

# تولید و بهینه سازی پوشش نانوکامپوزیتی زمینه فلزی Ni-Fe(Ti,W)C به روش رسوب گذاری الکتریکی

فاطمه سادات سیدان، مرضیه اسحاقیان و مریم کرباسی

دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۹۱/۰۶/۱۰- پذیرش مقاله: ۹۲/۰۳/۰۶)

## چکیده

آبکاری کامپوزیتی روشی برای رسوب هم زمان ذرات کوچک سرامیکی در لایه فلزی رسوب یافته است که می تواند منجر به بهبود خواص سطحی مانند سختی شود. در میان فرایندهای تولید نانو کامپوزیت ها، روش رسوب گذاری الکتریکی دارای مزایایی از جمله هزینه کم تجهیزات اولیه، سرعت بالای تولید، امکان صنعتی سازی و دمای کاری پایین است. در پژوهش حاضر، تولید پوشش نانوساختار Ni-Fe(Ti,W)C با استفاده از روش رسوب گذاری الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و تأثیر پارامترهای مهمی نظیر جنس زیرلایه و چگالی جریان بر روی خواص پوشش ها ارزیابی گردید. در این راستا از یک حمام نیکلی تحت شرایط جریان مستقیم استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده از مشخصه یابی پوشش ها توسط روش های پراش پرتو ایکس (XRD)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، آنالیز عنصری با تفکیک انرژی پرتو ایکس (EDS) و ریزسختی سنجی مشخص شد پوشش نانوساختار Ni-Fe(Ti,W)C به روش رسوب گذاری الکتریکی قابل تولید بوده و زیر لایه فولادی نسبت به برنجی، جهت رسوب گذاری کاربرد مضاعف با زمینه Ni-Fe که مشخصات مغناطیسی از خود نشان می دهد، مناسب تر می باشد. همچنین با بهینه سازی چگالی جریان، مورفولوژی سطحی صاف تر شد و ریزسختی تا ۱۷۵۰ ویکرز افزایش و اندازه دانه تا ۲۷ نانومتر کاهش یافت.

واژه های کلیدی: رسوب گذاری الکتریکی، Ni-Fe(Ti,W)C، چگالی جریان، ریزسختی، مورفولوژی

## Production and Optimization of Ni-Fe(Ti,W)C Nanocomposite Coating by Electroplating Process

F.S. Sayedan, M. Eshaghian and M. Karbasi

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology

(Received 31 August 2012, accepted 27 May 2013)

### Abstract

Composite electroplating is a method for simultaneous plating of small ceramic particles in the plated metallic layer, in order to develop the morphology and mechanical properties. The electroplating method possesses many advantages such as low first cost, high speed of production, the possibility scaling up to industrial technologies and low service temperature. In this study, production of nano structural metal matrix composite "Ni-Fe(Ti,W)C" is investigated by electroplating method and the effect of important parameters such as substrate material and current density on coating properties, is evaluated. For this purpose, nickel bath was used under the condition of direct current. Based on the obtained results from characterizing the coating by X-ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM) and Energy Dispersive X-ray spectroscopy (EDS), it was recognized that nano structure composite Ni-Fe(Ti,W)C is producible and the steel substrate is appropriate than brass substrate with magnetic Ni-Fe matrix for electroplating of double carbide. Also with improvement of current density, surface morphology was more smooth, the microhardness was increased to 1750 HV and the grain size was decreased to 27 nm.

