آبکاری الکتریکی پوشش‌های کربن شبه الماس برای کاربردهای فضایی

محرم شاملی[۱]، شاهین خامنه اصل[۲]*، مهشید نواب مقدم[۳]

۱- استادیار، پژوهشکده رانشگرهای فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران

۲- استاد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

۳-دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز

چکیده

اجزای متحرک مکانیکی و تماس مستقیم بین سطوح در خلا بکار رفته در کاربردهای فضایی، موجب تحقیقات زیادی برای یافتن پوششهای روان کننده‌ی جامد-جامد با مقاومت به سایش از جمله پوششهای کربن شبه الماس DLC است. روش آبکاری الکتریکی از لحاظ ارزانی تجهیزات و سادگی فرایند برای تهیه فیلم‌های DLC و مواد کربنی مربوطه در حال رقابت با سایر روش‌ها است. در این پژوهش پوشش DLC به روش آبکاری الکتریکی در ولتاژهای بالا سنتز شد. انواع کربن و پیوندهای پوشش بدست آمده به روش طیف‌سنجی رامان مطالعه گردید. خواص تریبولوژیکی و ریزساختاری نمونه‌ها به وسیله آنالیزهای میکروسختی‌سنجی، آزمون سایش و میکروسکوپ الکترونی روبشی متاثر از میدان FESEM مطالعه گردید. مقدار قابل قبول پیوندهای sp3 در پوشش‌دهی کربن شبه الماس به روش آبکاری الکتریکی، در ولتاژ ۴۷۰ ولت حاصل گردید. با بررسی تصاویر FESEM مشخص شد که ساختاری مشابه به گل‌کلم ایجاد شده است. سختی پوشش حاصل از روش آبکاری الکتریکی به دلیل مقدار بالای پیوندهایsp3 بالا است، به نحوی که در پوشش بهینه مقدار سختی در حدود ۱۶۰۰ ویکرز اندازه‌گیری گردید. ضریب اصطکاک پوشش DLC در مسافت های کم که مناسب لولا های فضایی با دامنه حرکت پائین است کم و قابل قبول است لیکن با افزایش مسافت، دچار افزایش چشمگیری گردید.

کلیدواژه‌ها: پوشش، کربن شبه الماس ، آبکاری الکتریکی، سختی ، خواص تریبولوژیکی

Diamond-Like Carbon Coatings Electroplating for Space Applications

Moharram Shameli[1], Shahin Khameneh Asl[*2], Mahshid Navab Mogaddam[3]

[1] Space Thrusters Research Institute, Iranian Space Research Center, Tabriz, Iran,
[2] * Associate Professor, Dept. of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz - Iran
[3] phd Student, Dept. of Materials Engineering, University of Tabriz, Tabriz - Iran

Abstract

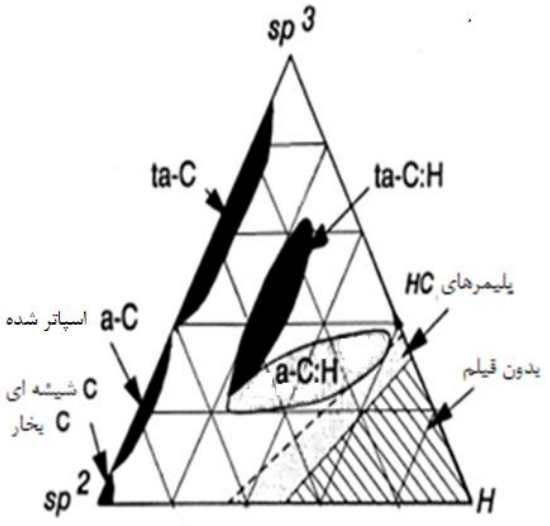
Mechanical moving assemblies and direct contact between surfaces in vacuum used in space applications have led to extensive research to find solid-solid lubricant coatings with high wear resistance, including Diamond-Like Carbon (DLC) coatings. Depending on the properties required, different methods of deposition were used for diamond like carbon (DLC) coating. In this research, the DLC coating was synthesized by electroplating method at high voltages on copper substrate. The types of carbon and coating bonds obtained were studied by Raman spectroscopy. The tribological and microstructural properties of the samples were studied by means of microhardness analysis, wear test, and FESEM. An acceptable amount of sp3 bands was obtained in the coating of DLC by electro plating method at a voltage of 470 volts. Examination of FESEM images revealed that a structure similar to cauliflower. The hardness of electroplated coatings is high due to the high amount of sp3 bands, the hardness value was measured around 1600 Vickers. The coefficient of friction of DLC coating is low and acceptable in short distances, which is suitable for space hinges with low range of motion, but with the increase of the distance, it increased significantly.

