

بررسی خواص ریزساختاری، مکانیکی، الکتروشیمیایی و سایشی پوشش نانوکامپوزیت مس نیکل/آلومینا

چکیده

در این پژوهش، پوشش کامپوزیت $\text{CuNi}/(2\text{g/L})\text{Al}_2\text{O}_3$ به روش آبکاری الکتریکی پالس تهیه شد و تأثیر حضور نانوذرات آلومینا بر خواص ریزساختاری، الکتروشیمیایی و سایشی پوشش مورد بررسی قرار گرفت. جایگذاری نانوذرات آلومینا درون پوشش موجب کاهش ضخامت از ۳۳ به ۲۱ میکرومتر و افزایش فشردگی آن شد. بررسی‌های میکروسختی حاکی از آن بود که ورود نانوذرات آلومینا از طریق مکانیسم پراکنده‌سختی، سبب افزایش ۲۶ درصدی میکروسختی پوشش کامپوزیت نسبت به پوشش آلیاژی شد. نتایج آزمون پلاریزاسیون نشان داد که حضور نانوذرات، با کاهش سطح فعال فلزی و به حداقل رساندن نفوذ مایع خورنده ناشی از پرشدن حفرات سبب کاهش چگالی جریان خوردگی از $1/85 \times 10^{-5}$ به $1/48 \times 10^{-5}$ آمپر بر سانتی‌متر مربع شد و به تبع آن مقاومت در برابر خورگی افزایش یافت. علاوه بر این، بررسی‌های سایشی نشان دادند که مقاومت در برابر سایش پوشش کامپوزیتی ناشی از کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۶۳۸ به ۰/۲۵۴ و عمق سایش از ۱۲ به ۸ میکرومتر افزایش یافت.

کلمات کلیدی: آبکاری الکتریکی، کامپوزیت، خوردگی، سایش، سختی

Investigation of Microstructural, Mechanical, Electrochemical and Wear Properties of CuNi/Al₂O₃ Nanocomposite Coating

Abstract

In this study, a CuNi/(2g/L)Al₂O₃ composite coating was prepared by pulse electroplating and the effect of the presence of alumina nanoparticles on the microstructural, electrochemical and wear properties of the coating was investigated. The inclusion of alumina nanoparticles in the coating reduced the thickness from 33 to 21 μm and increased its compactness. Microhardness studies indicated that the introduction of alumina nanoparticles through the mechanism of dispersed hardness increased the microhardness of the composite coating by 26% compared to the alloy coating. The results of the polarization test showed that the presence of nanoparticles, by reducing the active metal surface and minimizing the penetration of corrosive liquid due to the filling of pores, reduced the corrosion current density from 1.85×10^{-5} to 1.48×10^{-5} A/cm², and consequently increased the corrosion resistance. In addition, abrasion studies showed that the wear resistance of the composite coating increased due to a reduction in the friction coefficient from 0.638 to 0.254 and the wear depth from 12 to 8 μm .

Keywords: Electroplating, Composite, Corrosion, Wear, Microhardness

۱. مقدمه

با پیشرفت‌های اخیر در فناوری رسوب‌دهی پوشش‌ها، امکان ایجاد مواد پوششی چندمنظوره جدید برای استفاده در تمامی زمینه‌های ممکن فراهم شده‌است. این پیشرفت‌ها در پوشش‌دهی، نگرش نسبت به حفاظت از سطح مواد را تغییر داده‌است. امروزه از تکنیک‌های مختلف مهندسی سطح، مانند آبکاری الکتریکی، اسپری حرارتی و رسوب فیزیکی بخار استفاده می‌شود که نقش مهمی در سازمان‌دهی رشد ذرات و تعریف خواص ساختاری، ریزساختاری، مکانیکی و الکتریکی ایفا می‌کنند [۱-۳]. این تغییرات در ویژگی‌ها، کاربردهای متنوعی را برای این پوشش‌ها به‌ویژه در زمینه خواص مکانیکی و تریبولوژیکی برای کاربردهای سخت و مقاوم در برابر سایش ایجاد کرده‌است. تلاش‌های بسیاری برای بهبود ظاهر و خواص سطحی قطعات فلزی از طریق تغییر ترکیب مواد و شرایط رسوب‌دهی صورت گرفته است [۴]. این اقدامات به منظور محافظت در برابر سایش، خوردگی و همچنین کاهش هزینه انجام می‌شوند، زیرا تمامی این عوامل بر انهدام و تخریب قطعات صنعتی تأثیرگذار هستند. از میان روش‌های مختلف رسوب‌دهی، آبکاری الکتریکی یکی از ساده‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌هاست که امکان کنترل دقیق پارامترهای رسوب‌دهی را فراهم می‌کند. این روش قابلیت اعمال پوشش بر روی اشکال با هندسه متفاوت مانند سیم، صفحه و داخل لوله را دارد [۵]. در روش آبکاری الکتریکی، با عبور جریان مناسب

