



بررسی خواص ریزساختاری، سختی و خوردگی پوشش کامپوزیت مس- نیکل/گرافن تشکیل شده به روش آبکاری پالسی

عرفان بیگدلوی وطن^۱، مهدی سلیمی^{*۱}

۱. گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

چکیده

واژگان کلیدی:

در این پژوهش، تاثیر ورود نانورقه‌های گرافن بر خواص ریزساختاری، سختی و رفتار خوردگی پوشش آلیاژ CuNi تشکیل شده به روش آبکاری پالسی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ریزساختاری نشان داد در اثر افزودن نانورقه‌های گرافن در زمینه آلیاژ CuNi، مورفولوژی سطحی از مورفولوژی گره‌ای به مورفولوژی با گرانول‌های کروی تغییر کرده‌است، که این تغییر ساختار سطحی منجر به افزایش زبری سطح پوشش از ۳۳ به ۵۶ نانومتر برای پوشش کامپوزیت شده‌است. از طرفی در اثر پراکنده‌سختی به دلیل حضور ذرات فاز دوم گرافن، سختی حدود ۲۰ درصد افزایش پیدا کرده‌است. بررسی‌های خوردگی نشان داد حضور گرافن در زمینه آلیاژ به‌عنوان موانع فیزیکی عمل کرده و با کاهش سطح فعال فلزی مقاومت در برابر خوردگی را افزایش داده‌است. به‌عبارتی نفوذ مایع خورنده را به‌تعمیق انداخته و از این طریق نرخ خوردگی را کاهش داده‌است. چگالی جریان خوردگی برای نمونه کامپوزیت خوردگی از $1/8 \times 10^{-6}$ به $6/6 \times 10^{-7}$ آمپر بر سانتی‌متر مربع نسبت به نمونه آلیاژ افزایش پیدا کرده‌است. همچنین حضور ورقه‌های گرافن، باعث مثبت‌تر شدن پتانسیل خوردگی و نجیب‌تر شدن نمونه کامپوزیت شده‌است

گرافن،

آبکاری،

خوردگی،

کامپوزیت.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۹/۲۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۱

DOI: 10.22034/ISSST.2025.2047925.1632

Investigation of microstructural, hardness and corrosion properties of copper-nickel/graphene composite coating fabricated by pulse electroplating method

Abstract

This work examined the influence of graphene nanosheets on the microstructure, hardness, and corrosion characteristics of CuNi alloy coatings produced by pulse electroplating. The microstructural analysis indicated that the incorporation of graphene nanosheets into the CuNi alloy matrix altered the surface morphology from a nodular structure to one characterized by spherical granules, resulting in an increase in the surface roughness of the composite coating from 33 to 56 nm. Conversely, the presence of graphene resulted in a hardness increase of approximately 20% due to precipitation. Corrosion tests indicated that graphene's presence in the alloy matrix served as a physical barrier, enhancing corrosion resistance by diminishing the active metal surface area. Consequently, it impeded the infiltration of the corrosive liquid, so decreasing the corrosion rate. The corrosion current density for the corrosion composite sample has risen from 1.8×10^{-6} to 6.6×10^{-7} A/cm² in comparison to the alloy sample. The inclusion of graphene sheets has increased the corrosion potential, rendering the composite sample more noble.

Keywords: Graphene, Electroplating, Corrosion, Composite

* Corresponding author E-mail: mehdi.salimi1383@gmail.com.

۱. مقدمه

کامپوزیت/نانوکامپوزیت با بازدهی بالا شناخته می‌شود که با این روش می‌توان پوشش‌های کامپوزیت حاوی انواع مختلفی از مواد نظیر اکسیدها، کاربیدها و مواد فلزی را در ابعاد و اندازه‌های مختلف بر روی یک زیرلایه فلزی پوشش داد [۱۱]. نیکل و آلیاژهای آن نیز از جمله فلزاتی است که به جهت ارتقاء خواص مذکور، بصورت کامپوزیت با ذرات مختلف فلزی و سرامیکی نظیر SiC [۱۲]، ZrO_2 [۱۳]، TiC [۱۴] و ZrC [۱۵]، به روش آبرکاری الکتریکی بر روی زیرلایه‌های مختلف پوشش داده می‌شوند. گزارشات حاکی از آن است که اگر این ذرات موجود در پوشش، در مقیاس نانومتری باشند، تاثیر مطلوب‌تری بر روی ساختار و عملکرد لایه پوشش خواهند داشت، بطوریکه در یک نسبت وزنی مشخص و معلوم، نانوذرات در مقایسه با ذراتی که ابعاد میکرومتری دارند استحکام بیشتری را به زمینه فلزی پوشش خواهند بخشید [۱۶، ۱۷]. علاوه بر نانوذرات مذکور در پوشش که مقاومت در برابر خوردگی و استحکام پوشش کامپوزیت را افزایش می‌دهند برخی دیگر از ذرات در زمینه نیکل نیز می‌توانند سبب ارتقا خواص سایشی شوند. نانورقه‌هایی مانند گرافن به دلیل دارا بودن سطح ویژه بالا، در ساختار پوشش می‌توانند به جهت خاصیت روانکاری، خواص تریبولوژیکی پوشش را بهبود ببخشند. ورقه‌های گرافن، علاوه بر اینکه از نظر تریبولوژیکی برای لایه پوششی مطلوب هستند، بلکه به جهت ختنی بودن از نظر شیمیایی، می‌توانند خواص خوردگی سطحی و پوشش را نیز ارتقا ببخشند. تحقیقات فراوانی که اخیراً توسط محققان انجام شده است نیز تایید کننده این امر است [۲۰-۱۸]. به طور کلی، علاوه بر نوع ذرات فاز دوم، کسر حجمی و اندازه آن‌ها نیز برای تقویت خواص پوشش‌ها تاثیر گذار است. مؤلفه‌های مربوط به فرآیندهای آبرکاری الکتریکی نیز از دیگر عواملی است که بر