E-mail of Corresponding author: khameneh@tabrizu.ac.ir

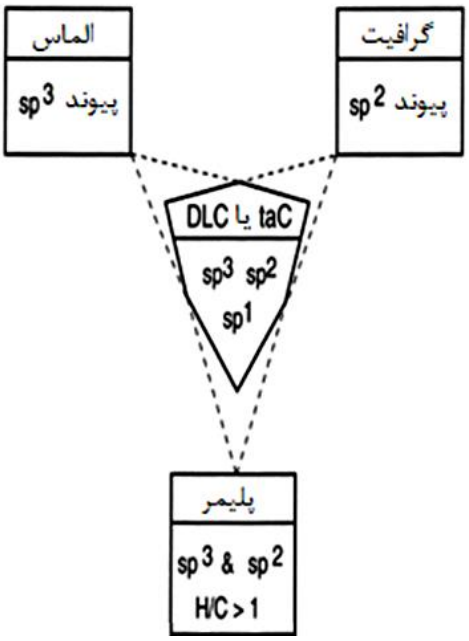
۱

مقدمه

تمامی مواد جامد از طریق سطح با محیط اطراف خود در تماس هستند، لذا مواد متنوعی برای پوشش‌دهی بدنه‌ها استفاده می شوند. روش‌های اعمال این پوشش‌ها نیز دارای تنوع گسترده و در حال رشدی است که بسته به شرایط و کاربرد قطعه مورد نظر باید بهترین و اقتصادی ترین آنها انتخاب شوند[۱]. مشکل اساسی بسیاری از تولیدات صنعتی مثل خودرو، هوافضا، لوازم خانگی، الکترونیک و غیره، ضریب اصطکاک بالای سطوح تماسی است[۲]. با افزایش تقاضا در عملکرد تریبولوژیکی برای کاربردهای هوافضایی، توسعه پوششهای روانکاری جامدـجامد ضروری است. استفاده از مجموعه‌های متحرک مکانیکی در خلا یک مساله چالش برانگیز است زیرا در این شرایط تماس مستقیم بین سطوح فلزی باعث ایجاد اصطکاک و سایش زیاد از طریق جوش سرد می‌شود. از طرف دیگر استفاده از روان کننده‌های مایع مشکل است زیرا باعث آلودگی سایر قطعات توسط روان کننده می‌شود. علاوه بر این در کاربردهای فضایی با گرانش کم، ممکن است تغذیه ی مناطق تماس با روان کننده‌های مایع با مشکل تبخیر روبه‌رو باشد. استفاده از پوشش‌های کربن شبه الماس در بسیاری از کاربرد های مکانیکی برای کاهش اصطکاک و سایش موفقیت آمیز بوده است[۳]. فیلم‌های آمورفDLC، کربن با هیدروژن (a-c:H) یا بدون هیدروژنی (a-c) هستند که ماده‌ی شبه پایدار آمورف با خواص مکانیکی، نوری، الکتریکی، شیمیایی و تریبولوژیکی عالی ایجاد می‌کنند. پوشش DLC هیدروژن‌دار، رشد زیادی در صنعت برای استفاده‌های گوناگون کرده است، زیرا ضریب اصطکاک کم و مقاومت به سایش بالایی دارد اما برای DLC بدون هیدروژن یا تتراهدرال (ta-c) هیچ کاربرد عملی مشخص نشده است [۶-۴]. شکل ۱ انواع کربن شبه الماس را در نمودار فازی، و شکل ۲ به طور طرح وار نمایش می‌دهد.



شکل (۱) : نمودار فازی مواد کربن شبه الماس[۴].



شکل (۲): محدوده خواص کربن شبه الماس با توجه به نوع پیوند[۴].

کربن شبه الماسDLC به دلیل خاصیت شفاف بودن در مقابل نور مرئی به عنوان پوششی ضد انعکاس و ضد خراش بر روی شیشه‌های عینک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ضمن این پوشش ایمپلنت‌های بیولوژیکی را در برابر خوردگی محافظت می کند. کربن شبه الماس پوشیده شده بر فولادضدزنگ و آلیاژهای‌تیتانیوم برای

اجزای دریچه‌های قلب مصنوعی استفاده می‌شود. فیلم‌های غیرهیدروژنه Tac نیز کاربرد گسترده‌ای به عنوان کاتد در صفحه نمایش‌های تخت و یا به عنوان عناصر پیکسل در صفحه نمایش بزرگ پیدا کرده‌اند [۴]. با افزایش تقاضا در عملکرد تریبولوژیکی برای کاربردهای فضایی، توسعه روانکاری جامد–جامد ضروری است. پوشش‌های کربن شبه الماس در بسیاری از کاربردهای مکانیکی خاص برای کاهش اصطکاک و سایش موفقیت آمیز عمل کرده است [۳].

