



## رفتار مکانیکی پوشش‌های نانوکامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> آبکاری شده در حضور مواد آلی

صادق میرزامحمدی<sup>۱</sup>، حمید خرسند<sup>۲\*</sup>، محمود علی‌اف خضرای<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹۱-۴۳۳۴۴، [hkhorsand@kntu.ac.ir](mailto:hkhorsand@kntu.ac.ir)

| چکیده   | اطلاعات مقاله   |
|---|---|
| <p>در این پژوهش از یک روش نوین برای افزایش محتوای نانوذرات آلومینا در پوشش‌های کامپوزیتی پایه نیکل آبکاری شده با جریان پالسی استفاده شده است. متانول، اتانول و فرمالدهید به‌عنوان مواد آلی به‌صورت جزئی به محلول وات اضافه شدند و پوشش‌های نانوکامپوزیتی نیکل آلومینا در حضور هم‌زمان اولتراسونیک و مغنتیک ایجاد شدند. بعد از فرآیند پوشش دادن، تاثیر حضور این حلال‌های آلی در محلول آبکاری با مقایسه سطح مقطع پوشش‌های نانوکامپوزیتی، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM) مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS)، بررسی شد. رفتار سایشی و سختی پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبکاری شده به‌وسیله آزمایش گوی روی دیسک ارزیابی شد. مطالعات ریزساختاری نشان داد که مقدار نانوذرات در پوشش‌های ایجاد شده با محلول وات بدون حلال آلی 2.1 wt.% است و این مقدار با افزودن حلال‌های آلی افزایش می‌یابد. به‌طوری‌که، بیشینه مقدار نانوذرات در این تحقیق (5.2 wt.%) با افزودن متانول به‌دست می‌آید. سختی سطحی پوشش‌های ایجاد شده با محلول وات 301 Hv بود که با افزودن متانول به 485 Hv افزایش یافت. آزمایش‌های سایش نیز نشان داد که افزودن متانول، مقاومت سایشی را بیش از دو برابر نسبت به الکترولیت بدون حلال آلی افزایش می‌دهد. بررسی میکروسختی پوشش‌ها موبد این واقعیت است که افزایش نانوذرات تقویت‌کننده و میکروسختی در اثر استفاده از حلال آلی متانول سبب تقویت مکانیکی لایه اکسیدی و ایجاد بیشترین مقاومت سایشی در نانوکامپوزیت‌های آبکاری شده می‌شود.</p> | <p>دریافت: ۹۵/۷/۵<br/>پذیرش: ۹۵/۹/۸</p> <p><b>کلیدواژگان:</b><br/>نانوکامپوزیت نیکل آلومینا<br/>مواد آلی<br/>آبکاری الکتریکی پالسی<br/>میکروسختی<br/>سایش</p> |

## Mechanical behavior of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings electroplated in the presence of organic compounds

Sadegh Mirzamohammadi<sup>1</sup>, Hamid Khorsand<sup>1\*</sup>, Mahmood Aliofkhaezrai<sup>2</sup>

1- Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

2- Department of Materials Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\*P.O.B. 19991-43344, Tehran, Iran, [hkhorsand@kntu.ac.ir](mailto:hkhorsand@kntu.ac.ir)

### Keywords

Nickel alumina nanocomposites  
Organic substances  
Pulse electrodeposition  
Microhardness  
Wear

### Abstract

In this study, a novel method was used to increase alumina nanoparticles content in nickel base composite coatings plated by pulse current. Methanol, ethanol and formaldehyde were partially added to the Watt's solution as organic substances and nickel alumina nanocomposite coatings were produced adopted by simultaneous ultrasonic and magnetic homogenizing. After electroplating, the effect of these organic solvents was investigated by comparison of cross sectional observation of the coatings by field emission scanning electron microscopy (FESEM) equipped with energy dispersive X-ray analysis (EDX). The hardness and wear behavior of electroplated nanocomposite coatings were evaluated by ball on disk test at room temperature and ambient air. Microstructures studies showed that the amount of incorporated nanoparticles in the coatings plated with the electrolyte without organic solvent is 2.1 wt. % and this amount increases with the addition of organic solvents. So that, the maximum amount of nanoparticles in this study (5.2 wt. %) is achieved by adding methanol. Surface hardness of the coatings plated with Watt's solution was 301 Hv which increased to 485 Hv with adding methanol. Wear tests also showed that the addition of methanol increased the wear resistance twice more than the electrolyte without organic solvent. The microhardness investigation verifies this fact that increasing of reinforcement nanoparticles and coating's microhardness due to adding methanol provides the oxide layer's mechanical strength and creates the highest wear resistance in the plated nanocomposites.

Please cite this article using:

Mirzamohammadi, S. Khorsand, H. and Aliofkhaezrai, M., "Mechanical behavior of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings electroplated in the presence of organic compounds", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 4, No. 3, pp. 245-254, 2017.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

## ۱- مقدمه

متانول، اتانول و فرمالدهید می‌باشد. مورفولوژی و مقدار نانوذرات در پوشش‌های نانو کامپوزیتی تحت مطالعات میکروسکوپی قرار می‌گیرد. خواص مکانیکی (سایشی و سختی) پوشش‌های حاصل نیز بررسی شده و مقاومت سایشی آن‌ها مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## ۲- مواد و روش آزمایش

## ۲-۱- آماده سازی حمام و نمونه‌ها

جهت آماده سازی الکترولیت‌های وات از چهار حلال مختلف آب خالص و آب به همراه 10 g/lit از هر یک از مواد آلی متانول، فرمالدهید و اتانول استفاده شد. اسید بوریک، سولفات نیکل و کلرید نیکل به ترتیب و با ترکیب شیمیایی نشان داده شده در جدول 1 به آب خالص و یا آب به همراه حلال‌های آلی اضافه شدند. ابتدا اسید بوریک به آب اضافه شد تا با اضافه شدن بقیه ترکیبات، pH محلول تغییرات قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. بعد از اضافه شدن هر کدام از اجزا، محلول به وسیله هم‌زن مگنتیکی در دمای 70°C متلاطم شد تا ترکیبات اضافه شده به خوبی در حلال حل شوند. سپس، در حال هم‌زدن، پودر آلومینا به تدریج به محلول اضافه شد.

جدول 1 ترکیب الکترولیت و پارامترهای آبکاری

Table 1 Electrolyte composition and plating parameters

| مقدار     | ترکیب شیمیایی و پارامترها            |
|-----------|--------------------------------------|
| 300 g/lit | NiSO <sub>4</sub> .6H <sub>2</sub> O |
| 50 g/lit  | NiCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O |
| 40 g/lit  | H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>       |
| 10 g/lit  | نانوذرات آلومینا (40 nm)             |
| 55°C      | دما                                  |
| 3.5       | pH                                   |
| 1000 Hz   | فرکانس جریان                         |
| 50 %      | سیکل کاری                            |

نمونه‌هایی از فولاد CK45 به شکل ورقه‌ای، در ابعاد 80×25×20 mm بریده شدند تا به‌عنوان کاتد در سل قرار گیرند. قبل از آبکاری الکترولیتی عملیات آماده‌سازی سطح نمونه‌ها انجام شد. ابتدا زمینه‌ها به‌صورت مکانیکی پولیش شدند. این پولیش کاری مکانیکی با کاغذ سنباده تا شماره 1000 انجام گرفت. سپس نمونه‌ها به‌ترتیب در استن چربی‌گیری و در یک مخلوط اسیدی فعال شدند. بعد از آن نمونه‌ها با آب مقطر شسته شده و بلافاصله در حمام آبکاری قرار گرفتند.

## ۲-۲- مشخصات فرآیند آبکاری الکترولیتی پالسی

فرآیند آبکاری کامپوزیتی تحت جریان پالسی با مقدار متوسط 5A/dm<sup>2</sup> با فرکانس 1000 Hz و سیکل کاری 50% انجام گرفت. سرعت هم‌زن مغناطیسی در حین رسوب گذاری 100 rpm قرار داده شد. آند حل‌شونده سل آبکاری از یک ورقه نیکلی با خلوص بالا (99%) ساخته شد. شماتیک نحوه اتصال آند و کاتد به مولد جریان در شکل 1 نشان داده شده است.

