

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

تأثیر افزودن اکسید گرافن بر رفتار خواص تریبولوژی پوشش‌های ایجاد شده روی آلایژ منیزیم AZ31 به روش

اکسیداسیون الکترولیتی پلاسما

مقاله پژوهشی

صادق اسماعیلی^۱، ته‌مین‌ه احمدی^{۲*}، حمیدرضا بخش‌ش‌راد^۳، امیرعباس نوربخش^۴

۱- دانشجویی دکترای مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد پیشرفته، دانشکده مهندسی مواد، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران.

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مواد، واحد شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی، شهرضا، ایران.

* tahmadi56@yahoo.com

چکیده

در این تحقیق تأثیر افزودن گرافن اکساید بر رفتار تریبولوژی پوشش‌های ایجاد شده به روش فرآیند اکسیداسیون پلاسما الکترولیتی تحت شرایط ولتاژ ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. عملیات پوشش‌دهی با شکل موج دو قطبی طی مدت ۱۰ دقیقه بر روی سطح آلایژ منیزیم AZ31 انجام گردید. نتایج نشان داد که مورفولوژی سطح پوشش‌ها دارای میکرو حفراتی مشهور به ساختار پنکیکی و دهانه آتشفشانی بر روی سطح هستند که قطر آن‌ها با افزودن گرافن اکساید افزایش یافته است. بررسی فازی پوشش‌ها نشان داد که پوشش‌ها از فازهای اکسیدی فورستریت و پریکلاز تشکیل شده‌اند. مکانیزم سایش نمونه‌های پوشش داده شده از نوع خراشان بوده است همچنین مقاومت به سایش پوشش حاوی افزودنی گرافن اکساید افزایش یافته به طوری که میانگین ضریب اصطکاک برای نمونه یاد شده ۱۰ برابر نسبت به نمونه بدون پوشش کاهش یافته است که دلیل این امر افزایش سختی می‌باشد. سختی نمونه حاوی گرافن اکساید حدود ۵ برابر نسبت به آلایژ منیزیم افزایش داشته است. پوشش ایجاد شده بر روی آلایژ منیزیم می‌تواند آن را به کاندید مناسبی جهت کاربردهای ارتوپدی تبدیل کند.

اطلاعات مقاله

دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۹/۲۹

کلید واژگان:

گرافن اکساید

اکسیداسیون پلاسما الکترولیتی

تخلخل

مقاومت به سایش

سایش خراشان

Effect of Graphene Oxide Addition on the Behavior of Tribological Properties of Coatings Prepared on Magnesium Alloy AZ31 by Plasma Electrolytic Oxidation Method

Sadegh Esmaili¹, Tahmineh Ahmadi^{2*}, Hamidreza bakhsheshi-Rad³, Amirabbas Noorbakhsh⁴

1- PhD student of Materials Engineering, Department Of Materials Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

2- Assistant Professor, Department Of Materials Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

3- Assistant Professor, Advanced Materials Research Center, Department Of Materials Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch, Najafabad, Iran.

4- Associate Professor, Department Of Materials Engineering, Shahreza Branch, Islamic Azad University, Shahreza, Iran.

* tahmadi56@yahoo.com

Article Information

Original Research Paper

Doi:

20.1001.1.24233226.1401.16.3.3.4

Keywords:

Graphene Oxide

Plasma Electrolytic Oxidation

Porosity

Wear resistance

Abrasive wear

Abstract

In this study, the effect of adding graphene oxide on the tribological behavior of coatings created by the electrolytic plasma oxidation process under constant voltage conditions has been investigated. Bipolar waveform coating operation was performed on the surface of AZ31 magnesium alloy for 10 minutes. The results showed that the surface morphology of the coatings had micro-cavities known as pancake structure and volcanic crater on the surface, the diameter of which increased with the addition of graphene oxide. Fuzzy analysis of coatings showed that the coatings are composed of oxide phases of forsterite and periclase. The wear mechanism of the coated samples was scratched. Also, the wear resistance of the coating containing graphene oxide additive increased so that the average coefficient of friction for the mentioned samples decreased 10 times compared to the uncoated sample, which is due to the increase in hardness. The hardness of the sample containing graphene oxide has increased about 5 times compared to the magnesium alloy. Magnesium alloy with this coating is a good candidate for orthopedic applications.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Sadegh Esmaili, Tahmineh Ahmadi, Hamidreza bakhsheshi-Rad, Amirabbas Noorbakhsh, Effect of Graphene Oxide Addition on the Behavior of Tribological Properties of Coatings Prepared on Magnesium Alloy AZ31 by Plasma Electrolytic Oxidation Method, New Process in Material Engineering, 2022, 16(3), 29-41.

۱- مقدمه

منیزیم و آلیاژهای آن در صنایع مختلف به خاطر خواص متمایز مانند چگالی پایین، استحکام بالا، هدایت حرارتی مناسب و ظرفیت گرمایی پایین محبوبیت فراوانی دارند [۱]. با این حال، برخی از خواص نامطلوب منیزیم و آلیاژهای آن مانند مقاومت پایین در برابر سایش مانع استفاده گسترده آن‌ها در صنعت شده است [۲]. تلاش‌های بسیاری از جمله آلیاژسازی و عملیات سطحی برای افزایش مقاومت به سایش آلیاژهای منیزیم در محیط‌های مختلف صورت گرفته است [۳].

در سال‌های اخیر فرآیند اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی (PEO) جهت اصلاح برخی از خواص آلیاژهای سبک مانند آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم مورد استفاده قرار گرفته است. این روش یک عملیات تبدیل الکتروشیمیایی است که عمدتاً بر اساس اصلاح فیلم آندی در حال رشد توسط تخلیه قوس که در پتانسیل‌های بالاتر از ولتاژ شکست فیلم اکسید آغاز می‌شود، بنا نهاده شده است [۴]. لازم به ذکر است که عملیات PEO به طور کلی باعث بهبود مقاومت به خوردگی و سایش می‌شود، اما لایه سطحی سخت و زبر ایجاد شده ممکن است منجر به افزایش محصولات ساینده در اصطکاک شده و باعث آسیب به ماده گردد [۵-۸]. آلیاژهای منیزیم به دلیل ساختار کریستالی هگزاگونال که اجازه برش در صفحات پایه را می‌دهد، ضریب اصطکاک پایینی دارند، در حالی که انجام عملیات PEO روی آن‌ها، منجر به افزایش ضریب اصطکاک خواهد شد [۱]. برای افزایش بیشتر عملکرد تریبولوژیکی یک پوشش سرامیکی تولید شده توسط PEO، بیشتر محققان تلاش کرده‌اند تا پوشش‌های کامپوزیتی با مواد افزودنی متنوع تهیه کنند. به طور کلی، قرار گرفتن نانوذرات در پوشش‌های کامپوزیتی عمدتاً باعث کاهش ریزترک‌ها می‌شود، مقدار اکسیدهای فلز را بهبود می‌بخشد و بنابراین مقاومت در برابر سایش و خوردگی را افزایش می‌دهد [۹].

گرافن اکسید به دلیل مساحت سطح ویژه بالا، خواص مکانیکی قابل توجه و آب دوست بودن، به عنوان یک ماده

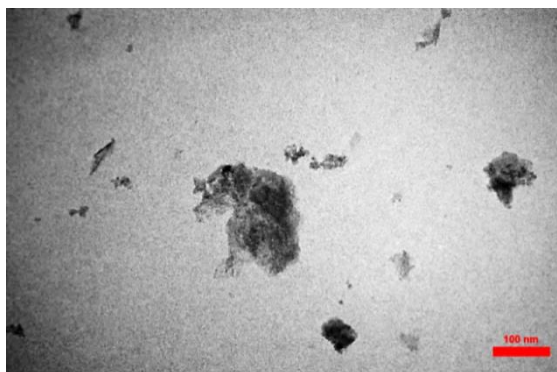
تقویت کننده و امیدوارکننده برای پوشش‌های با عملکرد بالا در نظر گرفته شده است. علاوه بر این، اکسید گرافن به دلیل داشتن گروه‌های حاوی اکسیژن، در یک الکترولیت اکسیداسیون میکرو قوس بسیار آسان‌تر پوشش دهی می‌شود [۱۰].