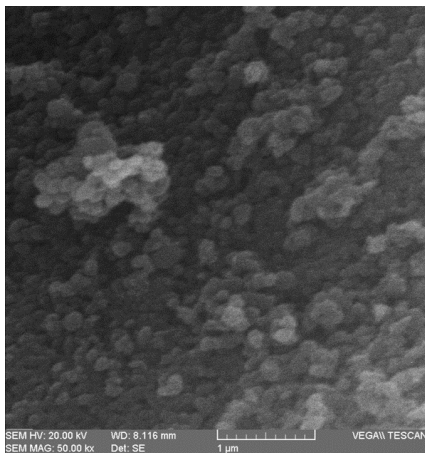
مواد فلزی به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی عالی، در گستره وسیعی از صنایع مانند خودروسازی، هوافضا، ساختمان‌سازی، ساخت تجهیزات صنعتی و پزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. با این حال اکثر مواد فلزی به خصوص فولادهای کربنی، مقاومت در برابر خوردگی پائینی در محیط‌های خورنده (دما و رطوبت بالا) از خود نشان می‌دهند [۲، ۳]. بنابراین، روش‌های مختلفی نظیر عملیات‌های سطحی، ممانعت کننده‌های خوردگی، حفاظت کاتدی و برخی دیگر از فرآیندها جهت کاهش نرخ خوردگی این مواد بکار گرفته می‌شوند [۴]. یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای حل مشکل مذکور بکار گرفته شده است، ایجاد پوشش‌های کامپوزیت/نانوکامپوزیت بر روی زیرلایه فلزی می‌باشد [۵]. از میان موادی که به عنوان پوشش روی سطح استفاده می‌شود، نیکل به دلیل مقاومت در برابر خوردگی و خواص مکانیکی مطلوبی که دارد، بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. تحقیقات علمی نشان می‌دهد که در مقایسه با نیکل خالص، پوشش‌های آلیاژی و کامپوزیت پایه نیکل مقاومت خوردگی و سایشی بالاتری از خود نشان می‌دهند [۶]. مس، نیز یکی دیگر از فلزات پرکاربرد در عرصه پوشش‌دهی می‌باشد که همراه با نیکل و بصورت آبرکاری الکتریکی بر روی زیرلایه‌های مختلف اعمال می‌شود [۷]. آلیاژهای Ni-Cu، به دلیل دارا بودن سختی و مقاومت در برابر خوردگی بالا مورد توجه قرار گرفته‌اند. این ویژگی‌ها باعث شده است که آلیاژهای Ni-Cu گزینه مناسبی برای کاربردهای مختلف نظیر حسگرها، تجهیزات دریایی، صنایع شیمیایی، مبدل‌های حرارتی و پوشش‌های مقاوم به خوردگی بکار گرفته شوند [۸-۱۰]. روش آبرکاری الکتریکی به عنوان یکی از آسان‌ترین و مرسوم‌ترین روش‌های ایجاد پوشش‌های

کیفیت و مورفولوژی پوشش و همچنین خواص نهایی سطح، از جمله مقاومت خوردگی اثرگذار می‌باشد. از مهم‌ترین این مؤلفه‌ها، نوع جریان می‌باشد، به‌طوریکه در فرآیند پوشش‌دهی به‌روش آبکاری الکتریکی عمدتاً از سه نوع جریان مختلف با عناوین جریان مستقیم، جریان پالسی و جریان پالسی معکوس استفاده می‌شود. در روش پوشش‌دهی الکتریکی، استفاده از جریان مستقیم، به‌عنوان ساده‌ترین روش پوشش‌دهی فلزات خالص، آلیاژی و کامپوزیت معرفی شده‌است [۲۱]. با این حال، در سال‌های اخیر تحقیقات زیادی در این حوزه انجام شده‌است که مبتنی بر جریان پالسی و پالس معکوس هستند. بالا بودن نرخ رسوب‌گذاری و همچنین بهبود خواص ریزساختاری، مکانیکی و خوردگی از عوامل ترغیب محققان به‌استفاده از جریان‌های پالسی و پالس معکوس می‌باشد [۲۴-۲۲]. T.Borkar و [۲۵] همکاران در یک کار تحقیقاتی نشان دادند که استفاده از جریان‌دهی پالسی و پالس معکوس در پوشش‌دهی الکتریکی، سبب افزایش میزان میکروسختی، مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت سایشی پوشش نیکل خالص و پوشش کامپوزیت پایه نیکل می‌شود. در این پژوهش، پوشش کامپوزیت CuNi/Gn برای اولین بار به‌روش آبکاری الکتریکی با جریان‌دهی پالسی تشکیل شد و تاثیر گرافن، به‌عنوان موانع فیزیکی با ماهیت خشی بر بهبود مقاومت در برابر خوردگی کامپوزیت CuNi/Gn مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲. آزمایش