بین دو الکترود درون محلول الکترولیت، پوششی همگن و متراکم با چسبندگی مناسب به زیرلایه حاصل می‌شود. در این روش، مواد مختلفی از جمله کامپوزیت‌ها، آلیاژها و فلزات خالص می‌توانند برای پوشش‌دهی سطح به کار گرفته شوند. به‌منظور بهبود خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و مقاومت در برابر خوردگی، ترکیب‌های مختلفی از مواد و شرایط رسوب‌دهی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [۶]. هم‌رسوبی کامپوزیت‌های سرامیکی در یک زمینه فلزی برای افزایش خواص مواد به کار گرفته می‌شود. پوشش‌های زمینه فلزی مانند نیکل، مس و نقره با مواد سرامیکی مختلف به‌عنوان فاز دوم ترکیب می‌شوند تا رفتار مکانیکی و الکتروشیمیایی آن‌ها را ارتقا دهند. ذرات فاز دوم رایج شامل اکسیدها [۷] SiO_2 مانند، CeO_2 [۸]، MoS_2 [۹]، SrSO_4 [۱۰]، کاربیدها مانند SiC [۱۱]، B_4C [۱۲]، نیتrideها مانند Si_3N_4 [۱۳] و حتی پلیمرها [۱۴] نیز هستند. در پوشش‌دهی به‌روش آبکاری الکتریکی، به‌منظور تولید پوشش‌های کامپوزیت، ذرات نامحلول در الکترولیت معلق شده و همراه با کاتیون‌های فلزی از طریق فرآیند الکترولیز کامپوزیتی هم‌رسوب می‌شوند. پوشش‌های آلیاژی نیکل کاربرد گسترده‌تری نسبت به پوشش‌های خالص نیکل پیدا کرده‌اند. معمولاً پوشش‌های پایه نیکل از نظر مکانیکی ضعیف هستند اما مقاومت در برابر خوردگی بالایی دارند. افزودن یک فاز دوم به‌ویژه تقویت‌کننده‌های سرامیکی سخت در زمینه فلزی می‌تواند خواص مکانیکی آن را به‌طور چشمگیری تغییر دهد [۱۵].

اخیرا، ساخت پوشش‌های کامپوزیتی نیکل با هم‌رسوبی ذرات نانو/میکرومتری در زمینه آلیاژی مانند Ni-W [۱۶]، Zn-Ni [۱۷]، Ni-Fe [۱۵]، Ni-Co [۱۸] و Ni-Cu [۱۹] مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته‌است. در پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکل، برخی گزارش‌ها درباره استفاده از فازهای سخت مانند Al_2O_3 [۲۰]، Si_3N_4 [۲۱]، SiC [۲۲]، Cr_2O_3 [۲۳]، WC [۲۴]، الماس [۲۵] و گرافیت [۲۶] موجود است. این فازهای سخت به‌عنوان یک مانع فیزیکی در برابر حرکت نابجایی‌ها و لغزش مرزدانه‌ای عمل کرده و موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی می‌شوند [۲۷]. دو مکانیسم اساسی در فرآیند هم‌رسوبی ذرات شامل پراکندگی فیزیکی ذرات تقویت‌کننده در الکترولیت و مهاجرت الکتروفورتیک ذرات است. ویژگی‌های رسوب به شدت به نوع ذرات مورد استفاده بستگی دارد. علاوه بر خواص اصلی زمینه، حضور ذرات سرامیکی سخت باعث افزایش استحکام مکانیکی و مقاومت در برابر سایش می‌شود، در حالیکه ذرات نرم و روان‌کننده بهبود عملکرد تریبولوژیکی را فراهم می‌کنند. مدل‌های متعددی برای توصیف مکانیسم هم‌رسوبی ذرات در زمینه فلزی در طی فرآیند آبکاری الکتریکی پیشنهاد

شده‌است که مدل جامع اولیه توسط گوگلیلمی ارائه شد [۲۸]. در فرآیند هم‌رسوبی ذرات، مراحل مختلفی رخ می‌دهد که شامل ایجاد ابرهای یونی اطراف ذرات در الکترولیت، همرفت به سمت کاتد، انتشار از طریق لایه مرزی هیدرودینامیکی، انتشار از طریق لایه مرزی غلظتی و در نهایت جذب بر سطح کاتد است، جایی که ذرات در پوشش فلزی به دام می‌افتند. فرآیند هم‌رسوبی تحت تأثیر پارامترهایی مانند مشخصات ذرات (مقدار، بار سطحی، شکل و اندازه)، ترکیب الکترولیت، غلظت، pH، دما، نوع فعال‌کننده سطح، چگالی جریان و شرایط محیطی قرار دارد [۲۹]. در این پژوهش، برای اولین بار اثر افزودن نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش CuNi ساخته‌شده به‌روش آبکاری پالسی بر خواص ریزساختاری، مکانیکی، الکتروشیمیایی و رفتار سایشی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف از افزودن نانوذرات آلومینا، کاهش سطح فعال فلزی و پر شدن حفرات موجود در زمینه آلیاژ به‌منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی بود. علاوه بر آن، دیگر هدف افزودن این نانوذرات، بهبود خواص سختی و افزایش خواص تریبولوژیکی ناشی از پراکنده‌سختی بود.

۲. روش تحقیق

در این پژوهش، پوشش کامپوزیتی $CuNi/Al_2O_3$ بر روی زیرلایه فولاد کربنی با استفاده از روش آبکاری الکتریکی رسوب‌گذاری شد. ترکیب الکترولیت در

جدول ۱ نشان داده شده‌است. به‌منظور تثبیت مقدار pH حمام و دستیابی به پوشش یکنواخت، از اسید بوریک استفاده گردید که علاوه بر کمک به یکنواختی پوشش، چسبندگی لایه ایجادشده به