۲-۳- مشخصه یابی پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

میکروساختار پوشش‌های کامپوزیتی و اثرات تریبولوژیکی حاصل از آزمایش‌های سایش به وسیله استفاده از یک میکروسکوپ الکترونی روبشی نشر میدانی<sup>۵</sup> (FESEM) مدل (TESCAN-MIRA3) مشاهده شد. جهت میکروسکوپی سطح مقطع پوشش‌ها، ابتدا با استفاده از گیوتین نمونه‌ها برش

بسیاری از تخریب‌ها از جمله فرسایش، سایش و خوردگی در سطح قطعات اتفاق می‌افتد. بنابراین اصلاح خواص مکانیکی سطح می‌تواند عمر قطعاتی که در معرض سایش و خوردگی هستند را افزایش دهد [1]. روش آبکاری الکترولیتی کامپوزیتی به‌عنوان یک روش پوشش‌دهی و اصلاح سطح شناسایی شده است که دارای راندمان انرژی بالا، قابلیت استفاده برای قطعات بزرگ، کنترل‌پذیری مطلوب، سرعت پوشش‌دادن مناسب، ایجاد ساختارهای فشرده‌تر و ظرافت بیشتر می‌باشد [2-4]. در طول چندسال اخیر تحقیقات بسیار زیادی روی پوشش‌های کامپوزیتی زمینه فلزی<sup>۱</sup> که با روش آبکاری الکترولیتی ایجاد می‌شوند انجام شده است. دلیل این امر قابلیت این پوشش‌ها در ارتقای خواص مکانیکی همچون سختی پوشش‌ها و مقاومت به سایش آن‌ها است [5-7].

در حین فرآیند رسوب الکترولیتی هم زمان<sup>۲</sup>، ذرات تقویت‌کننده نامحلول در الکترولیت آبکاری معلق می‌شوند و در هنگام رسوب یون فلزی درون پوشش به دام می‌افتند [8]. افزایش مقدار نانوذرات و توزیع یکنواخت‌تر آن‌ها در زمینه فلزی، به‌صورت بنیادی سبب اصلاح مقاومت به سایش پوشش‌های کامپوزیتی آبکاری شده می‌شود. پوشش‌هایی که با روش مرسوم آبکاری شده اند شامل محتوای ذرات نسبتاً کمی هستند [9، 10]، به‌همین دلیل، ایجاد روش‌هایی برای افزایش مشارکت ذرات در پوشش، چالش جدی را برای محققان بوجود آورده است. از جمله این روش‌ها، اضافه نمودن کاتالیزورهای کاتیونی فلزی<sup>۳</sup> [11] و تغییر دادن نوع جریان اعمالی از جریان مستقیم به پالسی [12] و ایجاد امواج فراصوت<sup>۴</sup> [13] می‌باشد. یکی از متعارف‌ترین روش‌ها، افزایش غلظت ذرات در حمام است که علاوه بر این که سبب افزایش هزینه‌ها می‌شود [14]، می‌تواند احتمال آگلومره شدن ذرات را به شدت افزایش دهد [15]. زیرا باید در نظر داشت که افزایش نانوذرات سبب افزایش انرژی آزاد سطحی سیستم می‌شود و سبب می‌شود که نانوذرات از نظر ترمودینامیکی تمایل داشته باشند که با چسبیده شدن به یکدیگر و به‌عبارت دیگر آگلومره شدن در حمام آبکاری، انرژی سطحی خود را کاهش دهند. آگلومره شدن ذرات باعث می‌شود که ذرات تقویت‌کننده توزیع یکنواختی در پوشش نداشته باشند و در نتیجه پوشش کامپوزیتی حاصل خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوبی نداشته باشد [16]. تاجال از آب به‌عنوان متداولترین حلال در آبکاری الکترولیتی استفاده شده است. اما آب می‌تواند به‌صورت جزئی، به وسیله حلال‌های آلی جایگزین شود. شرسا و ساجی [16] تاثیر افزودن اتانول در یک الکترولیت آبی نیکل را بر مقدار ذرات سرامیکی در زمینه نیکلی مطالعه نمودند و به این نتیجه رسیدند که افزودن اتانول مقدار مشارکت ذرات در پوشش را افزایش می‌دهد. بنابراین، استفاده از حلال‌های آلی در ترکیب شیمیایی الکترولیت می‌تواند راهکار مناسبی جهت افزایش مقدار نانوذرات در پوشش‌های کامپوزیتی محسوب شود. اما تحقیقات بسیار معدودی [16، 17] روی استفاده از مواد آلی دیگر و مقایسه آن‌ها با یکدیگر، جهت اصلاح پوشش‌های کامپوزیتی نانوساختار و افزایش مقدار نانوذرات در پوشش‌های کامپوزیتی انجام گرفته است.

هدف این تحقیق، بررسی مقدار مشارکت نانوذرات آلومینا در پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> آبکاری شده در الکترولیت‌هایی حاوی مواد آلی

<sup>1</sup> Metal Matrix Composites (MMCs)

<sup>2</sup> Electro co-deposition

<sup>3</sup> metal(-ion)-containing catalysts

<sup>4</sup> Ultrasonic

<sup>5</sup> Field Emission Scanning Electron Microscope

$$d = r - x \quad (1)$$

$$\left(\frac{W}{2}\right)^2 + x^2 = r^2 \quad (2)$$

$$d = r - \sqrt{r^2 - \frac{W^2}{4}} \quad (3)$$

که در آن  $d$  عمق سایش،  $r$  شعاع ایندنتور و  $W$  عرض شیار سایش است.

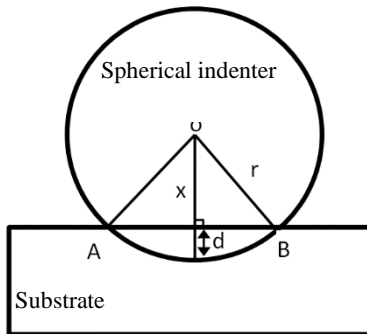


Fig. 2 Geometrical schematic for calculating of the wear depth

شکل ۲ تصویر شماتیک هندسه مورد استفاده در محاسبه عمق مسیر سایش

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- تاثیر نوع حلال‌های آلی بر میکروساختار پوشش‌ها

تاثیر نوع حلال‌های آلی افزوده شده به محلول وات بر مقدار نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> رسوب کرده در پوشش‌های نانو کامپوزیتی زمینه نیکلی را می‌توان در شکل 3 مشاهده کرد. شکل 3a نشان می‌دهد که پوشش آبکاری شده Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مربوط به محلول وات بدون اضافه شدن هیچ حلال آلی دارای سطحی به رنگ روشن، حاوی تعداد محدودی نقاط تیره می‌باشد. این پوشش به‌عنوان پوشش مرجع در نظر گرفته می‌شود. این نقاط تیره بوسیله آنالیز EDX همان نانوذرات آلومینا تشخیص داده شده اند که در زمینه روشن نیکلی محبوس شده اند. کمترین مقدار ذرات آلومینا (2.1 wt.%) در پوشش نانو کامپوزیتی آبکاری شده در محلول وات بدون افزودنی به‌دست می‌آید (شکل 3a). با افزودن مواد آلی فرمالدهید، اتانول و متانول در محلول وات، رسوب نانوذرات در پوشش‌ها، به‌ترتیب، با مقدارهای 4، 4.4 و 5.2 wt.% افزایش می‌یابد (شکل 4).

درصد مشارکت نانوذرات آلومینا در پوشش‌های زمینه نیکلی را می‌توان تا تقریباً 5.2 wt.% درصد وزنی با افزودن 10 g/lit متانول به الکترولیت افزایش داد و این افزایش نسبت به پوشش‌های کامپوزیتی آبکاری شده در محلول وات بدون افزودنی، بیش از دو برابر است. پوشش‌های مربوط به حلال‌های متانول، اتانول، فرمالدهید از نظر مقدار مشارکت ذرات آلومینا به‌ترتیب در بین دو مقدار ماکسیمم و مینیمم ذکر شده قرار می‌گیرند. بیشتر بودن مقدار ذرات آلومینا در پوشش مربوط به الکترولیت حاوی اتانول کاملاً مطابق با نتایج گرفته‌شده توسط شرسا و ساجی [16] و تیمیگ و همکاران [17] است. در محلول‌های آبکاری مربوط به پوشش‌ها، هیچگونه اختلافی در ویژگی‌های ذرات و خواص فیزیکی محلول‌ها وجود ندارد به جز انواع مختلفی از حلال‌ها که در ترکیب شیمیایی آن‌ها تفاوت ایجاد می‌نماید.