وجود هیدروژن برای بدست آوردن خواص شبه الماسی در این ماده مورد نیاز است تا ساختار آن را کنترل کند و خواص نوری و الکتریکی مورد نیاز بدست آید و تنش‌های داخلی را نیز کنترل کند. تکنیک پوشش دهی مدرن برای رسوب دادن فیلم‌هایDLC، کاشت یونی با منبع یونی پلاسما PSII است[۴]. و رایج ترین روش مورد استفاده برای پوشش دهی کربن شبه الماس رسوب شیمیایی بخار CVD پلاسما ماکروویو فشار کم از گاز متان و گاز هیدروژن است. این فرآیند های تبخیری پیشرفته از نظر هزینه‌ی تجهیزات و مواد اولیه گران تمام می شوند، لذا جستجو برای روش‌های کم هزینه برای رسوب DLC هنوز بحث داغ محسوب می‌شود. اخیراً رسوب نشانی فیلم‌های DLC از مایعات آلی امکان پذیر شده‌است [۷]. روش آبکاری الکتریکی از لحاظ ارزانی تجهیزات و سادگی فرایند برای تهیه فیلم‌های DLC و مواد کربنی مربوطه در حال رقابت با سایر روش‌ها است [۸، ۹]. پال و همکارانش [۷] در مورد سنتز فیلم کربن شبه الماس با روکش الکترودهای جدید تحقیقاتی انجام داده اند. در این روش استیک‌اسید به عنوان الکترولیت انتخاب شده است و سنتز فیلم‌های DLC به روش آبکاری الکتریکی بر روی پوشش شیشه‌ایSNO2 بوده و گرافیت به عنوان آند مورد استفاده قرار گرفته است. استیک اسید در آب یونیزه می‌شود و بصورت فرمول ۱ حاصل می‌شود:

$$CH_3COOH + H_2O \rightarrow CH_3^+ + (COOH)^- + H^+$$
$$+ OH^- \rightarrow CH_3^+ + CO_2 + (OH)^- + 2H^+ \quad (1)$$

بنابراین سطح کاتد حضور غلظت بسیار بالایی از رادیکال‌های متیل و یون‌های هیدروژن را که ضروری برای رساندن الماس یا فیلم‌های DLC برروی زیر لایه است بدست می‌آورد. تشکیل خوشه‌های بحرانی بعد از آن منجر به تشکیل فیلم‌های مداوم می‌شود.

پال و همکارانش [۱۰–۱۲] در تحقیقی دیگر در مورد سنتز فیلم‌های کربن شبه الماس با روش آبکاری و با استفاده از اسید فرمیک به عنوان الکترولیت بررسی‌هایی انجام داده‌اند. نسبت شدت پیک‌های بین G وD (ID/IG) یک پارامتر بسیار مهم برای تشخیص مواد DLC مانند است. مقالات گزارش کرده‌اند که کاهش نسبت ID/IG به افزایش پیوندsp3 مربوط است. نسبت ID/IG برای پوشش DLC به‌دست آمده از روش‌های مختلف و تحت شرایط مختلف مابین ۰.۳ تا ۵ است.

نامبا و همکارانش [۱۳، ۱۴] معتقدند که جریان عبوری از زیر لایه نقش مهمی در تشکیل پوشش از محلول آلی دارد. دانسیته جریان بالا نشان می‌دهد که ذرات قطبی بیشتری از محلول به سمت الکترود حرکت می‌کنند که ممکن است تاثیر مهمی در سرعت رشد فیلم‌ها داشته باشد.

در تحقیقی دیگر تاثیر جوشیدن الکترولیت تحت ولتاژ بالا و افزایش دما را در کنار الکترود بررسی شده است و نشان میدهد جوشیدن منجر به کاهش میزان رسوب و در نتیجه تشکیل یک فیلم غیروابسته می‌شود. این مشکل را می‌توان با کاهش ولتاژ عرضه شده حل کرد اما کاهش ولتاژ منجر به کاهش دانسیته جریان و در نتیجه منجربه کاهش میزان رسوب می‌شود. برای برطرف کردن مشکل کاهش دانسیته جریان می‌توان از کاهش فاصله الکترودها استفاده کرد که با این روش دستیابی به دانسیته جریان بالا حتی در ولتاژهای پایین نیز امکان‌پذیر است علاوه بر این با این روش احتمال بیشتری وجود دارد که یون‌ها یا رادیکال‌ها قبل از اتصال و ترکیب مجدد به الکترودهای مربوطه وارد شوند [۱۵].