ون و همکاران^۱ [۱۱]، پودر کامپوزیت هیدروکسی آپاتیت/ اکسید گرافن (HA/GO) را به روش سل-ژل با استفاده از GO سنتز شده که توسط اکسیداسیون تحت فشار به پوشش PEO رشد یافته بر روی آلیاژ Mg-AZ31 اضافه شده است، تولید کردند. آن‌ها مشاهده کردند که پوشش ایجاد شده توسط این روش باعث افزایش مقاومت در برابر سایش، سختی و استحکام می‌گردد و می‌توان از این پوشش‌ها به عنوان روان کننده جامد استفاده کرد. ما و همکاران^۲ [۵]، نشان دادند که مقاومت در برابر سایش یک پوشش حاوی کربن (C) ساخته شده روی آلیاژ آلومینیوم با افزودن میکرو ذرات گرافیت به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. نی و همکاران^۳ [۶]، برای کاهش ضریب اصطکاک پوشش‌های سرامیکی در دمای اتاق، یک لایه دوتایی متشکل از لایه داخلی اکسید آلومینیوم و لایه بیرونی روان کننده گرافیت را تولید کردند. همچنین ژانگ و همکاران^۴ [۹]، تأثیر اکسید گرافن بر عملکرد رفتار تریبولوژی پوشش MAO^۵ ساخته شده روی آلیاژ Mg-Li را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که ورقه‌های توزیع شده GO، میکرو منافذ را پر کرده و باعث کاهش تخلخل پوشش می‌شود.

در این تحقیق نیز به منظور بهبود خواص تریبولوژی آلیاژ منیزیم AZ31، پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی بر روی سطح آن تشکیل گردید و تأثیر افزودن گرافن اکساید به آن مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق نمونه‌هایی با ابعاد ۲۰×۱۵×۲ mm از آلیاژ منیزیم AZ31 به عنوان فلز پایه استفاده شد. ترکیب شیمیایی فلز پایه با استفاده از دستگاه کوانتومتر آرون مدل ۲۵۰۰ اندازه‌گیری و در جدول (۱) ارائه شده است. آماده‌سازی سطحی نمونه‌ها توسط سنباده کاربرد سیلیسیم از شماره ۶۰۰ تا



شکل (۲): تصویر TEM از سُل گرافن اکساید استفاده شده در الکترولیت پوشش‌دهی

از فرمول (۱) برای محاسبه درصد تغییرات وزن [۱۲] استفاده شد. در این رابطه M_1 وزن نمونه قبل از پوشش‌دهی، M_2 وزن نمونه پس از پوشش‌دهی و ΔW درصد تغییرات وزن نمونه می‌باشد.

$$\% \Delta W = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (1)$$

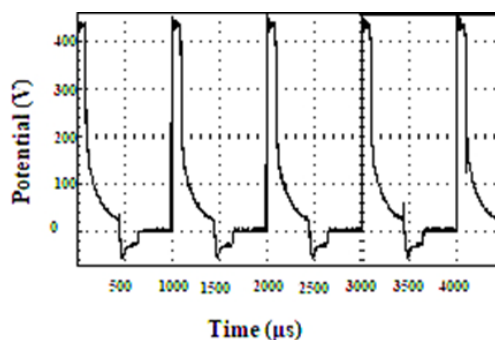
ترکیب فازی پوشش‌ها، توسط دستگاه پراش پرتو ایکس Philips مدل PW 1730 با زاویه نرمال ۱۰ تا ۱۰۵ درجه به دست آمد. آنالیز FTIR بر روی پوشش به دست آمده با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مادون قرمز ساخت کمپانی آمریکایی Thermo scientific به منظور شناسایی پیوندهای ایجاد شده در طول موج ۴۰۰ تا 4000 cm^{-1} صورت پذیرفت. جهت بررسی مورفولوژی سطحی و مقاطع نمونه‌ها و سطح سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل FEI Quanta 200 استفاده گردید. از میکروسکوپ نیروی اتمی BRUKER مدل ICON ساخت کشور آمریکا جهت بررسی توپوگرافی و سطح سایش نمونه‌ها استفاده گردید.

آزمون سختی سنجی نمونه‌ها، توسط دستگاه میکرو سختی سنج Koopa مدل KM3 به روش ویکرز با اعمال بار ۵۰۰ گرم انجام گردید. به منظور بررسی خواص تریبولوژی نمونه‌ها توسط دستگاه سایش مدل TSN-WTC 02 روش پین بر دیسک^۸ (ASTM G 99) تحت شرایط آزمایشگاهی (درجه حرارت $25 \pm 25^\circ \text{C}$ و رطوبت محیط ۲۱٪) و با بار اعمالی ۴ نیوتن، سرعت چرخش ۵۰ دور بر دقیقه با طی

۲۰۰۰ صورت پذیرفت. برای حذف آلاینده‌های آلی مانند چربی‌ها، نمونه‌ها با ترکیب آب مقطر، استون و الکل به مدت ۱۰ دقیقه درون دستگاه التراسونیک قرار گرفتند. جهت پوشش‌دهی نمونه‌ها، آلیاژ منیزیم به عنوان آنود و استوانه‌ای فلزی از جنس فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ به قطر ۲۰ و ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر به عنوان کاتد استفاده شد. از یک منبع جریان مستقیم با حداکثر پتانسیل ۷۵۰ ولت و جریان ۵۰ آمپر همراه با یک پالس طراحی شده بر پایه IGBT^۹ با قابلیت تبدیل جریان مستقیم به دوقطبی اصلاحی جهت تأمین انرژی لازم برای پوشش‌دهی استفاده شد. در جدول (۲)، پارامترهای الکتریکی مورد نیاز جهت عملیات پوشش‌دهی و شکل (۱)، منحنی مربوط موج جریان اعمالی را نشان می‌دهد.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی اسمی آلیاژ منیزیم AZ31 (درصد وزنی)

عنصر	Si	Cu	Mn	Zn	Al	Mg	درصد وزنی
	۰/۰۰۵	۰/۰۰۹	۰/۴۷۷	۱/۴۵	۳/۳۹	Bal.	



شکل (۱): منحنی موج جریان مورد استفاده برای پوشش‌دهی

پارامترهای فرآیند پوشش‌دهی توسط روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی طبق جدول (۲) انجام شد. دیسپرسیون آبی یا سُل گرافن اکساید به دست آمده از اکسیداسیون گرافیت از طریق روش هامرز اصلاح شده^۷ به دست آمده که به صورت تک لایه با ضخامت $1/4 - 0/7$ نانومتر در حلال قطبی آبی با غلظت $9 \text{ wt} \%$ به سُل تبدیل شد. تصویر میکروسکوپی الکترونی عبوری گرافن اکساید مورد استفاده در الکترولیت در شکل (۲) نشان داده شده است.

مسافت ۱۰۰ متر انجام شد. نرخ سایش ویژه مطابق با فرمول در فرمول فوق W_s نرخ سایش ویژه، m میزان جرم ساییده زیر محاسبه می‌شود:

$$W_s = \frac{m}{d \times F} \quad (2)$$

جدول (۲): پارامترهای الکتریکی فرآیند پوشش دهی

فرکانس (Hz)	سیکل کاری مثبت (%)	سیکل کاری منفی (%)	ولتاژ مثبت (V)	ولتاژ منفی (V)	زمان (دقیقه)	زمان پالس
۱۰۰۰	۱۰	۲۰	۴۴۰	۲۴	۱۰	$t_{on}^+ = 100 \mu s, t_{off}^+ = 350 \mu s$ & $t_{on}^- = 200 \mu s, t_{off}^- = 350 \mu s$

جدول (۳): پارامترهای مربوط به فرآیند پوشش دهی توسط روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی

