

مروری بر کاربردها و خواص سایشی پوشش‌های کربن شبه الماس

مهشید نواب مقدم^۱، شاهین خامنه اصل^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کد پستی: ۵۱۶۶۶-۱۴۷۶۶

۲- دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، کد پستی: ۵۱۶۶۶-۱۴۷۶۶

تاریخ دریافت: ۹۸/۰۲/۱۴ تاریخ بازبینی نهایی: ۹۸/۰۵/۰۹ تاریخ پذیرش: ۹۸/۰۵/۱۲ در دسترس بصورت الکترونیک: ۹۸/۰۸/۱۴

چکیده

مجموعه‌های متحرک مکانیکی در خلا و تماس مستقیم بین سطوح در کاربردهای فضایی، باعث شده است که تحقیقات زیادی برای یافتن پوشش‌های روان‌کننده جامد-جامد با عمر طولانی انجام شود. اخیراً استفاده از پوشش کربن شبه الماس DLC رایج شده است و بسته به خواص مورد نیاز، روش‌های مختلفی برای رسوب‌دهی استفاده می‌شود. پوشش DLC هیدروژن‌دار، رشد زیادی در صنعت برای استفاده‌های گوناگون کرده است، زیرا ضریب اصطکاک کم و مقاومت به سایش بالایی دارد. بیشترین روش مورد استفاده برای سنتز فیلم‌های کربن شبه الماس روش رسوب‌نشانی شیمیایی بخار CVD، پلاسما ماکروویو در فشار کم متان و گاز هیدروژن است. اما این فرآیندها هزینه بالایی دارد. روش آبرکاری الکتریکی از لحاظ ارزیابی تجهیزات و سادگی فرآیند برای تهیه فیلم‌های DLC و مواد کربنی مربوطه در حال رقابت با سایر روش‌ها است. به دلیل اینکه پوشش کربن شبه الماس به دست آمده به روش الکتروشیمیایی دارای تنش داخلی است، برای حل این مشکل، کربن شبه الماس با عناصر مختلفی آلیایده (دوپ) می‌شود که به نظر می‌رسد فلز نیکل عملکرد بهتری از نظر خواص مکانیکی و سایشی دارد. در این مقاله انواع کربن شبه الماس، کاربرد و روش ساخت آن، فیلم‌های کربن شبه الماس آلیایده شده با فلزات و نیکل و خواص مکانیکی و سایشی آن بررسی می‌گردد.

واژه‌های کلیدی

پوشش کربن شبه الماس، پوشش روان‌کننده، خواص سایشی، کربن شبه الماس دوپ نیکل.

چکیده تصویری





A Review on Applications and Tribological Properties of Diamond-Like Carbon Coatings

Mahshid Navvab Moghaddam, Shahin khameneh Asi*
Department of metallurgy, Tabriz University, P. O. Box: 51666-14766, Tabriz, Iran.