فیلم‌های کربن شبه الماس سختی ویکرز، مدول الاستیک و تنش داخلی بالایی دارند[۱۶]. این خواص بطور مستقیم با درصد کسری پیوندsp3 در ارتباط هستند [۸، ۹].

پوشش‌های روان‌کننده جامد برای مکانیزم‌های فضایی به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند که روانکاری های معمول، بالاخص هنگامی که شرایط عملیاتی شدید مانند درجه حرارت‌های خیلی بالا یا پایین، شرایط خلاء غیر قابل استفاده هستند. از آنجایی که روان‌کننده جامد لایه‌ای معروف MoS_2 پرمصرف‌ترین ماده امروزی است، پوشش‌های کربنی الماس (DLC) به عنوان کاندیدهای بالقوه برای مواد مقاوم در برابر سایش با اصطکاک کم در شرایط خلاء مورد مطالعه قرار می‌گیرند. بسته به ویژگی‌های DLC که به نوبه خود به روش رسوب‌گذاری وابسته است، فیلم‌های مورد بررسی طیف گسترده‌ای از رفتار تریبولوژیکی، از جمله ضرایب اصطکاک در خلاء زیر ۰/۰۲ را ارائه می‌دهند. ساختارها و ترکیبات DLC معمولی که امکان دستیابی به اصطکاک بسیار کم در خلاء و رفتار خوب در زیر هوا را فراهم می‌کنند، شناسایی و مورد بحث قرار می‌گیرند. به عنوان نمونه، در مورد مکانیزم‌های فضایی که در محیط بی‌هوا و در دماهای متفاوت فعالیت می‌کنند، روان‌کارهای جامد مانند DLC می‌توانند به عملکرد صحیح و موثر این مکانیزم‌ها کمک کنند و در دوره عمر آنها نقش اساسی داشته باشند [۱۷–۱۹].

در این تحقیق بر آن شدیم فیلم‌های DLC به روش مقرون به صرفه تر آبکاری الکتریکی تولید شود، و در ادامه ساختار و خواص تریبولوژیک این پوشش مورد بررسی و برای کاربرد مورد نظر بهینه سازی شود.

مواد و روش تحقیق

در این پژوهش تاثیر پارامتر ولتاژ بر خواص تریبولوژیکی پوشش‌کربن‌شبه‌الماس سنتز شده به روش آبکاری الکتریکی بررسی شد. برای بررسی روش آبکاری الکتریکی ورق های مسی به ابعاد ۱×۳ سانتی‌متر و ضخامت ۰/۸ میلی متر به عنوان بدنه تهیه شدند. در ابتدا این ورق‌ها توسط سنباده‌هایی از شماره ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ سنباده‌زنی شدند همه نمونه‌ها به مدت ۱۰ الی ۱۵ دقیقه به وسیله پودر آلومینا با اندازه ذرات ۰/۰۵ میکرومتر به صورت مکانیکی پولیش شدند. سپس در محلول ۵ درصد NaOH که تا دمای ۶۰ درجه‌سانتی‌گراد گرم شده بود به مدت ۲۰ دقیقه چربی زدایی شد و از محلول ۱۰ درصدی H_2SO_4 برای اسیدشویی این قطعات استفاده شد. محلول ۲۰ درصد استیک اسید و آب دیونیزه برای سنتز این پوشش استفاده شد. قطعه گرافیتی به عنوان آند و قطعه مسی به عنوان کاتد در فاصله ۷ میلیمتر از هم درون محلول ۲۰ درصد استیک اسید قرار گرفتند. برای آبکاری از منبع تغذیه ۰–۱ کیلوولت و ۰–۱ آمپر استفاده شد و مدت زمان اعمال ولتاژ ۳۰ دقیقه بود.

