



بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل- نانولوله های کربنی فرآوری شده به روش الکتروشیمیایی در شرایط مختلف به منظور کاربرد در سیم ارتودنسی

حامد رحمانی^۱، مهدی خدایی^۲

^۱. دانشجوی کارشناسی دانشکده علم و مهندسی مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲. عضو هیئت علمی دانشکده علم و مهندسی مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

در فرآیند ارتودنسی اصطکاک میان سیم و براکت های ارتودنسی از عوامل تاثیرگذار در عملکرد بوده و ایجاد شرایط کاهش اصطکاک در مدت طولانی فرآیند، می تواند سهولت این عملیات را در پی داشته باشد. از جمله راهکارهای دستیابی به خواص منحصر به فرد در سطح قطعات ایجاد پوشش های کامپوزیتی است که با انتخاب فازهای سازنده خواص مد نظر حاصل خواهد شد. در این تحقیق رفتار تریبولوژیکی پوشش های نانوکامپوزیتی نیکل - نانولوله کربنی ایجاد شده به روش الکتروشیمیایی بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ مطالعه شده است. بدین منظور تاثیر پارامترهای مختلف فرآیند از قبیل چگالی جریان و میزان فاز ثانویه اضافه شده (نانولوله کربنی) در ضریب اصطکاک پوشش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده کاهش ضریب اصطکاک پوشش نیکل به مقدار ۵۰ درصد با اضافه کردن نانولوله کربنی می باشد و بیشترین تغییر در ضریب اصطکاک، مربوط به پوشش با غلظت 0.44 mg.mL^{-1} و چگالی جریان کاری $2\text{-}10 \text{ A.dm}^{-2}$ می باشد که به مقدار 0.299 کاهش یافته است.

واژه های کلیدی: پوشش نانوکامپوزیتی، نیکل- نانولوله کربنی، ضریب اصطکاک، تریبولوژی، سیم ارتودنسی.

^۱. hamedrh@email.kntu.ac.ir

^۲. khodaei@kntu.ac.ir

مقدمه

از جمله راهکارهای دستیابی به خواص منحصر به فرد در پوشش ها ایجاد پوشش های کامپوزیتی است که منجر به بهبود خواص تریبولوژیکی [۱]، [۲]، [۶]، [۱۱-۱۴] و مقاومت به خوردگی و اکسیداسیون [۱۵-۱۸] خواهد شد. پوشش های کامپوزیتی با روش های مختلف پوشش دهی قابل حصول است و در این میان مهم ترین مزیت روش های الکتروشیمیایی در سادگی و هزینه کم این روش ها نسبت به روش های دیگر می باشد. در این روش پارامترهایی از قبیل چگالی جریان، سرعت تلاطم حمام و میزان فاز ثانویه اضافه شده به حمام اصلی ترین عوامل تأثیر گذار می باشند [۱۹-۲۰].

در میان پارامترهای پوشش دهی الکتروشیمیایی برای پوشش های نانو کامپوزیتی، استفاده از جریان پالسی در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است [۲۱]. هدف اصلی استفاده از جریان پالسی، بهبود خواص پوشش های حاصله از قبیل کاهش تخلخل و زبری سطح، افزایش سختی و مقاومت به سایش می باشد. استفاده از جریان پالسی موجب افزایش میزان ذرات رسوب داده شده می شود [۱۲-۱۵]. تاکنون نظرات متفاوتی در مورد تأثیر چگالی جریان بر میزان ذرات رسوب داده شده در داخل پوشش کامپوزیتی مطرح گردیده است [۲۲]. به عنوان مثال هنگامی که چگالی جریان افزایش پیدا می کند، میزان ذرات رسوب داده شده در کامپوزیت $Ni-TiO_2$ افزایش یافته است [۲۳]. در صورتی که با افزایش چگالی جریان، میزان ذرات در کامپوزیت های $Ni-Al_2O_3$ و $Cu-MoS_2$ کاهش یافته است [۲۴]. با افزایش چگالی جریان، هنگامی که فرایند تحت کنترل انتقال بار می باشد، به دلیل افزایش رسوب یون های فلزی، میزان ذرات نیز در داخل پوشش افزایش می یابد. با افزایش چگالی جریان به میزان حداکثر، مکانیزم واکنش از کنترل بار به کنترل جرم تغییر می کند که در این حالت با افزایش چگالی میزان ذرات در داخل پوشش کاهش خواهد یافت. در چگالی جریان پایین، یون های فلزی به کندی حرکت می کنند و زمان کافی جهت جذب یون های فلز توسط ذرات وجود ندارد و در نتیجه درصد حجمی ذرات در داخل پوشش کم خواهد بود. با افزایش چگالی جریان، حرکت یون های فلزی سریع تر و در نتیجه درصد حجمی ذرات افزایش می یابد. ولی با افزایش بیشتر چگالی جریان، به دلیل حرکت