زیرلایه را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین، سدیم دودسیل سولفات جهت کاهش کشش سطحی محلول بکار گرفته شد که از تشکیل حباب‌های گازی بر روی سطح جلوگیری کرده و مانع از ایجاد نقص‌هایی نظیر حفره‌ها و لکه‌های سطحی در پوشش نهایی می‌شود. نمک‌های سولفات نیکل و مس به‌عنوان منابع اصلی یون‌های فلزی در حمام الکتrolیتی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از نانوذرات آلومینا به‌عنوان ذرات فاز دوم درون محلول استفاده شد. برای بهبود توزیع یکنواخت نانوذرات آلومینا و جلوگیری از تجمع و کلوخه شدن این ذرات پیش از افزودن درون محلول، تحت امواج فراصوت به مدت یک ساعت پراکنده شدند. پارامترهای عملیاتی شامل چگالی جریان ۶ آمپر بر دسی‌متر مربع، pH برابر ۴، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و مدت‌زمان پوشش‌دهی ۱۸ دقیقه تنظیم شد. پیش از اعمال پوشش، سطح نمونه‌های فولادی با استفاده از سنباده‌هایی با شماره‌های مختلف از ۸۰ تا ۳۰۰۰ پرداخت شده و عملیات چربی‌زدایی بر روی آن‌ها انجام گردید. سپس، سطح نمونه‌ها با آب مقطر و شوینده مناسب شسته شده و برای فعال‌سازی سطحی در محلول اسید کلریدریک با غلظت ۷/۵ درصد حجمی غوطه‌ور شدند. در فرآیند پوشش‌دهی، از یک آند نیکلی با خلوص ۹۹/۹ درصد و ابعاد $۵ \times ۳ \times ۰/۲$ سانتی‌متر مکعب و یک کاتد فولاد کربنی با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر مربع استفاده شد که با فاصله ۲ سانتی‌متر از یکدیگر قرار گرفتند. برای اطمینان از یکنواختی پوشش، محلول الکتrolیت در طول فرآیند با یک همزن مغناطیسی با سرعت ۳۵۰ دور در دقیقه

مخلوط گردید. پوشش‌دهی با استفاده از جریان پالس و دستگاه QTD20.241 انجام شد. به‌منظور ارزیابی ترکیب شیمیایی و بررسی مورفولوژی سطح پوشش، از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل TESCAN (MIRA 3 LMU) استفاده گردید. همچنین، دستگاه FemtoScan برای آنالیز نیروی اتمی جهت اندازه‌گیری زبری و توپوگرافی سطح بکار رفت. اندازه‌گیری میکروسختی پوشش در پنج نقطه مختلف با استفاده از دستگاه NOVOTEST/UKRAINE انجام شد و میانگین آن ثبت گردید. آزمون پلاریزاسیون پس از غوطه‌وری نمونه‌ها در محلول ۵ درصد وزنی سدیم کلرید به مدت یک ساعت، با دستگاه پتانسیواستات/گالوانوستات Solarton-SI1287 ساخت ایالات متحده انجام شد. این آزمون در یک محفظه استاندارد سه الکتroدی شامل نمونه به‌عنوان الکتroد کار، الکتroد مرجع Ag/AgCl و الکتroد کمکی پلاتینی انجام گردید. سرعت روبش برای اندازه‌گیری پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، ۲ میلی‌ولت بر ثانیه تنظیم شد.

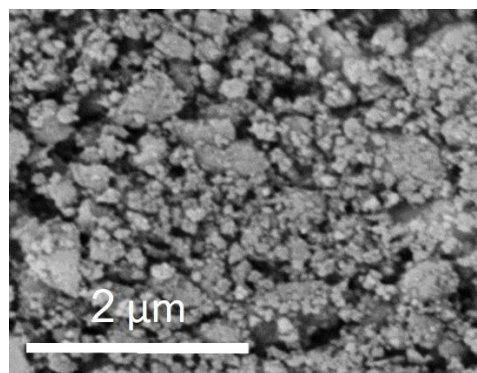
جدول ۱. ترکیب حمام آبرکاری کامپوزیت $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ تولید شده به روش آبرکاری پالس.

ترکیب	مقادیر (گرم بر لیتر)	خلوص (%)	محل تهیه
سولفات نیکل	۲۰۰	۹۹	مرک آلمان
سولفات مس	۱۰	۹۹/۵	مرک آلمان
بوریک اسید	۴۰	۹۹/۵	مرک آلمان
سدیم دودسیل	۰/۰۵	۹۹	مرک آلمان
سولفات آلومینا	۲	۹۹/۹۹	نانومت

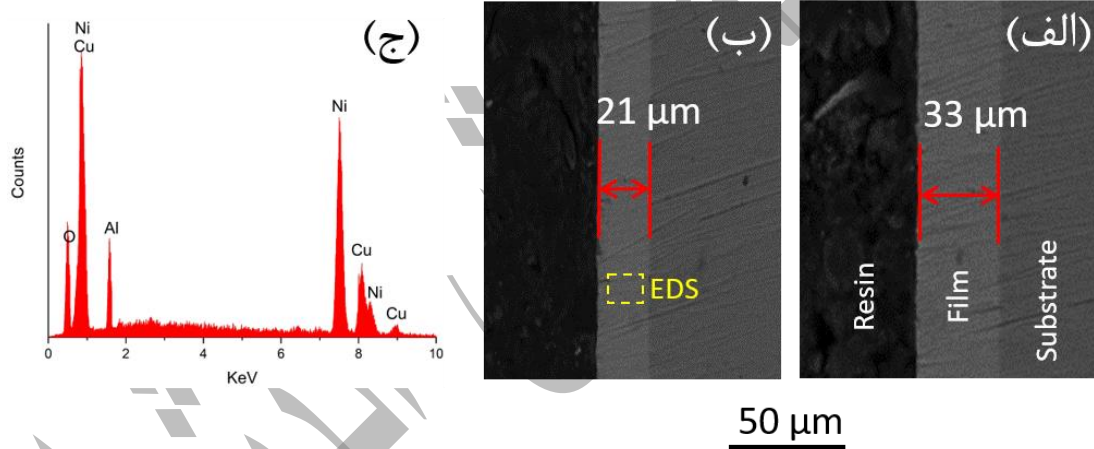
۳. نتایج و بحث

در شکل ۱، تصویر SEM از پودر نانوذرات آلومینا مورد استفاده در پوشش نشان داده شده است. اندازه این ذرات زیر ۵۰ نانومتر بوده است با این حال، بدلیل کلوخه شدن اندازه آن‌ها درشت‌تر مشاهده می‌شود. در شکل ۲ الف و ب، به ترتیب تصاویر SEM از ضخامت پوشش‌های CuNi و $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ نشان داده شده است. همچنین آنالیز EDX از ضخامت پوشش $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (مشخص شده بر روی تصویر ۲ ب) در شکل ۲ ج، نشان داده شده است. آنالیز EDX از سطح نمونه کامپوزیت حضور عناصر نیکل، مس و آلومینا را در زمینه پوشش نشان می‌دهد. با توجه به تصاویر SEM می‌توان مشاهده کرد نرخ رسوب‌گذاری پوشش‌ها بر روی زیرلایه کاملاً یکنواخت بوده

