



Ferdowsi University
of Mashhad

Journal of Metallurgical and Materials Engineering

<https://jmme.um.ac.ir>



Iron & Steel
Society of Iran

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

Research Article

Erfan Bigdeloyevatan¹ ; Mehdi Salimi²

DOI: [10.22067/jmme.2025.92920.1202](https://doi.org/10.22067/jmme.2025.92920.1202)

1- Introduction

Recent advances in coating technologies have enabled multifunctional coatings with improved mechanical and tribological properties. Electroplating is favored for its simplicity, cost-effectiveness, and precise control, making it suitable for metal-ceramic composites. Incorporating alumina nanoparticles into the metallic matrix enhances hardness, strength, and corrosion resistance by acting as barriers to dislocation movement. This study examines how alumina addition affects the microstructure, mechanical properties, and wear behavior of pulse electrodeposited CuNi coatings, aiming to improve corrosion resistance and tribological performance.

2- Experimental

CuNi/Al₂O₃ composite coatings were pulse electrodeposited on carbon steel using an electrolyte containing nickel and copper sulfates, alumina nanoparticles, boric acid, and sodium dodecyl sulfate. Alumina nanoparticles were ultrasonically dispersed for one hour before use. Electrodeposition was conducted at 6 A/dm², pH 4, 25°C, for 18 minutes. The coatings were analyzed for surface morphology, roughness, microhardness, and corrosion resistance using SEM, AFM, microhardness testing, and potentiodynamic polarization in 5% NaCl solution.

3- Results and discussion

Figures 1a and 1b show SEM images of CuNi and CuNi/Al₂O₃ coating thicknesses, while Figure 1c presents EDX analysis of the CuNi/Al₂O₃ cross-section, confirming nickel, copper, and alumina presence. SEM reveals uniform deposition with thicknesses of ~33 μm for CuNi and ~21 μm for CuNi/Al₂O₃. The reduced thickness in the composite is due to alumina nanoparticles acting as grain growth inhibitors, leading to a denser coating and lower deposition rate.

Figure 2 shows potentiodynamic polarization curves of CuNi and CuNi/Al₂O₃ coatings after 1-hour immersion in 3.5% NaCl at room temperature. The composite coating exhibited higher corrosion resistance due to alumina nanoparticles, which act as inert physical barriers that reduce corrosion by blocking corrosive solution penetration.

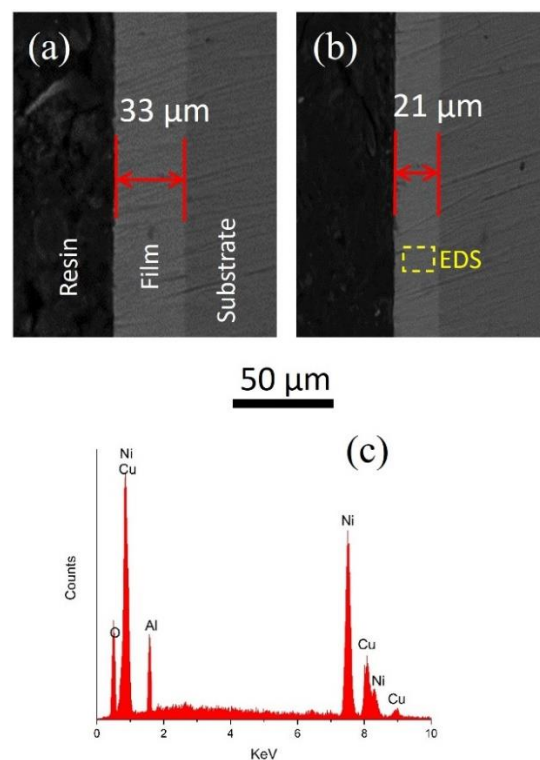


Figure 1: (a) SEM image of the CuNi coating, (b) composite CuNi/Al₂O₃ coating, and (c) EDS analysis of the surface of the composite coating shown in image (b).

*Manuscript received April 7 2025, Revised May 22 2025, Accepted July 20, 2025.

¹ Corresponding author: MSc Student in Metallurgical and Materials Engineering, University of Zanjan.

Email: Erfan8183bigdeli@gmail.com

² Assistant Professor, Department of Materials and Metallurgy, Metallurgical Research Center, Islamic Azad University of Zanjan.

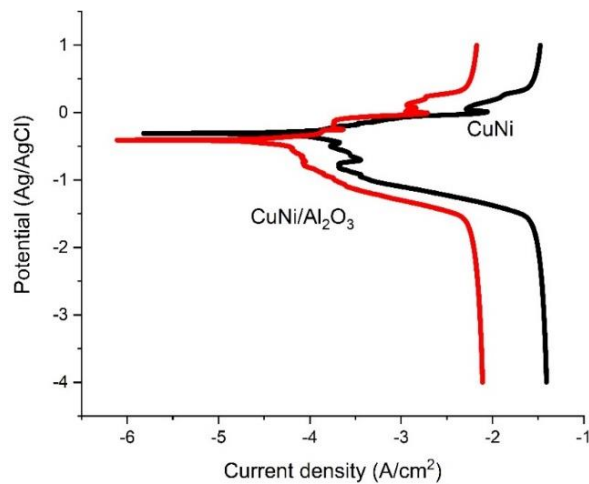


Figure 2: Potentiodynamic polarization of CuNi and CuNi/Al₂O₃ coatings at room temperature.