**Key words:** electroplating, Ni-Fe(Ti,W)C, current density, microhardness, morphology

**E-mail of corresponding author:** Niloofaraneh\_fs@yahoo.com

## مقدمه

یکی از بهترین روش‌های تولید پوشش نیکل و آلیاژهای، رسوب‌گذاری الکتریکی است که علت آن، ایجاد ساختار نانوکریستالی و در نهایت دستیابی به خواص مطلوبتر از جمله نرخ خوردگی کمتر، سختی و مقاومت به سایش بالاتر نسبت به پوشش‌های میکروکریستال می‌باشد [۱ و ۲]. پوشش‌های کامپوزیتی از جمله پوشش‌های پیشرفته‌ای هستند که به لحاظ خواص منحصر به فردی مانند مقاومت به سایش و خوردگی، سختی بالا و پایداری حرارتی در سال‌های اخیر مورد توجه قرار گرفته اند. برای تولید این پوشش‌ها بر حسب جنس زیر لایه، زمینه پوشش و فاز دوم و هم چنین نوع کاربرد آن‌ها انواع روش‌های سنتی و مدرن به کار می‌رود [۳]. پوشش‌های کامپوزیتی در سال‌های اخیر برای بسیاری از کاربردها همانند قطعات ساینده برشی، مته‌های دندانپزشکی و غیره توسعه یافته‌اند. این نوع کامپوزیت‌ها که به صورت یک لایه روی زمینه اصلی پوشش داده می‌شوند، معمولاً شامل ذرات سختی مانند کاربیدها، اکسیدها و الماس می‌باشند، که به منظور بهبود خواص مکانیکی پوشش از آن‌ها استفاده می‌شود [۴].

با بررسی نتایج تحقیقات صورت گرفته بر روی پوشش نیکل، بهبود خواص این پوشش با افزودن کبالت یا تنگستن مشاهده شده است. استفاده از تنگستن در پوشش نیکل باعث بهبود خواصی نظیر خصوصیات مغناطیسی، الکتریکی، سایشی، مقاومت به خوردگی، کاهش اندازه دانه، پایداری حرارتی و سختی بالا شده است [۵]. همچنین تحقیقات صورت گرفته بر روی خاصیت مغناطیسی ذرات آهن نشان داده است که هرگاه ذرات در ابعاد نانو درآیند، حتی در غیاب میدان مغناطیسی نیز خاصیت مغناطیسی داشته که به این رفتار آن‌ها رفتار سوپرپارامگناطیس اطلاق می‌شود. به همین دلیل نقش عمده Fe در پوشش‌های زمینه فلزی Ni-Fe تقویت خاصیت مغناطیسی و در نتیجه بهبود پیوستگی بین زمینه و پوشش می‌باشد [۶]. پوشش قطعات صنعتی با مواد کامپوزیتی عموماً از روش‌های

اسپری حرارتی [۷] و PVD [۸] انجام می‌شود که طی آن اکسیداسیون شدیدی می‌تواند اتفاق بیفتد، در حالی که استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی ضمن سادگی سیستم و عدم نیاز به دستگاه‌های پیچیده، مشکل اکسیداسیون نیز وجود نخواهد داشت. عدم آلودگی محیط زیست، سرعت تولید بالا و قابلیت کنترل از مزایای دیگر این روش تولید پوشش می‌باشد [۹].

هدف از پژوهش حاضر، بهینه سازی چگالی جریان به منظور ایجاد شرایط بهینه جهت تولید پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Fe(Ti,W)C بر روی زیر لایه مناسب می‌باشد.

## مواد و روش تحقیق

مشخصات حمام پوشش‌دهی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات حمام پوشش‌دهی بر روی زیر لایه های فولادی و برنجی.

ترکیب حمام پوشش دهی	مقدار	شرکت سازنده
NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	45g/l	KIMIA MAVAD
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	40g/l	MERCK
Fe(Ti,W)C	1.5g/250ml	MERCK

در عملیات پوشش‌دهی ابتدا زیر لایه‌های فولادی و برنجی هر کدام در ابعاد ۲×۲cm برش خورده و مانع سرد شدند و به منظور برقراری جریان الکتریکی در حین پوشش‌دهی، به یک سیم مسی متصل شدند و به عنوان کاتد مورد استفاده قرار گرفتند. جهت آماده‌سازی سطح زیر لایه‌ها قبل از پوشش‌دهی، سنباده‌زنی و ایجاد زبری به منظور چسبندگی بیشتر انجام گرفت. در مرحله بعد سطح زیر لایه‌ها ابتدا به مدت ۱۰ دقیقه به منظور چربی‌زدایی در اتانول و سپس به مدت ۲۰ ثانیه به منظور فعال سازی در اسید کلریدریک ۱۵٪ قرار گرفت و بلافاصله با آب مقطر شست و شو داده شده و در حمام

مورفولوژی سطح پوشش ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL 30 و ارزیابی کامپوزیت تولیدی توسط آزمون طیف سنجی توزیع انرژی (EDS) انجام گرفت.