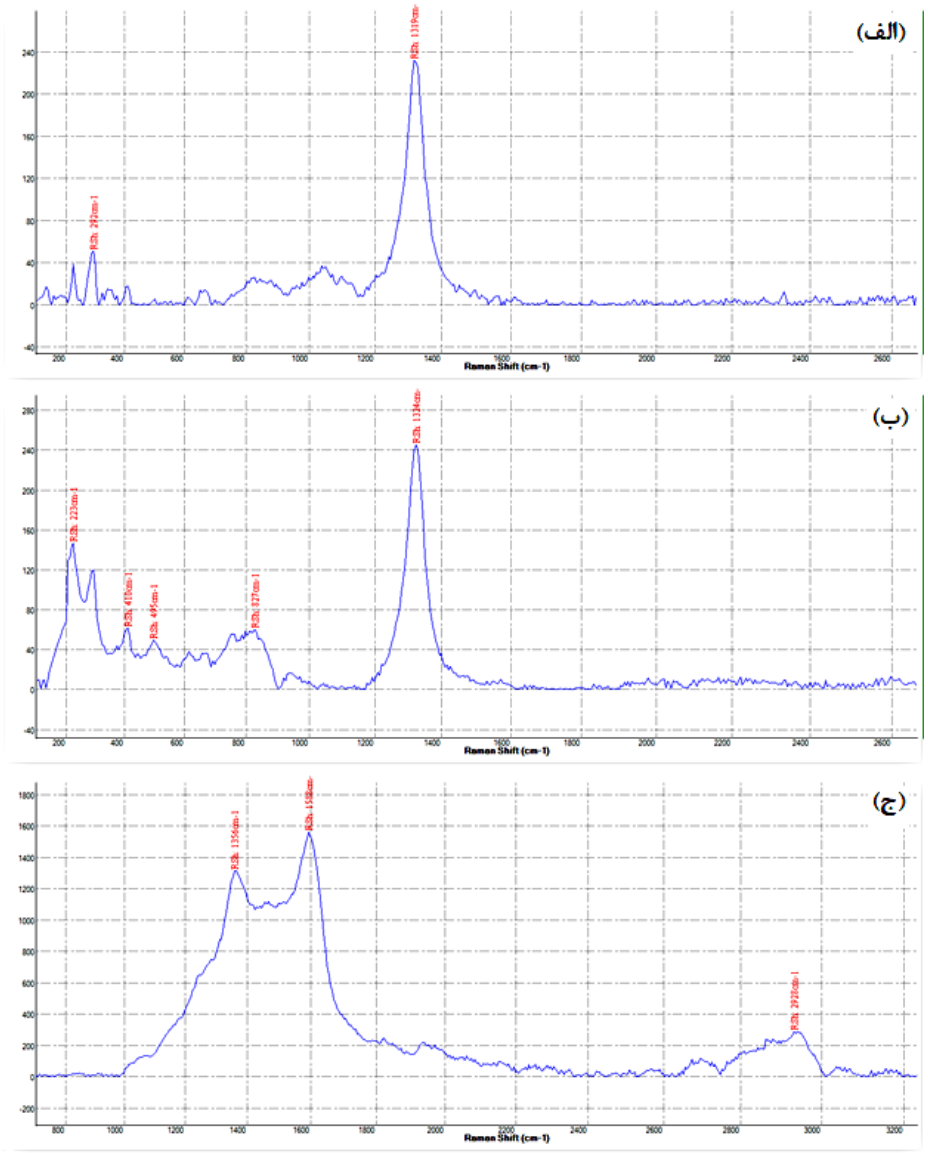
برای تشخیص سنتز فیلم کربن شبه الماس از طیف سنجی رامان استفاده شد که میزان پیوند sp3 و sp2 را نمایش می‌دهد. پیوندهای sp2 نشان‌دهنده خواص گرافیتی و پیوندهای sp3 نشان‌دهنده خواص الماسی است. نسبت شدت پیک‌های بین Gگرافیت تک کریستالی و D گرافیت بی‌نظم، ID/IG یک مولفه بسیار مهم برای تشخیص مواد DLC مانند است که کاهش نسبت ID/IG به افزایش پیوندsp3 مربوط است. خاصیت پوشش‌های DLC به کربن و تاثیر عناصر دیگر بر طیف رامان بستگی دارد. طیف‌سنجی رامان توسط دستگاه TAKRAM-P50COR10 با طول موج 532 nm و بازه رامان شیفت ۱۰۰–۴۶۰۰ انجام شد.

میکروسختی سنجی توسط دستگاه sctmc-HV 1000 با اندازه بارهای ۹.۸–۰.۴۹ نیوتن و مدت زمان اعمالی ۱۵ ثانیه و سه مرتبه اندازه‌گیری شد. خواص تریبولوژیکی پوشش‌های سنتز شده، توسط دستگاه پین روی دیسک بررسی شد. نیروی اعمالی برای بررسی پوشش DLC در حدود ۵ نیوتن و مسافت طی شده ۲۰۰ متر بود. جهت

بررسی لایه تشکیل شده و مشاهده تغییرات سطحی و مورفولوژی از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی FESEM، مدل MIRA3 TESCAN FESEM ولتاژ 30 KV با استفاده از الکترون‌های ثانویه انجام گرفت.