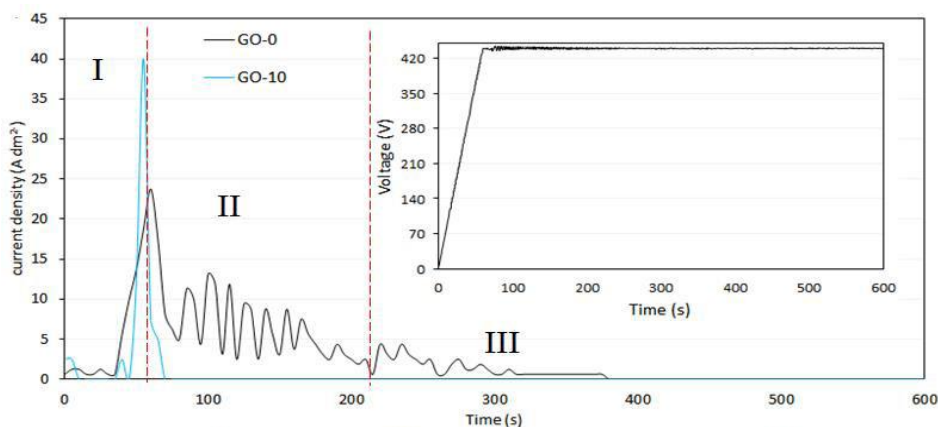
کد نمونه	سیلیکات سدیم (gr/Lit)	هیدروکسید پتاسیم (gr/Lit)	پتاسیم فلوراید (gr/Lit)	غلظت سل گرافن اکساید ۰.۹ wt.% در الکترولیت پوشش دهی (mL/Lit)	pH	هدایت الکتریکی (mS/cm)
GO-0	۷	۸	۲	۰	۱۲/۵۴	۱۶/۰۵
GO-10	۷	۸	۲	۱۰	۱۲/۹	۱۸/۵

نمونه GO-10 با شدت کاهش می‌یابد و تا انتهای عملیات پوشش دهی ثابت (حدود 0.5 A.dm^{-2}) مانده است. دلیل این امر به میزان هدایت الکتریکی الکترولیت باز می‌گردد؛ به عبارت دیگر چون ولتاژ اعمال شده ثابت است، افزایش دانسیته جریان مطابق قانون اهم باعث کاهش مقاومت سیستم و منجر به کاهش زمان و جریان خروجی جرقه زنی می‌شود. به عبارت بهتر در توضیحات منطقه اول می‌توان گفت که غلظت یون‌ها در الکترولیت با افزودن گرافن اکساید افزایش یافته و در نتیجه یون‌ها به راحتی بر روی سطح بستر جمع می‌شوند؛ بنابراین جریان بین بستر و الکترولیت به سرعت افزایش می‌یابد و سپس بهمن^۹ الکترون به راحتی رخ داده و منجر به کاهش شکست الکتریکی می‌شود [۱۴].

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی تغییرات نمودار جریان- زمان

شکل (۳)، نمودار جریان- زمان را برای نمونه‌های GO-0 و GO-10 در الکترولیت پایه سیلیکاتی نشان می‌دهد. تکامل جریان در طول تشکیل فیلم آندی در حالت پتانسیل ثابت شامل سه منطقه می‌باشد. منطقه ۱ نمودار، ناحیه آندایزینگی می‌باشد که در این ناحیه افزایش شدید دانسیته جریان دیده می‌شود و یک فیلم نازک فیلم پسیو با مقاومت بالا در سطح شروع به تشکیل شدن می‌نماید به طوری که قبل وقوع شکست دی‌الکتریک و ایجاد پلاσμα، از سطح منیزیم مقداری حباب اکسیژن آزاد می‌شود این ناحیه برای نمونه GO-0 به تدریج کاهش یافته اما برای



شکل (۳): نمودار سیکل جریان- زمان عملیات پوشش دهی PEO در حضور و عدم حضور گرافن اکساید

ناشی از جرقه‌های بحرانی خارج می‌شود را مسدود نماید و مانع از بین رفتن پوشش می‌گردد [۱۵].

۲-۳- بررسی مورفولوژی سطح نمونه‌ها

شکل (۴) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مطابق شکل (۴-الف)، مورفولوژی سطح نمونه مرجع (AZ31) دارای خطوط موازی بوده که منشأ آن رد سنباده می‌باشد. شکل (۴-ب)، مورفولوژی سطح نمونه فاقد GO-0 را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌کنید سطحی صاف به همراه میکرو حفرات پراکنده با سایزهای متفاوت (ساختار پنکیکی^۱) ایجاد شده است؛ تخلخل‌ها توسط نواحی شبه دایره‌ای نسبتاً هموار از پوششی که تحت انجماد مجدد قرار گرفته، احاطه گردیده است. شکل (۴-ج)، مورفولوژی سطح نمونه GO-10 را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید مورفولوژی سطح ایجاد شده کاملاً آتشفشانی^{۱۱} و به هم ریخته می‌باشد. بر روی سطح کانال‌های تخلیه نمونه‌های حاوی افزودنی گاهاً محصولات واکنش که در اینجا همان رسوبات گرافن اکساید است دیده می‌شود؛ از طرفی هم میزان دانسیته جریان بالا سبب ایجاد قوس‌های شدیدتری بر روی سطح نمونه در حین فرآیند پوشش‌دهی شده و این امر ساختار را از حالت پنکیکی به آتشفشانی تغییر داده است.

به‌طور کلی، مورفولوژی سطح پوشش‌ها از میکرو حفره‌هایی که مشخصه پوشش‌های اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی هست، پوشیده شده‌اند. میکرو حفره‌ها مربوط به پدیده میکرو جرقه‌ها و حباب‌های گازی در حین فرآیند پوشش‌دهی است. اندازه و نحوه توزیع این عیوب، خواص نهایی پوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل دمای بسیار بالا حاصل از پدیده تخلیه، منیزیم از زیرلایه ذوب شده و مذاب حاصل در حال خارج شدن از کانال‌های تخلیه به دلیل میدان الکتریکی قوی با اکسیژن موجود در الکترولیت اکسید شده و به اکسید منیزیم تبدیل می‌شود. انجماد سریع مذاب اکسید منیزیم در تماس با الکترولیت که از کانال‌های تخلیه خارج می‌شود، باعث تشکیل ساختارهای پنکیکی و دهانه آتشفشانی می‌گردد [۱۲ و ۱۶].

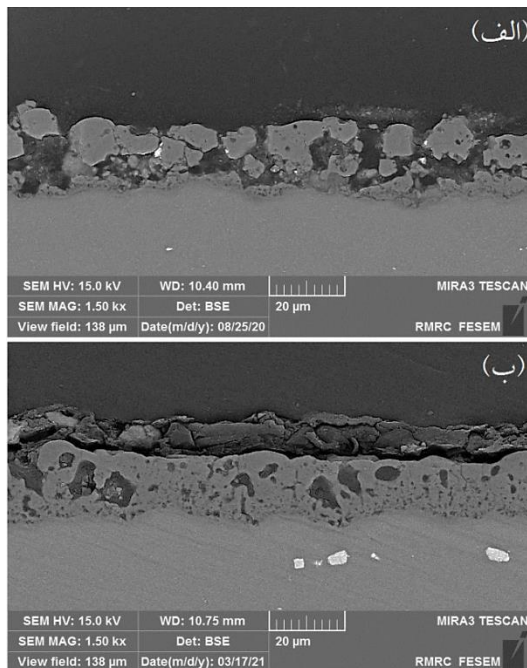
در آغاز منطقه ۲، در سطح نمونه به دلیل پدیده لومینسانس، جرقه‌های ریزی روی سطح آند و نوسانات جریان به وجود آمد که باعث تشکیل لایه متخلخل می‌گردد. جریان شکست فیلم آندی زمانی حاصل می‌گردد که مقادیر جریان، به حد بحرانی برای ایجاد بهمنی از جریان الکتریکی برسد [۸]؛ به عبارت دیگر پس از عبور از فرآیند آندایز معمولی، افزایش میدان الکتریکی در لایه ایجاد شده و انتشار صوت، نشان‌دهنده آزاد شدن شدیدتر گاز اکسیژن در آند است.

در این منطقه با فرض اینکه مقاومت الکترولیت حین فرآیند ثابت باشد می‌توان مقاومت سیستم را معادل مقاومت پوشش در نظر گرفت؛ بنابراین کاهش دانسیته جریان در الکترولیت حاوی گرافن اکساید به خاطر افزایش مقاومت پوشش است؛ البته این امر به خاطر هدایت الکتریکی بیشتر الکترولیت حاوی گرافن اکساید است، چرا که در این الکترولیت افزایش هدایت الکتریکی باعث کاهش شدید دانسیته جریان خروجی می‌گردد.