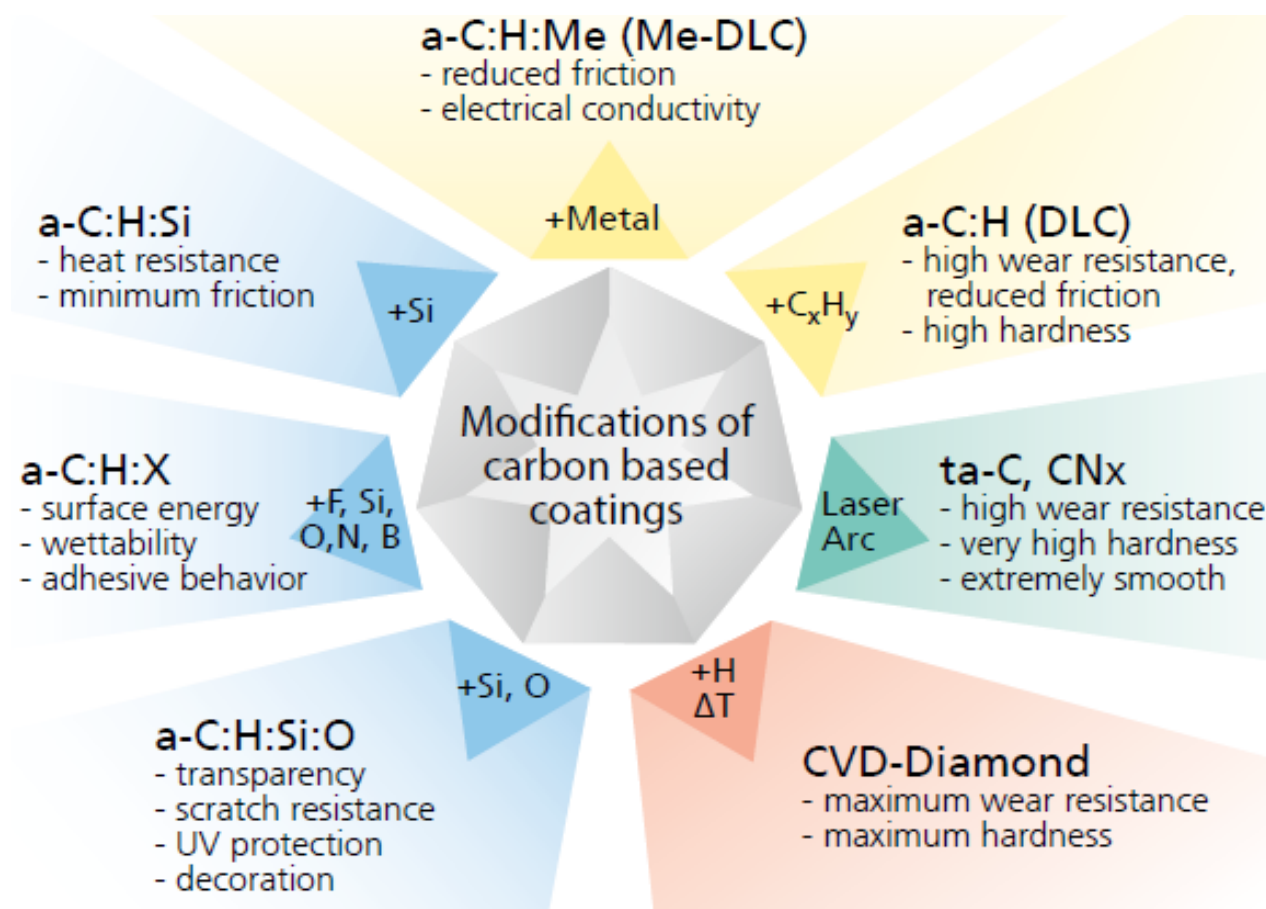
Abstract

Mechanical moving assemblies in vacuum and direct contact between surfaces in space applications have led to extensive research into solid-solid lubricating coatings with a long life span. Recently, the use of diamond like carbon (DLC) coating has become commonplace and, depending on the properties required, different methods of deposition are used. Hydrogenated DLC coatings have grown enormously in the industry for a variety of uses, due to its low coefficient of friction and high abrasion resistance. The most commonly used method for the synthesis of Diamond like carbon films is the low-pressure microwave plasma CVD of methane and hydrogen gas mixtures. But these processes cost a lot. The electroplating method is in competition with other methods in terms of the cost of equipment and the simplicity of the process for the production of DLC films and related carbon materials. Due to the fact that the Diamond like carbon coating is obtained by electrochemical method have the internal stress, to solve this problem Diamond like carbon doped with various elements which seems Ni have a better performance in terms of mechanical and tribological properties. In this paper, we studied about types of DLC, its application and manufacturing method, metals dope DLC, Ni dope DLC and its mechanical and tribological properties.

Keywords

Diamond like carbon coating, Lubricating coatings, Tribological properties, Diamond like Carbon doped Ni.

Graphical abstract



۱- مقدمه

تمامی مواد جامد از طریق سطح با محیط اطراف خود در تماس هستند و به جرأت می‌توان گفت که در بین تجهیزات، قطعات و سازه‌های ساخت دست بشر، کمتر قطعه‌ای یافت می‌شود که حداقل یک عملیات پوششکاری یا تمام‌کاری سطح، بر روی آن انجام نشده باشد. مواد استفاده شده برای پوشش‌دهی بدنه‌ها از تنوع گسترده‌ای برخوردار است. مواد آلی و پلیمرها، سرامیک‌ها، انواع فلزات خالص و آلیاژی و حتی مواد کامپوزیتی را می‌توان به عنوان پوشش به کاربرد. روش‌های اعمال این پوشش‌ها نیز دارای تنوع گسترده و در حال رشدی است که بسته به شرایط و کاربرد قطعه مورد نظر باید انتخاب شوند [۱].