سریع یون ها نسبت به ذرات، مجدداً درصد حجمی ذرات در پوشش کاهش می یابد [۴]. در این میان بررسی پارامترهای پوشش دهی الکتروشیمیایی با استفاده از نانولوله های کربنی به عنوان فاز ثانویه در پوشش های نانو کامپوزیتی نیازمند بررسی است.

در ارتودنسی اصطکاک میان سیم ها و براکت های آن از عوامل تاثیرگذار در عملیات ارتودنسی بوده و ایجاد شرایط کاهش اصطکاک در مدت طولانی فرآیند، می تواند سهولت این عملیات را در پی داشته باشد. از این رو تحقیقات به سمت ایجاد پوشش هایی با خاصیت خودروانکاری سوق پیدا کرده است. در تحقیقی ردلیچ^۱ و همکارانش [۲۵] به منظور کاهش اصطکاک میان سیم ها و براکت های ارتودنسی از روش پوشش دهی نانو کامپوزیتی الکترولس نیکل- فسفر برای پوشش دهی سیم های ارتودنسی با فاز ثانویه نانوذرات در سولفید تنگستن که یک روانکار جامد است استفاده نموده است. نتایج بدست آمده، نشان دهنده کاهش در مقاومت اصطکاکی در مقابل حرکت وایرهای پوشش داده شده در زوایای مختلف، مخصوصاً در ۱۰ درجه بوده است.

هدف اصلی در این تحقیق بررسی رفتار تریبولوژیکی پوشش های نانو کامپوزیتی نیکل (Ni) - نانولوله کربنی (CNT) ساخته شده به روش الکتروشیمیایی می باشد که در آن CNTs به عنوان ماده روانکار جامد اضافه شده اند. در این تحقیق تاثیر پارامترهای مختلف ایجاد پوشش Ni-CNTs به روش لایه نشانی الکتروشیمیایی بر روی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در رفتار تریبولوژیکی این پوشش ها مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش تحقیق

پوشش نیکل همراه با نانوذرات توسط روش آبکاری پالسی در حمام واتس آبکاری شده اند. ترکیب شیمیایی حمام مورد استفاده و همچنین شرایط آبکاری نمونه ها در جدول ۱ آورده شده است. pH حمام آبکاری، در ابتدای هر آزمایش به وسیله محلول های اسید سولفوریک ۱۰٪ و یا آمونیاک ۱۰٪ در میزان ۳/۵ ثابت نگه داشته می شد. از ورق فولادی ضد زنگ ۳۰۴ با ابعاد ۲۰ سانتی متر مربع به عنوان کاتد استفاده شد. در این تحقیق از ورق نیکلی با خلوص بسیار بالا (۹۹/۹۷٪) به عنوان آنود استفاده گردیده است. نمونه های فولاد ضد زنگ ابتدا توسط سنباده های کاغذی کاربید سیلیسیم از ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ سنباده زنی شدند. چربی گیری نمونه ها توسط استون در حمام فراصوتی به مدت ۲ دقیقه انجام شد. سپس نمونه را در محلول قلیایی سدیم هیدروکسید ۳۵٪ و سدیم کربنات ۲۵٪ وزنی به مدت ۲ دقیقه در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد قرار داده و سپس با آب مقطر شست و شو شدند. نمونه ها دقیقاً قبل از انجام پوشش دهی در محلول اسیدشویی Woods (جدول ۲) به مدت ۲۰ ثانیه مورد عملیات اسیدشویی قرار می گرفتند و سپس با آب مقطر شسته می شدند [۱۸].