تیمیگ و همکاران [17] نیز در تحقیق خود به این نتیجه رسیده‌اند که حضور حلال آلی اتانول در محلول وات می‌تواند تاثیر به‌سزایی بر مقدار مشارکت ذرات بگذارد و در نتیجه سبب افزایش ذرات در پوشش شود [17]، [19]. با توجه به نتایج این تحقیق، با تغییر دادن حلال‌های آلی: فرمالدهید،

داده شدند. سپس نمونه‌ها منت شده و سطح مقطع پوشش‌ها تا سنباده شماره 2500 ساییده شد. در نهایت با استفاده از پودر آلومینا با اندازه 0.3 μm پولیش شدند. مقدار رسوب ذرات آلومینا در پوشش‌های نانو کامپوزیتی زمینه نیکلی با استفاده از طیف نگاری اشعه x (EDX) تعیین شد. دامنه آنالیز EDX یک مساحت 50 μm<sup>2</sup> در بزرگنمایی 800X است. جهت تعیین غلظت اتمی آلومینیم از شدت پیک‌های ka، از اطلاعات EDX که با فاکتور ZAF (فاکتور عدد اتمی Z، جذب A و تصحیح فلورسنس F<sup>λ</sup>) اصلاح شده اند، استفاده می‌شود. غلظت آلومینا با استفاده از نسبت استوکیومتری اکسیژن به آلومینیم در آلومینا تعیین شد. مقدار رسوب ذرات از میانگین سه اندازه‌گیری انجام شده از سه نقطه راندوم از هر نمونه به‌دست آمد. آنالیزهای فازی پوشش‌ها با استفاده از یک تفرق سنج اشعه x ساخت شرکت Philips جهت تعیین ساختار پوشش‌ها انجام شد. آنالیزهای فازی با سرعت اسکن 0.04 درجه بر ثانیه در محدوده 2θ از 15° تا 120° انجام گرفت. سختی سطحی پوشش‌های نانو کامپوزیتی با روش ویکرز و استفاده از یک دستگاه میکروسختی‌سنجی Bueheler انجام شد. سختی‌سنجی میکروسختی با اعمال یک بار 50 گرمی برای 15 ثانیه اندازه‌گیری شد. مقدار نهایی سختی هر پوشش در مقیاس ویکرز از میانگین 5 اندازه‌گیری مختلف تعیین شد.

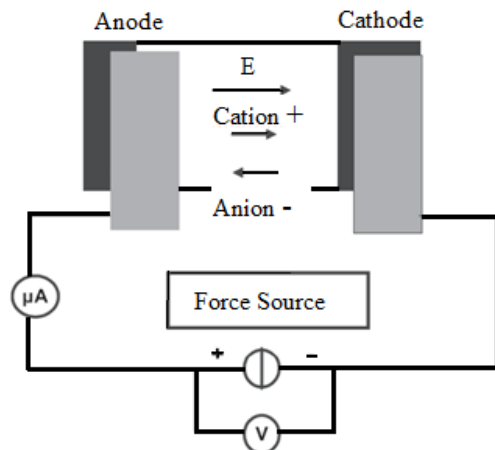


Fig. 1 General schematic for electroplating process

شکل ۱ تصویر شماتیک عمومی برای فرآیند آبکاری الکتریکی

آزمایش‌های سایش با روش گوی روی دیسک برای تعیین خواص سایشی و اصطکاکی پوشش‌ها تحت شرایط لغزش خشک در دمای محیط (25°C) و رطوبت نسبی حدود 55% انجام گرفت. از یک گلوله آلومینایی به‌عنوان پین ساینده بر طبق استاندارد ASTM G 99-95a استفاده شد. تمام آزمایش‌ها تحت بار اعمالی و سرعت یکسان انجام شد. برای هر یک از پوشش‌ها 4 سری نمونه تهیه شد تا آزمایش سایش بر روی آن‌ها انجام گیرد. ضریب اصطکاک و زمان سایش به‌صورت اتوماتیک در حین آزمایش ثبت شد. نرخ سایش پوشش‌ها با توزین نمونه‌ها بعد از آزمایش محاسبه شد. مسیرهای سایش با میکروسکوپ مورد مطالعه قرار گرفتند. عمق سایش به‌صورت ریاضی با استفاده از معادله 3 محاسبه شد. شکل 2 شماتیک قرار گرفتن پین ساینده در شیار ایجاد شده بعد از انجام فرآیند سایش را نشان می‌دهد. معادله 1 و 2 با استفاده از هندسه نشان داده شده در این شکل نتیجه می‌شوند. از معادله 1 و 2 می‌توان معادله 3 را نتیجه گرفت.

<sup>1</sup> Energy Dispersive X-ray analysis (EDX)

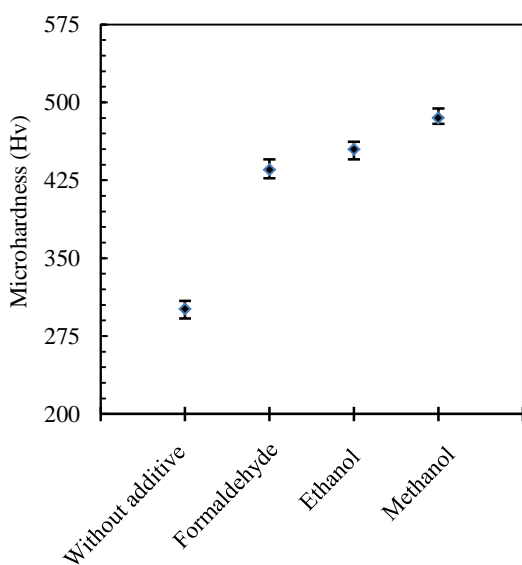
<sup>2</sup> Fluorescence correction

<sup>3</sup> X-Ray Diffractometer (XRD)

2- بر اساس نتایج گرفته شده توسط گالنیومی [21] در مواقعی که درصد ذرات موجود در یک محلول بیشتر از یک حد مشخص باشد، مقدار ذرات مشارکت کرده در پوشش کاهش می‌یابد و این امر به دلیل کاهش قدرت ترسازنی آن الکترولیت برای آن حجم از ذرات می‌باشد. به عبارت دیگر اگر قدرت ترسازنی یک الکترولیت از یک الکترولیت دیگر بیشتر باشد، احتمال افزایش مشارکت بیشتر ذرات در پوشش برای یک حجم یکسان از ذرات در محلول آبرکاری وجود دارد. بنابراین با در نظر گرفتن مقدار ثابت غلظت نانوذرات در محلول‌های آبرکاری می‌توان نتیجه گرفت افزایش مقدار نانوذرات در پوشش‌های مربوط به حلال‌های آلی مختلف (به ترتیب فرمالدهید، اتانول و متانول) می‌تواند به دلیل افزایش قدرت ترسازنی آن‌ها باشد.

### ۲-۲- تاثیر نوع حلال‌های آلی بر میکرو سختی پوشش‌ها

شکل 5 تغییرات میکروسختی اندازه‌گیری شده برای پوشش‌های نانوکامپوزیتی را به صورت تابعی از افزودن حلال‌های آلی مختلف نشان می‌دهد. زمینه پوشش‌ها از فولاد CK45 است و سختی معادل 195 Hv را از خود نشان می‌دهد. در حالیکه سختی پوشش نانوکامپوزیتی  $Ni-Al_2O_3$  که با محلول وات بدون افزودن هیچ حلال آلی ایجاد شده است، 295 Hv اندازه‌گیری شده است.



