مختلف پودر پوشش داده شده، رابطه‌ای برای محاسبه ضخامت لایه الکترولس تشکیل شده به دست آمد. رابطه ۱ بیانگر متوسط ضخامت پوشش الکترولس بر زیرلایه پودری است:

$$t = \frac{r_p}{3} \times \frac{\rho_s}{\rho_{el}} \times \frac{X_{el}}{1-X_{el}} \quad (1)$$

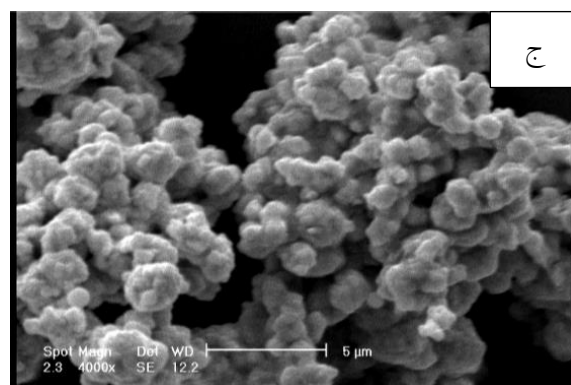
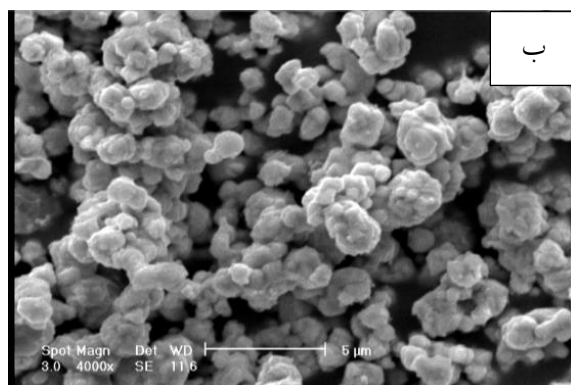
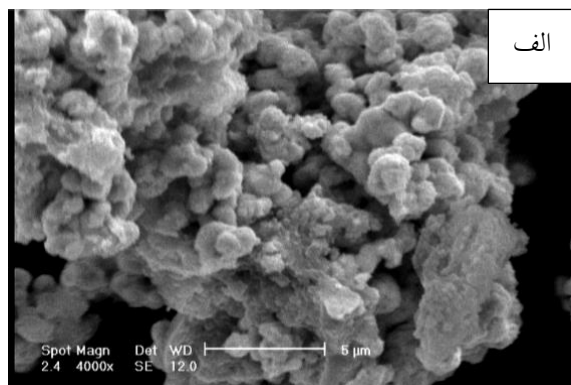
که در آن r_p متوسط شعاع ذرات پودر زیرلایه، ρ_s چگالی زیرلایه، ρ_{el} چگالی پوشش الکترولس و X_{el} درصد وزنی پوشش الکترولس است. اثبات این رابطه در پیوست ارایه شده است.

روش‌های مشخصه‌یابی

در این پژوهش، بررسی‌های میکروسکوپی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips XI30 انجام شد. از این میکروسکوپ به‌منظور بررسی مورفولوژی پودر کاربردتنگستن، قبل و بعد از فرآیند الکترولس استفاده شد.

به منظور بررسی فازهای تشکیل شده در نمونه‌های مورد آزمایش و بررسی مواد تهیه شده، از آزمون پراش پرتوی ایکس با تابش CuK_{α} ، با نرخ رویش ۰/۰۵ درجه برثانیه و محدوده زاویه بین ۲۰ تا ۹۰ درجه استفاده شد. در این

نتیجه اختلاف درصد نیکل در دو نمونه E20 و E20P از حذف آلودگی‌های سطحی ناشی می‌شود.



شکل ۲. سطح ذرات پودر پس از انجام عملیات الکترولس در نمونه‌های (الف) E20، (ب) E20P و (ج) E40P در بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر میکروسکوپ الکترونی روبشی.