Figure 3 illustrates the friction coefficient curves of CuNi and CuNi/Al₂O₃ samples under a 4 N load and a sliding distance of 100 m at room temperature against an H13 steel abrasive. The average friction coefficients for CuNi and CuNi/Al₂O₃ were 0.638 and 0.254, respectively, indicating a significant reduction due to the addition of alumina nanoparticles. The nanoparticles reduce direct contact between the pin and the coating surface, thereby decreasing adhesive wear. However, after 55 m of sliding, detachment of alumina nanoparticles may increase vibrations and cause surface scratches on the softer metal. Additionally, the enhanced hardness of the composite coating, attributed to alumina nanoparticles, contributes to improved wear resistance.

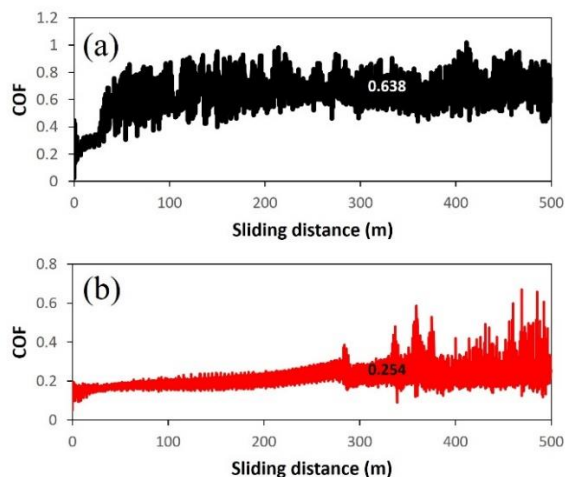


Figure 3: Friction coefficient curves of CuNi (a) and CuNi/Al₂O₃ (b) coatings.

4- Conclusions

The addition of alumina nanoparticles to CuNi coatings resulted in a denser and thinner composite structure due to grain growth inhibition. This composite showed improved corrosion resistance as alumina particles acted as physical barriers against corrosive media. Moreover, the nanoparticles significantly lowered the friction coefficient and enhanced wear resistance by reducing direct contact and adhesive wear. However, after extended sliding, nanoparticle detachment caused increased vibrations and surface scratches. These findings demonstrate that alumina nanoparticles effectively enhance both mechanical and corrosion properties of CuNi coatings for protective applications.



بررسی خواص ریزساختاری، مکانیکی، الکتروشیمیایی و سایشی پوشش نانو کامپوزیت مس نیکل / آلومینا*

مقاله پژوهشی

مهدی سلیمی^(۲)



عرفان بیگدلوی وطن^(۱)

DOI: 10.22067/jmme.2025.92920.1202

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 پر شدن 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 خوردگی 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.

واژه‌های کلیدی آبکاری الکتریکی، کامپوزیت، خوردگی، سایش، سختی.

Investigation of Microstructural, Mechanical, Electrochemical and Wear Properties of $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ Nanocomposite Coating

Erfan Bigdeloyevatan

Mehdi Salimi

Abstract In this study, a $\text{CuNi}/(2\text{g/L})\text{Al}_2\text{O}_3$ 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.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۴/۱/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۴/۴/۲۹ می‌باشد.

Email: Erfan8183bigdeli@gmail.com

(۱) نویسنده مسئول: دانشجو کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده معدن، دانشگاه زنجان.

(۲) استادیار گروه مواد و متالورژی، مرکز تحقیقات متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی زنجان.

مقدمه

با پیشرفت‌های اخیر در فناوری رسوب‌دهی پوشش‌ها، امکان ایجاد مواد پوششی چندمنظوره جدید برای استفاده در تمامی زمینه‌های ممکن فراهم شده است. این پیشرفت‌ها در پوشش‌دهی، نگرش نسبت به حفاظت از سطح مواد را تغییر داده است. 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 [1-3]. این تغییرات در ویژگی‌ها، کاربردهای متنوعی را برای این پوشش‌ها به ویژه در زمینه خواص مکانیکی و تریبولوژیکی برای کاربردهای سخت و مقاوم در برابر سایش ایجاد کرده است. تلاش‌های بسیاری برای بهبود ظاهر و خواص سطحی قطعات فلزی از طریق تغییر ترکیب مواد و شرایط رسوب‌دهی صورت گرفته است [4]. 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 [5]. 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. به منظور بهبود خواص مکانیکی، تریبولوژیکی و مقاومت در برابر خوردگی، ترکیب‌های مختلفی از مواد و شرایط رسوب‌دهی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند [6]. 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 به عنوان فاز دوم ترکیب می‌شوند تا رفتار مکانیکی و الکتروشیمیایی آن‌ها را ارتقا دهند. ذرات فاز دوم رایج شامل اکسیدها SiO_2 [7]، مانند CeO_2 [8]، MoS_2 [9]، SrSO_4 [10]، کاربیدها مانند SiC [11]، B_4C [12]، نیتrideها مانند Si_3N_4 [13] و حتی پلیمرها [14] نیز هستند. در پوشش‌دهی به روش آبکاری