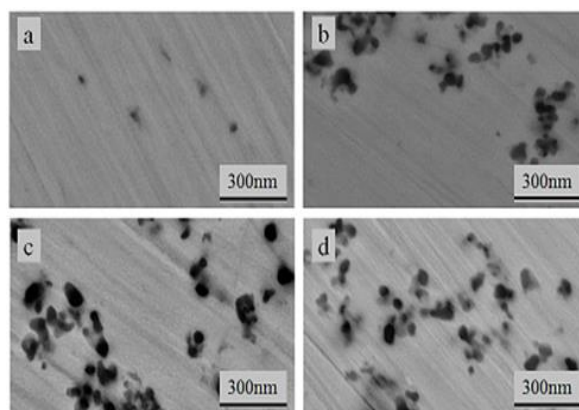
**Fig. 5** The changes in microhardness of  $Ni-Al_2O_3$  nanocomposite coatings due to the type of organic solvent (10 g/lit)

شکل 5 تغییرات میکروسختی اندازه‌گیری شده در پوشش‌های آبرکاری شده  $Ni-Al_2O_3$  با تغییر حلال آلی اضافه شده به محلول وات (10 g/lit)

سختی پوشش‌های مربوط به محلول‌های وات حاوی حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول به ترتیب افزایش می‌یابد. این افزایش سختی در این سری از پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌تواند به دو دلیل باشد:

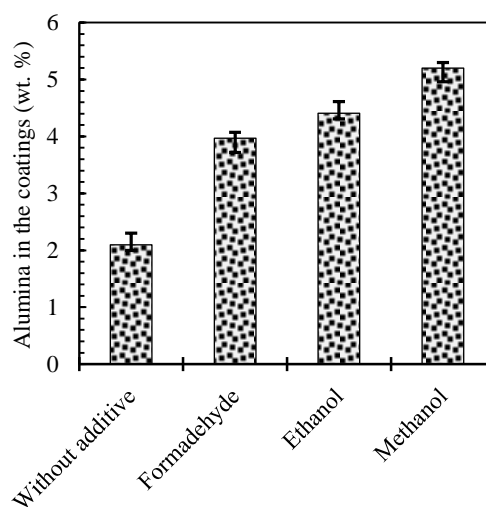
1- نتایج XRD در شکل 6 نشان می‌دهد که همه پوشش‌های نیکلی کامپوزیتی به صورت ترجیحی بر روی صفحات (111) رشد می‌کنند. گارسیا لسینا و همکاران در تحقیق [25] و لکا و همکاران در تحقیق [22] نشان داده‌اند که پوشش‌های نیکلی خالص به صورت ترجیحی روی صفحه (200) رشد می‌کنند. اما با اضافه شدن ذرات آلومینا، به صورت ترجیحی روی (111) رشد خواهند کرد. بنابراین رشد ترجیحی پوشش‌های کامپوزیتی روی صفحه (111)، به دلیل حضور نانوذرات در زمینه نیکلی همه پوشش‌ها می‌باشد. اما

اتانول و متانول در محلول وات به ترتیب یک روند افزایشی در مقدار نانوذرات پوشش‌ها به دست آمده است (شکل 4). این افزایش مقدار مشارکت ذرات در پوشش‌ها با تغییر حلال‌های آلی می‌تواند به این دلایل نیز باشد:



**Fig. 3** FESEM micrographs of  $Ni-Al_2O_3$  composites electroplated (a) without additive and (b) with 10 g/lit Formaldehyde, (c) ethanol, (d) Methanol

شکل 3 ریزنگارهای FESEM از توزیع ذرات  $Al_2O_3$  در سطح مقطع پوشش‌های کامپوزیتی  $Ni-Al_2O_3$  آبرکاری شده با محلول وات (a) بدون افزودنی، با افزودن 10 g/lit (b) فرمالدهید، (c) اتانول، (d) متانول. ذرات آلومینا به رنگ تیره در زمینه نیکلی روشن دیده می‌شوند.



**Fig. 4** Effect of addition of 10 g/lit organic solvent on the amount of participated alumina in  $Ni-Al_2O_3$  nanocomposite coatings

شکل 4 نمودار تاثیر افزودن 10 g/lit حلال اضافه شده به محلول وات بر درصد وزنی نانوذرات در پوشش‌های به دست آمده

1- چن و کو [20] در تحقیق خود نشان داده‌اند که جهت ایجاد نانوکامپوزیت‌هایی با درصد ذرات تقویت‌کننده بیشتر، که سبب ارتقای خواص مکانیکی نیز می‌شود، بسیار مهم است که نانوذرات در الکترولیت به صورت یکنواخت پخش شوند و آگلومره نشوند. بر اساس تحقیق لوو و همکاران [14]، حلال‌های آلی می‌توانند بر واکنش هیدراسیون ذرات هنگام ورود با الکترولیت تاثیر بگذارند و با ایجاد بار سطحی روی ذرات، نیروی دافعه بین ذرات را افزایش دهند. با این روش، نانوذرات با بارهای سطحی یکسان همدیگر را دفع می‌کنند و در حالت یکنواخت‌تری در الکترولیت پخش می‌شوند.

2- با افزایش نانوذرات Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در پوشش‌ها، سختی آن‌ها به وسیله پراکنده شدن ذرات در زمینه افزایش می‌یابد. مکانیزمی که برای سخت شدن ذرات پراکنده پیشنهاد می‌شود، مطابق با مکانیزم اوروان است [23]. این مکانیزم استحکام بخشی با افزایش مقدار نانوذرات تقویت‌کننده در پوشش‌های کامپوزیتی به مقدار بیشتری فعال می‌شود. در نتایج تحقیق باقی و همکاران [24] نیز افزایش سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی با مکانیزم اوروان گزارش شده است. بنابراین میکروسختی پوشش‌ها با افزایش مقدار ذرات آلومینا در پوشش افزایش می‌یابد.

### ۳-۳- تاثیر نوع حلال‌های آلی بر رفتار سایشی پوشش‌ها

شکل 7 نمودارهای متداول ضریب اصطکاک پوشش‌های کامپوزیتی ایجاد شده با محلول وات حاوی حلال‌های آلی مختلف را نشان می‌دهد. تغییرات ضریب سایش در همه پوشش‌ها با افزایش مسافت سایش روندهای مشابهی را نشان می‌دهند. یک دوره نامتعادل که در آن ضریب اصطکاک نسبت به مسافت سایش با نرخ زیادی افزایش می‌یابد تا به یک مقدار ماکزیمم برسد و در ادامه با یک نرخ آهسته کاهش می‌یابد تا به یک شرایط تعادلی برسد. بعد از آن، ضریب اصطکاک در آن مقدار تا آخر آزمایش تقریباً ثابت می‌ماند. مثلاً در مورد پوشش‌های ایجاد شده با الکترولیت حاوی فرمالدهید، ضریب اصطکاک ابتدا تا 0.56 افزایش می‌یابد. اما بعد از 25 متر مسافت لغزش به حالت تعادل و به مقدار 0.34 می‌رسد و تا انتهای آزمایش تقریباً در همان مقدار باقی می‌ماند. چنین روندی از تغییرات ضریب اصطکاک در تحقیق گارسینا لسینا و همکاران [25] در پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-SiC نیز مشاهده شده است.