در جدول ۴، نتایج حاصل از آزمون طیف‌سنج فلورسانس پرتوی ایکس به همراه ضخامت لایه الکترولس تشکیل شده در هر نمونه ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل از این جدول، می‌توان گفت عملیات اسیدشویی و شستشو تأثیر چندانی بر مقدار پوشش نیکل نداشته است. همانطور که

جدول ۳. مساحت متوسط و شعاع ذرات.

مقدار	مشخصه
۱/۵۵۶	مساحت متوسط ذرات (μm^2)
۰/۷	شعاع متوسط ذرات (μm)

شعاع متوسط ذرات که در این بررسی به دست آمد، در رابطه ۱ به کار گرفته شد و توسط آن، متوسط ضخامت لایه الکترولس به صورت تقریبی محاسبه گردید.

پوشش الکترولس نیکل بر سطح ذرات WC

مورفولوژی سطح نمونه‌های E20، E20P و E40P در شکل ۲ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل ملاحظه می‌شود، در تمامی نمونه‌ها روی سطح ذرات پودر، لایه الکترولس نیکل-فسفر تشکیل شده است و مورفولوژی این ذرات به صورت گل‌کلمی است. در این تصاویر تفاوت ظاهری قابل ملاحظه‌ای مشاهده نمی‌شود.

انجام عملیات اسیدشویی و شستشو مشابه آنچه در این پژوهش صورت گرفته است، باعث می‌شود مورفولوژی زیرلایه کاربید تنگستن از حالت چندوجهی و گوشه دار به صورت نیم‌کروی و لایه لایه درآید و همچنین آلودگی‌های سطحی پودر زیرلایه کاملاً حذف شود. در نتیجه انجام این عملیات باعث به وجود آمدن سطحی مناسب جهت تشکیل لایه الکترولس می‌شود [۱۳]. در این پژوهش به دلیل آنکه مورفولوژی پودر اولیه به شکل نیم‌کروی و حفره‌دار بود، انجام عملیات اسیدشویی تأثیر چندانی بر تغییر مورفولوژی سطح زیرلایه نداشت. انجام عملیات اسیدشویی و شستشو بیش‌تر سبب از بین رفتن آلودگی‌های سطحی می‌گردد و در

در شکل ۳ الگوی پراش پرتوی ایکس پودر E20P قبل و بعد از فرآیند الکترولس نشان داده شده‌است. با توجه به این شکل پس از فرآیند الکترولس در الگوی پراش پرتوی ایکس این پودر، به دلیل آمورف بودن پوشش الکترولس، پیک‌های نیکل در الگوی پراش پرتوی ایکس ظاهر نشده‌است، همچنین در این نمودار پیک‌های W_2C ظاهر شده‌است. احتمال تشکیل W_2C در مرحله اسیدشویی یا الکترولس وجود داشت. آزمون پراش پرتوی ایکس بر روی پودر کاربیدتنگستن اسیدشویی شده نشان داد که در مرحله اسیدشویی دکربوره شدن اتفاق نیفتاده‌است و نمودار آن شبیه شکل ۳(الف) است.

در این پژوهش، در فرآیند الکترولس پودر کاربیدتنگستن، حداقل pH حمام حدود ۴/۵ بوده‌است که یک محیط اسیدی متوسط است. بر اساس پژوهش‌های صورت گرفته در زمینه خوردگی کاربید تنگستن، مشخص شده است که فاز WC به دلیل آنکه از لحاظ فعال بودن سطح، شباهت به پلاتین دارد، در محیط‌های اسیدی متوسط، پایداری خوبی نشان می‌دهد. همچنین نسبت به W_2C مقاومت بیشتری در محیط اسیدی دارد [۱۵]. در نتیجه واکنش الکتروشیمیایی در حمام رخ نداده‌است. با توجه به این مطالب، احتمال تشکیل W_2C ، تنها در هنگام آزاد شدن گاز هیدروژن در پایان فرآیند الکترولس وجود دارد که ذرات پودری در معرض این گاز قرار گرفته‌اند و می‌توان گفت طبق واکنش ۱ به W_2C تبدیل شده‌اند. این واکنش برای تمام کاربیدهای سرامیکی با فرمول شیمیایی MC در دماهای بالا انجام می‌شود. در دماهای پایین، هیدروژن می‌تواند در عیوب کریستالی نفوذ کند و باعث آزاد شدن هیدروکربن شود [۱۶]. در نتیجه می‌توان گفت بخشی از سطح ذرات پودر که هیدروژن در عیوب ساختاری آن‌ها نفوذ کرده‌است، به W_2C تبدیل شده‌است.