^۱ - Redlich

جدول ۱. ترکیب شیمیایی حمام و شرایط آبکاری نمونه ها.

مقدار (cc)	اجزا
250(g/l)	NiSO ₄ .6H ₂ O
50(g/l)	NiCl ₂ .6H ₂ O
35(g/l)	H ₃ BO ₃
50(°c)	Temperature
3.5	pH

جدول ۲- ترکیب شیمیایی محلول اسیدشویی نمونه های فولاد ضد زنگ.

غلظت	اجزا
۴۵ گرم بر لیتر	نیکل (به صورت نیکل کلرید)
۱۰ درصد حجمی	کلریدریک اسید
۵۰-۱۰ آمپر بر دسی متر مربع	چگالی جریان
۲۵ درجه سانتیگراد	دما
۰/۵-۳ دقیقه	زمان
۹۰ گرم بر لیتر	حداکثر غلظت نیکل
نیکل	آند

به دلیل آگلومره شدن CNTs در داخل الکترولیت ، از یکنواخت کننده ی فراصوتی در حین پوشش دهی استفاده شد. در این روش از پروب فراصوتی بندلین مدل SONOPULS HD 3200 با فرکانس ۲۰ کیلو هرتز و

توان ۲۰۰ وات و استفاده همزمان از همزن مغناطیسی استفاده گردید. برای تهیه نمونه های کامپوزیتی از حمام واتس (جدول ۱) که به آن پودر CNT اضافه شده بود، استفاده گردید. این ذرات دارای ابعاد ۸۰ نانومتری ساخت کشور کره بودند. به دلیل یونی بودن شدید حمام واتس، ذرات CNT آگلومره می شدند که این امر پوشش دهی کامپوزیتی را غیر ممکن می ساخت. از این رو از فعال کننده ی سطحی SDS به میزان ۰/۳ گرم بر لیتر در تمامی پوشش های تولیدی استفاده شده است.

جدول ۳ شرایط آبکاری جهت بررسی اثر چگالی جریان بر خواص پوشش را نشان می دهد. با توجه به مقدار سطح زیر لایه ، چگالی جریان از طریق تنظیم کردن جریان کاری قابل محاسبه خواهد بود.

جدول ۳- شرایط پوشش دهی نمونه های نانو کامپوزیتی برای بررسی چگالی جریان.

شناسه نمونه	CNT غلظت (mg.ml^{-1})	چگالی جریان (mA.dm^{-2})	زمان پوشش دهی (min)
B	۰/۴۴	۴	۵
F	۰/۴۴	۸	۵
D	۰/۴۴	۱۰	۵
E	۰/۴۴	۱۲	۵

جدول ۴ شرایط آبرکاری جهت بررسی اثر غلظت CNT موجود در حمام آبرکاری بر خواص سایشی پوشش ها را نشان می دهد. برای بررسی تغییرات این پارامتر، پارامترهای دیگر ثابت نگه داشته شدند. برای تمام نمونه ها زمان پوشش دهی به مدت ۵ دقیقه انتخاب شده است.

جدول ۴- شرایط پوشش دهی نمونه های نانو کامپوزیتی برای بررسی غلظت CNT.