نتایج و بحث

از آنالیز XRD به نوع پیوندهای کربن نمی‌توان پی برد و میزان الماسی یا گرافیتی بودن پوشش را نمی‌توان تشخیص داد، بهتر است از طیف سنجی رامان برای دستیابی به این هدف استفاده کرد. سنتز پوشش کربن شبه الماس به روش آبکاری الکتریکی در ولتاژهای گوناگون و آمپر ثابت انجام گرفت. تغییر در میزان ولتاژ اعمالی در میزان پیوندهای sp2 و sp3 تغییر ایجاد می‌کند. پوشش DLC دارای پیک شانه مانند در طیف سنجی رامان است در ولتاژ ۴۷۰ V و دانسیته جریان ۱ Amp بدست آمد. پوشش‌های بدست آمده در ولتاژهای پایینتر نیز دارای پیوندهای sp2 و sp3 بودند اما چون میزان پیوند sp2 آن‌ها بیشتر بود (گرافیتی تر بودند) پیک حاصل از آن‌ها شانه مانند بدست نیامد. با مطالعه سختی و طیف سنجی رامان نمونه‌های بدست آمده در ولتاژهای گوناگون می‌توان به تاثیر میزان ولتاژ اعمالی در نوع پیوندها پی برد. در شکل ۳ (الف، ب) پیک‌های باند D به ترتیب در موقعیت های 1319 cm^{-1} و 1324 cm^{-1} بدست آمده است اما شدت این باند برای ولتاژ ۵۰ در حدود ۲۳۵ و برای ولتاژ ۱۲۵ در حدود ۲۴۲ است که این شدت برا تشکیل DLC مناسب کافی نیست. در شکل ۳(ج) پیک شانه مانند بصورت کامل مشخص شد و باند D و G به ترتیب در 1356 cm^{-1} و 1588 cm^{-1} مشخص شده است که شدت آن‌ها نیز نسبت به دو نمونه قبلی به دلیل افزایش ولتاژ اعمالی تا ۴۷۰ ولت افزایش یافته است. میکروسختی نمونه پوشش داده شده در اختلاف پتانسیل‌های ۵۰، ۱۲۵ و ۴۷۰ ولت به ترتیب ۸۲، ۱۱۵ و ۱۶۱۰ ویکرز اندازه گرفته شد. که همانطور که مشخص است افزایش ولتاژ باعث افزایش پیوندهای sp3 و در نتیجه افزایش چشمگیر سختی پوشش شده است. مقادیر پارامترهای اصلی یعنی شدت D نسبت به G و موقعیت های باندهای D و G برای رامان در جدول ۱ آورده شده است. هرچقدر موقعیت پیک G به طول موج‌های بالاتر برود دارای پیوندهای sp2 بیشتری بوده و ساختار گرافیتی تر است و هرچقدر موقعیت پیک G طول موج کمتری داشته باشد از پیوندهای sp3 بیشتری برخوردار است و لذا ساختار سخت تر و الماسی تر است.



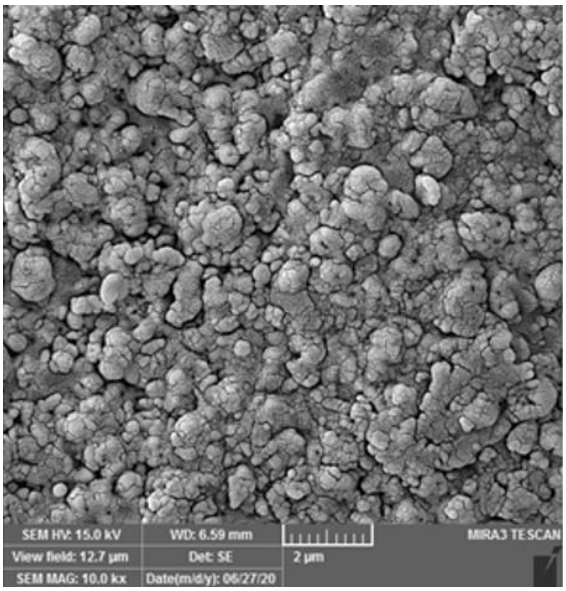
شکل(۳): طیف سنجی رامان پوشش DLC بدست آمده به روش آبکاری الکتریکی در A۱ الف) V ۵۰ ب) V ۱۲۵ ج) V ۴۷۰.