پوشش کامپوزیت CuNi/Gn بر روی زیرلایه فولاد کربنی در الکترولیت مربوط به جدول ۱ پوشش‌دهی شد. بوریک اسید در محلول برای تثبیت pH حمام و همچنین برای تولید

پوشش‌های یکنواخت استفاده می‌شود. همچنین، بوریک اسید باعث بهبود چسبندگی بین لایه پوشش و سطح زیرلایه می‌شود [۲۶]. سدیم دو دسیل سولفات، باعث کاهش کشش سطحی محلول می‌شود که مانع از تشکیل حباب‌های گازی روی سطح زیرلایه می‌گردد. این امر از ایجاد نقص‌هایی مانند حفره‌ها یا لکه‌های سطحی در لایه آبکاری‌شده جلوگیری می‌کند، همچنین باعث یکنواختی سطح پوشش می‌شود [۲۷]. سولفات نیکل و مس به‌عنوان نمک‌های اولیه در حمام آبکاری استفاده شدند. از ورقه‌های گرافن با سطح ویژه ۱۵۵ متر مربع بر گرم، خلوص ۹۸٪ و چگالی ۰/۳۵ گرم بر سی سی تولید شده توسط کشور هندوستان استفاده شد. این ورقه‌ها در ابتدا به‌مدت یک ساعت برای به‌حداقل رساندن کلوخه‌های گرافن تحت عملیات التراسونیک قرار گرفت و سپس مستقیماً به حمام آبکاری اضافه شد. چگالی جریان، pH و دمای محلول الکترولیت به ترتیب ۶ آمپر بر دسی متر مربع، ۴ و ۲۵ درجه سلسیوس و همچنین مدت‌زمان پوشش‌دهی ۱۸ دقیقه در نظر گرفته شد. قبل از عملیات پوشش‌دهی، زیرلایه‌های فولادی از شماره ۸۰ تا ۳۰۰۰ سنباده‌زنی و پولیش شدند و سپس چربی‌زدایی انجام شد. در مرحله بعد با آب مقطر و صابون شسته شدند. برای فعال‌سازی سطحی از اسید کلریدریک ۷/۵ درصد حجمی استفاده شد. نیکل با خلوص ۹۹/۹٪ و با ابعاد ۵×۳×۰/۲ سانتی‌متر مکعب به‌عنوان آند و فولاد کربنی با ابعاد ۲×۲ سانتی‌متر مربع به‌عنوان کاتد با فاصله ۲ سانتی‌متر از هم استفاده شد. برای رسیدن به پوششی یکنواخت، محلول الکترولیت توسط یک همزن با سرعت ۳۵۰ دور در دقیقه در طول پوشش‌دهی هم‌زده شد. پوشش‌دهی تحت جریان پالس با دستگاه QTD20.241 انجام شد. برای بررسی ترکیب شیمیایی و مورفولوژی سطحی پوشش‌ها از تجزیه و تحلیل Scanning Electron Microscopy (SEM) با دستگاه مدل



شکل ۱. تصویر SEM از پودر گرافن.

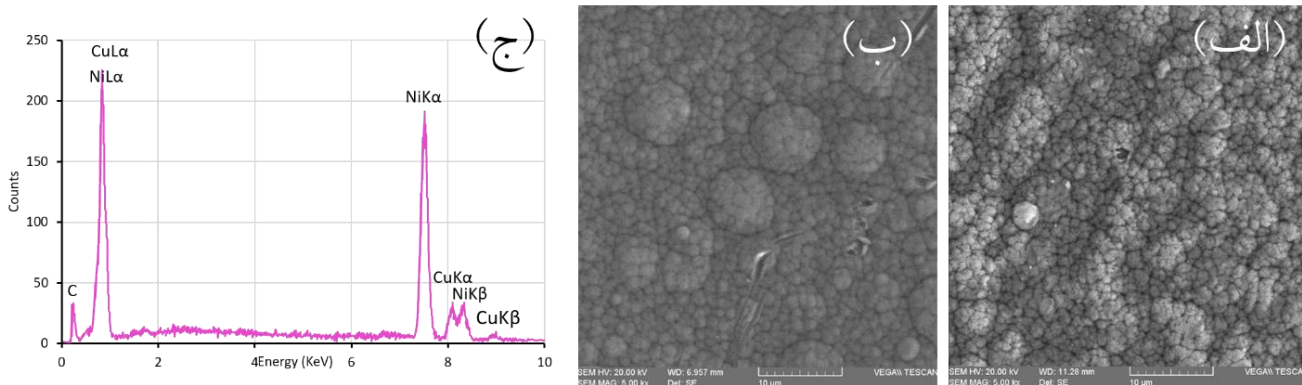
تصاویر SEM، از سطح نمونه‌های مربوط به آلیاژ CuNi و کامپوزیت CuNi/Gn و همچنین تجزیه و تحلیل Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) از سطح پوشش کامپوزیت به ترتیب در شکل ۲ الف، ب و ج نشان داده شده است. با توجه به تصاویر الف و ب، می‌توان مشاهده کرد، در اثر ورود ورقه‌های گرافن در زمینه آلیاژ، مورفولوژی سطحی پوشش تغییر یافته است. می‌توان مشاهده کرد بر اثر کامپوزیت‌سازی ساختار از مورفولوژی گره‌مانند به مورفولوژی گرانولی با اندازه‌های میکرونی تغییر یافته است [۲۸،۲۹]. این امر احتمالاً به کلوخه شدن گرافن‌ها بر روی سطح پوشش نسبت داده می‌شود. در تصویر ۱ ج، تجزیه و تحلیل EDS از سطح پوشش کامپوزیت حضور عناصر نیکل، مس و کربن را در پوشش تایید می‌کند.