شناسه نمونه	غلظت CNT (mg.ml^{-1})	چگالی جریان (mA.dm^{-2})	زمان پوشش دهی (min)
F	۰/۴۴	۸	۵
G	۰/۶	۸	۵
H	۱/۰	۸	۵

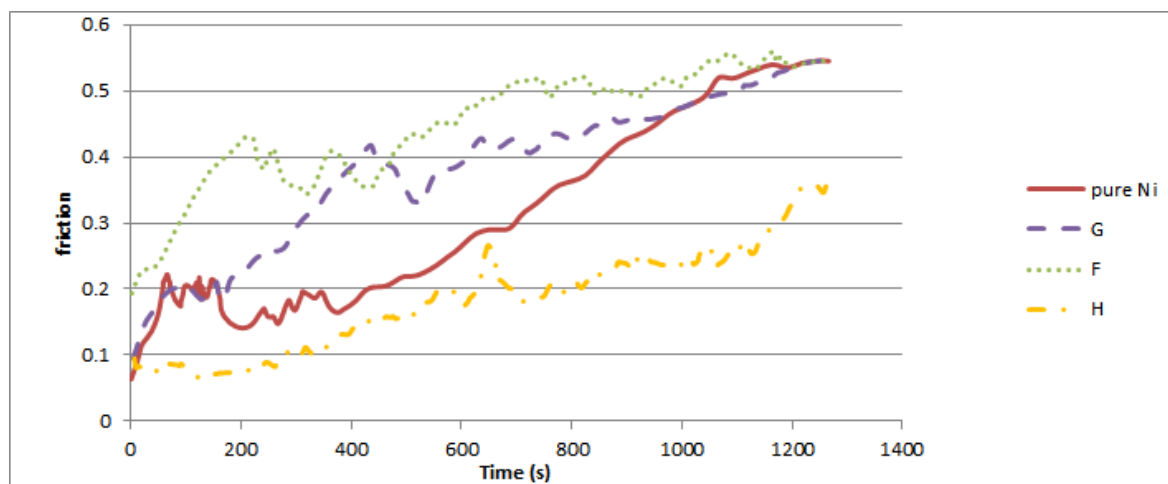
برای تعیین رفتار تریبولوژیکی پوشش ها از دستگاه تریبومتر پین بر روی دیسک در دمای اتاق و رطوبت ۳۵٪ با استاندارد ASTM G99 استفاده شد. قطر نمونه های آزمون ۲,۳ سانتی متر و ضخامت آن ۱ میلی متر می باشد. برای بررسی خواص سایشی پوشش ها، با روش پین روی دیسک قطر نمونه های آزمون ضریب اصطکاک ۲,۳ سانتی متر و ضخامت آن ۱ میلی متر می باشد. پین فولادی از نوع SAE۵۲۱۰۰ با سختی HRC ۶۴ و قطر ۷ میلی متر در تماس با نمونه در نظر گرفته شد. برای هر نمونه، آزمون با بار اعمالی ۱,۵ نیوتن و سرعت خطی لغزش ۰,۰۵ متر بر ثانیه در مسیر دایره ای شکل به شعاع ۱ سانتی متر بود. ضرایب اصطکاک پوشش ها در مسافت ۴۰ تا ۶۰ متر به مدت ۴۰۰ ثانیه بدست آمد.

نتایج و بحث

در این پژوهش پوشش ها با پارامترهای متفاوتی چون چگالی جریان مختلف و همچنین غلظت های مختلف CNT تهیه شده اند و برای بررسی تاثیر این پارامترها بر رفتار تریبولوژیکی پوشش، تعیین ضریب اصطکاک پوشش ها با استفاده از دستگاه تریبومتر انجام شده است. نتایج این آزمون که به صورت ضریب اصطکاک بر حسب مسافت طی شده پین بر روی نمونه است در شکل های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به نمودارهای بدست آمده از آزمون سایش که به روش پین روی دیسک انجام شده است، می توان دریافت که ضریب اصطکاک پوشش نیکل خالص به مقدار ۰/۵۶۷ می باشد که پس از ترکیب آن با CNT در تمام پوشش ها