الکتریکی، به منظور تولید پوشش‌های کامپوزیت، ذرات نامحلول در الکترولیت معلق شده و همراه با کاتیون‌های فلزی از طریق فرایند 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 به ویژه تقویت‌کننده‌های سرامیکی سخت در زمینه فلزی می‌تواند خواص مکانیکی آن را به طور چشمگیری تغییر دهد [15].

اخیراً ساخت پوشش‌های کامپوزیتی نیکل با هم‌رسوبی ذرات نانو/ میکرومتری در زمینه آلیاژی مانند Ni-W [16]، Zn-Ni [17]، Ni-Fe [15]، Ni-Co [18] و Ni-Cu [19] مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. در پوشش‌های کامپوزیتی زمینه نیکل، برخی گزارش‌ها درباره استفاده از فازهای سخت مانند Al_2O_3 [20]، $2\text{Si}_3\text{N}_4$ [2]، 1SiC [22]، Cr_2O_3 [23]، WC [24]، الماس [25] و گرافیت [26] موجود است. این فازهای سخت به عنوان یک مانع فیزیکی در برابر حرکت ناب‌جایی‌ها و لغزش مرزخانه‌ای عمل می‌کنند و موجب بهبود ویژگی‌های مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی می‌شوند [27]. دو مکانیسم اساسی در فرایند هم‌رسوبی ذرات شامل پراکندگی فیزیکی ذرات تقویت‌کننده در الکترولیت و مهاجرت الکتروفوریتیک 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 حالی که ذرات نرم و روان‌کننده بهبود عملکرد تریبولوژیکی را فراهم می‌کنند. مدل‌های متعددی برای توصیف مکانیسم هم‌رسوبی ذرات در زمینه فلزی در طی فرایند آبکاری الکتریکی پیشنهاد شده است که مدل جامع اولیه توسط گوگلیلمی ارائه شد [28]. در فرایند 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. فرایند هم‌رسوبی تحت تأثیر پارامترهایی مانند مشخصات ذرات (مقدار، بار سطحی، شکل و اندازه)، ترکیب الکترولیت، غلظت، pH، دما، نوع فعال‌کننده سطح، چگالی جریان

pH برابر ۴، دمای ۲۵ درجه سلسیوس و مدت زمان 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 فرایند پوشش‌دهی، از یک آند نیکلی با خلوص ۹۹/۹ درصد و ابعاد $۰/۲ \times ۳ \times ۵$ 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 الکترولیت در طول فرایند با یک همزن مغناطیسی با سرعت ۳۵۰ دور در دقیقه مخلوط گردید. پوشش‌دهی با استفاده از جریان پالس و دستگاه QTD20.241 انجام شد. به منظور 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 به کار 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 الکترودی شامل نمونه به عنوان الکترود کار، الکترود مرجع $Ag/AgCl$ و الکترود کمکی پلاتینی انجام گردید. سرعت روبش برای اندازه‌گیری پلاریزاسیون پتانسیودینامیک، ۲ میلی‌ولت بر ثانیه تنظیم شد.

و شرایط محیطی قرار دارد [29]. در این پژوهش، برای اولین بار اثر افزودن نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش $CuNi$ ساخته شده به روش آبرکاری 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 به منظور افزایش مقاومت در برابر خوردگی بود. علاوه بر آن، هدف دیگر افزودن این نانوذرات، بهبود خواص سختی و افزایش خواص تریبولوژیکی ناشی از پراکنده‌سختی بود.

روش تحقیق

در این پژوهش، پوشش کامپوزیتی $CuNi/Al_2O_3$ بر روی زیرلایه فولاد کربنی با استفاده از روش آبرکاری الکتریکی رسوب‌گذاری شد. ترکیب الکترولیت در جدول (۱) نشان داده شده است. به منظور تثبیت مقدار pH حمام و دستیابی به پوشش یکنواخت، از اسید بوریک استفاده گردید که علاوه بر کمک به یکنواختی پوشش، چسبندگی لایه ایجاد شده به زیرلایه را نیز بهبود می‌بخشد. همچنین، سدیم دودسیل سولفات به منظور کاهش کشش سطحی محلول به کار گرفته شد که از تشکیل حباب‌های گازی بر روی سطح جلوگیری می‌کند و مانع از ایجاد نقص‌هایی نظیر حفره‌ها و لکه‌های سطحی در پوشش نهایی می‌شود. نمک‌های سولفات نیکل و مس به عنوان منابع اصلی یون‌های فلزی در حمام الکترولیتی مورد استفاده قرار گرفتند. همچنین از نانوذرات آلومینا به عنوان 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 دسی متر مربع،