در منطقه ۳، با اینکه جریان آندی به واسطه مقاومت پوشش به حدود 0.5 A.dm^{-2} رسیده است، اما هنوز جرقه‌زنی با یک روند ثابت و یکنواخت در حال رخداد است؛ دلیل این امر وجود جریان کاتدی می‌باشد. در این ناحیه، شدت جرقه‌زنی در نمونه GO-10 نسبت به نمونه GO-0 افزایش یافته است. در تحلیل کلی می‌توان گفت، گرافن اکساید درون الکترولیت جذب آنیون‌ها را در سطح نمونه مهار می‌کند، در نتیجه از رخداد ولتاژ (یا جریان) بحرانی بین بستر و الکترولیت جلوگیری می‌نماید؛ به عبارت بهتر، واکنش‌های پایانی در PEO شدید بوده که در صورت وجود ذرات گرافن اکساید، میزان مصرف یون‌ها افزایش می‌یابد. این امر منجر به کاهش یون‌ها در الکترولیت می‌شود و شدت جریان به طور محسوسی افزایش می‌یابد، بنابراین برای حفظ تعادل میدان الکتریکی به جریان بیشتری نیاز است [۱۴]، این در حالی است که با وقوع بهمن الکترون، شکست دی‌الکتریک بهبود می‌یابد. به طور کلی گرافن اکساید موجود می‌تواند منافذ ریز را در جاهایی که مذاب

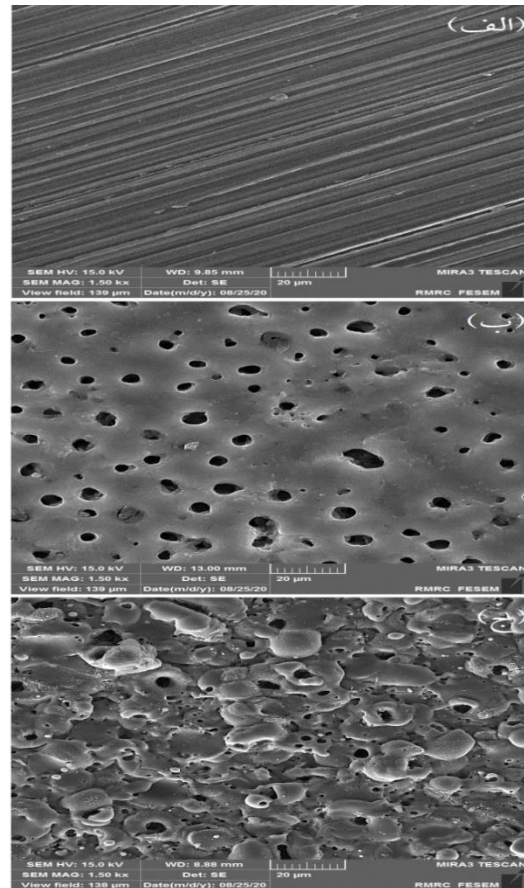
۳-۳- بررسی سطح مقطع نمونه‌ها

شکل (۶)، تصویر سطح مقطع عرضی نمونه‌های پوشش داده شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید استفاده از گرافن اکساید در الکترولیت پوشش‌دهی، سبب افزایش تراکم ریزساختار و کاهش قطر تخلخل‌های درون ساختاری (حفرات نوع A و C) در مقایسه با پوشش اکسیدی شده است [۱۷ و ۱۸]. حفرات نوع A، حفرات سطحی هستند که به فصل مشترک فلز- پوشش راه ندارند و این‌گونه گفته شده است که این نوع از حفرات نتیجه گازهای به دام افتاده در سطح پوشش هستند. حفرات نوع C دارای عمق بیشتری نسبت به حفرات نوع A هستند اما این حفرات راهی به فصل مشترک پوشش- زیرلایه ندارند و علت تشکیل این نوع حفرات همانند حفرات نوع A است، اما مخرب‌ترین نوع این حفرات B نامیده می‌شود که این دسته از حفره‌ها از سطح پوشش تا زیر لایه راه دارند [۷].



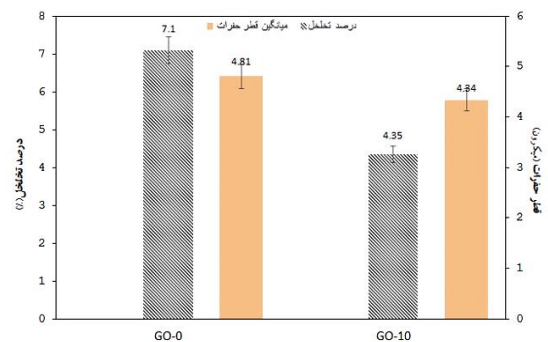
شکل (۶): تصویر الکترون برگشتی از مقطع عرضی نمونه‌های: (الف) GO-10، (ب) GO-0

رشد پوشش به سمت زمینه با کنترل نفوذ اکسیژن همراه با خروج منیزیم مذاب از طریق کانال‌های تخلیه و انجماد آن در سطح می‌باشد. با توجه به جذب الکتروفوریتیکی گرافن اکساید و بهبود سیلان مذاب منیزیم در سطح آن، نمونه



شکل (۴): تصاویر SEM از سطح نمونه‌های پوشش‌دار: (الف) مرجع AZ31، (ب) GO-0 و (ج) GO-10

شکل (۵)، نمودار مربوط به درصد تخلخل سطحی و قطر حفرات نمونه‌های پوشش داده شده را نشان می‌دهد. همان‌طوری که مشاهده می‌کنید درصد تخلخل و قطر حفرات ایجاد شده در نمونه GO-10 به دلیل تغییرات دانسیته جریان و افزودن گرافن اکساید به پوشش کمتر از نمونه GO-0 می‌باشد.



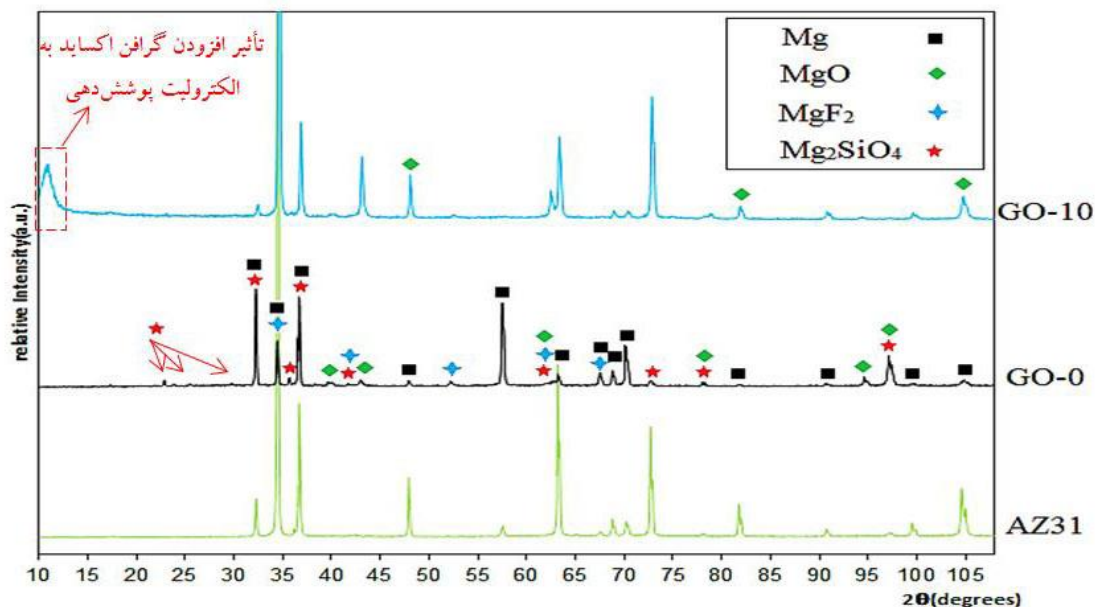
شکل (۵): نمودار قطر تخلخل - درصد تخلخل برای نمونه‌های پوشش داده شده

۴-۳- بررسی فازی نمونه‌ها

شکل (۷) الگو پراش پرتو ایکس نمونه‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، عمده فازهای تشکیل در پوشش‌ها، فازهای فورستریت و پریکلاز می‌باشد. مطابق تحقیق لی و همکاران^[۱۹] مکانیزم تشکیل MgO مطابق با فرآیند آنودایزینگ است. حضور Mg_2SiO_4 در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های پوشش داده شده نشان می‌دهد که SiO_4^{4-} به میزان زیادی در فیلم وجود دارد. سیلیکات سدیم در محلول آبی به راحتی هیدرولیز می‌شود و به شکل $Si(OH)_4$ درمی‌آید، هم‌زمان به دلیل گرمای زیاد ناشی از پدیده قوس به SiO_2 هیدراته تبدیل می‌گردد. با توجه به تأثیر درجه حرارت بالا در فرآیند PEO، SiO_2 و MgO هر دو ذوب می‌شوند و پس از خاموش شدن میکرو قوس‌ها توسط الکترولیت خنک می‌شوند و در نهایت تحت یک تغییر شکل فازی به مخلوطی از فازهای MgO و Mg_2SiO_4 تبدیل می‌گردند [۱۹].