جدول(۱): موقعیت و شدت D و G با توجه به طیف سنجی رامان.

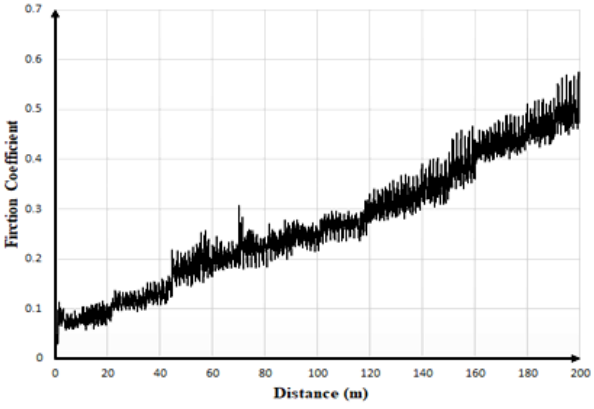
نمونه	موقعیت G	موقعیت D	شدت G	شدت D	ID/IG
آبکاری	۱۵۸۸	۱۳۵۶	۱۵۶۴/۳۵۲	۱۳۱۳/۶۵۵	۰/۸۳

در شکل ۴ تصاویر FESEM مربوط به سطح پوشش DLC منتخب نمایش داده شده است. اصولا ساختار DLC بصورت گل کلم مانند است که در این تصویر نیز می‌توان این ساختار را مشاهده کرد. پوشش‌های DLC از لحاظ شیمیایی بی اثر بوده و از سختی بالایی برخوردار هستند لذا دارای ضریب اصطکاک کمی هستند. اندازه‌گیری سایش برای این فیلم‌ها مشکل است زیرا به دلیل ضخامت کم و سختی کم زیرلایه پوشش تخریب می‌شود. نمودار تغییرات

ضریب اصطکاک در آزمون سایش نمونه DLC در شکل۵ قابل مشاهده است. این پوشش همانطور که قبلا نیز اشاره شده، دارای سختی بالایی است لذا در ابتدای آزمون دارای ضریب اصطکاک پایین حدود ۰/۱ است ولی این نمودار حالت صعودی داشته و بعد از طی ۲۰۰ متر به ضریب اصطکاک ۰/۵۵ می‌رسد.



شکل۴: تصاویر FESEM پوشش DLC در بزرگنمایی‌های مختلف.



شکل ۵ ضریب اصطکاک سایش برای پوشش DLC.

نتیجه‌گیری

۱- مطابق آنالیز رامان مقدار پیوندهای sp3 پوشش‌های ایجاد شده بر روی زیرلایه مسی به روش آبکاری الکتریکی که در دمای اتاق و در ولتاژ ۵۰ ولت، جریان ۱ آمپر و محلول ۲۰ درصد استیک اسید حاصل گردید، پایین بوده و به حد قابل قبول در پوشش‌های کربن شبه الماس نرسید. با ثابت قرار دادن جریان، محلول و کنترل دمای حمام در محدوده ۳۰ تا ۴۰ درجه سانتیگراد به وسیله مخلوط آب و یخ، مقدار پیوندهایsp3 پوشش‌های ایجاد شده به روش آبکاری الکتریکی با افزایش ولتاژ اعمالی تا ۱۲۵ ولت، دچار افزایش گردید ولی همچنان به حد قابل قبول در پوشش‌های کربن شبه الماس نرسید. تا اینکه مقدار قابل قبول پیوندهای sp3 در پوشش‌دهی کربن شبه الماس به روش آبکاری الکتریکی، در ولتاژ ۴۷۰ ولت حاصل گردید.

۲- پوشش DLC حاصل از آبکاری الکتریکی از سختی بالایی برخوردار بود که می‌تواند به دلیل مقدار بالای پیوندهای sp3 باشد. مقدار سختی در این پوشش در حدود ۱۶۰۰ ویکرز اندازه‌گیری گردید.

۳- در تصاویر FESEM حاصل از سطوح پوشش DLC ساختاری گل‌کلم مانند که مشخصه پوشش‌های کربن شبه الماس است، مشهود می‌باشد.

۴- پوشش اعمال شده، از ضریب اصطکاک پایین‌تری نسبت به زیرلایه فولادی برخوردار هستند. پایین‌ترین مقدار ضریب اصطکاک در ابتدای آزمون سایش مختص پوشش DLC است (حدود ۰/۱) که به دلیل دارا بودن بیشترین سختی در بین نمونه‌های آزمایش شده است.