جدول ۱ ترکیب حمام آبرکاری کامپوزیت $CuNi/Al_2O_3$ تولید شده به روش آبرکاری پالس

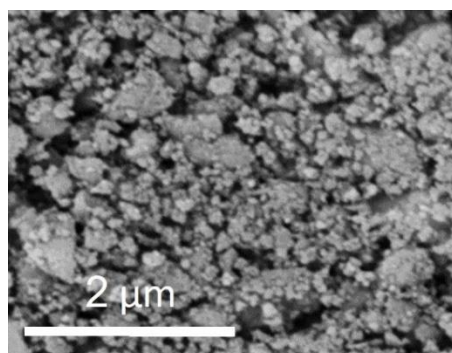
ترکیب	مقادیر (گرم بر لیتر)	خلوص (%)	محل تهیه
سولفات نیکل	۲۰۰	۹۹	مرک آلمان
سولفات مس	۱۰	۹۹/۵	مرک آلمان
بوریک اسید	۴۰	۹۹/۵	مرک آلمان
سدیم دودسیل سولفات	۰/۰۵	۹۹	مرک آلمان
آلومینا	۲	۹۹/۹۹	نانومت

نتایج و بحث

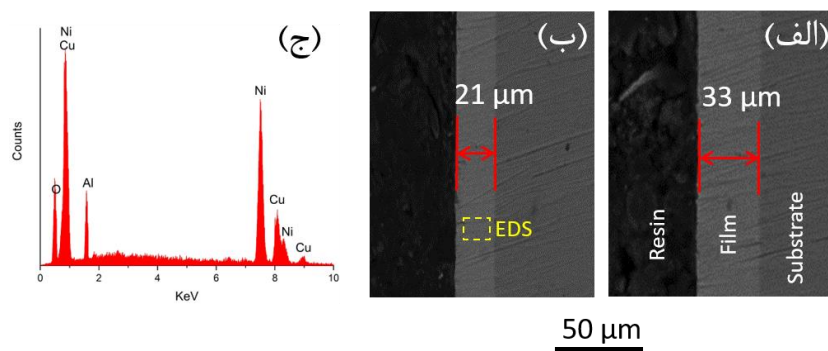
در شکل (۱) تصویر SEM از پودر نانوذرات آلومینا مورد استفاده در پوشش نشان داده شده است. اندازه این ذرات زیر ۵۰ نانومتر بوده است با این حال، به دلیل کلوخه شدن اندازه آن‌ها درشت‌تر مشاهده می‌شود. در شکل (۲-الف) و (۲-ب) به ترتیب تصاویر SEM از ضخامت پوشش‌های CuNi و $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ نشان 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 است به طوری که 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 به دست 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 [30,31].

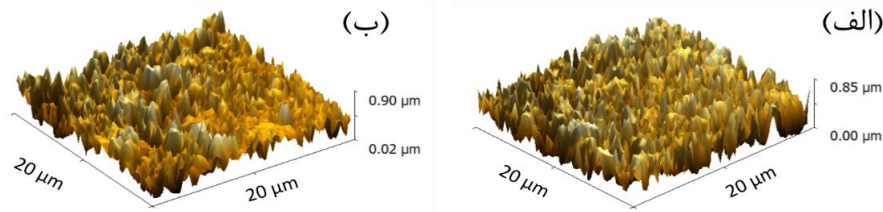
تصاویر سه‌بعدی AFM از سطح پوشش‌های CuNi و $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ در مساحت 20×20 میکرومتر به ترتیب در شکل (۳-الف) و (۳-ب) نشان داده شده است. نتایج نشان داد زبری متوسط برای نمونه‌های CuNi و $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ به ترتیب ۴۲ و ۵۶ نانومتر به دست آمده است، به عبارتی زبری سطح برای نمونه کامپوزیت در اثر ورود نانوذرات آلومینا افزایش یافته است. دلیل این امر در طول رسوب‌گذاری الکتریکی می‌تواند به دو عامل نسبت داده شود: (۱) کلوخه شدن نانوذرات آلومینا بر روی سطح پوشش کامپوزیت و (۲) رسوب‌گذاری دو مرحله‌ای یون‌های CuNi به‌گونه‌ای که در حضور نانوذرات آلومینا، در ابتدا یون‌های CuNi بر روی نانوذرات آلومینا رسوب‌گذاری و سپس بر روی زیرلایه رسوب‌گذاری می‌شوند. این دو عامل می‌توانند باعث افزایش زبری سطح پوشش کامپوزیت شوند [31-33].