دستگاه TESCAN (MIRA 3 LMU) استفاده شد. دستگاه FemtoScan برای تجزیه و تحلیل Atomic Force Microscopy (AFM) و برای ارزیابی زبری و توپوگرافی سطح مورد استفاده قرار گرفت. میکروسختی از پنج محل مختلف انتخاب شده، با استفاده از دستگاه NOVOTEST/UKRAINE مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار متوسط آن گزارش شد. آزمون پلاریزاسیون پس از غوطه‌وری در محلول ۵ درصد سدیم کلرید به مدت یک ساعت، با استفاده از پتانسیواستات Solarton-SI1287 مدل پتانسیواستات/گالوانوستات ساخته شده توسط ایالات متحده، که دارای یک محفظه استاندارد سه الکترودی است، انجام شد. اندازه‌گیری پلاریزاسیون پتانسیودینامیک با سرعت پویش ۲ میلی‌ولت بر ثانیه انجام شد. در سیستم سه الکترودی، نمونه به عنوان الکتروود کار، به عنوان الکتروود مرجع، و پلاتین به عنوان الکتروود کمکی استفاده شد.

جدول ۱. ترکیب حمام آبکاری مربوط به کامپوزیت CuNi/Gn تولید شده به روش آبکاری پالس

ترکیب	مقادیر (گرم بر لیتر)
سولفات نیکل	۲۰۰
سولفات مس	۱۰
بوریک اسید	۴۰
سدیم دودسیل سولفات	۰/۰۵
گرافن	۰/۵

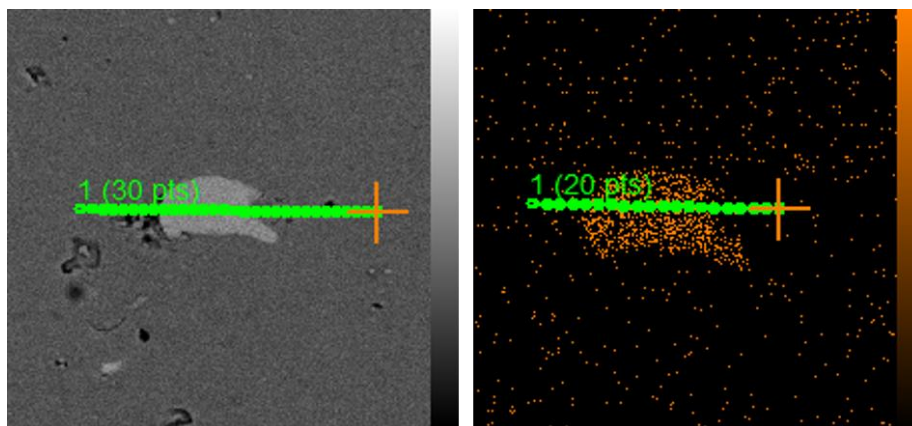
در شکل ۱، تصویر SEM از پودر نانورقه‌های گرافن نشان داده شده است. به دلیل این که این ورقه‌ها خاصیت کلوخه‌ای شدن دارند بنابراین در تصویر به شکل آگلومره مشاهده می‌شوند.



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

تجزیه و تحلیل عنصری، درصد توزیع کربن به صورت کیفی بر محل مشخص شده به صورت متمرکز نشان دهنده حضور گرافن بر روی سطح پوشش کامپوزیت CuNi/Gn است.

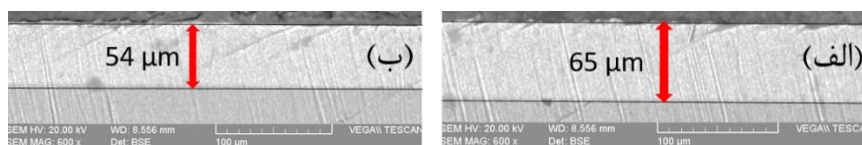
در شکل ۳، نقشه توزیع عنصری، از سطح پوشش کامپوزیت CuNi/Gn، به منظور اثبات حضور گرافن در زمینه آلیاژ نشان داده شده است. ورقه گرافن بر روی سطح، توسط تصویر SEM در بزرگنمایی بالا نشان داده شده است.



شکل ۳. تجزیه و تحلیل نقشه توزیع عنصری مربوط به سطح نمونه کامپوزیت CuNi/Gn.

ذرات گرافن در زمینه پوشش است. بر اساس تصاویر SEM، افزودن گرافن، منجر به فشرده سازی پوشش و کاهش ضخامت آن از ۶۵ به ۵۴ میکرومتر می شود. به عبارتی، احتمالاً ذرات گرافن به عنوان موانعی از رشد دانه ممانعت کرده و نرخ رسوب گذاری را کاهش می دهند [۳۰].