بطوریکه ضخامت پوشش در همه قسمت‌ها یکسان می‌باشد. ضخامت مربوط به پوشش‌های CuNi و $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ به ترتیب ۳۳ و ۲۱ میکرومتر بدست آمده است. به عبارتی نتایج نشان می‌دهد در اثر ورود نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش در مدت زمان پوشش‌دهی یکسان، ضخامت پوشش کاهش یافته و پوشش کامپوزیت فشرده‌تر شده است. مطابق پژوهش‌های پیشین احتمالاً حضور نانوذرات در پوشش به عنوان موانعی در برابر رشد دانه عمل کرده و از این طریق نرخ رسوب‌گذاری کاهش می‌یابد [۳۰ و ۳۱].



شکل ۱. تصویر SEM از پودر نانوذرات آلومینا.



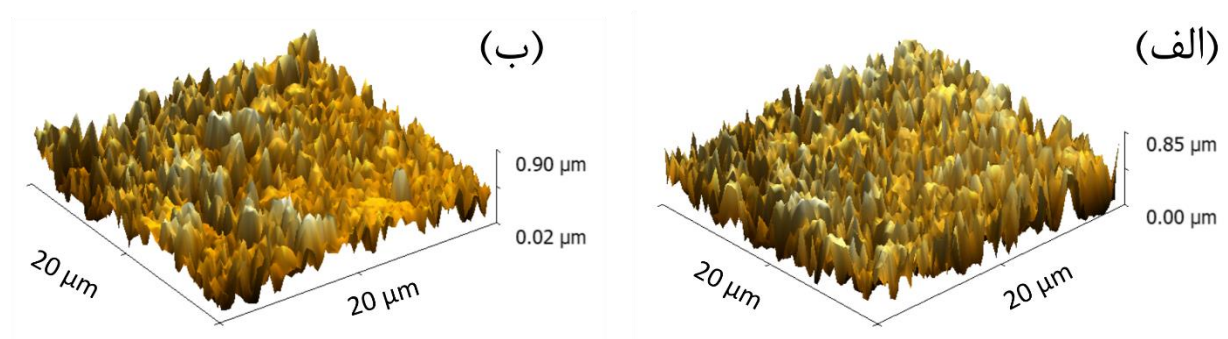
شکل ۲. (الف) تصویر SEM از پوشش CuNi، (ب) پوشش کامپوزیت CuNi/Al₂O₃ و (ج) تجزیه و تحلیل EDS از سطح پوشش کامپوزیت تصویر ب.

کامپوزیت در اثر ورود نانوذرات آلومینا افزایش یافته است. دلیل این امر در طول رسوب گذاری الکتریکی می تواند به دو عامل نسبت داده شود: (۱) کلوخه شدن نانوذرات آلومینا بر روی سطح پوشش کامپوزیت و (۲) رسوب گذاری دو مرحله ای یون های CuNi؛ به گونه ای که در حضور نانوذرات آلومینا، در

تصاویر سه بعدی AFM از سطح پوشش های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در مساحت ۲۰×۲۰ میکرومتر به ترتیب در شکل ۳ الف و ب، نشان داده شده است. نتایج نشان داد زبری متوسط برای نمونه های CuNi و CuNi/Al₂O₃ به ترتیب ۴۲ و ۵۶ نانومتر بدست آمده است، به عبارتی زبری سطح برای نمونه

افزایش زبری سطح پوشش کامپوزیت شوند [۳۱-۳۳].

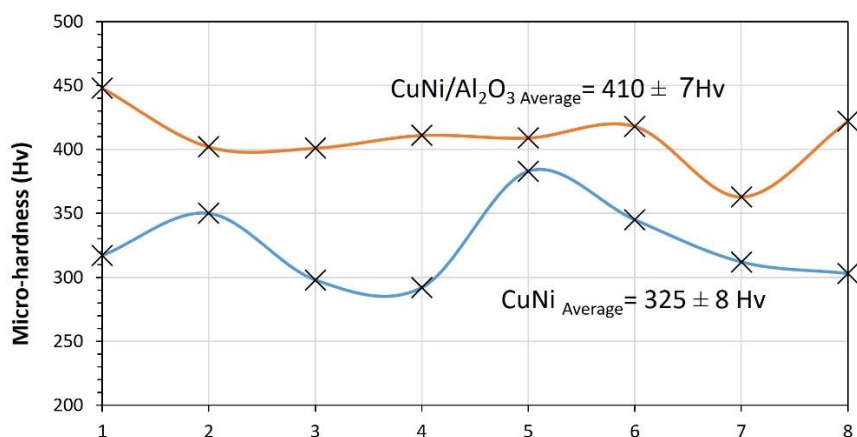
ابتدا یون‌های CuNi بر روی نانوذرات آلومینا رسوب‌گذاری شده و سپس بر روی زیرلایه رسوب‌گذاری می‌شوند. این دو عامل می‌توانند باعث



شکل ۳. آنالیز سه‌بعدی AFM از سطح پوشش‌های CuNi (الف) و CuNi/Al₂O₃ (ب).

پراکنده سختی ناشی از حضور نانوذرات. به عبارتی نانوذرات توزیع شده بر روی سطح، به‌عنوان موانعی در برابر تحرک نابجایی‌ها قرار گرفته و با قفل آن‌ها، میکروسختی مربوط به نمونه کامپوزیت را افزایش می‌دهد [۳۴ و ۳۵].