شکل ۱ تصویر SEM از پودر نانوذرات آلومینا



شکل ۲ (الف) تصویر SEM از پوشش CuNi، (ب) پوشش کامپوزیت $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ و (ج) تجزیه و تحلیل EDS از سطح پوشش کامپوزیت تصویر ب

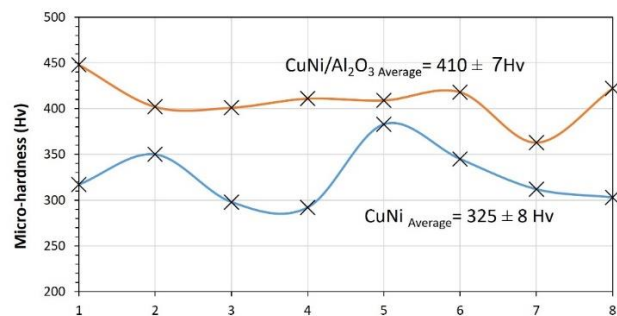


شکل ۳ آنالیز سه بعدی AFM از سطح پوشش های CuNi (الف) و CuNi/Al₂O₃ (ب)

به عنوان موانع فیزیکی عمل می کنند و از ورود مایع خورنده جلوگیری می کنند [36-38].

نمودارهای مربوط به ضریب اصطکاک نمونه های CuNi و CuNi/Al₂O₃ به ترتیب در شکل (۶-الف) و (۶-ب) در دمای اتاق و تحت سایند 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 به دست آمد. نتایج نشان داد افزودن نانوذرات آلومینا در زمینه CuNi منجر به کاهش متوسط ضریب اصطکاک شد. همچنین با توجه به نتایج می توان مشاهده کرد ارتعاشات موجود در نمونه CuNi زیاد هستند و این نشانگر چسبندگی بالای بین پین و جسم مورد سایش است. که احتمالاً اصلی ترین مکانیسم برای این نمونه مکانیسم چسبندگی 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 سایند و جسم و نیز از ایجاد مکانیسم سایش چسبندگی جلوگیری می کنند. 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 می شوند و بین دو جسم (سایند/مورد سایش) قرار می گیرند و از این طریق باعث ایجاد خراش هایی بر روی سطح جسم نرم تر (فلز مورد سایش) می شوند. عامل دیگری که می تواند باعث افزایش مقاومت در برابر سایش نمونه کامپوزیت شود، سختی بالای آن نسبت به نمونه CuNi (مطابق بخش های قبلی) است. زیرا در اثر افزودن نانوذرات آلومینا سختی، بهبود پیدا کرده است که همین امر به نوبه خود منجر به این افزایش می شود. 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 [39-42]. متوسط ضریب اصطکاک با جمع

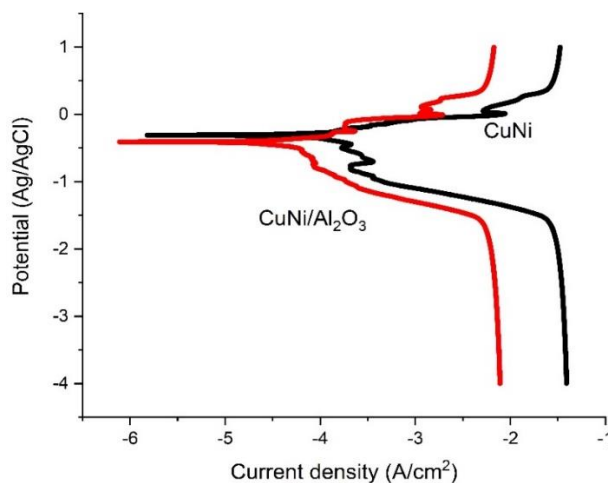
در شکل (۴) نتایج میکروسختی ویکرز مربوط به پوشش های CuNi/Al₂O₃ و CuNi در ۸ نقطه مختلف از سطح نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد مقدار سختی برای پوشش کامپوزیت از ۳۲۵ به ۴۱۰ ویکرز افزایش پیدا کرده است. دلیل اصلی این امر می تواند نسبت داده شود به مکانیسم پراکنده سختی ناشی از حضور نانوذرات. به عبارتی نانوذرات توزیع شده بر روی سطح، به عنوان مانعی در برابر تحرک نابه جایی ها قرار می گیرند و با قفل آن ها، میکروسختی مربوط به نمونه کامپوزیت افزایش می یابد [34-35].



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

پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش های CuNi و CuNi/Al₂O₃ در دمای اتاق و پس از غوطه وری 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. به طور 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. اصلی ترین عامل افزایش مقاومت در برابر خوردگی در نمونه کامپوزیت حضور نانوذرات آلومینا است زیرا این نانوذرات به دلیل ماهیت خنثای خود در واکنش های الکتروشیمیایی شرکت نمی کنند و از این طریق سرعت خوردگی را کاهش می دهند، علاوه بر آن بر روی سطح