تشکر و قدردانی

به این وسیله از همکاران پژوهشگاه فضایی ایران علی‌الخصوص پژوهشکده رانشگرهای فضایی تبریز به جهت حمایت از این پژوهش کمال تشکر و قدردانی را داریم. همچنین از کارشناسان و دانشجویان آزمایشگاه خوردگی و پوشش دادن گروه مهندسی مواد و آزمایشگاه

مرکزی دانشگاه تبریز به جهت همکاری در نمونه سازی و پوشش کاری نمونه ها قدر دانی می شود.

مراجع

[1] ASM HAND BOOK, “SURFACE ENGINEERING”, ASM INTERNATIONAL, VOL. 5, 11th ed., USA

[۲] مرضیه کریمی، فرهنگ عباسی، محمد مهدویان احدی، "مروری بر پوشش های روان کننده"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، شماره۳، ۴۱-۵۳، ۱۳۹۷

[3] J. Fontaine, “Towards the use of diamond-like carbon solid lubricant coatings in vacuum and space environments”, Journal of Engineering Tribology, Vol. 222 Part J, 2008.

[4] A. Grill, “Diamond-like carbon: state of the art”, Diamond and Related Materials, 8, 428–434, 1999.

[5] K. A. H. Al Mahmud, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, H. M. Mobarak, and N.W. M. Zulkifli, “AN UPDATED OVERVIEW OF DIAMOND-LIKE CARBON COATING IN TRIBOLOGY” Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 0:1–29, 2014

[6] R. K. Roy, S. F. Ahmed, J. W. Yi, M. W. Moon, K. R. Lee, Y. Jun, “Improvement of adhesion of DLC coating on nitinol substrate by hybrid ion beam deposition technique”, 1179–1183, 2009

[7] R.K. Roy, B. Deb, B. Bhattacharjee, A.K. Pal, “Synthesis of diamond-like carbon film by novel electrodeposition route”, Thin Solid Films 422, 92–97,2002

[8] Kedong Ma, Guangbin Yang, Laigui Yu, Pingyu Zhang, “Synthesis and characterization of nickel-doped diamond-like carbon film electrodeposited at a low voltage”, Surface & Coatings Technology 204 , 2546–2550, 2010.

[9] J.Robertson, “Properties of diamond-like carbon”, Surface and Coatings Technology,185-203,1992

[10] S. Gupta, M. Pal Chowdhury, A.K. Pal, “Synthesis of DLC films by electrodeposition technique using formic acid as electrolyte”, Diamond & Related Materials 13, 1680–1689,2004.

[11] S. K. Pal, “Synthesis, characterization and tribological behavior of nitrogen-doped chromium-diamondlike carbon nanocomposite thin film”, Louisiana State University Master's Theses,2004

[12] Ch.Cao, H.Zhu, H.Wang, “Electrodeposition diamond-like carbon films from organic liquids”, Volume 368, 203-207, 2000

[13] H. Hassannejad, F. Bogani, M. Boniardi, A. Casaroli, C. Mele, B. Bozzini, “Electrodeposition of DLC films on carbon steel from acetic acid solutions”, Transactions of the IMF, 92,183-188,2014.

[14] H. Panga, X.Wang, G. Zhang, H. Chen, G.Lv, S. Yanga, “Characterization of diamond-like carbon films by SEM, XRD and Raman spectroscopy”, Applied Surface Science 256, 6403–6407, 2010

[15] K. Sreejith, J. Nuwad, C.G.S. Pillai, “Low voltage electrodeposition of diamond like carbon (DLC)”, Applied Surface Science 252, 296–302, 2005

[16] B. Pandey, S.Hussain, “Effect of nickel incorporation on the optical properties of diamond-like Carbon (DLC) matrix”, Journal of Physics and Chemistry of Solids, 72, 1111–1116, 2011

[17]. Donnet, C., Fontaine, J., Le Mogne, T., Belin, M., Héau, C., Terrat, J. P., ... & Pont, G. (1999). Diamond-like carbon-based functionally gradient coatings for space tribology. Surface and Coatings Technology, 120, 548-554.

[18]. Vercammen, K., Meneve, J., Dekempeneer, E., Smeets, J., Roberts, E. W., & Eiden, M. J. (1999). Study of RF PACVD diamond-like carbon coatings for space mechanism applications. Surface and Coatings Technology, 120, 612-617.

[19]. Sun, X. (2013). Solid Lubricants for Space Mechanisms. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_1230