در شکل ۴، تصاویر SEM مربوط به سطح مقطع نمونه های CuNi/Gn و CuNi تشکیل شده به روش آبکاری پالس نشان داده شده است. می توان مشاهده کرد، ضخامت پوشش ها در سرتاسر زیر لایه به صورت یکنواخت است. از این رو، عامل تعیین کننده و اصلی کاهش ضخامت پوشش، جایگذاری



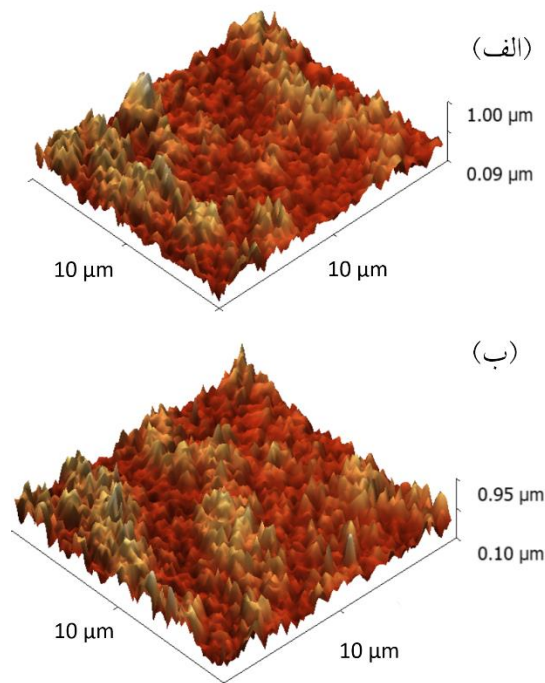
شکل ۴. تجزیه و تحلیل SEM مربوط به سطح مقطع نمونه های (الف) CuNi و (ب) CuNi/Gn.

بعد بر روی زیرلایه رسوب گذاری می شوند که این امر می تواند باعث افزایش زبری در حضور ورقه های گرافن شود. عامل دیگری که می تواند باعث زبری شود، کلوخه شدن خود گرافن ها هنگام رسوب گذاری بر روی سطح است. مکانیسم های فوق توسط پژوهش های مشابه گذشته تایید می شود [۲۵،۳۱،۳۲].

میکروسختی برای نمونه های پوشش آلیاژ CuNi و کامپوزیت CuNi/Gn به ترتیب ۳۷۰ و ۴۴۳ ویکرز بدست آمد. از نتایج می توان استنباط کرد، حضور ورقه های گرافن در زمینه آلیاژ CuNi منجر به افزایش میکروسختی ویکرز شده است. حضور این ذرات فاز دوم می تواند میکروسختی را با به تعویق انداختن لغزش نابجایی ها (مکانیسم پراکنده سختی) افزایش دهد [۳۳،۳۴].

شکل ۶، منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به پوشش های CuNi و CuNi/Gn را در محلول ۵ درصد سدیم کلرید نشان می دهد که با استفاده از جریان پالسی بر روی زیرلایه فولادی ایجاد شده است. مقادیر مربوط به جریان خوردگی و پتانسیل خوردگی، بتا کاتی و آندی از نمودارهای پلاریزاسیون توسط نرم افزار CorrView استخراج و در جدول ۲ گزارش شده است. پتانسیل خوردگی یک مؤلفه ترمودینامیکی است در حالیکه چگالی جریان خوردگی، به عنوان یک مؤلفه سینتیکی مد نظر می باشد. این نتایج نشان دهنده آن است که افزودن گرافن به پوشش آلیاژی

تصاویر سه بعدی توپوگرافی از سطح پوشش های CuNi و CuNi/Gn به ترتیب در شکل ۵ الف و ب، نشان داده شده است. زبری متوسط برای نمونه ها به ترتیب ۳۳ و ۵۶ نانومتر گزارش شد. نتایج نشان می دهد در اثر افزودن ورقه های گرافن در زمینه آلیاژ، زبری متوسط افزایش می یابد.

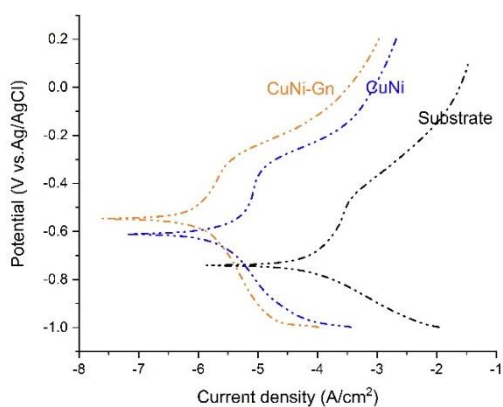


شکل ۵. تجزیه و تحلیل سه بعدی AFM از سطح پوشش های CuNi (الف) و CuNi/Gn (ب).

مکانیسم افزایش زبری در حضور گرافن را می توان به این صورت توضیح داد که در ابتدا یون های CuNi بر روی نواحی نقص گرافن آگلومره شده رسوب می کنند و در مرحله

نرخ خوردگی نسبی بالاتر است. با اعمال پوشش های CuNi و CuNi/Gn مقادیر بتا آندی کاهش و بتا کاتدی افزایش یافته است که این تغییرات نشان دهنده کاهش سرعت واکنش کاتدی و بهبود مقاومت در برابر خوردگی، به دلیل کاهش انحلال آندی است [۳۹،۴۰].