جدول ۳. پارامترهای متغیر در طی آزمایش های انجام شده

شماره نمونه	۱	۲	۳	۴
نوع زیر لایه	برنجی	فولادی	فولادی	فولادی
چگالی جریان (mA/cm <sup>2</sup> )	۱۵۰	۱۵۰	۴۰	۲۰
زمان (ثانیه)	۱۸۰۰	۱۸۰۰	۶۷۵۰	۱۳۵۰۰

مورفولوژی سطح پوشش ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips XL 30 و ارزیابی کامپوزیت تولیدی توسط آزمون طیف سنجی توزیع انرژی (EDS) انجام گرفت. به منظور بررسی ریزسختی پوشش های نانوکامپوزیتی Ni-Fe(Ti,W)C از دستگاه ریزسختی سنج مدل Leit 7 با بار اعمالی ۵۰ گرم و زمان توقف ۱۰ ثانیه استفاده شد. بررسی فازی پوشش ها به روش پراش پرتو ایکس (XRD) انجام گرفت. همچنین تعیین اندازه دانه ها با استفاده از پهنای پیک ها در نمودارهای پراش پرتو ایکس انجام شد. بدین منظور با توجه به عدم انجام کار مکانیکی بر روی سطح پوشش ها از رابطه شرر که به صورت معادله (۱) بوده و ارتباط بین پهنای پیک های XRD و اندازه دانه ها را به صورت تخمینی به دست می دهد، استفاده شده است.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

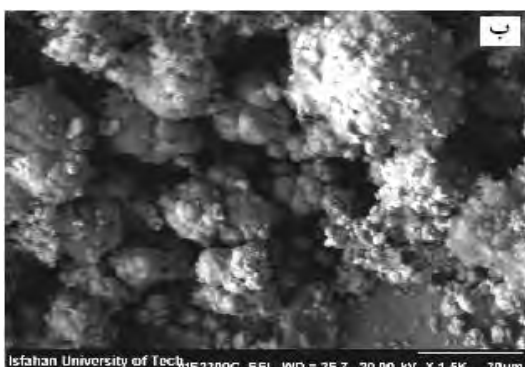
که در این معادله، D اندازه متوسط دانه برحسب نانومتر،  $\lambda$  طول موج پرتو ایکس استفاده شده برحسب نانومتر،  $\beta$

قرار گرفت. حمام پوشش دهی با حجم ۲۵۰ ml پس از آماده سازی به مدت ۲۴ ساعت استراحت داده شد و به دلیل تمایل ذرات کامپوزیت ساز به ته نشینی بالای آن، محلول قبل از پوشش دهی به مدت ۳۰ دقیقه آلتراسونیک شد. تنظیم pH محلول توسط آمونیاک و اسید سولفوریک ۹۸٪ رقیق شده با استفاده از Ph متر دیجیتال (Metrohm، سوئیس) صورت گرفت. به دلیل حضور ذرات نانومتری آهن با خاصیت سوپر پارامغناطیس در محلول پوشش دهی و در نتیجه عدم امکان استفاده از هم زن مغناطیسی جهت ایجاد تلاطم در محلول حین پوشش دهی و جلوگیری از تشکیل ذرات رسوبی و ته نشینی در آن از گاز آرگون با فشار کم استفاده شد. پوشش دهی به روش جریان مستقیم با استفاده از دستگاه کولومتر دیجیتالی مدل BHP 2050 ساخت شرکت Behpajooch در دمای ۵۰°C و کولن ۲۷ انجام شد. شرایط پوشش دهی به طور خلاصه در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. شرایط پوشش دهی.