بالاتر قرار گرفتن نمودار مربوط به محلول وات بدون حلال آلی از بقیه نمودارها در شکل 7 نشان می‌دهد که با افزودن حلال آلی به محلول وات ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد و با تغییر دادن هر یک از حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول به ترتیب در محلول وات، ضریب اصطکاک به مقادیر کمتری کاهش می‌یابد. به طوری که کمترین ضریب اصطکاک با افزودن متانول به محلول وات با مقدار میانگین 0.28 اندازه‌گیری شد. حلال‌های آلی که سبب شده‌اند مقدار ذرات آلومینای بیشتری در پوشش تعبیه شود، ضریب اصطکاک پوشش‌های مربوط به آن‌ها کمتر است. پوشش‌های ایجاد شده با محلول وات حاوی متانول دارای بیشترین مقدار نانوذرات و کمترین مقدار ضریب اصطکاک نسبت به بقیه پوشش‌ها می‌باشند. در ساده‌ترین شکل مدل تابور<sup>1</sup> و بودن<sup>2</sup> [28] برای اصطکاک لغزشی، فرض می‌شود که نیروی اصطکاک از دو منبع به وجود می‌آید که عبارتند از نیروی چسبندگی حاصل از مناطق حاوی تماس واقعی بین سطوح (اتصال ناهمگونی‌ها) و نیروی تغییر شکل لازم جهت خیش زدن<sup>3</sup> سطوح نرم‌تر توسط ناهمگونی‌های سطوح سخت‌تر. تقویت‌کننده‌های نانومقیاس آلومینایی که در زمینه پوشش پخش شده‌اند، تماس زمینه فلزی و گوی آلومینایی را در حین لغزش کاهش می‌دهند [26]. بنابراین، افزایش مقدار نانوذرات تقویت‌کننده، تحت تاثیر افزودن مواد آلی، می‌تواند سبب کاهش مناطق تماس واقعی بین سطوح در حال ساییده شدن شود. این امر، منبع اول ایجاد نیروی اصطکاک یعنی نیروی چسبندگی را تضعیف می‌نماید و می‌تواند سبب کاهش ضریب اصطکاک شود. سختی پوشش‌های نانو کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ایجاد شده با هر

در شکل 6، شدت پیک‌های (111) مربوط به هر یک از پوشش‌ها متفاوت است و به ترتیب از محلول وات بدون افزودنی تا محلول وات حاوی متانول افزایش می‌یابد. جهت بررسی بیشتر تفاوت پیک‌های XRD، ضرایب ساختار (TC) هر یک از صفحات رشد نیکل در جدول 2 خلاصه شده است. این ضرایب با استفاده از شدت‌های X-Ray و اطلاعات XRD و با استفاده از معادله 4 محاسبه شده‌اند.

$$I_{tc} = \left( \frac{I_{hkl}}{I_{111} + I_{200} + I_{220} + I_{311}} \right) \times 100 \quad (4)$$

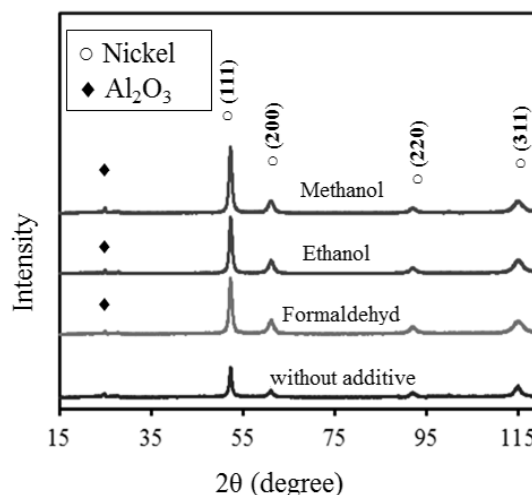


Fig. 6 Effect of addition of 10 g/lit organic solvent on the XRD pattern of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings

شکل 6 تاثیر افزوده شدن 10 g/lit حلال‌های آلی مختلف به محلول وات بر مدل‌های XRD پوشش‌های Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

جدول 2 تاثیر افزودن 10 g/lit حلال‌های آلی بر روی ضریب‌های ساختار پوشش‌ها  
Table 2 Effect of addition of 10 g/lit organic solvent on the XRD pattern of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings

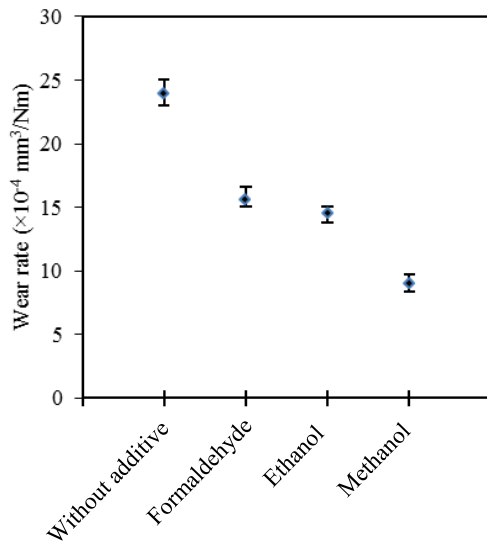
| ماده آلی اضافه شده به محلول      |                  |                  |                  | وات          |
|----------------------------------|------------------|------------------|------------------|--------------|
| ضریب ساختار (% I <sub>tc</sub> ) |                  |                  |                  |              |
| I <sub>311</sub>                 | I <sub>220</sub> | I <sub>200</sub> | I <sub>111</sub> |              |
| 24.7                             | 7.6              | 22.8             | 44.9             | بدون افزودنی |
| 19.2                             | 7.4              | 14.5             | 58.9             | فرمالدهید    |
| 17.3                             | 8.6              | 12.9             | 61.2             | اتانول       |
| 15.5                             | 5.9              | 12.8             | 65.8             | متانول       |

همان‌طور که در جدول 2 مشاهده می‌شود، ضریب ساختار پوشش‌های نانو کامپوزیتی، مربوط به صفحه (111)، در محلول وات 44.9 درصد است و با اضافه شدن متانول به محلول وات تا 65.8 درصد افزایش می‌یابد. این نتیجه تغییر صفحه رشد پوشش از (200) به (111) را تأیید می‌نماید. به عبارت دیگر جهت رشد پوشش‌های زمینه نیکلی از [100] به [110] تغییر می‌نماید که در تحقیق لکا و همکاران نیز این نتیجه گزارش شده است [22]. جهت رشد ترجیحی پوشش‌های نانو کامپوزیتی این تحقیق [110] است و با تغییر دادن حلال‌ها (به ترتیب فرمالدهید، اتانول و متانول)، دانه‌های نیکل تمایل بیشتری برای رشد در جهت [110] پیدا می‌کنند. تغییر رشد ترجیحی دانه‌های نیکل از جهت [100] به جهت [110] و افزایش سختی پوشش در تحقیق لکا و همکاران [22] نیز مشاهده شده است. رشد رسوبات نیکل در جهت [110] نسبت به جهت [100] منجر به ایجاد تنش‌های داخلی و سختی بیشتری در آن‌ها می‌شود [22].

<sup>1</sup> Ploughing

<sup>2</sup> Bowden

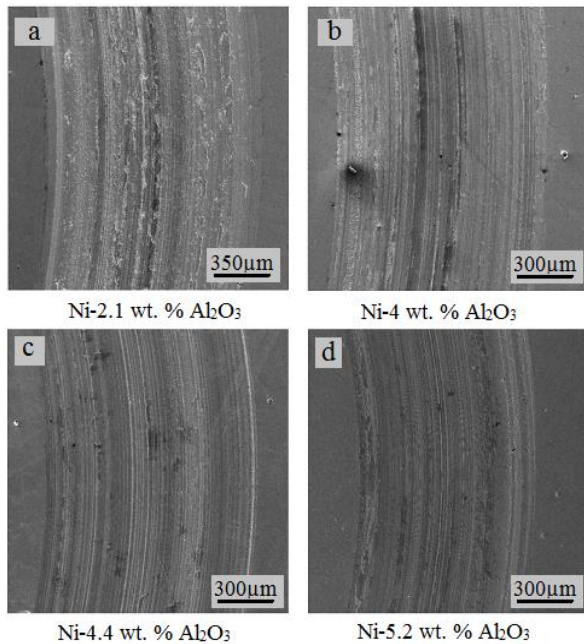
<sup>3</sup> Tabor



**Fig. 8** Effect of addition of organic solvent (10 g/lit) on the wear rate of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings

شکل ۸ تاثیر افزودن 10 g/lit حلال‌های آلی به محلول وات بر نرخ سایش پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

ریزننگارهای FESEM مسیرهای سایش پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ایجاد شده با الکترولیت وات حاوی حلال‌های آلی مختلف در شکل 9 نشان داده شده است.