در پژوهشی مشابه، Zuveria Firdouz و همکاران [۴۱] پوشش های کامپوزیت NiCu تقویت شده با CNT و نانوذرات الماس را به روش آبرکاری الکتریکی ساختند. نتایج آن ها نشان داد پوشش های کامپوزیت نسبت به پوشش NiCu مقاومت در برابر پلاریزاسون بهتر و نرخ خوردگی کمتری از خود نشان دادند. آن ها اظهار کردند دلیل افزایش مقاومت در برابر خوردگی برای پوشش های کامپوزیت، پرشدن منافذ و حفرات مربوط به ساختار پوشش آلیاژ NiCu، توسط ذرات فاز دوم CNT و نانوذرات الماس بود. در پژوهشی دیگر، Morteza Ferdosi Heragh و همکاران [۴۲] پوشش NiCu/CNT را به روش آبرکاری الکتریکی بر روی زیرلایه فولادی ساختند.



شکل ۶. منحنی های پلاریزاسیون پتانسیودینامیک از سطح پوشش های CuNi و CuNi/Gn و زیرلایه فولادی.

CuNi، چگالی جریان خوردگی را کاهش می دهد. از آنجائیکه چگالی جریان خوردگی، کنترل کننده سینتیک فرآیند خوردگی می باشد [۳۵،۳۶]، در نتیجه می توان گفت که پوشش کامپوزیت CuNi/Gn، نرخ خوردگی آهسته تری نسبت به CuNi خواهد داشت. با توجه به نمودارهای شکل ۵ و جدول ۲، پوشش CuNi/Gn نسبت به پوشش آلیاژی، چگالی جریان کمتر و پتانسیل خوردگی نجیب تری دارد. بنابراین، حضور گرافن درون پوشش CuNi می تواند مقاومت در برابر خوردگی را افزایش داده و نرخ خوردگی را کاهش دهد. این بدان علت است که بر اثر فعل و انفعالات لایه گرافن با زمینه فلزی نیکل-مس، برهمکنش منسجمی بین اتم های نیکل-مس و گرافن ایجاد می شود که می تواند مسیر نفوذ عناصر و مایع خورنده را طولانی تر کرده و از این طریق از فرآیند خوردگی ممانعت کنند [۳۷]. از طرفی دیگر، گرافن ها به عنوان موانع فلزی با کاهش سطح فعال فلزی پوشش، اکتیویته پوشش را پایین می آورند که همین امر منجر به بهبود مقاومت در برابر خوردگی برای پوشش کامپوزیت می شود. در مقایسه نمودارهای پلاریزاسیون و جدول نتایج خوردگی، پوشش های آلیاژ و کامپوزیت نسبت به زیرلایه فولادی دارای مقاومت در برابر خوردگی بالاتری می باشند. زیرا عناصر مس و نیکل نسبت به آهن، پتانسیل خوردگی نجیب تری دارند. از طرفی دیگر، زیرلایه فولادی چگالی جریان خوردگی بالاتری نسبت به پوشش ها دارد [۳۸]. نتایج حاصل از آزمون پلاریزاسیون نمونه ها نشان دهنده تغییرات قابل توجه در ضرایب تافل کاتدی و آندی است که تأثیر مستقیم بر مقاومت در برابر خوردگی دارند. در نمونه زیرلایه، مقدار بتا آندی برابر با 0.103 (۱/ولت) و بتا کاتدی برابر با 0.289 (۱/ولت) بوده که بیانگر سرعت بالای واکنش های الکتروشیمیایی و

جدول ۲. داده‌های حاصل از پلاریزاسیون پتانسیودینامیک مربوط به نمونه‌های زیرلایه، پوشش آلیاژ و کامپوزیت.

نمونه	پتانسیل خوردگی (ولت)	چگالی جریان خوردگی (آمپر بر سانتی‌متر مربع)	پتانسیل آندی (۱/ولت)	پتانسیل کاتدی (۱/ولت)
زیرلایه	-۰/۷۴	$6/4 \times 10^{-5}$	۰/۲۸۹	۰/۱۰۳
CuNi	-۰/۶۲	$1/8 \times 10^{-6}$	۰/۲۲۱	۰/۱۲۴
CuNi/Gn	-۰/۵۳	$6/6 \times 10^{-7}$	۰/۲۱۱	۰/۱۸۷

در برابر خوردگی می‌شود، بطوریکه برای نمونه کامپوزیت پتانسیل خوردگی نجیب‌تر شده‌است. همچنین، چگالی جریان خوردگی از $1/8 \times 10^{-6}$ به $6/6 \times 10^{-7}$ آمپر بر سانتی‌متر مربع کاهش یافته‌است. مقاومت در برابر خوردگی برای زیرلایه فولادی نسبت به هر دو پوشش آلیاژی CuNi و کامپوزیت CuNi/Gn مقدار ضعیف‌تری بود.