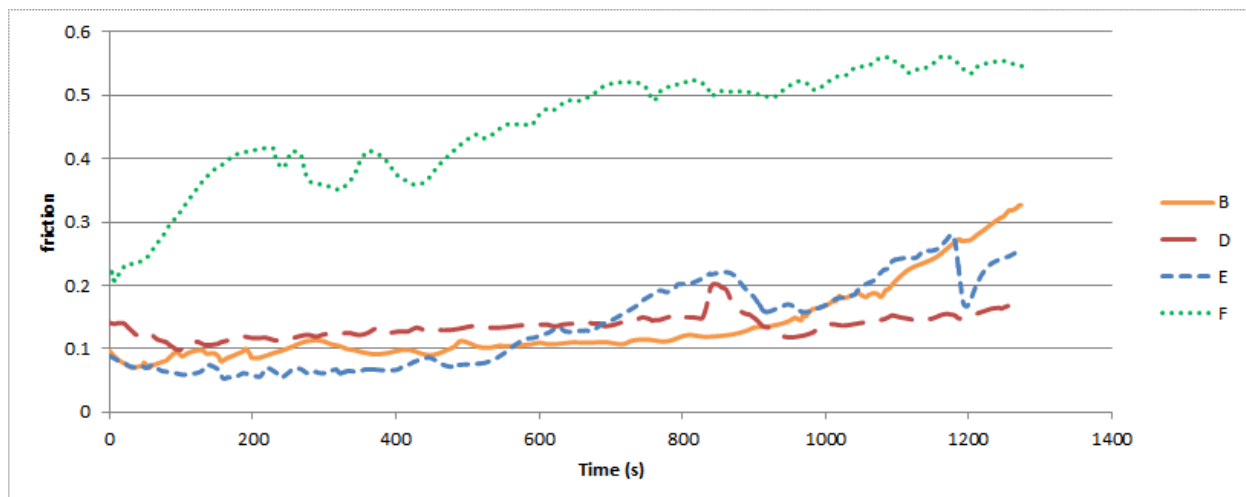
ضریب اصطکاک کاهش یافته است [۱۲]. بیشترین تغییر در ضریب اصطکاک، مربوط به پوشش D، با حمام آبکاری دارای غلظت 0.44 mg.mL^{-1} و چگالی جریان کاری 2 A.dm^{-2} می باشد که به مقدار 0.299 کاهش یافته است. در چگالی جریان های کمتر از 10 A.dm^{-2} افزودن CNT به حمام آبکاری تغییر چندانی در ضریب اصطکاک ایجاد نمی کند. اما پوشش کامپوزیتی حاوی 1 mg.mL^{-1} نانولوله های کربنی، به علت بیشتر بودن CNT، ضریب اصطکاک آن نسبت به غلظت های دیگر، کاهش بیشتری داشته است. همچنین CNT به عنوان روان ساز عمل کرده و باعث کاهش ضریب اصطکاک در این پوشش گردیده است. در پوشش های F و G این ضریب بسیار نزدیک به ضریب اصطکاک پوشش نیکل خالص می باشد که علت آن چگالی پایین تر CNT در پوشش نسبت به پوشش H می باشد [۱۴]. هرچه میزان CNT در پوشش بیشتر باشد، به علت فاصله کمتر CNT، نقش روان سازی بیشتر قابل مشاهده بوده در نتیجه ضریب اصطکاک پوشش کمتر خواهد بود [۱۲]. افزودن 0.44 mg.mL^{-1} نانولوله های کربنی به حمام آبکاری نیکل در چگالی جریان های 10 و 12 A.dm^{-2} باعث می شود که ضریب اصطکاک آن به میزان تقریباً ۵۰ درصد کاهش یابد.