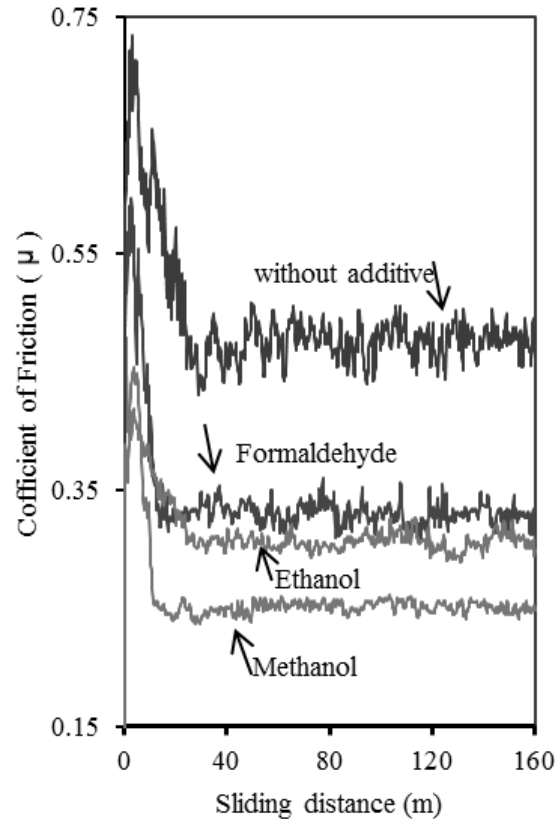


**Fig. 9** Worn surfaces of Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings produced by Watt's solution (a) without additive and (b) with 10 g/lit Formaldehyde, (c) ethanol, (d) Methanol

شکل ۹ مورفولوژی سطوح مسیرهای سایش پوشش‌های آبکاری پالسی شده با محلول وات (a) بدون افزودنی و حاوی 10 g/lit (b) فرمالدهید، (c) اتانول، (d) متانول

در شکل به‌طور واضح دیده می‌شود که با تغییر حلال‌های آلی افزوده شده به محلول وات و در نتیجه افزایش مقدار نانوذرات آلومینا در پوشش تا 5.2 wt. %، عرض‌های مسیرهای سایش کاهش یافته‌اند. با استفاده از اندازه

کدام از الکترولیت‌های حاوی فرمالدهید، اتانول و متانول، به ترتیب، افزایش می‌یابد (شکل 5). این افزایش سختی سبب می‌شود که تغییر شکل پلاستیک کمتری در سطوح امکان‌پذیر باشد و متعاقب آن، قسمت مربوط به نیروی تغییر شکل تضعیف شود. بنابراین اصطکاک کمتری در اثر تغییر شکل ایجاد می‌شود و ضریب اصطکاک پوشش حاصل، کمتر خواهد شد. کاهش ضریب اصطکاک پوشش‌های نانو کامپوزیتی با افزایش مقدار ذرات آلومینا نیز می‌تواند به دلایل مذکور باشد.

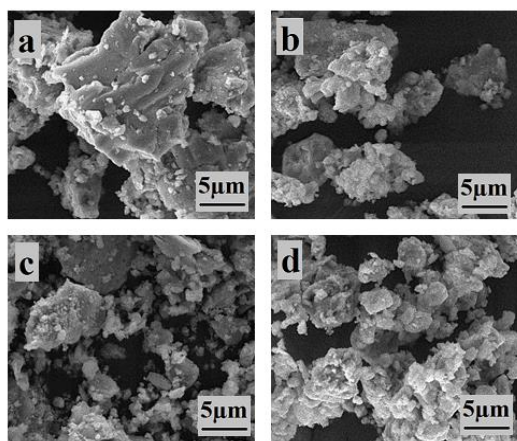


**Fig. 7** The changes in coefficient of friction for Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposite coatings produced with different organic solvents (10 g/lit)

شکل ۷ تغییرات ضریب اصطکاک با مسافت سایش برای پوشش‌های کامپوزیتی Ni-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ایجاد شده با محلول وات حاوی حلال‌های آلی مختلف (10 g/lit)

با توجه به شکل 8، افزودن حلال‌های آلی سبب افزایش مقاومت به سایش نسبت به پوشش‌های ایجاد شده با محلول وات بدون افزودنی شده است. مقاومت به سایش پوشش‌ها با تغییر حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول در محلول وات، به ترتیب، افزایش می‌یابد. این نتایج نیز نشان می‌دهد که افزایش مقدار ذرات آلومینا به وسیله تغییر نوع حلال‌های آلی، همانطور که سبب کاهش ضریب اصطکاک پوشش‌ها می‌شود، سبب افزایش مقاومت به سایش آن‌ها نیز شده است. به‌عنوان مثال، مقاومت به سایش پوشش‌های مربوط به متانول تقریباً دو برابر بیشتر از پوشش‌های آبکاری شده بدون حلال آلی می‌باشد. رفتار نسبی همه پوشش‌ها در این تحقیق از این درک عمومی که پوشش‌های سخت‌تر مقاومت به سایش بیشتری دارند تبعیت می‌کند. مطابق با همان ترتیب پوشش‌ها از نظر میزان سختی که در شکل 5 نشان داده شده است مقاومت به سایش پوشش‌ها افزایش یافته است. بنابراین افزایش سختی و کاهش ضریب اصطکاک دو پارامتری هستند که در جهت افزایش مقاومت به سایش موثر هستند [27].

خطاندازی هنوز در سطح ساییده شده مشاهده می‌شود. اما درجه و مقدار آن تقلیل یافته است و تقریباً سایش لغزشی آرامی انجام گرفته است. تصاویر میکروسکوپ الکترونی براده‌های سایش در شکل 11 و آنالیز EDX این براده‌ها در جدول 3 نشان می‌دهد که با تغییر حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول در الکترولیت براده‌های سایش کوچکتر شده و مقدار اکسیژن در آن‌ها افزایش می‌یابد. مقدار اکسیژن در براده‌های سایش پوشش ایجاد شده با محلول وات % 14.1 است که با افزودن متانول به الکترولیت این مقدار به % 28.4 می‌رسد. افزایش مقدار اکسیژن در براده‌های حاصل از سایش نشان می‌دهد که سایش، به مقدار بیشتری با مکانیزم اکسایشی انجام گرفته است و سایش چسبان کاهش یافته است. کاهش میزان سایش چسبان به این دلیل است که لازمه ایجاد چسبندگی قابل توجه بین سطوح درگیر باهم این است که سطح، عاری از اکسیدها و فیلم‌های جذب شده باشد [28]. بنابراین، افزایش میزان ترکیبات اکسیدی در براده‌های سایش نشان می‌دهد که سایش اکسایشی افزایش یافته و فرصت‌های ایجاد سایش چسبان را کاهش داده است.



**Fig. 11** Wear debris of  $Ni-Al_2O_3$  nanocomposite coatings produced by Watt's solution (a) without additive and (b) with 10 g/lit Formaldehyde, (c) ethanol, (d) Methanol

**شکل 11** براده‌های سایشی پوشش‌های  $Ni-Al_2O_3$  آبکاری شده با محلول واتس (a) بدون افزودنی، حاوی 10 g/lit (b) فرمالدهید، (c) اتانول و (d) متانول

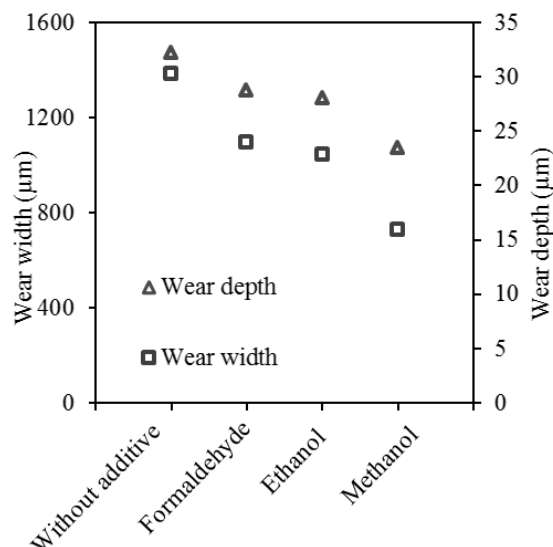
**جدول 3** آنالیز EDX براده سایش پوشش‌های آبکاری شده با محلول وات حاوی 10 g/lit حلال آلی