نوع جریان	مستقیم
دما (درجه سانتیگراد)	۵۰±۲
pH	۴/۲±۰/۱
کولن	۲۷
آند	نیکل
کاتد	فولاد / برنج

پس از پوشش دهی نمونه ها، سطح آن ها توسط اتانول مورد شست و شو قرار گرفت. پارامترهای در نظر گرفته شده در طی آزمایش های انجام شده با غلظت کاربید مضاعف ۶ g/L در جدول ۳ ارائه شده است.



ادامه شکل ۱.

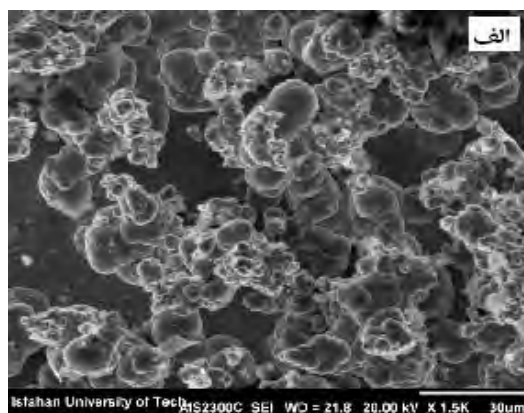
در شکل ۲ نتایج آنالیز EDS پوشش‌های مورد بحث نشان داده شده است. با مقایسه نتایج مشخص می‌گردد که درصد عناصر کربن، تنگستن و تیتانیوم در پوشش اعمال شده بر روی زیر لایه فولادی (شکل ۲-الف) بیشتر از پوشش ایجاد شده بر روی زیر لایه برنجی (شکل ۲-ب) می‌باشد که می‌تواند نشانگر این موضوع باشد که میزان رسوب کاربید مضاعف در پوشش اعمال شده بر روی زیر لایه فولادی بیشتر است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، این امر می‌تواند ناشی از خاصیت مغناطیسی در هنگام استفاده از زیر لایه فولادی که باعث جذب فاز پایه و به دنبال آن رسوب بیشتر ذرات به همراه یون‌های نیکل و آهن یعنی Ni-Fe می‌گردد، باشد [۱۰].

تصاویر شکل ۳ از پوشش‌های تولید شده بر روی زیر لایه فولادی در چگالی جریان‌های مختلف توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی تهیه شده است. با مقایسه تصاویر شکل (۳-الف، ۳-ب و ۳-ج) مشخص می‌گردد که در یک مقدار ثابت کاربید مضاعف، با کاهش چگالی جریان، پوشش از مورفولوژی صاف‌تر و پیوستگی و اتصال مناسب‌تری برخوردار است، چرا که با افزایش چگالی جریان، سرعت رسوب‌گذاری کاربید مضاعف افزایش یافته و بنابراین ساختار دندردریتی حاصل می‌شود. به عبارتی، در چگالی جریان‌های کمتر، سرعت رشد جوانه‌ها تقریباً یکسان بوده و مورفولوژی یکنواخت‌تری حاصل می‌گردد که این موضوع توسط ابراهیمی و همکارانش نیز گزارش شده است [۱۱].

پهنای پیک برحسب رادیان و  $\theta$  زاویه وقوع پیک (زاویه پراش) بر حسب رادیان می‌باشد.