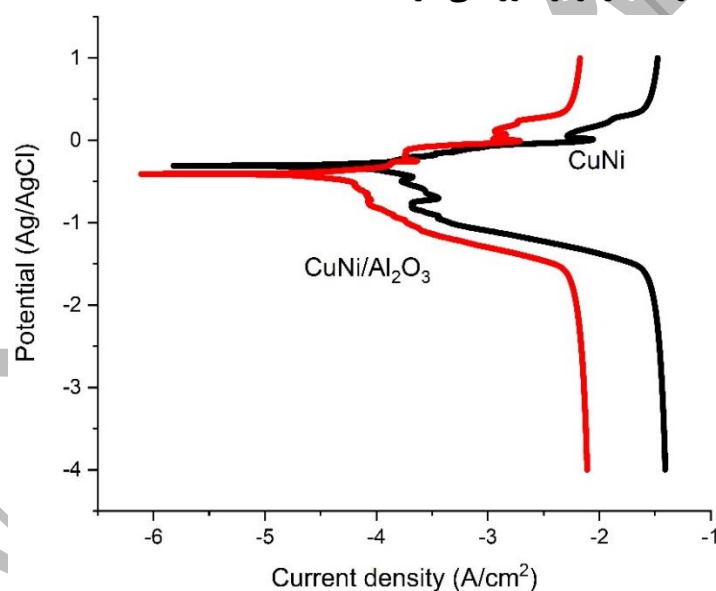
در شکل ۴، نتایج میکروسختی ویکرز مربوط به پوشش‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در ۸ نقطه مختلف از سطح نشان داده شده‌است. می‌توان مشاهده کرد مقدار سختی برای پوشش کامپوزیت از ۳۲۵ به ۴۱۰ ویکرز افزایش پیدا کرده‌است. دلیل اصلی این امر می‌تواند نسبت داده شود مکانیسم



شکل ۴، میکروسختی ویکرز مربوط به پوشش‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در نقاط مختلف از سطح پوشش.

نمونه کامپوزیت حضور نانوذرات آلومینا است زیرا این نانوذرات به دلیل ماهیت خنثی خود در واکنش‌های الکتروشیمیایی شرکت نکرده و از این طریق سرعت خوردگی را کاهش می‌دهند، علاوه بر آن بر روی سطح به عنوان موانع فیزیکی عمل کرده و از ورود مایع خورنده جلوگیری می‌کند [۳۶-۳۸].

پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در دمای اتاق و پس از غوطه‌وری یک ساعته در محلول ۳/۵ درصد NaCl انجام شد. نتایج پتانسیل خوردگی، چگالی جریان خوردگی و مقاومت پلاریزاسیون در جدول ۲ گزارش شده است. بطور کلی، مقاومت در برابر خوردگی با چگالی جریان خوردگی رابطه عکس دارد. نتایج نشان داد مقاومت در برابر خوردگی مربوط به نمونه کامپوزیت نسبت به نمونه آلیاژی مقدار بالاتری است. اصلی‌ترین عامل افزایش مقاومت در برابر خوردگی در



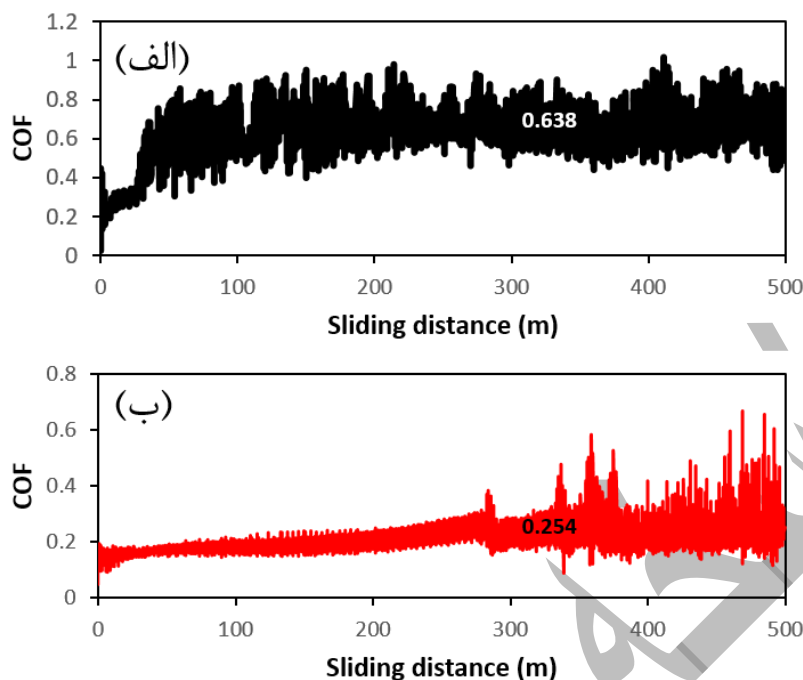
شکل ۵. پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در دمای اتاق.

جدول ۲. داده‌های حاصل از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃.