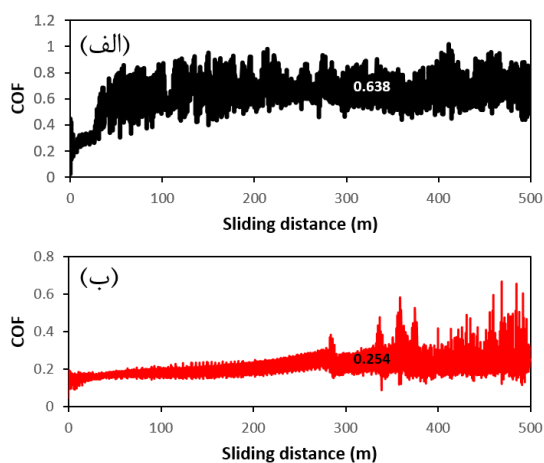
تمامی داده‌های ضریب اصطکاک در مسافت لغزشی ۰ تا ۵۰۰ متر و تقسیم بر تعداد آن به دست آمد.



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 سانتی‌متر مربع)
CuNi	-۰/۳۰	۱۵۱۸	$۱/۸۵ \times ۱۰^{-۵}$
CuNi/Al ₂ O ₃	-۰/۴۰	۳۸۴۲	$۱/۴۸ \times ۱۰^{-۵}$



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

جدول ۳ داده‌های به دست 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

نتیجه گیری		
Nanoparticles	نانوذرات	در این پژوهش، پوشش کامپوزیت $\text{CuNi}/\text{Al}_2\text{O}_3$ به روش
Microstructure	ریزساختار	آبکاری الکتریکی پالس ساخته شد و تأثیر حضور نانوذرات
Electrochemical	الکتروشیمیایی	آلومینا با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر بر خواص ریزساختاری،
Microhardness	میکروسختی	میکروسختی، خوردگی و رفتار سایشی مورد بررسی قرار گرفت
Corrosion Current Density	چگالی جریان خوردگی	و نتایج به شرح زیر خلاصه شد:
Corrosion Resistance	مقاومت در برابر خوردگی	۱. جای گذاری نانوذرات آلومینا در زمینه پوشش CuNi منجر به
Coefficient of Friction	ضریب اصطکاک	کاهش ضخامت پوشش از ۳۳ به ۲۱ میکرومتر و افزایش
Wear Depth	عمق سایش	فشرده‌گی آن شد.
Alumina (Al_2O_3)	آلومینا	۲. نتایج میکروسختی نشان داد در اثر ورود نانوذرات آلومینا در
Surface Roughness	زبری سطح	زمینه پوشش ناشی از مکانیسم پراکنده‌سختی، میکروسختی
Pulsed (Method)	پالسی (روش)	۲۶ درصد افزایش پیدا کرد.
Dispersion Hardening Mechanism	مکانیزم پراکنده‌سختی	۳. نتایج آزمون پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد به دلیل
Co-deposition	همرسوبی	کاهش سطح فعال فلزی و جلوگیری از نفوذ مایع خورنده
Electrolyte	الکتrolیت	ناشی از پر شدن حفرات توسط نانوذرات، دانسیته جریان از
Alloy	آلیاژ	$10^{-5} \times 1/85$ به $10^{-5} \times 1/48$ برای نمونه کامپوزیت کاهش
Substrate	زیرلایه	یافت. به عبارتی مقاومت در برابر خوردگی برای نمونه
	میکروسکوپ الکترونی روبشی	کامپوزیت افزایش پیدا کرد.
Scanning Electron Microscope (SEM)		۴. مقاومت در برابر سایش برای نمونه کامپوزیت افزایش پیدا کرد
Atomic Force Microscopy (AFM)	آنالیز نیروی اتمی	که این افزایش با کاهش ضریب اصطکاک از ۰/۶۳۸ به ۰/۲۵۴
Polarization Test	آزمون پلاریزاسیون	توجیه می‌شود. علاوه بر آن، عمق سایش برای نمونه
Tribological	تریبولژیکی	کامپوزیت از ۱۲ به ۸ میکرومتر کاهش یافت.
Adhesive Wear Mechanism	مکانیسم سایش چسبنده	
Potentiodynamic Test	آزمون پتانسیودینامیک	

واژه‌نامه

سپاسگزاری

Wear	سایش
Electroplating	آبکاری الکتریکی
Composite Coating	پوشش کامپوزیت

مراجع

- [1] Z. Zhong, G. Lin, T. Hu, Z. Wang, S. Wang, H. Xia, S. Li, and L. Zhang, "A review of external field-enhanced metal electrodeposition: Mechanism and applications," *JOM*, vol. 77, no. 2, pp. 665–685, 2025. <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," *International Journal of Biological Macromolecules*, vol. 308, p. 142476, 2025.