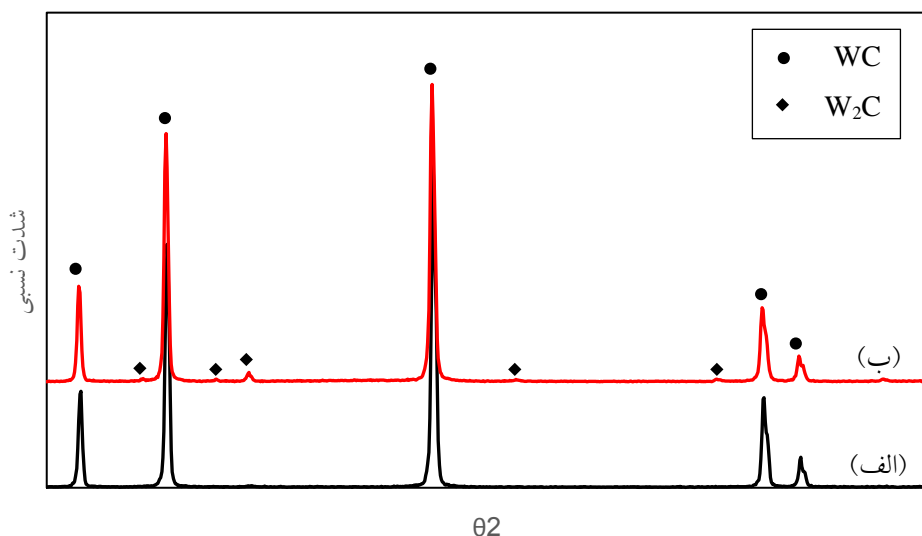


ملاحظه می‌شود، درصد نیکل در نمونه E20P، حدود ۷٪ بیش‌تر از نمونه E40P است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که درصد پودر اضافه شده به حمام الکترولس به منظور پوشش دهی، بیش‌ترین تأثیر را در مقدار پوشش الکترولس داشته‌است. با توجه به اینکه مقدار نیکل رسوب کرده بر سطح زیرلایه در مقدار مشخصی از حمام الکترولس ثابت است، هرچه سطح زیرلایه وارد شده در حمام الکترولس بیش‌تر باشد، ضخامت لایه الکترولس رسوب کرده کاهش خواهد یافت. به این ترتیب، هرچه غلظت پودر اضافه شده به حمام بیش‌تر باشد، سطح زیرلایه بیش‌تر خواهد بود و در نتیجه ضخامت پوشش الکترولس ذرات پودر کاهش می‌یابد.

جدول ۴. درصد عناصر و ضخامت متوسط پوشش الکترولس برای نمونه‌های مختلف پودری

نمونه	درصد عناصر			متوسط ضخامت پوشش الکترولس (μm)
	P	Ni	سایر عناصر	
E20	۱۱	۱/۵	۰/۵	۰/۰۸
E20P	۱۴/۱	۱/۹	۰/۸	۰/۱۱
E40P	۷/۵	۱	۰/۵	۰/۰۵

طبق جدول ۴، در نمونه E20P، متوسط ضخامت لایه الکترولس در اطراف ذرات پودر حدود $0.11 \mu m$ است و پس از آن نمونه‌های E20 و E40P با ضخامت‌های $0.08 \mu m$ و $0.05 \mu m$ قرار می‌گیرند. با توجه به بیش‌تر بودن درصد عناصر در پوشش الکترولس، بیش‌تر بودن متوسط ضخامت لایه الکترولس در نمونه E20P قابل توجیه است.