ترکیب	پتانسیل خوردگی (ولت)	مقاومت پلاریزاسیون (اهم)	چگالی جریان خوردگی (آمپر بر سانتی متر مربع)
CuNi	-۰/۳۰	۱۵۱۸	$1/85 \times 10^{-5}$
CuNi/Al ₂ O ₃	-۰/۴۰	۳۸۴۲	$1/48 \times 10^{-5}$

نمودارهای مربوط به ضریب اصطکاک نمونه‌های CuNi و CuNi/Al₂O₃ به ترتیب در شکل ۶ الف و ب در دمای اتاق و تحت ساینده فولاد H13 بر حسب مسافت لغزشی ۱۰۰ متر تحت نیروی ۴ نیوتن نشان داده شده است. متوسط ضریب اصطکاک مربوط به نمونه CuNi و CuNi/Al₂O₃ به ترتیب ۰/۶۳۸ و ۰/۲۵۴ بدست آمد. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات آلومینا در زمینه CuNi منجر به کاهش متوسط ضریب اصطکاک شد. همچنین با توجه به نتایج می‌توان مشاهده کرد ارتعاشات موجود در نمونه CuNi زیاد هستند و این نشانگر چسبندگی بالای بین پین و جسم مورد سایش است. که احتمالاً اصلی‌ترین مکانیسم برای این نمونه مکانیسم چسبنده است. با این حال در مورد نمونه کامپوزیت شاهد ارتعاشات خفیف هستیم، دلیل اصلی این امر حضور نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش است. زیرا این نانوذرات با قرار گرفتن بر روی سطح پوشش کامپوزیت و کاهش سطح واقعی تماس از تماس مستقیم پین ساینده و جسم جلوگیری کرده و از

ایجاد مکانیسم سایش چسبنده جلوگیری می‌کند. با این حال، در نمونه کامپوزیت لغزش بیشتر از متر ۵۵ متر منجر به افزایش ارتعاشات شده است، احتمالاً پس از ۵۵ متر، نانوذرات آلومینا از سطح پوشش جدا شده و بین دو جسم (ساینده/مورد سایش) قرار می‌گیرد و از این طریق باعث ایجاد خراش‌هایی بر روی سطح جسم نرم‌تر (فلز مورد سایش) می‌شود. عامل دیگری که می‌تواند باعث افزایش مقاومت در برابر سایش نمونه کامپوزیت شود، سختی بالای آن نسبت به نمونه CuNi (مطابق بخش‌های قبلی) است. زیرا در اثر افزودن نانوذرات آلومینا سختی، بهبود پیدا کرده است که همین امر به نوبه خود منجر به این افزایش می‌شود. در جدول ۳، نتایج حاصل از متوسط ضریب اصطکاک و عمق سایش نشان داده شده است که این نتایج تطابق کاملی با افزایش مقاومت در برابر سایش برای نمونه کامپوزیت CuNi/Al₂O₃ دارند [۳۹-۴۲]. متوسط ضریب اصطکاک با جمع تمامی داده‌های ضریب اصطکاک در مسافت لغزشی ۰ تا ۵۰۰ متر و تقسیم بر تعداد آن بدست آمد.



شکل ۶. نمودارهای ضریب اصطکاک مربوط به پوشش‌های CuNi (الف) و CuNi/Al₂O₃ (ب).

جدول ۳. داده‌های بدست آمده از نتایج سایش پین روی دیسک

ترکیب	متوسط ضریب اصطکاک	عمق سایش (میکرومتر)
CuNi	۰/۶۳۸	۱۷
CuNi/Al ₂ O ₃	۰/۲۵۴	۸

رفتار سایشی مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به شرح زیر خلاصه شد:

۱. جایگذاری نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش CuNi منجر به کاهش ضخامت پوشش از ۳۳ به ۲۱ میکرومتر و افزایش فشردگی آن شد.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پوشش کامپوزیت CuNi/Al₂O₃ به‌روش آبکاری الکتریکی پالس ساخته شد و تاثیر حضور نانوذرات آلومینا با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر بر خواص ریزساختاری، میکروسختی، خوردگی و

۲. نتایج میکروسختی نشان داد در اثر ورود نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش ناشی از مکانیسم پراکنده سختی میکروسختی، ۲۶ درصد افزایش پیدا کرد.

۳. نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد به دلیل کاهش سطح فعال فلزی و جلوگیری از نفوذ مایع خورنده ناشی از پر شدن حفرات توسط نانوذرات، دانسیته جریان از $10^{-5} \times 1/85$ به 10^{-5} -۵

$10 \times 1/48$ برای نمونه کامپوزیت کاهش یافت. به عبارتی مقاومت در برابر خوردگی برای نمونه کامپوزیت افزایش پیدا کرد.

۴. مقاومت در برابر سایش برای نمونه کامپوزیت افزایش پیدا کرد که این افزایش با کاهش ضریب اصطکاک از $0/638$ به $0/254$ توجه می شود. علاوه بر آن، عمق سایش برای نمونه کامپوزیت از 12 به 8 میکرومتر کاهش یافت.

مراجع

- [1] Z. Zhong, G. Lin, T. Hu, Z. Wang, S. Wang, H. Xia, S. Li, L. Zhang, A review of external field-enhanced metal electrodeposition: Mechanism and applications, JOM 77 (2025) 665–685. <https://doi.org/10.1007/s11837-024-06968-7>.
- [2] T. Kopač, Tailored alginate and chitosan hydrogels: Structural control and functional applications via copper-based electrodeposition, Int. J. Biol. Macromol. 308 (2025) 142476. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.142476>.
- [3] W. Liu, Q. Zhao, R. Jiang, X. Ni, T. You, C. Li, Y. Deng, B. Xu, Y. Chen, L. Chen, Stereoisomeric Engineering Mediated Zinc Metal Electrodeposition: Critical Balance of Solvation and Adsorption Capability, Adv. Powder Mater. (2025) 100276. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100276>.
- [4] A. Chakraborti, S.K. Das, P. Sahoo, Tailoring the Tribomechanical and Corrosion Behavior of Reverse Pulse Deposited Ni–Co–P Coating Through Cobalt Content Modulation, J. Tribol. 147 (2025). <https://doi.org/10.1115/1.4067283>.
- [5] A. Siddaiah, P. Kumar, A. Henderson, M. Misra, P.L. Menezes, Surface energy and tribology of electrodeposited Ni and Ni-graphene coatings on steel, Lubricants 7 (2019). <https://doi.org/10.3390/lubricants7100087>.
- [6] B. Li, W. Zhang, W. Zhang, Y. Huan, Preparation of Ni-W/SiC nanocomposite coatings by electrochemical deposition, J. Alloys Compd. 702 (2017) 38–50. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.239>.
- [7] R. Li, Y. Hou, B. Liu, D. Wang, J. Liang, Electrodeposition of homogenous Ni/SiO₂