GO-10 در مقایسه با نمونه GO-0 فشرده‌گی بالاتر دارد و ابعاد کانال‌های تخلیه کاهش یافته است. ضخامت نمونه GO-0 برابر 0.2 ± 0.21 و ضخامت نمونه GO-10 برابر حدود 0.2 ± 0.20 میکرون می‌باشد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید تغییرات ضخامت پوشش در اثر افزودن گرافن اکساید ناچیز بوده است. با توجه به فرآیند پوشش‌دهی به نظر می‌رسد که کاهش تعداد جرقه‌ها و کوچک‌تر شدن آن‌ها در اثر کاهش دمای قطعه حین پوشش‌دهی باعث کاهش انحلال اکسیژن و در نتیجه کاهش تعداد حفره‌های گازی در مقطع پوشش گردیده است، این در حالی است که گرافن اکساید مطابق شکل (۶) درون حفرات را پر کرده است و به عنوان یک عامل کاهش‌دهنده تعداد تخلخل مقطع ظاهر شده است.

وزن پوشش نمونه GO-0 برابر 0.3 ± 0.3 و نمونه GO-10 برابر حدود 0.1 ± 0.7 گرم می‌باشد. افزودن گرافن اکساید در الکترولیت سیلیکاتی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در افزایش وزن پوشش دارد، بنابراین می‌توان گفت که حضور افزودنی تا حدودی سبب پر شدن تخلخل‌ها و متراکم شدن پوشش گردیده است.



شکل (۷): الگو پراش پرتو ایکس نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده

که در نمونه فاقد گرافن اکساید به صورت منیزیم می‌باشند به فازهای MgO و Mg_2SiO_4 تبدیل شده و شدت آن با افزودن غلظت GO افزایش یافته است [۱۷]. با توجه به آنالیز انجام

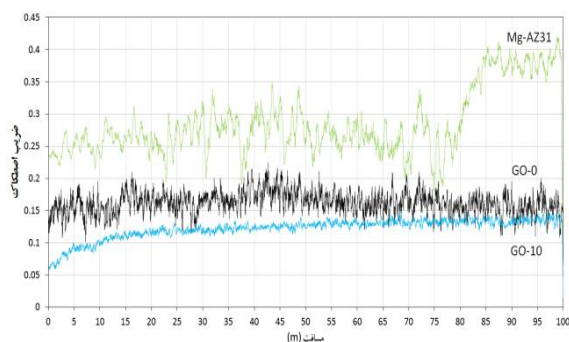
برای نمونه GO-0 که یک پوشش مبتنی بر سیلیکات می‌باشد و هیچ فازی که نشان‌دهنده وجود GO باشد را نشان نمی‌دهد. در صورت افزودن گرافن اکساید شدت تعدادی از پیک‌ها

۳-۶- بررسی میکروسختی

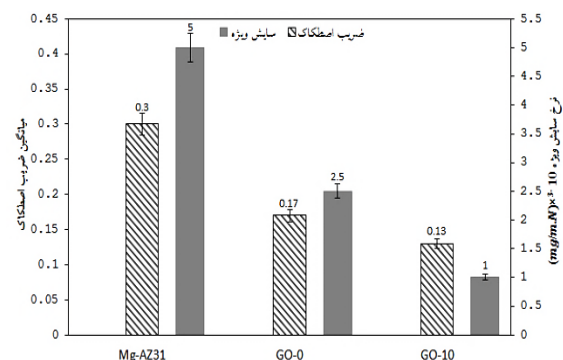
سختی فلز پایه برابر $91 \pm 0/1$ ، نمونه GO-0 برابر $448 \pm 0/2$ و GO-10 برابر $532 \pm 0/4$ اندازه‌گیری شد. همان‌طور که مشخص است، افزودن گرافن اکساید، باعث افزایش سختی پوشش گردیده است. مطابق با شکل (۷)، افزودن گرافن اکساید در الکترولیت می‌تواند باعث تشکیل فازهای سخت MgO و Mg_2SiO_4 شود و یک ساختار ظریف با نقص ساختاری کمتر ایجاد کند. فشردگی و تراکم مقاطع عرضی پوشش‌ها گواه این موضوع است که سختی با متراکم شدن پوشش افزایش یافته و سبب گردیده که سختی نمونه‌های پوشش دار نسبت به نمونه بدون پوشش افزایش یابد.

۳-۷- بررسی رفتار سایشی

شکل (۹) نمودار ضریب اصطکاک برای نمونه‌ها برای مسافت ۱۰۰ متر را نشان می‌دهد.



شکل (۹): نمودار ضریب اصطکاک برحسب مسافت طی شده نمونه‌ها

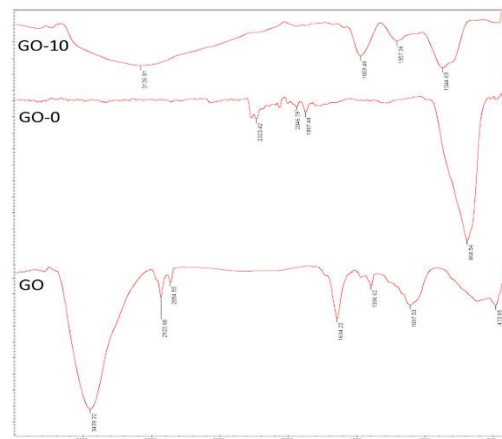


شکل (۱۰): نمودار ضریب اصطکاک و نرخ سایش ویژه نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده

شده و مطالعات [۱۸]، هیچ فاز ثانویه حاوی کربن در پوشش‌ها دیده نمی‌شود؛ اما در زاویه 10° درجه حضور گرافن اکساید را در نمونه GO-10 می‌توان اثبات نمود [۲۰-۲۲].

۳-۵- بررسی آنالیز FT-IR

در راستای تأیید آنالیزهای XRD و همچنین مشخص شدن پیوندهای بین اکسیژن، کربن و سیلیسیم در پوشش‌ها، از نمونه‌ها آنالیز FTIR گرفته شد که در شکل ۸ قابل ملاحظه می‌باشد. مشخص شده است که موقعیت‌های پیک‌ها در یک طیف مادون قرمز با ترکیب مولکولی و ساختار آن ارتباط دارد. در طیف مادون قرمز، باندهای جذب به دست آمده با تحقیقات سایر محققین هم‌خوانی دارد [۲۱ و ۲۳]. در نمونه GO-10، پیک‌های باند ارتعاشات کربوکسیل و هیدروکسیل در محدوده 3050 تا 3800 cm^{-1} قرار دارد. باندهای جذب در محدوده 1600 تا 1650 cm^{-1} مربوط به گونه‌های کتونیک و C=O و پیک‌های باندهای ارائه شده از 1357 تا 1411 مربوط به پیوند C-H است. پیک‌های مشاهده شده در محدوده 1044 تا 1092 cm^{-1} مربوط به ارتعاش نامتقارن و کششی گروه‌های Si-O-Si و Si-O-C می‌باشد. پیک‌های ارائه شده در نمونه GO-0 عمدتاً Si-O و Si-H می‌باشد همچنین در باند جذب محدوده 440 cm^{-1} ترکیب MgO دیده می‌شود. پیک‌های پودر گرافن اکساید (GO) نیز مربوط به پیوندهای C-C، C-H و C-O است. با توجه به حضور پیک‌های کربن در نمونه GO-10، می‌توان گفت که ذرات گرافن اکساید در طی فرآیند PEO با موفقیت در پوشش قرار گرفته است.