**Table 3** EDX analysis of wear debris of electroplated coatings with Watt's solution containing 10 g/lit organic solvent

| عنصر براده سایش (at.%) | بدون افزودنی | فرمالدهید | اتانول | متانول |
|------------------------|--------------|-----------|--------|--------|
| O                      | 14.1         | 20.7      | 26.3   | 28.4   |
| Ni                     | 83.7         | 75.8      | 70.2   | 67.7   |
| Al                     | 2.2          | 3.5       | 3.5    | 3.9    |

علاوه بر این، کاهش نرخ سایش پوشش‌های  $Ni-Al_2O_3$  در اثر افزایش محتوای نانوذرات و سختی آن‌ها، تقریباً شبیه کاهش نرخ سایش در فولادها، با به وجود آمدن مارتنزیت در فصل مشترک سایشی است. نقشه سایشی فولادهای لغزان دارای هشت حالت مختلف سایش را می‌باشد [28]. در هر کدام از این حالت‌ها، متناسب با بار اعمالی و سرعت لغزش، سایش آرام یا سایش شدید اتفاق می‌افتد. در انتقال از حالت شماره هفت به هشت، سایش از حالت شدید به حالت آرام انتقال پیدا می‌کند. این انتقال به این دلیل انجام

عرض مسیره‌های سایش و روش ریاضی ارائه شده در معادله 3 و شکل 2، عمق سایش پوشش‌ها محاسبه شده و در شکل 10 نشان داده شده است.



**Fig. 10** Effect of addition of 10 g/lit organic solvent versus wear width and depth of  $Ni-Al_2O_3$  nanocomposite coatings

**شکل 10** افزودن 10 g/lit حلال‌های آلی مختلف به محلول وات در برابر عرض مسیره‌های سایش و عمق سایش پوشش‌های کامپوزیتی  $Ni-Al_2O_3$

سایش پوشش‌های کامپوزیتی که با محلول وات بدون افزودنی ایجاد شده‌اند، شیار با عمق  $30\mu m$  میکرومتر ایجاد کرده است. در حالی که با افزودن حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول در محلول وات به ترتیب عمق شیار سایش کاهش می‌یابد و در حالت الکترولیت حاوی متانول به  $15.5\mu m$  میکرومتر می‌رسد. در پوشش‌های آبکاری شده با محلول وات بدون مواد آلی که دارای کمترین محتوای نانوذرات هستند، بیشترین عمق سایش ایجاد شده است. در مسیر سایشی آن‌ها، کندگی‌هایی<sup>1</sup> دیده می‌شود و در اطراف کندگی‌ها، اثراتی از چسبندگی شدید و تغییر شکل پلاستیک ایجاد شده است. با توجه به شکل 11a، سایش این پوشش‌ها بزرگترین براده‌ها را در بین پوشش‌ها ایجاد کرده است که نشان می‌دهد، سایش چسبان شدیدی در برابر گوی آلومینایی اتفاق افتاده است. نتایج سایش ذکر شده و نشان داده شده در شکل 9 حاکی از این است که وجود نانوذرات آلومینا دفن شده در زمینه نیکلی، نایجابی‌ها را در زمینه نیکلی متوقف و یا حرکت آن‌ها را کند می‌نماید. این کار با مکانیزم استحکام دهی با ذرات پراکنده انجام می‌شود. بنابراین، افزایش مقدار نانوذرات می‌تواند، مقاومت به تغییر شکل پلاستیک را اصلاح کرده و ظرفیت تحمل بار به وسیله زمینه نیکلی را افزایش دهد. این امر سبب می‌شود سختی و مقاومت به سایش ارتقا یابد. همانطور که در تصاویر 9b و 9c می‌توان مشاهده کرد، زمانی که محتوای  $2.1\text{ wt.}\%$  نانوذرات  $Al_2O_3$  در پوشش‌ها، با افزودن فرمالدهید و اتانول، به ترتیب، به  $4\text{ wt.}\%$  و  $4.4\text{ wt.}\%$  افزایش می‌یابد، مکانیزم کنده شدن در سایش پوشش‌ها تقریباً متوقف می‌شود. عمق سایش نیز از  $30\mu m$  به  $24\mu m$  (فرمالدهید) و  $22.5\mu m$  (اتانول) می‌رسد. مسیره‌های سایش از خطوط موازی تشکیل شده‌اند که می‌تواند انجام سایش لغزشی با مکانیزم خطاندازی<sup>2</sup> را نشان دهد. در مقایسه با شکل 9c، سایش پوشش‌های آبکاری شده با متانول که حاوی  $5.2\text{ wt.}\%$  می‌باشد، دارای عرض و عمق کمتری است (شکل 9d).

<sup>1</sup> Peeling wear

<sup>2</sup> Scuffing wear

- Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 4, pp. 31-36, 2016.
- [2] Chiu, S.Y. Chung, S.T. Lin, C.Y. Tsai, W.T., "Electrodeposition of  $Ni-Al_2O_3$  Composite Coatings Employing Supercritical  $CO_2$  Baths," Surface and Coatings Technology, Vol. 247, pp. 68-73, 2014.
- [3] Lin, Y. Ikeda, S. Septina W. Kawasaki, Y. Harada, T. Matsumura, M., "Mechanistic Aspects Of Preheating Effects Of Electrodeposited Metallic Precursors On Structural And Photovoltaic Properties Of  $Cu_2ZnSnS_4$  Thin Films," Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 120, Part A, pp. 218-25, 2014.
- [4] Ghorbani, M., "Coating (1)," In Persian, Second ed., Sharf Universitu Publication, Tehran, pp. 110-121, 2005.
- [5] Mirzamohammadi, S. Aliov, M.K. Sabour Rouh A. Velashjerdi, A. Naimi-Jamal, M.M.R., "Tribological Properties of Tertiary  $Al_2O_3/CNT/Nanodiamond$  Pulsed Electrodeposited  $Ni-W$  Nanocomposite", Materials Science and Technology, Vol. 27, pp. 546-50, 2011.
- [6] Yousefpour, H. and Akbari Mousavi, S.A.A., "Investigations On Microstructure, Wear Behavior And Corrosion Resistance Of Brass/Graphite Composite Produced By Friction Stir Processing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, In Press, 2016.
- [7] Kartal, M. Uysal, M. Gul, H. Alp, A. Akbulut, H., "Effect of Surfactant Concentration In The Electrolyte On The Tribological Properties Of Nickel-Tungsten Carbide Composite Coatings Produced By Pulse Electro Co Deposition," Applied Surface Science, Vol. 354, Part B, pp.328-36, 2015.
- [8] Mohajeri, S. Dolati, A. Rezagholibeiki, S., "Electrodeposition of  $Ni/WC$  Nanocomposite in Sulfate Solution," Materials Chemistry and Physics, Vol. 129, pp.746-50, 2011.
- [9] Nasre esfahani, A.R. Daneshi, S.J. Farmanesh, K., "Effect of Zeta Potential on Deposition of Alumina Particles in Composite Coatings Obtained from Pulse Current," In Persian, Journal of Advanced Design and Manufacturing Technolog Vol. 4, pp.13-19, 2009.
- [10] Huang, W. Zhao, Y. and Wang, X., "Preparing a High-Particle-Content  $Ni/Diamond$  Composite Coating with Strong Abrasive Ability," Surface and Coatings Technology, Vol. 235, pp. 489-94, 2013.
- [11] Wang, L. Gao, Y. Liu, H. Xue, Q. and Xu, T., "Effects of Bivalent Co Ion On The Co-Deposition Of Nickel And Nano-Diamond Particles," Surface and Coatings Technology, Vol. 191, pp. 1-6, 2005.
- [12] Lajevardi, S.A. and Shahrabi, T., "Effects of Pulse Electrodeposition Parameters on the Properties of  $Ni-TiO_2$  Nanocomposite Coatings," Applied Surface Science, Vol. 256, pp. 6775-81, 2010.
- [13] Lee, D. Gan, Y.X. Chen, X. and Kysar, J.W., "Influence of Ultrasonic Irradiation on The Microstructure of  $Cu/Al_2O_3, CeO_2$  Nanocomposite Thin Films During Electrodeposition," Materials Science and Engineering A, Vol. 447, pp. 209-16, 2007.
- [14] Low, C. Wills, R. and Walsh, F., "Electrodeposition of Composite Coatings Containing Nanoparticles In A Metal Deposit," Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 371-83, 2006.
- [15] Hou, F. Wang, W. Guo, H., "Effect of the Dispersibility of  $ZrO_2$  Nanoparticles in  $Ni-ZrO_2$  Electroplated Nanocomposite Coatings on the Mechanical Properties of Nanocomposite Coatings," Applied Surface Science, Vol. 252, pp.3812-7, 2006.
- [16] Shrestha, N.K. and Saji, T., "Non-Aqueous Composite Plating Of  $Ni-Ceramic$  Particles Using Ethanol Bath And Anti-Wear Performance Of The Coatings," Surface and Coatings Technology, Vol. 186, pp. 444-9, 2004.
- [17] Thiemi, D. and Bund, A., "Influence of Ethanol On The Electrodeposition Of  $Ni/Al_2O_3$  Nanocomposite Films," Applied Surface Science, Vol. 255, pp. 4164-70, 2009.
- [18] Gores, H.J. and Barthel, J.M.G., "Nonaqueous Electrolyte Solutions: New Materials For Devices And Processes Based On Recent Applied," IUPAC Conference on Chemical Thermodynamics, 13th, Clermont-Ferrand, France, 1994.
- [19] Kaisheva, M. and Fransær, J., "Influence of the Surface Properties Of Sic Particles On Their Codeposition With Nickel," Journal of The Electrochemical Society, Vol. 151, pp. 89-96, 2004.
- [20] Kuo, S.L. Chen, Y.C. Ger, M.D. and Hwu, W.H., "Nano-particles Dispersion Effect on  $Ni/Al_2O_3$  Composite Coatings," Materials Chemistry and Physics, Vol. 86, pp. 5-10, 2004.