- nanocomposite coatings from deep eutectic solvent with in-situ synthesized SiO₂ nanoparticles, *Electrochim. Acta* 222 (2016) 1272–1280. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.11.101>.
- [8] L. Zhang, C. Shang, F. Wang, T. Zheng, C. Nie, Y. Qiao, G. Sun, X. Wang, Y. Liu, The wear behavior and corrosion resistance properties of Ni-based composite coatings modified with CeO₂ and MoS₂ nanoparticles, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* (2025) 137017. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2025.137017>.
- [9] Y. Zhao, S. Liu, H. Guo, H. Li, J. Zhang, Z. Ma, N. Zhong, W. Li, V. Ji, Mechanistic insights on the microstructural evolution and tribological performance of the Ni-MoS₂ composite coatings electrodeposited under different current densities, *J. Mater. Res. Technol.* (2025). <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.055>.
- [10] X.-S. Liang, J.-H. Ouyang, Y.-F. Li, Y.-M. Wang, Electrodeposition and tribological properties of Ni–SrSO₄ composite coatings, *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009) 4316–4321. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.043>.
- [11] T. Cui, M. Cao, H. Li, Y. Zhang, K. Jiang, Influence of electrodeposition parameters on the fabrication of Ni–Co/SiC+ TiN composite films through pulse current electrodeposition, *Sci. Rep.* 14 (2024) 13111. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64083-8>.
- [12] Y. Zhang, S. Zhang, Y. He, H. Li, T. He, Y. Fan, H. Zhang, Mechanical properties and corrosion resistance of pulse electrodeposited Ni-B/B₄C composite coatings, *Surf. Coatings Technol.* 421 (2021) 127458. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127458>.
- [13] M. Eslami, H. Saghafian, F. Golestani-Fard, A. Robin, Effect of electrodeposition conditions on the properties of Cu–Si₃N₄ composite coatings, *Appl. Surf. Sci.* 300 (2014) 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.021>.
- [14] C. Gong, J. Cui, Y. Sun, S. Shen, J. Li, Uniform electrodeposition of graphene/polypyrrole conductive coatings promoted by graphene quantum dots, *Prog. Org. Coatings* 204 (2025) 109269. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109269>.
- [15] Y. Li, X. Cai, G. Zhang, C. Xu, W. Guo, M. An, Optimization of electrodeposition nanocrystalline Ni-Fe alloy coatings for the replacement of Ni coatings, *J. Alloys Compd.* 903 (2022) 163761. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163761>.
- [16] M. Ye, T. Ding, Z. Hao, F. He, Nucleation and growth mechanism of electrodeposited Ni–W alloy, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 31 (2021) 1842–1852. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(21\)65621-2](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(21)65621-2).
- [17] R.S. Bhat, S.M. Shetty, N.V.A. Kumar, Electroplating of Zn-Ni alloy coating on mild steel and its electrochemical studies, *J. Mater. Eng. Perform.* 30 (2021) 8188–8195. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06051-1>.
- [18] I.M.A. Omar, K.M. Emran, M. Aziz, Electrodeposition of Ni-Co film: a review, *Int. J. Electrochem. Sci.* 16 (2021) 150962. <https://doi.org/10.20964/2021.01.16>.
- [19] M.M. Brito, R.A. Artisiani, I.A. Carlos, The electrodeposition of Ni-Cu and Ni-Cu-P from aspartate-based baths, *J. Alloys Compd.* 890 (2022) 161761.

<https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161761>.

- [20] J. Azizi-Nour, F. Nasirpour, Exploiting magnetic sediment co-electrodeposition mechanism in Ni-Al₂O₃ nanocomposite coatings, *J. Electroanal. Chem.* 907 (2022) 116052. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116052>.
- [21] M. Tizgadam, S. Hengsberger, A. Rasooli, S. Ahmadiyeh, Influence of Si₃N₄ nanoparticles on morphology, hardness and corrosion resistance of electrodeposited Ni-Co-Si₃N₄, *Int. J. Electrochem. Sci.* 17 (2022) 221062. <https://doi.org/10.20964/2022.10.62>.
- [22] C. Ma, H. He, F. Xia, Z. Xiao, Y. Liu, Performance of Ni-SiC composites deposited using magnetic-field-assisted electrodeposition under different magnetic-field directions, *Ceram. Int.* 49 (2023) 35907–35916. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.271>.
- [23] S. Marmi, S. Siad, A. Chala, H. Marmi, Corrosion Behavior of Electrodeposited Nickel Coating Reinforced by Cr₂O₃ Particles, in: *Defect Diffus. Forum, Trans Tech Publ*, 2021: pp. 203–218. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.406.203>.
- [24] H. Jin, R. Ji, T. Dong, S. Liu, Y. Liu, F. Zhang, C. Ma, S. Liu, Fabrication and characterization of WC particles reinforced NiFe composite coating by jet electrodeposition, *Surf. Coatings Technol.* 421 (2021) 127368. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127368>.
- [25] B. Li, T. Mei, H. Chu, J. Wang, S. Du, Y. Miao, W. Zhang, Ultrasonic-assisted electrodeposition of Ni/diamond composite coatings and its structure and electrochemical properties, *Ultrason. Sonochem.* 73 (2021) 105475. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105475>.
- [26] A. Abdollahi, A. Ghaffarinejad, M. Arabi, Electrodeposition of Ni-Fe on graphite rod as an efficient and binder-free electrocatalyst for oxygen and hydrogen evolution reactions, *J. Alloys Compd.* 937 (2023) 168400. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168400>.
- [27] W. Fei, J. Cui, Y. Sun, J. Yang, S. Gao, J. Li, Anti-corrosion and electrically conductive inorganic conversion coatings based on aligned graphene derivatives by electrodeposition, *Nano Mater. Sci.* 4 (2022) 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.011>.
- [28] N. Guglielmi, Kinetics of the deposition of inert particles from electrolytic baths, *J. Electrochem. Soc.* 119 (1972) 1009. <https://doi.org/10.1149/1.2404383>.
- [29] X. Wu, X. Zhao, P. Lin, C. Tan, C. Wang, W. Chen, Effects of electrodeposition current density and additives on the microstructure and mechanical properties of copper films, *J. Mater. Res. Technol.* 36 (2025) 1789–1801. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.212>.
- [30] P. Jin, C. Sun, Z. Zhang, C. Zhou, T. Williams, Fabrication of the Ni-W-SiC thin film by pulse electrodeposition, *Surf. Coatings Technol.* 392 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125738>.
- [31] T. Borkar, S.P. Harimkar, Effect of electrodeposition conditions and reinforcement content on microstructure and tribological properties of nickel composite coatings, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2011) 4124–4134. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.057>.