شکل (۸): نمودار FTIR نمونه‌های پوشش دار و پودر گرافن اکساید

اصطکاک کمتری در نمونه‌های کامپوزیتی به دنبال کاهش نیروی برشی را مشاهده می‌شود.

به طور کلی گرافن اکساید چه به صورت تک لایه و یا به صورت چند لایه به راحتی با اکسید مذاب در الکترولیت PEO ادغام می‌شود و با تشکیل گرافن اکساید در ترک‌های سطحی و تخلخل‌ها، منجر به افزایش خواص روان کنندگی جامد در پوشش می‌گردد.

جدول (۴) داده‌های مربوط به کاهش وزن نمونه‌ها را پس از آزمون سایش نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که نمونه AZ31 داری بیشترین و نمونه GO-10 دارای کمترین میزان کاهش وزن می‌باشد. کاهش وزن نمونه‌ها پس از سایش عمدتاً به زبری سطح و ترکیب شیمیایی پوشش بستگی دارد به طوری که در پوشش با سطح صاف تر و سختی بالاتر کاهش وزن کمتری مشاهده می‌شود. افزودن گرافن اکساید به طرز قابل توجهی زبری سطح و سختی را افزایش می‌دهد و باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود [۲۵].

جدول (۴): کاهش وزن نمونه‌های بدون پوشش و پوشش داده شده پس از آزمون سایش

کد نمونه	نمونه	پین
BM	۲/۶	۳/۵
GO-0	۱	-۰/۵
GO-10	۰/۴	-۱/۳

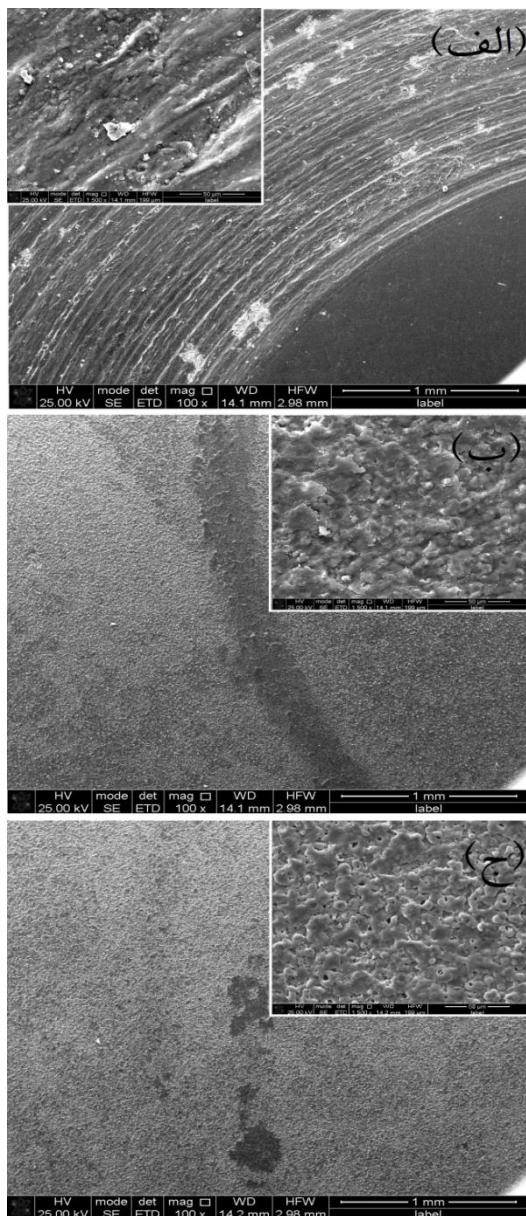
میزان کاهش وزن در نمونه مرجع (AZ31)، به دلیل پایین بودن سختی و مقاومت به سایش، بسیار بالا می‌باشد این در حالی است که وزن پین ساینده این نمونه به دلیل باقی ماندن ذرات منیزیم جدا شده از سطح و انباشته شدن آن‌ها روی پین، افزایش یافته است. کاهش وزن نمونه‌های پوشش دار با اختلاف کمی از یکدیگر می‌باشند که نمایانگر افزایش مقاومت به سایش است. نکته جالب در این نمونه‌ها میزان کاهش وزن پین‌ها است که به دلیل سختی سطح، افزایش مقاومت به سایش و نهایتاً کنده شدن سطح پین این اتفاق رخ داده است [۱۳] در مورد نمونه GO-10 می‌توان گفت که کاهش وزن اندک به این معنی نیست که اصلاً کاهش وزن وجود نداشته؛ بلکه مقدار اندک کاهش وزن با افزایش وزن ناشی از باقی ماندن ذرات آهن ساییده شده از پین بر روی

در نمونه مرجع (AZ31)، ضریب اصطکاک به طور میانگین حدود ۰/۳ می‌باشد که در بین تمامی نمونه‌ها دارای بیشترین ضریب اصطکاک است. نوسانات به وجود آمده در این نمونه شامل دو مرحله است؛ ناحیه اول که تا حدود ۸۰ متر با دامنه نوسان زیاد ادامه دارد که به دلیل زبر بودن و ناهمواری سطحی به وجود آمده‌اند. ناحیه دوم که از ۸۵ متر با دامنه نوسانات کمتر تا پایان ادامه دارد مربوط به انباشت ذرات حاصل از سایش می‌باشد. در این نمودار به صورت جزئی نوسانات ناگهانی و دره‌هایی مشاهده می‌شود که می‌تواند به علت کنده شدن تکه‌ای از سطح رخ داده باشد؛ به عبارت دیگر در مرحله اول، ضریب اصطکاک بر روی سطح صاف بوده و سایش جزئی شیاری بر روی سطح به وجود می‌آورد؛ در ادامه این رویه، سایش چسبان بر لغزش غلبه کرده و در نتیجه ضریب اصطکاک افزایش یافته است.

در نمونه‌های پوشش دار دامنه تغییرات ضریب اصطکاک به ترتیب ۰/۱۷ و ۰/۱۳ می‌باشد. ناحیه اول این نمونه کوتاه بوده و پس از طی مسافت ۲ تا ۱۰ متر وارد ناحیه دوم گردیده است. وسعت کم ناحیه اول بیانگر زبری کم و سطحی با اصطکاک نسبتاً صاف می‌باشد. این بدین معناست که پین فولادی در ابتدا برآمدگی‌های سطحی پوشش را می‌خراشد به این ترتیب مقادیر ضریب اصطکاک تا از بین رفتن نمودن برجستگی‌ها به سرعت افزایش می‌یابد. کاهش ضریب اصطکاک نسبت به نمونه مرجع به دلیل کم شدن چسبندگی بین دو سطح امری منطقی است. لازم به ذکر است که نمونه GO-10 به دلیل داشتن گرافن اکساید خاصیت خود روانکاری دارد. دلیل ضریب اصطکاک نسبتاً زیاد برای نمونه GO-0 از بین رفتن و تخریب شدن لایه بیرونی متخلخل ناشی از اثرات فازهای سختی همچون MgO و SiO_2 [۲۴] و ضعیف بودن این لایه می‌باشد که به راحتی شکسته می‌شود [۱۸].

همان‌طور که از سطح نمونه‌های پوشش داده شده مشخص است ضریب اصطکاک به دلیل اثر روانکاری افزودنی گرافن اکساید باعث پر شدن تخلخل‌ها شده، در نتیجه پوشش کامپوزیتی به دست آمده متراکم‌تر از پوشش PEO شده بدون افزودنی گرافن اکساید است، پس ساییدگی و ضریب

از نوع سایش خراشان بوده که با افزودن گرافن اکساید سبب افزایش مقاومت به سایش منیزیم شده؛ به طوری که منجر به افزایش اثر استحکام‌دهی و کاهش ضریب اصطکاک گردیده است. لازم به ذکر است که سختی، ضریب اصطکاک و خاصیت خود روانکاری از عواملی هستند که بر مقاومت به سایش پوشش‌ها تأثیر به‌سزایی دارند [۱۷]. به بیان دیگر رفتار تریبولوژیکی نمونه‌ها نشان داد که وجود کربن (C) ناشی از افزودن گرافن اکساید و افزایش فازهای سخت در پوشش‌های کامپوزیتی می‌تواند ضریب اصطکاک را کاهش دهد.