نمودار ضریب اصطکاک پوشش ها بر حسب زمان انجام آزمون سایش در شکل های ۴ و ۵ به ترتیب برای پوشش های دارای حمام با غلظت های متفاوت CNT و چگالی جریان های مختلف آورده شده است.



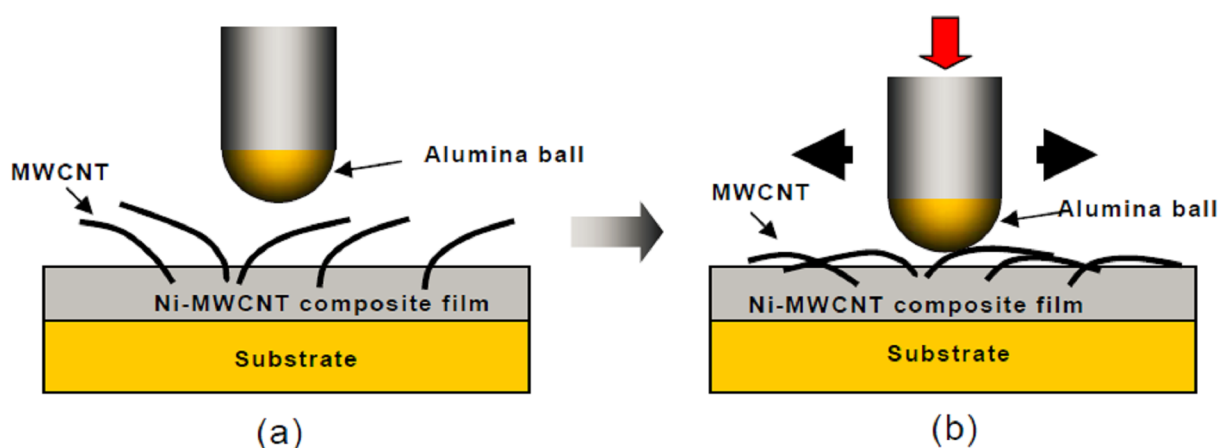
شکل ۱. نمودار ضریب اصطکاک پوشش های نیکل خالص و کامپوزیتی نیکل-CNT بدست آمده با غلظت های مختلف CNT

در چگالی جریان کاری 8 A.dm^{-2}



شکل ۲. نمودار ضریب اصطکاک پوشش های کامپوزیتی نیکل-CNT در چگالی جریان کاری مختلف.

برای مشخص شدن اثر نانولوله ای کربنی در کاهش اصطکاک، طرحواره ای از سازوکار روانکاری پوشش های حاوی CNT شکل ۳ نشان داده شده است. نانولوله های کربنی چند دیواره به صورت رانوم در سطح پوشش نانوکامپوزیتی توزیع شده اند. در هنگامی که زمینه نیکلی با تغییر شکل پلاستیک مواجه شود (شرایط حرکت سیم در براکت ارتودنسی)، بنابراین نانولوله های کربنی به تدریج در جهت افقی آرایش می یابد که نتیجه آن ضریب اصطکاک کمتر خواهد شد [۱۴].



شکل ۳. شماتیک رفتار پوشش حین تست سایش (a) قبل از تست (b) بعد از تست [۱۴].

نتیجه گیری

- (۱) در چگالی جریان های کمتر از 10 A.dm^{-2} افزودن CNT به حمام آبکاری تغییر چندانی در ضریب اصطکاک ایجاد نمی کند. اما پوشش کامپوزیتی حاوی 1 mg.mL^{-1} نانولوله های کربنی، به علت بیشتر بودن CNT، ضریب اصطکاک آن نسبت به غلظت های دیگر، کاهش بیشتری داشته است.
- (۲) افزودن 0.44 mg.mL^{-1} نانولوله های کربنی به حمام آبکاری نیکل در چگالی جریان های 10 و 12 A.dm^{-2} باعث می شود که ضریب اصطکاک آن به میزان تقریباً 50 درصد کاهش یابد.
- (۳) با افزایش بیشینه چگالی جریان آبکاری، به دلیل افزایش قدرت پرتاب حمام، نانولوله های کربنی شانس کمتری برای نشست روی سطح دارند.