<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, and L. Chen, "Stereoisomeric engineering mediated zinc metal electrodeposition: Critical balance of solvation and adsorption capability," *Advanced Powder Materials*, vol. 4, no. 2, p. 100276, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.apmate.2025.100276>
- [4] A. Chakraborti, S. K. Das, and P. Sahoo, "Tailoring the tribomechanical and corrosion behavior of reverse pulse deposited Ni–Co–P coating through cobalt content modulation," *Journal of Tribology*, vol. 147, 2025. <https://doi.org/10.1115/1.4067283>
- [5] A. Siddaiah, P. Kumar, A. Henderson, M. Misra, and P. L. Menezes, "Surface energy and tribology of electrodeposited Ni and Ni-graphene coatings on steel," *Lubricants*, vol. 147, no. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/lubricants7100087>
- [6] B. Li, W. Zhang, W. Zhang, and Y. Huan, "Preparation of Ni–W/SiC nanocomposite coatings by electrochemical deposition," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 702, pp. 38–50, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.239>
- [7] R. Li, Y. Hou, B. Liu, D. Wang, and J. Liang, "Electrodeposition of homogenous Ni/SiO₂ nanocomposite coatings from deep eutectic solvent with in-situ synthesized SiO₂ nanoparticles," *Electrochimica Acta*, vol. 222, pp. 1272–1280, 2016. <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, and Y. Liu, "The wear behavior and corrosion resistance properties of Ni-based composite coatings modified with CeO₂ and MoS₂ nanoparticles," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, p. 137017, 2025. <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, and V. Ji, "Mechanistic insights on the microstructural evolution and tribological performance of the Ni–MoS₂ composite coatings electrodeposited under different current densities," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.05.055>
- [10] X.-S. Liang, J.-H. Ouyang, Y.-F. Li, and Y.-M. Wang, "Electrodeposition and tribological properties of Ni–SrSO₄ composite coatings," *Applied Surface Science*, vol. 255, no. 7, pp. 4316–4321, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2008.11.043>
- [11] T. Cui, M. Cao, H. Li, Y. Zhang, and K. Jiang, "Influence of electrodeposition parameters on the fabrication of Ni–Co/SiC+TiN composite films through pulse current electrodeposition," *Scientific Reports*, vol. 14, p. 13111, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-64083-8>
- [12] Y. Zhang, S. Zhang, Y. He, H. Li, T. He, Y. Fan, and H. Zhang, "Mechanical properties and corrosion resistance of pulse electrodeposited Ni–B/B₄C composite coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 421, p. 127458, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127458>
- [13] M. Eslami, H. Saghaian, F. Golestani-Fard, and A. Robin, "Effect of electrodeposition conditions on the properties

- of Cu-Si₃N₄ composite coatings,” *Applied Surface Science*, vol. 300, pp. 129–140, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.02.021>
- [14] C. Gong, J. Cui, Y. Sun, S. Shen, and J. Li, “Uniform electrodeposition of graphene/polypyrrole conductive coatings promoted by graphene quantum dots,” *Progress in Organic Coatings*, vol. 204, p. 109269, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2025.109269>
- [15] Y. Li, X. Cai, G. Zhang, C. Xu, W. Guo, and M. An, “Optimization of electrodeposition nanocrystalline Ni-Fe alloy coatings for the replacement of Ni coatings,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 903, p. 163761, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.163761>
- [16] M. Ye, T. Ding, Z. Hao, and F. He, “Nucleation and growth mechanism of electrodeposited Ni-W alloy,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 31, pp. 1842–1852, 2021. [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, and N. V. A. Kumar, “Electroplating of Zn-Ni alloy coating on mild steel and its electrochemical studies,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 30, pp. 8188–8195, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06051-1>
- [18] I. M. A. Omar, K. M. Emran, and M. Aziz, “Electrodeposition of Ni-Co film: a review,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 16, p. 150962, 2021. <https://doi.org/10.20964/2021.01.16>
- [19] M. M. Brito, R. A. Artisiani, and I. A. Carlos, “The electrodeposition of Ni-Cu and Ni-Cu-P from aspartate-based baths,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 890, p. 161761, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161761>
- [20] M. M. Brito, R. A. Artisiani, and I. A. Carlos, “The electrodeposition of Ni-Cu and Ni-Cu-P from aspartate-based baths,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 890, p. 161761, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2022.116052>
- [21] M. Tizgadam, S. Hengsberger, A. Rasooli, and S. Ahmadiyeh, “Influence of Si₃N₄ nanoparticles on morphology, hardness and corrosion resistance of electrodeposited Ni-Co-Si₃N₄,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 17, no. 10, p. 221062, 2022. <https://doi.org/10.20964/2022.10.62>
- [22] C. Ma, H. He, F. Xia, Z. Xiao, and Y. Liu, “Performance of Ni-SiC composites deposited using magnetic-field-assisted electrodeposition under different magnetic-field directions,” *Ceramics International*, vol. 49, no. 22, pp. 35907–35916, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.271>
- [23] S. Marmi, S. Siad, A. Chala, and H. Marmi, “Corrosion behavior of electrodeposited nickel coating reinforced by Cr₂O₃ particles,” in *Defect and Diffusion Forum*, Trans Tech Publications, pp. 203–218, 2021. <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, and S. Liu, “Fabrication and characterization of WC particles reinforced NiFe composite coating by jet electrodeposition,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 421, p. 127368, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127368>
- [25] B. Li, T. Mei, H. Chu, J. Wang, S. Du, Y. Miao, and W. Zhang, “Ultrasonic-assisted electrodeposition of Ni/diamond