شکل ۳. الگوی پراش پرتوی ایکس پودر E20P (الف) قبل و (ب) بعد از عملیات الکترولس.

نتیجه‌گیری

با افزایش غلظت پودر در حمام الکترولس نیکل-فسفر، درصد نیکل و فسفر در پودر نهایی کاهش می‌یابد. با اضافه کردن ۲۰ و ۴۰ g/lit پودر کاربید تنگستن اسیدشویی شده در حمام الکترولس، به ترتیب حدود ۱۴/۱ و ۷/۵٪ نیکل روی ذرات پودر رسوب کرد. عملیات اسیدشویی بر پودرهای کرومی و غیرمسطح مورد استفاده در این پژوهش، تأثیر چندانی نداشت و تنها باعث رفع آلودگی‌های سطحی شد. در این پژوهش، انجام عملیات اسیدشویی باعث شد درصد نیکل پودر پس از عملیات الکترولس، حدود ۲۸٪ افزایش پیدا کند. رابطه‌ای برای محاسبه تقریبی ضخامت لایه الکترولس به کار گرفته شد که با استفاده از آن ضخامت لایه الکترولس برای پودرهای E20، E20P و E40P به ترتیب برابر ۰/۰۸، ۱/۱ و ۰/۰۵ μm به دست آمد. انجام عملیات الکترولس روی پودر کاربید تنگستن باعث تشکیل فاز کاربید ثانویه W₂C در ساختار می‌شود که دلیل آن را می‌توان نفوذ هیدروژن فرآیند الکترولس در عیوب ساختاری برشمرد.

پیوست

به منظور محاسبه ضخامت لایه الکترولس، ابتدا باید سطح ذرات پودر را با استفاده از روابط زیر قبل از فرآیند الکترولس به دست آورد:

$$S_s = \frac{M_1}{\rho_s} \times \frac{S_p}{V_p} \quad (1)$$

در این رابطه S_s مساحت زیرلایه پودری، M_1 جرم ذرات قبل از الکترولس، ρ_s چگالی زیرلایه، S_p و V_p به ترتیب سطح و حجم یک ذره پودر کرومی است. با جایگذاری حجم و سطح یک ذره کرومی داریم:

$$S_s = \frac{M_1}{\rho_s} \times \frac{3}{r_p} \quad (2)$$

که در آن r_p شعاع ذرات کرومی زیرلایه است. با ضرب کردن سطح زیرلایه در ضخامت لایه الکترولس (t)، حجم لایه الکترولس (V_{el}) محاسبه می‌شود. داریم:

$$V_{el} = S_s \times t \quad (3)$$

از ترکیب روابط ۲ و ۳ داریم:

$$V_{el} = \frac{M_1}{\rho_s} \times \frac{3}{r_p} \times t \quad (4)$$

3. Y. De Hazan, D. Werner, Z. Markus, M. Groteklaes, and T. Graule, *Homogeneous Ni-P/Al₂O₃ nanocomposite coatings from stable dispersions in electroless nickel baths*, Colloid Interface Sci., 328(2008)103-109.
4. C. Zhang, G. P. Ling, and J. H. He, *Co-Al₂O₃ nanocomposites powder prepared by electroless plating*, Materials Letters, 58(2003)200-204.
5. G. Shi, J. Han, Z. Zhang, H. Song, and B. Lee, *Pretreatment effect on the synthesis of Ag-coated Al₂O₃ powders by electroless deposition process*, Surface and Coatings Technology, 195(2005)333-337.
6. S. M. M. Vaghefi and A. Saatchi, *Deposition and properties of electroless Ni-P-B₄C composite coatings*, Surface and Coatings Technology, 168(2003)259-262.
7. H. Zhu, Y. Niu, C. Lin, L. Huang, H. Ji, and X. Zheng, *Microstructures and tribological properties of vacuum plasma sprayed B₄C-Ni composite coatings*, Ceram. Int., 39(2013)101-110.
8. R. L. Deuis, C. Subramanian, J. M. Yellup, P. Arora, *Study of electroless nickel plating of ceramic particles*, Scripta Metallurgica et Materialia, 33(1995)1217-1224.
9. L. Luo, J. Yu, J. Luo, and J. Li, *Preparation and characterization of Ni-coated Cr₃C₂ powder by room temperature ultrasonic-assisted electroless plating*, Ceram. Int., 36(2010)1989-1992.
10. X. Xu, Z. D. Cui, S. L. Zhu, Y. Q. Liang, and X. J. Yang, *Preparation of nickel-coated graphite by electroless plating under mechanical or ultrasonic agitation*, Surface and Coatings Technology, 240(2014)425-431.
11. Z. Liu, L. Jian, and W. Tao, *Preparation of WC-Co composite powder by electroless plating and its application in laser cladding*, Mater. Lett., 60(2006)1956-1959.
12. M. Jafari, M. H. Enayati, M. Salehi, S. M. Nahvi, and C. G. Park, *Microstructural and mechanical*