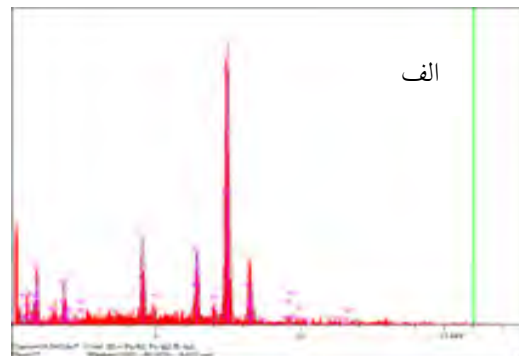
### بحث و نتیجه

در تصاویر شکل ۱ میکروگراف SE-SEM تهیه شده از پوشش‌های تولید شده با چگالی جریان  $150 \text{ mA/Cm}^2$  و مقدار  $6 \text{ g/L}$  کاربید مضاعف، بر روی دو زیر لایه فولادی (شکل ۱-الف) و برنجی (شکل ۱-ب) نشان داده شده است. با مقایسه تصاویر شکل ۱ مشاهده می‌گردد که پوشش بر روی زیر لایه برنجی بسیار متخلخل بوده و از تراکم، پیوستگی و اتصال مناسب بر خوردار نیست. به عبارت دیگر، پوشش بر روی زیر لایه برنجی کاملاً به حالت اسفنجی درآمده در حالی که پوشش اعمال شده بر روی زیر لایه فولادی از پیوستگی و تراکم بیشتری برخوردار است که این پدیده می‌تواند ناشی از عملکرد خاصیت مغناطیسی در هنگام استفاده از زیر لایه فولادی باشد، چرا که خاصیت مغناطیسی باعث جذب فاز پایه یعنی Ni-Fe می‌شود که منجر به تراکم بیشتر و پیوستگی بالاتر پوشش و رفع حالت اسفنجی می‌گردد، در حالی که در پوششی که روی زیر لایه برنجی اعمال شده به دلیل فقدان خاصیت مغناطیسی، پوشش کاملاً به حالت اسفنجی درآمده است که این رفتار توسط ریکه و همکارانش نیز گزارش شده است [۱۰].

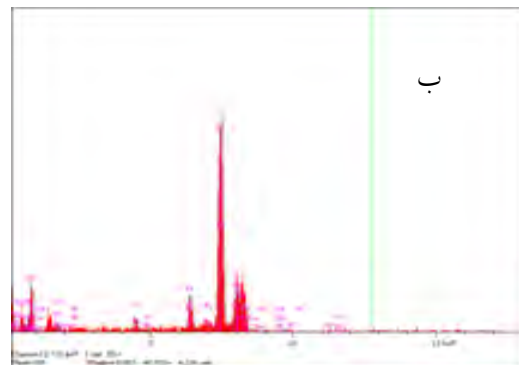


شکل ۱. تصاویر SE-SEM از پوشش‌های تولید شده در دانسیته جریان  $(150 \text{ mA/cm}^2)$  و مقدار کاربید Fe-(Ti,W)C برابر  $6 \text{ g/L}$  با بزرگنمایی ۱۵۰۰ (الف) زیر لایه فولادی (ب) زیر لایه برنجی.

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	0.30	10.23	2.20	wt. %	
Ti	Ka	0.91	1.02	1.88	wt. %	
Fe	Ka	6.37	6.88	6.87	wt. %	
Ni	Ka	39.56	80.01	83.97	wt. %	
W	La	0.42	1.85	6.08	wt. %	
			100.00	100.00	wt. %	Total



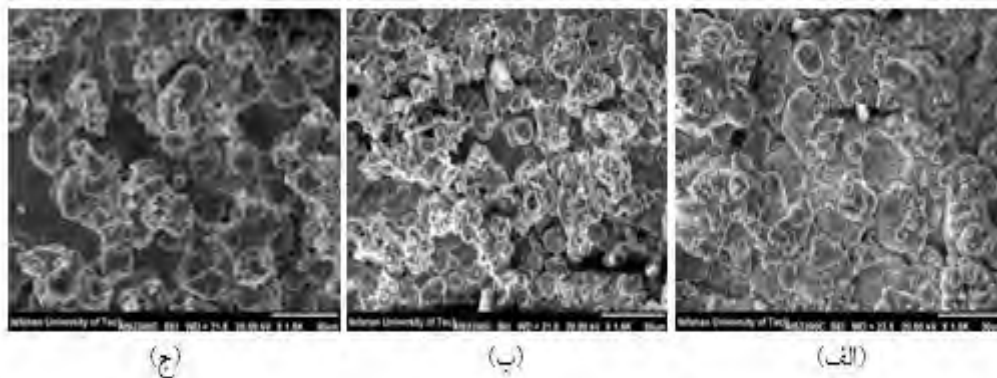
	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	0.88	32.27	1.94	wt. %	
Ti	Ka	1.10	1.42	1.47	wt. %	
Fe	Ka	3.60	4.67	5.63	wt. %	
Ni	Ka	20.81	46.63	59.04	wt. %	
W	La	0.39	1.89	4.49	wt. %	
			100.00	100.00	wt. %	Total



شکل ۲. نتایج آنالیز EDS پوشش های تولید شده در دانسیته جریان  $150 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  و مقدار کاربید مضاعف  $6 \text{ g/L}$  بر روی (الف) زیرلایه فولادی (ب) زیرلایه برنجی.