سطح نمونه جبران شده است. نکته قابل توجه دیگر، کاهش وزن یا سایش بسیار زیاد پین فولادی می‌باشد که می‌توان نتیجه گرفت پوشش‌های کامپوزیتی در مقابل سطح فولاد مقاوم بوده و این سطح را به شدت دچار ساییدگی می‌کنند. نرخ سایش ویژه ارتباط مستقیمی با ضریب اصطکاک دارد و در نمونه‌هایی که ضریب اصطکاک آن‌ها کم بوده است، نرخ سایش ویژه نیز پایین است. میزان نرخ سایش فلز پایه برابر 0.2 ± 4 ، نمونه GO-0 برابر 0.3 ± 5 و GO-10 برابر 0.1 ± 1 اندازه‌گیری شد. کمترین میزان نرخ سایش ویژه مربوط به نمونه GO-10 می‌باشد؛ علت این امر سختی بالا، ضریب اصطکاک کم و همچنین تشکیل کامپوزیت حاوی کربن در ساختار اکسید منیزیم بوده که سبب روانکاری هر چه بیشتر سطح شده است.

شکل (۱۱) تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشی نمونه‌ها را پس از انجام آزمون سایش نشان می‌دهد. در نمونه مرجع (AZ31)، سایش چسبان مکانیزم غالب می‌باشد و باعث نوسان شدید با ضریب اصطکاک بالا می‌باشد که دلیل آن به خاطر تأثیر جوش‌های آنی سطحی بر اثر دمای موضعی بالای مناطق تماس می‌باشد. مکانیزم سایش نمونه مرجع ترکیبی از مکانیزم چسبان و خراشان می‌باشد. سایش خراشان ایجاد شده می‌تواند بر اثر خراشیدگی پین بر روی سطح تشکیل شده باشد. مکانیزم چسبان باعث افزایش پهنای اثر سایش بر روی سطح می‌گردد.

از طرف دیگر برای نمونه‌های پوشش‌دار GO-0 و GO-10 عرض و عمق رد سایش کاهش یافته است. در این نمونه‌ها به علت مورفولوژی خاص سطح و وجود برآمدگی‌ها و فرو رفتگی‌ها، مکانیزم کاملاً متفاوتی حاکم است. در واقع سطح چندان دچار سایش نشده و برآمدگی‌های سطحی در ضمن انجام آزمایش، فشرده شده و اگر ذراتی هم از برآمدگی‌ها کنده شده باشد در فرو رفتگی‌های پوشش سطحی قرار گرفته است. در تحلیل کلی برای نمونه‌های پوشش‌دار می‌توان گفت که بقایای سایش و تکه‌های تولید شده ناشی از برآمدگی‌ها، منافذ و میکروترک‌ها به دلیل فشار بین اصطکاک پر شده‌اند، در نتیجه ساز و کار سایش نمونه‌ها

صورت سایش چسبان درمی‌آید. گفتنی است محصولات سایشی بر روی پین می‌چسبد و این عامل می‌تواند به تسریع سرعت سایش منجر شود [۲۵].

پوشش نمونه GO-0 یک لایه ضخیم بر روی سطح ایجاد می‌کند که دارای سختی بالاتر و مقاوم در برابر سایش است. ضریب اصطکاک به دلیل ناهمواری و تخلخل‌های لایه خارجی تغییرات قابل توجهی دارد در حالی که وقتی سایش به لایه متراکم منتقل می‌شود تغییرات ضریب اصطکاک به یک مقاومت پایدار می‌رسد و تغییرات آن کاهش می‌یابد، پس پهنای رد سایش به طرز چشم‌گیری باریک شده (۲/۵ میکرون) و عمق سایش نیز به حدود ۴/۴ میکرون می‌رسد.

در نمونه GO-10، با توجه به سختی بیشتر آثار خراش کاهش یافته است که بدین معنی است که بخشی از گرافن اکساید به پین جذب شده باعث روانکاری گردیده است. لازم به ذکر است که با توجه به شکل (۱۱) و سختی پوشش، پین نیز اندکی دچار کاهش وزن شده که می‌توان نتیجه گرفت که آثار پین بر روی پوشش باقی می‌ماند. به‌طور کلی پهنای رد سایش و عمق محل ساییدگی با این نمونه به طرز قابل توجهی کاهش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

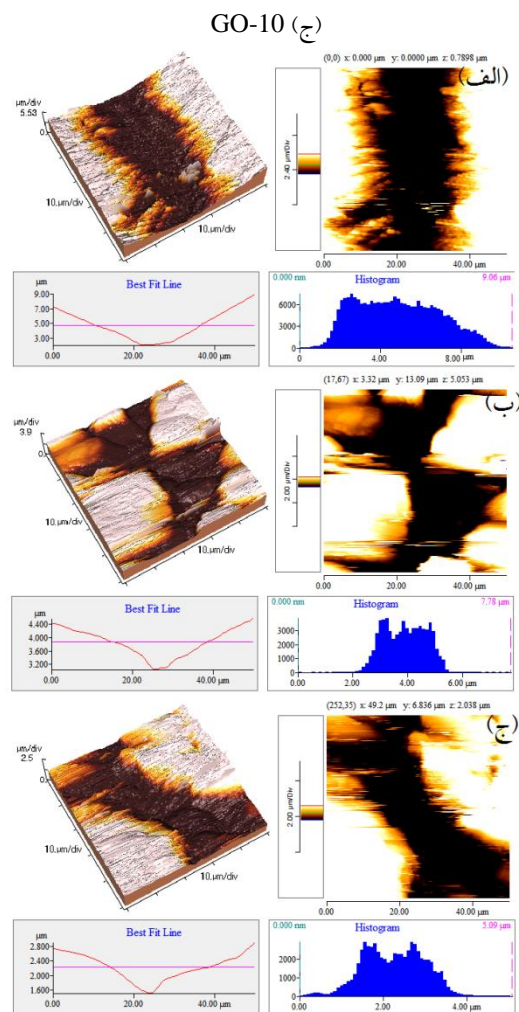
۱- افزودن گرافن اکساید به الکترولیت پوشش‌دهی پایه سیلیکاتی سبب افزایش هدایت الکتریکی شده و این امر باعث افزایش دانسیته جریان اعمالی گردیده است.

۲- مورفولوژی سطح نمونه‌های GO-0 و GO-10 به ترتیب دارای ساختار پنکیکی و دهانه آتشفشانی می‌باشند؛ همچنین افزودن GO تأثیر چندانی در ضخامت پوشش نداشته اما باعث پر شدن تخلخل‌ها شده است.

۳- در خروجی‌های الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های پوشش داده شده، حضور فازهای عمده MgO ، Mg_2SiO_4 کاملاً مشهود است، همچنین برای نمونه GO-10 در زاویه حدود ۱۰ درجه یک پیک متأثر از گرافن اکساید رؤیت شد.

۴- در نتایج FT-IR پیک‌های ارائه شده در نمونه GO-0 عمدتاً Si-O و Si-H می‌باشد. همچنین در نمونه GO-10 با افزودن گرافن اکساید پیوندهای کربنی C=C، C-H و C-O

شکل (۱۱): تصاویر رد سایش نمونه‌های: (الف) AZ31، (ب) GO-0 و



شکل (۱۲): تصاویر AFM محل سایش نمونه‌های: (الف) مرجع AZ31

(ب) GO-0 و (ج) GO-10

شکل (۱۲) تصاویر AFM و عمق سایش نمونه‌ها را نشان می‌دهد. در طی فرآیند سایش نمونه مرجع به دلیل زبری ناشی از ساییدگی پین بر روی سطح، بقایای ساییده شده به زیر لایه می‌چسبد و باعث سایش می‌شود؛ تشکیل شیارهای ناهموار در سطح بستر سبب پستی و بلندی‌های زیادی بر روی سطح می‌گردد و در نتیجه ضریب اصطکاک مطابق شکل ناپایدار می‌شود و رد سایش با پهنای ۵۰ میکرون و عمق ۷ میکرون به وجود می‌آورد. یک نکته که باید به آن اشاره کرد این است که سایش به وجود آمده بر روی نمونه مرجع با توجه به عمق سایش و تصاویر SEM و همچنین فرآیند اصطکاک، در ابتدا با توجه به نیروی مماسی اعمال شده بر روی سطح از نوع خراشان بوده که پس از طی مسافت به

[9] Y. Zhang & et al., "Influence of graphene oxide on the antiwear and antifriction performance of MAO coating fabricated on MgLi alloy", Surface and Coatings Technology, vol. 364, 2019.