آن‌ها اظهار کردند مقاومت در برابر خوردگی برای نمونه کامپوزیت به دلیل کاهش چگالی جریان ناشی از پر شدن منافذ و حفرات توسط CNT افزایش می‌یابد. علاوه بر این، ذرات CNT به دلیل ایجاد مقاومت الکتریکی، انتقال بار را بین زیرلایه و پوشش کاهش داده و رفتار الکتروشیمیایی را بهبود می‌بخشند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پوشش آلیاژ CuNi و پوشش کامپوزیت CuNi/Gn به روش آبکاری الکتریکی پالسی بر روی زیرلایه فولادی تشکیل شدند. نتایج ریزساختاری نشان داد که ورقه‌های گرافن در زمینه آلیاژ CuNi باعث تغییر مورفولوژی از ساختار گره‌ای به ساختار با گرانول‌های کروی شدند. این امر به دلیل کلوخه شدن گرافن‌ها روی سطح پوشش است که منجر به افزایش ۷۲ درصدی زبری پوشش کامپوزیت شد. نتایج میکروسختی ویکرز نشان داد به دلیل مکانیسم پراکنده سختی ورقه‌های گرافن در زمینه پوشش، میکروسختی از ۳۷۰ به ۴۴۳ ویکرز افزایش یافته‌است. نتایج پلاریزاسیون پتانسیودینامیک نشان داد در اثر افزودن گرافن در ترکیب آلیاژ، گرافن به عنوان موانع فلزی در برابر مایعات خوردنده عمل کرده و با کاهش سطح فعال فلزی، باعث بهبود مقاومت

مراجع

- [1] N.R. Baddoo, Stainless steel in construction: A review of research, applications, challenges and opportunities, J. Constr. Steel Res. 64 (2008) 1199–1206.
- [2] M. Der Ger, Electrochemical deposition of nickel/SiC composites in the presence of surfactants, Mater. Chem. Phys. 87 (2004) 67–74. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2004.04.022>.
- [3] L. Wang, J. Zhang, Y. Gao, Q. Xue, L. Hu, T. Xu, Grain size effect in corrosion behavior of electrodeposited nanocrystalline Ni coatings in alkaline solution, Scr. Mater. 55 (2006) 657–660.
- [4] 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>.
- [5] S. Ramalingam, V.S. Muralidharan, A. Subramania, Electrodeposition and characterization of Cu-TiO₂ nanocomposite coatings, J. Solid State

- [17] B.M. Quinn, C. Dekker, S.G. Lemay, Electrodeposition of noble metal nanoparticles on carbon nanotubes, *J. Am. Chem. Soc.* 127 (2005) 6146–6147.
- [18] Y. Liu, Y. Liu, Q. Zhang, C. Zhang, J. Wang, Y. Wu, P. Han, Z. Gao, L. Wang, X. Wu, Control of the microstructure and mechanical properties of electrodeposited graphene/Ni composite, *Mater. Sci. Eng. A.* 727 (2018) 133–139.
- [19] Y. Fan, Y. He, P. Luo, T. Shi, X. Chen, Pulse Current Electrodeposition and Properties of Ni-W-GO Composite Coatings, *J. Electrochem. Soc.* 163 (2016) D68–D73. <https://doi.org/10.1149/2.0171603jes>.
- [20] Z. Ren, N. Meng, K. Shehzad, Y. Xu, S. Qu, B. Yu, J.K. Luo, Mechanical properties of nickel-graphene composites synthesized by electrochemical deposition, *Nanotechnology.* 26 (2015). <https://doi.org/10.1088/0957-4484/26/6/065706>.
- [21] A.D. Pingale, A. Owhal, S.U. Belgamwar, J.S. Rathore, Effect of current on the characteristics of CuNi-G nanocomposite coatings developed by DC, PC and PRC electrodeposition, *Jom.* 73 (2021) 4299–4308.
- [22] R.M. Reddy, B.M. Praveen, K.G. Chandrappa, K.O. Nayana, Generation of Ni–Si₃N₄ nanocomposites by DC, PC and PRC electrodeposition methods, *Surf. Eng.* 32 (2016) 501–507.
- [23] J.S. Shathishkumar, A. Jegan, Assessment on the microhardness and corrosion resistance characteristics of Ni-SiC and Ni-MWCNT coatings by pulse reverse electrodeposition technique, *Mater. Res. Express.* 7 (2020). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab8e6e>.
- [24] A. Balasubramanian, D.S. Srikumar, G. Raja, G. Saravanan, S. Mohan, Effect of pulse parameter on pulsed electrodeposition of copper on stainless steel, *Surf. Eng.* 25 (2009) 389–392. <https://doi.org/10.1179/026708408X344680>.
- [25] 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>.
- [26] J.D. Reid, C.E. Tambe, The Multifaceted Role of Boric Acid in Nickel Electrodeposition and Electroforming, (2024). <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad80d3>.
- Electrochem. 13 (2009) 1777–1783.
- [6] S.T. Aruna, C.N. Bindu, V.E. Selvi, V.K.W. Grips, K.S. Rajam, Synthesis and properties of electrodeposited Ni/ceria nanocomposite coatings, *Surf. Coatings Technol.* 200 (2006) 6871–6880.
- [7] S. Ramalingam, K. Balakrishnan, S. Shanmugasamy, A. Subramania, Electrodeposition and characterisation of Cu–MWCNTs nanocomposite coatings, *Surf. Eng.* 33 (2017) 369–374.
- [8] C.R. Thurber, Y.H. Ahmad, S.F. Sanders, A. Al-Shenawa, N. D’Souza, A.M.A. Mohamed, T.D. Golden, Electrodeposition of 70-30 Cu–Ni nanocomposite coatings for enhanced mechanical and corrosion properties, *Curr. Appl. Phys.* 16 (2016) 387–396.
- [9] M. Alizadeh, H. Safaei, Characterization of Ni-Cu matrix, Al₂O₃ reinforced nano-composite coatings prepared by electrodeposition, *Appl. Surf. Sci.* 456 (2018) 195–203.
- [10] A.V. Nemani, M. Ghaffari, K.S. Bokati, N. Valizade, E. Afshari, A. Nasiri, Advancements in additive manufacturing for copper-based alloys and composites: a comprehensive review, *J. Manuf. Mater. Process.* 8 (2024) 54.
- [11] I. Gurrappa, L. Binder, Electrodeposition of nanostructured coatings and their characterization - A review, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 9 (2008). <https://doi.org/10.1088/1468-6996/9/4/043001>.
- [12] C. Cai, X.B. Zhu, G.Q. Zheng, Y.N. Yuan, X.Q. Huang, F.H. Cao, J.F. Yang, Z. Zhang, Electrodeposition and characterization of nano-structured Ni–SiC composite films, *Surf. Coatings Technol.* 205 (2011) 3448–3454.
- [13] W. Wang, F.-Y. Hou, H. Wang, H.-T. Guo, Fabrication and characterization of Ni–ZrO₂ composite nano-coatings by pulse electrodeposition, *Scr. Mater.* 53 (2005) 613–618.
- [14] C. Ma, D. Zhao, W. Liu, F. Xia, P. Jin, C. Sun, Magnetic assisted pulse electrodeposition and characterization of Ni–TiC nanocomposites, *Ceram. Int.* 46 (2020) 17631–17639.
- [15] Z. Zhang, X. Wu, C. Jiang, N. Ma, Electrodeposition of Ni matrix composite coatings containing ZrC particles, *Surf. Eng.* 30 (2014) 21–25.
- [16] C.R. Raghavendra, S. Basavarajappa, I. Sogalad, Electrodeposition of Ni-nano composite coatings: a review, *Inorg. Nano-Metal Chem.* 48 (2018) 583–598.