از طرفی حجم لایه الکترولس را می‌توان با استفاده از وزن پودر پس از فرآیند الکترولس (M_2)، چگالی لایه الکترولس (ρ_{el}) و کسر جرمی لایه الکترولس (X_{el}) به‌دست آورد. به این ترتیب داریم:

$$V_{el} = M_2 \times X_{el} / \rho_{el} \quad (5)$$

برای محاسبه جرم پودر پس از فرآیند الکترولس بر حسب جرم اولیه از تساوی وزن زیرلایه قبل از الکترولس (M_{s1}) و بعد از الکترولس (M_{s2}) استفاده می‌کنیم. داریم:

$$M_{s1} = M_1 \quad (6)$$

$$M_{s2} = M_2 \times X_s \quad (7)$$

در این رابطه X_s کسر جرمی زیرلایه پس از فرآیند الکترولس است که می‌توان آن را به‌صورت زیر بیان کرد:

$$M_{s2} = M_2 \times (1 - X_{el}) \quad (8)$$

با تساوی روابط ۶ و ۸ داریم:

$$M_2 = M_1 / (1 - X_{el}) \quad (9)$$

با اعمال رابطه ۵ در رابطه ۹ داریم:

$$V_{el} = M_1 \times X_{el} / (\rho_{el} \times (1 - X_{el})) \quad (10)$$

با تساوی روابط ۴ و ۱۰، ضخامت لایه الکترولس مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$t = \frac{r_p}{3} \times \frac{\rho_s}{\rho_{el}} \times \frac{X_{el}}{1 - X_{el}} \quad (11)$$

مراجع

1. W. Sha, X. Wu, and K. G. Keong, *Electroless copper and nickel-phosphorous plating*. Woodhead Publishing, 2011.
2. N. B. Khosroshahi, R. A. Khosroshahi, R. T. Mousavian, and D. Brabazon, *Effect of electroless coating parameters and ceramic particle size on fabrication of a uniform Ni-P coating on SiC particles*, Ceram. Int., 40(2014)1-11.

13. *characterizations of a novel HVOF-sprayed WC-Co coating deposited from electroless Ni-P coated WC-12Co powders*, Mater. Sci. Eng. A, 578(2013)46-53.
14. L. Luo, Y. Wu, J. Li, and Y. Zheng, *Preparation of nickel-coated tungsten carbide powders by room temperature ultrasonic-assisted electroless plating*, Surface and Coatings Technology, 206(2011)1091-1095.
15. G. Mondin, F. M. Wisser, A. Leifert, N. Mohamed-noriega, J. Grothe, S. Dörfler, and S. Kaskel, *Metal deposition by electroless plating on polydopamine functionalized micro- and nanoparticles*, J. Colloid Interface Sci., 411(2013)187-193.
16. D. J. Ham and J. S. Lee, *Transition metal carbides and nitrides as electrode materials for low temperature fuel cells*, Energies, 2(2009)873-899.
17. E. K. Storms, *The Refractory Carbides*, London, Academic Press INC., 1967.