افزایش جوانه زنی و صاف تر کردن مورفولوژی سطحی با استفاده از عوامل اصلاح کننده سطح مثل ساخارین امکان پذیر است. همچنین استفاده از یک عملیات فرم دهی مثل انواع نورد در حالتی که محصول تولیدی به صورت ورق باشد نیز می تواند برای صاف تر کردن مورفولوژی سطحی مؤثر باشد [۱۲].

از طرفی با افزایش چگالی جریان، سرعت تولید پوشش افزایش می یابد. بنابراین اگر رسوب گذاری در چگالی جریان های بالا مورد نظر باشد، لازم است از عوامل جوانه زنی استفاده نمود. پس در چگالی جریان بالاتر، علاوه بر رشد، جوانه زنی هم لازم است و بنابراین نیاز بیشتری به عوامل جوانه زنی وجود دارد.



شکل ۳. تصاویر SE-SEM از پوشش تولید شده بر روی زیرلایه فولادی با بزرگنمایی ۱۵۰۰ در چگالی جریان های مختلف: (الف) چگالی جریان  $20 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  (ب) چگالی جریان  $40 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$  (ج) چگالی جریان  $150 \text{ (mA/cm}^2\text{)}$ .

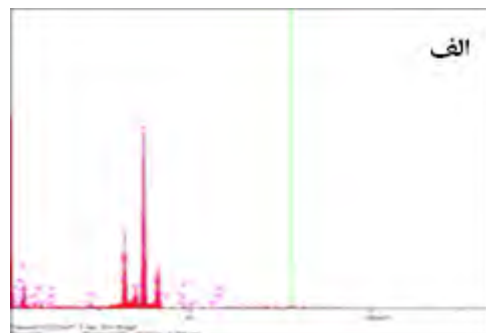
ضریب K مساوی جرم ماده آزاد شده توسط بار ۱C، یابۀ عبارت دیگر جرم ماده آزاد شده توسط جریان ۱A در مدت زمان ۱ ثانیه است. مطابق معادله ۲، m متناسب با I می باشد. به عبارت دیگر هرچه چگالی جریان بالاتر باشد، یون های حامل عامل کامپوزیت ساز در محلول بیشتر شده و بنابراین جرم رسوب کرده افزایش می یابد. با افزایش بیشتر چگالی جریان از  $۴۰\text{mA/cm}^2$  به  $۱۵۰\text{mA/cm}^2$ ، عکس این پدیده مشاهده می شود، زیرا در چگالی جریان های بسیار بالا، سرعت رسوب گذاری نیکل بیشتر بوده و گنجایش برای پذیرش کاربید مضاعف در زمینه کمتر می گردد و درصد رسوب کاربید مضاعف روی زمینه Ni-Fe کاهش می یابد [۱۳].

با مقایسه نتایج حاصل از آنالیز EDS پوشش هایی که در شکل (۴-الف، ۴-ب و ۴-ج) ارائه شده است، مشخص می گردد که با افزایش چگالی جریان از  $۲۰\text{mA/cm}^2$  به  $۴۰\text{mA/cm}^2$ ، درصد رسوب کامپوزیت افزایش می یابد که این امر مطابق رابطه قانون اول فارادی (معادله ۲) قابل بررسی است:

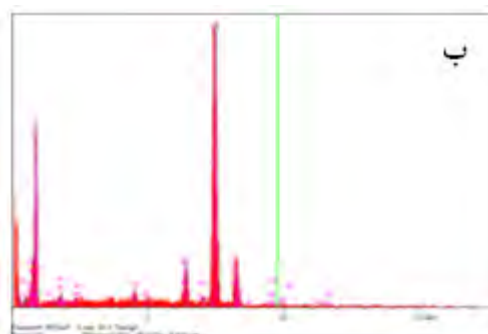
$$m = Kq = KI t \quad (2)$$

که در این معادله، m جرم ماده رسوب کرده، I جریان الکتریکی، t زمان الکترولیز، q بار کلی و K ضریب تناسب (هم ارز الکتروشیمیایی ماده) می باشد. با فرض اینکه  $q = 1C$  (بار کل یک کولن) باشد، درمی یابیم که

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	0.40	26.08	6.39	wt. %	
Ti	Ka	0.27	0.62	0.60	wt. %	
Fe	Ka	5.31	13.59	15.47	wt. %	
Ni	Ka	13.71	57.33	68.61	wt. %	
W	La	0.27	2.38	8.92	wt. %	
			100.00	100.00	wt. %	Total

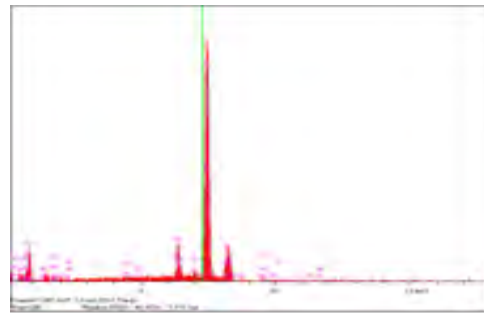


Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	1.14	19.70	4.49	wt. %	
Ti	Ka	3.69	2.26	2.05	wt. %	
Fe	Ka	10.59	6.43	6.81	wt. %	
Ni	Ka	64.05	68.71	76.50	wt. %	
W	La	1.25	2.91	10.15	wt. %	
			100.00	100.00	wt. %	Total



شکل ۴. آنالیز EDS از پوشش تولید شده بر روی زیرلایه فولادی با مقدار کاربید مضاعف 6 g/L (الف) چگالی جریان  $۲۰\text{mA/cm}^2$  (ب) چگالی جریان  $۴۰\text{mA/cm}^2$  (ج) چگالی جریان  $۱۵۰\text{mA/cm}^2$ .

Elt.	Line	Intensity (c/s)	Atomic %	Conc	Units	
C	Ka	0.30	10.23	2.20	wt.%	
Ti	Ka	0.91	1.02	1.88	wt.%	
Fe	Ka	6.37	6.88	6.87	wt.%	
Ni	Ka	39.56	80.01	83.97	wt.%	
W	La	0.42	1.85	6.08	wt.%	
			100.00	100.00	wt.%	Total



ادامه شکل ۴.

الکتریکی نانو کریستالی نیکل را به همراه خواهد داشت [۱۱].

جدول ۴. ریزسختی و اندازه دانه نمونه های پوشش داده شده بر روی زیرلایه فولادی با جرم کاربید مضاعف ۶ g/L.

چگالی جریان (mA/Cm <sup>2</sup> )	۲۰	۴۰	۱۵۰
ریزسختی (ویکرز)	۱۵۰۰	۱۷۵۰	۱۳۲۰
اندازه دانه (nm)	۳۵	۲۷	۳۰

#### نتیجه گیری

پوشش نانوکامپوزیتی Ni-Fe(Ti,W)C بر روی زیرلایه فولادی به روش رسوب گذاری الکتریکی قابل تولید می باشد و زیرلایه فولادی نسبت به برنجی جهت رسوب گذاری پوشش فوق مناسب تر است. چگالی جریان بهینه برای رسوب گذاری نانوکامپوزیت Ni-Fe(Ti,W)C بر روی زیرلایه فولادی با مقدار کاربید مضاعف ۶g/L، ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup> می باشد. در چگالی جریان مذکور، حداکثر ریز سختی برابر با ۱۷۵۰ ویکرز و حداقل اندازه دانه کریستالی نیکل برابر با ۲۷ نانومتر حاصل گردید. با کاهش چگالی جریان، پوشش از مورفولوژی صاف تر و پیوستگی و اتصال مناسب تری برخوردار است.