تشکر و قدردانی

از جناب آقای دکتر علی اف خضرای برای هر آنچه به من آموختند و برای راهنمایی های ارزنده شان و زحمات بی دریغشان و اینکه اجازه دادند از آزمایشگاه و امکانات ایشان استفاده کنم کمال تشکر و قدردانی را دارم و بی نهایت سپاس گذارم.

مراجع

- [۱] H. Gül, F. Kılıç, S. Aslan, A. Alp, and H. Akbulut, "Characteristics of electro-co-deposited Ni- Al_2O_3 nano-particle reinforced metal matrix composite (MMC) coatings," *Wear*, vol. ۲۶۷, no. ۵-۸, pp. ۹۷۶-۹۹۰, Jun. ۲۰۰۹.
- [۲] H. Gül, F. Kılıç, M. Uysal, S. Aslan, A. Alp, and H. Akbulut, "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. ۲۵۸, no. ۱۰, pp. ۴۲۶۰-۴۲۶۷, Mar. ۲۰۱۲.
- [۳] S. A. Lajevardi, T. Shahrabi, and V. Hasannaemi, "Synthesis and mechanical properties of nickeltitania composite coatings," *Materials and Corrosion*, vol. ۶۲, no. ۱, pp. ۲۹-۳۴, Jan. ۲۰۱۱.
- [۴] S. A. Lajevardi and T. Shahrabi, "Effects of pulse electrodeposition parameters on the properties of Ni-TiO₂ nanocomposite coatings," *Applied Surface Science*, vol. ۲۵۶, no. ۲۲, pp. ۶۷۷۵-۶۷۸۱, Sep. ۲۰۱۰.
- [۵] D. Thiemi, R. Lange, and A. Bund, "Influence of pulse plating parameters on the electrocodeposition of matrix metal nanocomposites," *Electrochimica Acta*, vol. ۵۲, no. ۲۵, pp. ۷۳۶۲-۷۳۷۱, Sep. ۲۰۰۷.
- [۶] S. T. Aruna, V. K. William Grips, and K. S. Rajam, "Ni-based electrodeposited composite coating exhibiting improved microhardness, corrosion and wear resistance properties," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. ۴۶۸, no. ۱-۲, pp. ۵۴۶-۵۵۲, Jan. ۲۰۰۹.
- [۷] R. Jendrzewski, K. Van Acker, D. Vanhoyweghen, and G. Śliwiński, "Metal matrix composite production by means of laser dispersing of SiC and WC powder in Al alloy," *Applied Surface Science*, vol. ۲۵۵, no. ۱۰, pp. ۵۵۸۴-۵۵۸۷, Mar. ۲۰۰۹.
- [۸] R. Bose and G. P. Kalaignan, "Fortification of Ni-Y₂O₃ nanocomposite coatings prepared by pulse and direct current methods," pp. ۴۹۵-۵۰۱, ۲۰۱۱.
- [۹] D. Thiemi and A. Bund, "Characterization of electrodeposited Ni-TiO₂ nanocomposite coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۲, no. ۱۳, pp. ۲۹۷۶-۲۹۸۴, Mar. ۲۰۰۸.
- [۱۰] R. Bose and G. P. Kalaignan, "Fortification of Ni-Y₂O₃ nanocomposite coatings prepared by pulse and direct current methods," *Ionics*, vol. ۱۷, no. ۶, pp. ۴۹۵-۵۰۱, Apr. ۲۰۱۱.
- [۱۱] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, J. a Szpunar, and D. J. Li, "Tribocorrosion behaviour of Al/Al₂O₃ MMC produced by ARB process," *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, vol. ۵, no. ۱, pp. ۱۰-۱۵, Mar. ۲۰۱۱.
- [۱۲] T. Nickchi, M. Ghorbani, a. Alfantazi, and Z. Farhat, "Fabrication of low friction bronze-CNTs nano-composite coatings," *Materials & Design*, vol. ۳۲, no. ۶, pp. ۳۵۴۸-۳۵۵۳, Jun. ۲۰۱۱.
- [۱۳] S. C. Sharma, B. M. Satish, B. M. Girish, and D. R. Somashekar, "Wear characteristics of phosphor-bronze/silicon carbide particulate composites," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. ۱۱۸, no. ۱-۳, pp. ۶۵-۶۸, Dec. ۲۰۰۱.
- [۱۴] H. Zhao, L. Liu, W. Hu, and B. Shen, "Friction and wear behavior of Ni-CNTs composites prepared by electroforming," *Materials & Design*, vol. ۲۸, no. ۴, pp. ۱۳۷۴-۱۳۷۸, Jan. ۲۰۰۷.
- [۱۵] K. . Hou, M. . Ger, L. . Wang, and S. . Ke, "The wear behaviour of electro-codeposited Ni-SiC composites," *Wear*, vol. ۲۵۳, no. ۹-۱۰, pp. ۹۹۴-۱۰۰۳, Nov. ۲۰۰۲.
- [۱۶] Y. Wang, S. Lim, J. L. Luo, and Z. H. Xu, "Tribological and corrosion behaviors of Al₂O₃/polymer nanocomposite coatings," *Wear*, vol. ۲۶۰, no. ۹-۱۰, pp. ۹۷۶-۹۸۳, May ۲۰۰۶.