- [37] 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). <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154495>.
- [38] C. Liu, F. Su, J. Liang, Producing cobalt-graphene composite coating by pulse electrodeposition with excellent wear and corrosion resistance, *Appl. Surf. Sci.* 351 (2015) 889–896. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.06.018>.
- [39] W. Liu, W. Li, W. Dong, L. Guo, Y. Zou, C. Yu, C. Sun, N. Huang, X. Sun, A novel carbon coating by electrochemical deposition in deep eutectic solvent with the assistance of ammonium chloride for stainless steel bipolar plates, *J. Power Sources.* 606 (2024) 234518.
- [40] J. Yang, K. Dong, Y. Song, X. Cheng, Q. Dong, E.-H. Han, Deposition mechanism of cathodic electrophoresis coating on Mg alloys: Effects of Mg substrates on deposition process, *Prog. Org. Coatings.* 187 (2024) 108103.
- [41] Z. Firdouz, P. Tripathi, K. Mondal, K. Balani, Effect of carbonaceous reinforcements on anticorrosive and magnetic properties of Ni-Cu based composite coatings prepared by pulsed electrodeposition, *Surf. Coatings Technol.* 441 (2022) 128560. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128560>.
- [42] M.F. Heragh, S. Eskandarinezhad, A. Dehghan, Ni-Cu matrix composite reinforced with CNTs: preparation, characterization, wear and corrosion behavior, inhibitory effects, *J. Compos. Compd.* 2 (2020) 123–128.
- [27] S.M.L. Baghal, A. Amadeh, M.H. Sohi, S.M.M. Hadavi, The effect of SDS surfactant on tensile properties of electrodeposited Ni – Co / SiC nanocomposites, *Mater. Sci. Eng. A.* 559 (2013) 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.145>.
- [28] W. Zhang, Q. Fu, Z. Shi, C. Ji, B. Li, H. Chu, Microstructure, surface characteristics and properties of Ni–W composite coatings reinforced by nanoparticles fabricated by electrodeposition route, *Surf. Topogr. Metrol. Prop.* 9 (2021) 15010.
- [29] B. Li, T. Mei, D. Li, S. Du, Ultrasonic-assisted electrodeposition of Ni-Cu/TiN composite coating from sulphate-citrate bath: Structural and electrochemical properties, *Ultrason. Sonochem.* 58 (2019) 104680.
- [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) 125738. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125738>.
- [31] 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>.
- [32] 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.
- [33] S. Mohajeri, A. Dolati, S. Rezagholibeiki, Electrodeposition of Ni/WC nano composite in sulfate solution, *Mater. Chem. Phys.* 129 (2011) 746–750.
- [34] A. Zoikis-Karathanasis, E.A. Pavlatou, N. Spyrellis, The effect of heat treatment on the structure and hardness of pulse electrodeposited NiP–WC composite coatings, *Electrochim. Acta.* 54 (2009) 2563–2570.
- [35] 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>.
- [36] L.M. Chang, D. Chen, J.H. Liu, R.J. Zhang, Effects of different plating modes on microstructure and corrosion resistance of Zn-Ni alloy coatings, *J. Alloys Compd.* 479 (2009) 489–493. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2008.12.108>.