نتایج حاصل از ریزسختی سنجی و تخمین اندازه دانه پوشش های اعمال شده بر روی زیرلایه فولادی در جدول ۴ ارائه شده است. براساس نتایج این جدول مشخص می گردد که بیشترین ریزسختی در شرایطی که چگالی جریان ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup> باشد، حاصل می شود. با توجه به اینکه میزان رسوب کاربید مضاعف در چگالی جریان ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup>، دارای بیشترین مقدار است، نانو ذرات پراکنده شده در زمینه مانعی در برابر حرکت نابجایی ها و جریان پلاستیک ماده بوده که این امر منجر به افزایش ریز سختی در چگالی جریان مذکور می باشد [۱۴]. همچنین در چگالی جریان ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup>، اندازه دانه کریستالی نیکل کمترین مقدار است. در چگالی جریان های کمتر از ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup>، سرعت رسوب نیکل بر روی زیر لایه کمتر بوده و این امر منجر به رشد دانه های کریستالی نیکل می شود [۱۳]، در حالی که در چگالی جریان های بالاتر از ۴۰ mA/Cm<sup>2</sup>، اندازه دانه کریستالی نیکل افزایش یافته است. قاعدتاً با کاهش چگالی جریان، سرعت جوانه زنی بیشتر از سرعت رشد رسوب بوده و لذا ساختار ریزدانه تر می گردد. اما در بعضی موارد، افزایش چگالی جریان پوشش دهی و یا کاهش مقاومت انتقال بار، باعث افزایش نفوذ سطحی یون های جذب سطحی شده و در نتیجه باعث جلوگیری از جذب گونه های الکتروشیمیایی بر روی محل های فعال رشد شده و درشت تر شدن اندازه دانه های رسوب

منابع

1. A. M. U. Erb, A. M. El-Sherik, G. Palumbo, K. T. Aust, "Synthesis structure and properties of electroplated nanocrystalline materials", *Nanostructured materials* (1993) 383-390.
2. F. Ebrahimi, L. Hongqi, M. Scripta, "Grain growth in electrodeposited nanocrystalline FCC Ni-Fe alloys" (2006) 263.
3. Th.Lampk, A.Leopold, "Correlation between structure and corrosion behavior of nickel dispersion coatings containing ceramic particles of different size", *surface and coatings technology*, (2006).
4. M.Pushpavanam, G. Varadajan, "Composite Coatings", *Electroplating and metal finishing*, 10-15, (1974).
5. M. Surender, R. Balasubramanian, B. Basu," *Electrochemical behavior of electrodeposited Ni-WC composite*" coatings surface and coating technology ( 2004) 93-97.
6. R. Mishra, R. Balasubramaniam,"*Effect of nanocrystalline grain size on the electrochemical and corrosion behavior of nickel*", *corrosion science*, 46 (2004) 3019-3029.
7. R.C. Tucker," *Thermal spray coating* ", *ASM Handbook*, 5 (1994) 497-509.
8. D.M. Mattox, "*Physical vapor deposition coating processes* ", *ASM Handbook*, 5 (1994) 538-555.
9. L.P. Wang, Y. Gao, T. Xu, X. Qunji," *A comparative study on the tribological behavior of nanocrystalline nickel and cobalt coatings correlated with grain size and phase structure*", *Materials chemistry and physics* (2006) 96-103.
10. D. Rieke, "Magnetice properties of nanostructured materials, *Chemical materials*", 8 (1996) 1770-1783.
11. F. Ebrahimi, Z. Ahmed, "The effect of current density on properties of electrodeposited nanocrystalline nickel", *Journal of applied electrochemistry*, 33 (2003) 733-739.
12. K. A. "Mechanical properties of nostructured materials", *Materials science and engineering*, 304 (2001) 200-205.
13. V.B. Singh, "Electrodeposition and characterization of Ni-TiC composite using N-methylformamide bath", *Materials Science and Engineering A*, 532 (2012) 493- 499.
14. G. N. K. Ramesh Bapu, "Electrocodeposition and characterization of nickel-titanium carbide composites", *Surface and Coatings Technology*, 67 (1994) 105-110.