- composite coatings and its structure and electrochemical properties,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 73, p. 105475, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105475>
- [26] A. Abdollahi, A. Ghaffarinejad, and M. Arabi, “Electrodeposition of Ni–Fe on graphite rod as an efficient and binder-free electrocatalyst for oxygen and hydrogen evolution reactions,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 937, p. 168400, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.168400>
- [27] W. Fei, J. Cui, Y. Sun, J. Yang, S. Gao, and J. Li, “Anti-corrosion and electrically conductive inorganic conversion coatings based on aligned graphene derivatives by electrodeposition,” *Nano Materials Science*, vol. 4, no. 3, pp. 244–250, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.nanoms.2021.07.011>
- [28] N. Guglielmi, “Kinetics of the deposition of inert particles from electrolytic baths,” *Journal of the Electrochemical Society*, vol. 119, no. 8, p. 1009, 1972. <https://doi.org/10.1149/1.2404383>
- [29] X. Wu, X. Zhao, P. Lin, C. Tan, C. Wang, and W. Chen, “Effects of electrodeposition current density and additives on the microstructure and mechanical properties of copper films,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 36, pp. 1789–1801, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.03.212>
- [30] P. Jin, C. Sun, Z. Zhang, C. Zhou, and T. Williams, “Fabrication of the Ni–W–SiC thin film by pulse electrodeposition,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 392, p. 127045, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125738>
- [31] T. Borkar and S. P. Harimkar, “Effect of electrodeposition conditions and reinforcement content on microstructure and tribological properties of nickel composite coatings,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 205, no. 17-18, pp. 4124–4134, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2011.02.057>
- [32] R. Karslioglu and H. Akbulut, “Comparison microstructure and sliding wear properties of nickel–cobalt/CNT composite coatings by DC, PC and PRC current electrodeposition,” *Applied Surface Science*, vol. 353, pp. 615–627, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.161>
- [33] C. R. Raghavendra, S. Basavarajappa, I. Sogalad, and V. K. Saunshi, “Study on surface roughness parameters of nano composite coatings prepared by electrodeposition process,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 38, pp. 3110–3115, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.493>
- [34] C. Sun, H. Fan, J. Jiang, Z. Li, and Y. Zhao, “Effect of current density on microstructure, microhardness, and tribological properties of Cu–Al₂O₃ composite coatings prepared by jet electrodeposition,” *Journal of Electronic Materials*, vol. 51, pp. 6518–6524, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11664-022-09892-1>
- [35] K. Zhan, W. Wang, F. Li, J. Cao, J. Liu, Z. Yang, Z. Wang, and B. Zhao, “Microstructure and properties of graphene oxide reinforced copper-matrix composite foils fabricated by ultrasonic assisted electrodeposition,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 872, p. 144995, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144995>
- [36] W. Wang, T. Yuan, R. Li, X. Zhu, H. Li, W. Lin, L. Li, and D. Zheng, “Electrochemical corrosion behaviors of Pb–Ag anodes by electric current pulse assisted casting,” *Journal of Electroanalytical Chemistry*, vol. 847, p. 113250, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.113250>

- [37] S. Pandiyarajan, S. S. M. Manickaraj, A.-H. Liao, A. Ramachandran, K.-Y. Lee, and H.-C. Chuang, "Recovery of Al_2O_3 from hazardous Al waste as a reinforcement particle for high-performance Ni/ Al_2O_3 corrosion resistance coating via ultrasonic-aided supercritical- CO_2 electrodeposition," *Chemosphere*, vol. 313, p. 137626, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137626>
- [38] R. Zhang, G. Cui, X. Su, X. Yu, and Z. Li, "A novel functionally graded Ni-graphene coating and its corrosion resistance," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 829, p. 154495, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154495>
- [39] R. Karthik, R. Mani, and P. Manikandan, "Tribological studies of Ni-SiC and Ni- Al_2O_3 composite coatings by pulsed electrodeposition," *Materials Today: Proceedings*, vol. 37, pp. 701–706, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.717>
- [40] M. Rezayat, M. S. Yazdi, M. D. Zandi, and A. Azami, "Tribological and corrosion performance of electrodeposited Ni-Fe/ Al_2O_3 coating," *Results in Surfaces and Interfaces*, vol. 9, p. 100083, 2022. <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, and M. Yuan, "Electrodeposition and wear behavior of NiCoW ternary alloy coatings reinforced by Al_2O_3 nanoparticles: influence of current density and electrolyte composition," *Surface and Coatings Technology*, vol. 431, p. 128030, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128030>
- [42] H. Ogihara, H. Wang, and T. Saji, "Electrodeposition of Ni-B/SiC composite films with high hardness and wear resistance," *Applied Surface Science*, vol. 296, pp. 108–113, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.01.057>