[10] V. O. Fasiku, S. J. Owonubi, E. Mukwevho, B. A. Aderibigbe, Y. Lemmer, Revaprasadu Neerish & E. R. Sadiku, "Graphene-Based Materials for Implants", Wiley Online Library, Handbook of Graphene Set, I-VIII, Chapter 5, 2019.

[11] C. Wen & et al., "Characterization and corrosion properties of hydroxyapatite/grapheme oxide bio-composite coating on magnesium alloy by one-step micro-arc oxidation method", Surface and Coatings Technology, vol. 317, 2017.

[۱۲] ح. شریفی، م. علی‌اف خضرای، ا. عرفانی فر و ع. صبور روح‌القدم، "بررسی مورفولوژی و خواص خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی اکسیداسیون پلاسمایی الکترولیتی تشکیل شده در الکترولیت حاوی پنی‌سیلین بر روی تیتانیوم"، علوم و مهندسی خوردگی، شماره ۷، پاییز ۱۳۹۴.

[۱۳] ح. بختیاری‌زمانی، ا. صائب‌نوری، س. ع. حسن‌زاده تبریزی و ف. سلحشوری، "بررسی اثر عملیات نیتروژن‌دهی گازی بر ریخت و رفتار سایشی پوشش TiO_2 ایجادشده به روش اکسایش الکترولیتی پلاسمایی"، علوم و مهندسی سطح، شماره ۴۱، ۱۳۹۸.

[14] Q. Chen, Z. Jiang, S. H. Tang, W. Dong, Q. Tong & W. Li, "Influence of Graphene Particles on the Micro-arc Oxidation Behaviors of 6063 Aluminum Alloy and the Coating Properties", Applied Surface Science, vol. 423, 2017.

[15] Y. Zuo, T. Li, P. Yu, Z. Zhao, X. Chen, Y. Zhang & F. Chen, "Effect of graphene oxide additive on tribocorrosion behavior of MAO coatings prepared on Ti6Al4V alloy", Applied Surface Science, vol. 480, 2019.

[۱۶] م. اصغری، ک. رئیسی و ا. حکیمی‌زاد، "اثر افزودن تنگستات سدیم به الکترولیت بر خواص متالورژیکی و خوردگی پوشش ایجاد شده توسط روش اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی بر آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵"، هفدهمین سمینار ملی مهندسی سطح، دانشگاه صنعتی اصفهان، بهمن ۱۳۹۵.

[17] Y. Zhang, F. Chen, Y. Zhang, C. Du, "Influence of graphene oxide additive on the tribological and electrochemical corrosion properties of a PEO

قابل مشاهده می‌باشد که نشان‌دهنده این است که ذرات گرافن اکساید در طی فرآیند PEO با موفقیت در پوشش قرار گرفته است.

۵- بررسی رفتار سایشی نمونه‌ها در ۱۰۰ متر نشان داد ضریب اصطکاک نسبت به نمونه مرجع کاهش یافته است و مقاومت به سایش به‌طور چشم‌گیری برای نمونه GO-10 افزایش یافته است که به دلیل افزایش سختی و خاصیت روانکاری گرافن اکساید در پوشش می‌باشد.

۵- مراجع

[1] R. G. Hu, S. Zhang, J. F. Bu, C.J. Lin & G. L. Song, "Recent progress in corrosion protection of magnesium alloys by organic coatings," Progress in Organic Coatings, vol. 73, 2012.

[۲] ا. صیفوری، ش. میردامادی، ع. خاوندی و م. یزدانی، "بررسی رفتار زیست تخریبی و ترشوندگی پوشش‌های سیلیکاتی ایجاد شده بر روی آلیاژ منیزیم AZ31 به روش اکسیداسیون ریزجرقه"، فصل‌نامه علمی و پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۲.

[3] J. Yang, F. Cui & I. S. Lee, "Surface modifications of magnesium alloys for biomedical applications," Annals of Biomedical Engineering, vol. 39, 2011.

[4] Q. Chen & et al., "Influence of graphene particles on the micro-arc oxidation behaviors of 6063 aluminum alloy and the coating properties", Applied Surface Science, vol. 423, 2017.

[5] K. J. Ma, M. M. S. Al Bosta & W. T. Wu, "Preparation of self-lubricating composite coatings through a micro-arc plasma oxidation with graphite in electrolyte solution", Surface and Coatings Technology, vol. 259, 2014.

[۶] ا. دانش‌پژوه، آ. زارع بیدکی و م. حاجی صفری، "بررسی تأثیر زمان فرآیند اکسیداسیون الکترولیتی پلاسمایی بر رفتار خوردگی آلیاژ Ti-13Nb-13Zr در محلول رینگر هوازادابی شده"، فصل‌نامه علمی و پژوهشی فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، شماره دوم، ۱۳۹۶.

[7] B. S. Lou & et al., "Plasma electrolytic oxidation coatings on AZ31 magnesium alloys with Si_3N_4 nanoparticle additives", Surface and Coatings Technology, vol. 332, 2017.

[۸] م. علی‌اف خضرای، ر. بخشی، م. ح. مرادی و ع. صبور روح‌ا قدم، "پوشش‌های اکسیدی نانو ساختار"، فدک ایستیس، تهران، ۱۳۹۴.

[23] T. Li, L. Li, J. Qi & F. Chen, "Corrosion protection of Ti6Al4V by a composite coating with a plasma electrolytic oxidation layer and sol-gel layer filled with graphene oxide", *Progress in Organic Coatings*, vol. 144, 2020.

[24] F. Chen, Y. Zhang & Y. Zhang, "Effect of Graphene on Micro-Structure and Properties of MAO Coating Prepared on Mg-Li Alloy ", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 12, 2017.

[25] X. Chen, D. Liao, D. Zhang, X. Jiang, P. Zhao & R. Xu, "Friction and Wear Behavior of Graphene-Modified Titanium Alloy Micro-arc Oxidation Coatings", *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 73, 2020.

coating prepared on AZ31 magnesium alloy", *Tribology International*, vol. 146, 2020.

[18] R. Kucukosman, E. E. Sukuroglu, Y. Totik & SuleymanSukuroglu, "Effects of graphene oxide addition on wear behaviour of composite coatings fabricated by plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ91 magnesium alloy", *Journal of Adhesion Science And Technology*, vol. 35, 2020.

[19] L. Liu, P. Yang, C. Su, H. Guo & M. An, "Microstructure and Corrosion Behavior of Micro-Arc Oxidation Film on Magnesium Alloy", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, 2013.

[20] Sh. Wei, F. Wu, Y. Wang, A. Rabiei Baboukani, Y. Wen & J. Jiang, "Corrosion Resistance of Micro-Arc Oxidation/Graphene Oxide Composite Coatings on Magnesium Alloys", *ACS Omega*, vol. 5, 2020.

[21] A. Bordbar Khiabani, S. Rahimi, B. Yarmand & M. Mozafari, "Electrophoretic deposition of graphene oxide on plasma electrolytic oxidized-magnesium implants for bone tissue engineering applications", *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, 2018.

[22] Z. Qiu, R. Wang, J. Wu, Y. Zhang, Y. Qu & X. Wu, "Graphene oxide as a corrosion-inhibitive coating on magnesium alloys", *RSC Adv.*, vol. 5, 2015.

۶- پی‌نوشت

- [1] Wen et al
- [2] Ma et al
- [3] Nie et al
- [4] Zhang et al
- [5] Mico- Arc Oxidation
- [6] Isolated Gate Bipolar Transistor
- [7] Modified Hummer's Method
- [8] Pin-On-Disk
- [9] Avalanche
- [10] Pancake
- [11] Volcanic
- [12] Li et al