- [32] R. Karslioglu, H. Akbulut, Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel–cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition, *Appl. Surf. Sci.* 353 (2015) 615–627. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.161>.
- [33] C.R. Raghavendra, S. Basavarajappa, I. Sogalad, V.K. Saunshi, Study on surface roughness parameters of nano composite coatings prepared by electrodeposition process, *Mater. Today Proc.* 38 (2021) 3110–3115. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.493>.
- [34] C. Sun, H. Fan, J. Jiang, Z. Li, Y. Zhao, Effect of current density on microstructure, microhardness, and tribological properties of Cu-Al₂O₃ composite coatings prepared by jet electrodeposition, *J. Electron. Mater.* 51 (2022) 6518–6524. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09892-1>.
- [35] K. Zhan, W. Wang, F. Li, J. Cao, J. Liu, Z. Yang, Z. Wang, B. Zhao, Microstructure and properties of graphene oxide reinforced copper-matrix composite foils fabricated by ultrasonic assisted electrodeposition, *Mater. Sci. Eng. A* 872 (2023) 144995. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144995>.
- [36] W. Wang, T. Yuan, R. Li, X. Zhu, H. Li, W. Lin, L. Li, D. Zheng, Electrochemical corrosion behaviors of Pb-Ag anodes by electric current pulse assisted casting, *J. Electroanal. Chem.* 847 (2019) 113250. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113250>.
- [37] S. Pandiyarajan, S.S.M. Manickaraj, A.-H. Liao, A. Ramachandran, K.-Y. Lee, H.-C. Chuang, Recovery of Al₂O₃ from hazardous Al waste as a reinforcement particle for high-performance Ni/Al₂O₃ corrosion resistance coating via ultrasonic-aided supercritical-CO₂ electrodeposition, *Chemosphere* 313 (2023) 137626. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137626>.
- [38] R. Zhang, G. Cui, X. Su, X. Yu, Z. Li, A novel functionally graded Ni-graphene coating and its corrosion resistance, *J. Alloys Compd.* 829 (2020) 154495. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154495>.
- [39] R. Karthik, R. Mani, P. Manikandan, Tribological studies of Ni-SiC and Ni-Al₂O₃ composite coatings by pulsed electrodeposition, *Mater. Today Proc.* 37 (2021) 701–706. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.717>.
- [40] M. Rezayat, M.S. Yazdi, M.D. Zandi, A. Azami, Tribological and corrosion performance of electrodeposited Ni–Fe/Al₂O₃ coating, *Results in Surfaces and Interfaces* 9 (2022) 100083. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2022.100083>.
- [41] Z. Zhang, L. Dai, Y. Yin, Z. Xu, Y. Lv, Z. Liao, G. Wei, F. Zhong, M. Yuan, Electrodeposition and wear behavior of NiCoW ternary alloy coatings reinforced by Al₂O₃ nanoparticles: influence of current density and electrolyte composition, *Surf. Coatings Technol.* 431 (2022) 128030. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128030>.
- [42] H. Ogihara, H. Wang, T. Saji, Electrodeposition of Ni–B/SiC composite films with high hardness and wear resistance, *Appl. Surf. Sci.* 296 (2014) 108–113. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.057>.

- **Wear** : سایش
- **Electroplating** : آبکاری الکتریکی
- **Composite Coating** : پوشش کامپوزیت
- **Nanoparticles** : نانوذرات
- **Microstructure** : ریزساختار
- **Electrochemical** : الکتروشیمیایی
- **Microhardness** : میکروسختی
- **Corrosion Current Density** : چگالی جریان خوردگی
- **Corrosion Resistance** : مقاومت در برابر خوردگی
- **Coefficient of Friction** : ضریب اصطکاک
- **Wear Depth** : عمق سایش
- **Alumina (Al₂O₃)** : آلومینا
- **Surface Roughness** : زبری سطح
- **Pulsed (Method)** : پالسی (روش)
- **Dispersion Hardening Mechanism** : مکانیزم پراکنده سختی
- **Co-deposition** : هم رسوبی
- **Electrolyte** : الکترولیت
- **Alloy** : آلیاژ
- **Substrate** : زیرلایه
- **Scanning Electron Microscope (SEM)** : میکروسکوپ الکترونی روبشی
- **Atomic Force Microscopy (AFM)** : آنالیز نیروی اتمی
- **Polarization Test** : آزمون پلاریزاسیون
- **Tribological** : تریبولوژیکی
- **Adhesive Wear Mechanism** : مکانیسم سایش چسبنده
- **Potentiodynamic Test** : آزمون پتانسیودینامیک