می‌گیرد که در اثر افزایش سرعت لغزش در فصل مشترک سایش، مارتنزیت به وجود می‌آید. سختی بالای مارتنزیت باعث می‌شود که لایه اکسیدی سطحی، که در حین سایش از اتصال ناهمگونی‌ها جلوگیری می‌نماید، از قدرت مکانیکی موضعی مطلوبی برخوردار شود و سایش آرامی در فولادها اتفاق بیافتد [28]. در پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Al_2O_3$  نیز با افزودن حلال‌های آلی، مقدار نانوذرات و سختی پوشش‌ها افزایش یافته و این سختی ایجاد شده در پوشش که در اینجا نقش زیرلایه اکسید سطحی را بازی می‌کند می‌تواند استحکام مکانیکی اکسید را فراهم کرده و سبب شود که لایه اکسیدی از قدرت مکانیکی مطلوبی برخوردار شود. افزایش استحکام زیر لایه اکسیدها سبب می‌شود که پایداری اکسیدها در فصل مشترک سایش افزایش یابد. این امر سبب می‌شود احتمال سایش چسبان کاهش یافته و مکانیزم غالب سایش به سمت سایش اکسایشی تمایل پیدا کند. نرخ سایش و مورفولوژی سطوح ساییده شده نشان می‌دهد که مقاومت سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبکاری شده با الکترولیت حاوی متانول مافوق حلال‌های آلی فرمالدهید و اتانول و الکترولیت بدون افزودنی است. بنابراین، استفاده از متانول به صورت جزئی در الکترولیت آبکاری می‌تواند روش مفیدی در اصلاح راندمان سایشی پوشش‌های نانوکامپوزیتی آبکاری شده باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق پوشش‌های نانوکامپوزیتی  $Ni-Al_2O_3$  با استفاده از الکترولیت‌های حاوی حلال‌های آلی فرمالدهید، اتانول و متانول روی پایه‌های فولادی آبکاری شدند. پوشش‌های حاصل از نظر مورفولوژی و محتوای ذرات، میکروسختی و مقاومت به سایش مورد ارزیابی قرار گرفتند.

1- با افزودن حلال‌های آلی، محتوای نانوذرات تقویت‌کننده آلومینا در پوشش‌های نانوکامپوزیتی ایجاد شده با متانول 5.2 wt.% به دست آمد که در برابر 2.1 wt.% مربوط به الکترولیت بدون حلال آلی افزایش قابل توجهی را نشان می‌دهد. این افزایش می‌تواند به دلیل افزایش قدرت ترسای الکترولیت برای حجم معینی از ذرات باشد.

2- پوشش‌های  $Ni-Al_2O_3$  ایجاد شده با الکترولیت حاوی متانول بیشترین میکروسختی را از خود نشان می‌دهند. افزایش مقدار ذرات موجود در پوشش‌ها نقش موثری را در ترتیب افزایش میکروسختی آن‌ها با مکانیزم سخت شدن با ذرات پراکنده داشته است.

3- مقاومت به سایش پوشش‌های ایجاد شده با الکترولیت‌های حاوی حلال‌های آلی افزایش می‌یابد. به طوری که مقاومت به سایش پوشش‌های مربوط به متانول تقریباً دو برابر بیشتر از پوشش‌های آبکاری شده بدون حلال آلی می‌باشد. افزودن حلال آلی سبب می‌شود محتوای نانوذرات آلومینای پوشش افزایش یافته و متعاقب آن سختی پوشش نیز افزایش یابد. سختی ایجاد شده در پوشش، که در اینجا نقش زیرلایه اکسید سطحی را بازی می‌کند، می‌تواند استحکام مکانیکی اکسید را فراهم کرده و سبب شود که لایه اکسیدی از قدرت مکانیکی مطلوبی برخوردار شود. افزایش نانوذرات تقویت‌کننده و میکروسختی در اثر استفاده از حلال آلی متانول سبب تقویت مکانیکی لایه اکسیدی و ایجاد بیشترین مقاومت به سایش در نانوکامپوزیت‌های آبکاری شده می‌شود.

#### ۵- مراجع

- [1] Ahmadifard, S. Shahin, N. Kazemi, Sh. Heidarpor, A. Shirazi, A., "Fabrication of  $A5083/SiC$  Surface Composite By Friction Stir Processing And Its Characterization," In Persian, Journal of



- [21] Gül, H. Kılıç, F. Uysal, M. Aslan, S. Alp, A. and Akbulut, H., "Effect of Particle Concentration On The Structure And Tribological Properties Of Submicron Particle Sic Reinforced Ni Metal Matrix Composite (MMC) Coatings Produced By Electrodeposition," Applied Surface Science, Vol. 258, pp. 4260-7, 2012.
- [22] Lekka, M. Lanzutti, A. Casagrande, A. de Leitenburg, C. Bonora, P. and Fedrizzi, L., "Room and High Temperature Wear Behaviour Of Ni Matrix Micro-And Nano-Sic Composite Electrodeposits," Surface and Coatings Technology, Vol. 206, pp. 3658-65, 2012.
- [23] Dieter, G. "Mechanical Metallurgy" In Persian, Third ed., Univesity Publication Center, Tehran, pp. 225-229, 2009.
- [24] Baghery, P. Farzam, M. Mousavi, A. and Hosseini, M., "Ni-TiO<sub>2</sub> Nanocomposite Coating with High Resistance to Corrosion and Wear," Surface and Coatings Technology, Vol. 204, pp. 3804-10, 2010.
- [25] García-Lecina, E. García-Urrutia, I. Díez, J. Salvo, M. Smeacetto, F. and Gautier, G., "Electrochemical Preparation And Characterization Of Ni/Sic Compositionally Graded Multilayered Coatings," Electrochimica Acta, Vol. 54, pp.2556-62, 2009.
- [26] Borkar, T. and Harimkar, S.P. "Effect of Electrodeposition Conditions and Reinforcement Content on Microstructure And Tribological Properties Of Nickel Composite Coatings," Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 4124-34, 2011.
- [27] Mazaheri, H. Fazel Najafabadi, M. and Alaei, A., "Study of Microstructure and Tribological Behavior of the Composite Layer Produced of Silicon Carbide Particles on a Steel ASTM A106 GTAW Welding Method," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 2, No. 1, pp. 65-72, 2015.
- [28] Hutchings, I.M., "Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials," Edward Arnold, pp. 175-181, 1992.