- [۱۷] B. Szczygieł and M. Kołodziej, "Composite Ni/Al₂O₃ coatings and their corrosion resistance," *Electrochimica Acta*, vol. ۵۰, no. ۲۰, pp. ۴۱۸۸-۴۱۹۵, Jul. ۲۰۰۵.
- [۱۸] P. Baghery, M. Farzam, A. B. Mousavi, and M. Hosseini, "Ni-TiO₂ nanocomposite coating with high resistance to corrosion and wear," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۴, no. ۲۳, pp. ۳۸۰۴-۳۸۱۰, Aug. ۲۰۱۰.
- [۲۰] Q. Feng, T. Li, Z. Zhang, J. Zhang, M. Liu, and J. Jin, "Preparation of nanostructured Ni/Al₂O₃ composite coatings in high magnetic field," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۱, no. ۱۴, pp. ۶۲۴۷-۶۲۵۲, Apr. ۲۰۰۷.
- [۲۱] N. S. Qu, D. Zhu, K. C. Chan, W. N. Lei, "*Pulse electrodeposition noncrystalline nickel using ultra narrow pulse width and high peak current density*", *Surface and coating technology*, PP. 123-128, 2003.
- [۲۲] Y. S. Dong, P. H. Lin, and H. X. Wang, "Electroplating preparation of Ni-Al₂O₃ graded composite coatings using a rotating cathode," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۰, no. ۱۱, pp. ۳۶۳۳-۳۶۳۶, Mar. ۲۰۰۶.
- [۲۳] K. Barmak, S.W. Bonovic, etc, "Processing and Properties of Electrodeposited Functionally Graded Composite Coatings of Ni-Al-Al₂O₃," pp. ۲۲۷-۲۳۲, ۱۹۹۷.
- [۲۴] R. Mishra, B. Basu, R. Balasubramaniam, "*Effect of grain size on tribological behaviour of nano crystalline nickel*", *Material Science and Engineering* , Vol. A373, PP. 370-373, 2004.
- [۲۵] Redlich M et al. improved orthodontic stainless steel wires coating with inorganic fullerene like phosphorous film dental materials ۲۰۰۸ 24 (12) 1640-1646 4 7.