مشکل اساسی بسیاری از تولیدات صنعتی اعم از خودرو، هوافضا، لوازم خانگی، الکترونیک و غیره، ضریب اصطکاک بالای سطوح تماسی است. بسیاری از فرآیندها در صنعت بدون استفاده از پوشش‌های روان‌کننده معروف به روان‌کننده‌های فیلم‌جامد برای سطوح درگیر در حال حرکت، غیرممکن است [۲]. با افزایش تقاضا در عملکرد سایشی^۱ برای کاربردهای هوا فضایی، توسعه روانکاری جامد - جامد 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 روان‌کننده‌های مایع مشکل است زیرا باعث آلودگی سایر قطعات توسط روان‌کننده می‌شود. علاوه بر این در کاربردهای فضایی با گرانش کم، ممکن است تغذیه مناطق تماس با روان‌کننده‌های مایع با مشکل روبه‌رو باشد. اخیراً استفاده از پوشش‌های کربن شبه الماس^۲ DLC در بسیاری از کاربردهای مکانیکی متداول برای کاهش اصطکاک و سایش موفقیت‌آمیز بوده است. اما هنوز برخی محدودیت‌هایی وجود دارد. یکی از محدودیت‌ها این است که بعد از رسوب پوشش، برخلاف روانکارهای مایع مسیر سایش نمی‌تواند دوباره پر شود. بنابراین طول عمر و مقاومت به سایش مهم است

[۳]. به دلیل هزینه کم و راحت‌تر بودن فرآیند آبرکاری الکتریکی این روش بررسی شد.

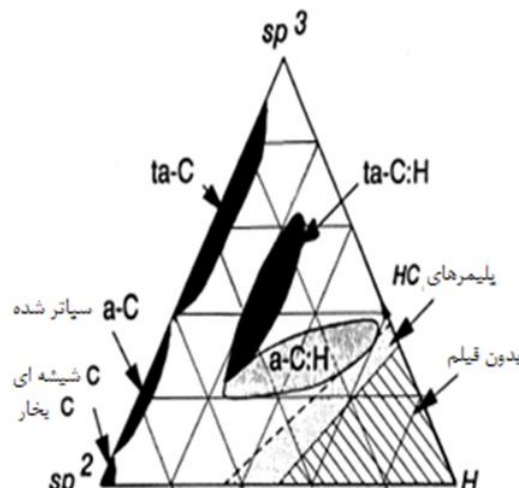
۲- انواع کربن شبه الماس (DLC)

فیلم‌های بی‌شکل DLC، کربن با هیدروژن (a-c:H) یا بدون هیدروژنی (a-c) هستند که ماده شبه‌پایدار بی‌شکل با خواص مکانیکی، نوری، الکتریکی، شیمیایی و سایشی عالی ایجاد می‌کنند. این فیلم‌ها می‌توانند در دماهای پایین با روش‌های مختلف و با استفاده از انواع مختلفی از پیش‌سازه‌ها و ترکیبات عناصر مختلف مثل Si, F, N یا فلزات دیگر آماده شوند. این مواد فلزی و غیرفلزی می‌توانند براساس نوع کاربرد پوشش DLC، اضافه شوند. روش‌های مختلف مورد استفاده برای رسوب لایه‌های DLC، انعطاف‌پذیری زیادی روی خواص برای کاربردهای گوناگون ایجاد می‌کند. 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 تراهدرال (ta-c) هیچ کاربرد عملی مشخص نشده است [۴-۶]. شکل ۱ انواع کربن شبه الماس را در نمودار فازی، و شکل ۲ به طور طرح‌وار نمایش می‌دهد.

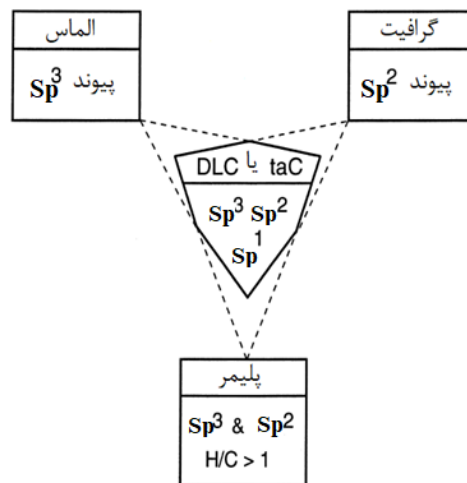
۳- کاربرد کربن شبه الماس

کربن شبه الماس به دلیل خاصیت شفاف بودن در مقابل نور مرئی به عنوان پوششی ضدانعکاس و ضدخراش بر روی شیشه‌های عینک مورد استفاده قرار می‌گیرد. دمای پایین تخلیه به DLC این اجازه را می‌دهد تا به عنوان لایه محافظ بر روی محصولات ساخته شده از پلاستیک قرار گیرد. بنابراین برای محافظت در برابر سایش شیشه‌های عینک آفتابی ساخته شده از پلی کربنات از DLC استفاده می‌شود. استفاده گسترده از فیلم‌های DLC برای حفاظت خوردگی و حفاظت از رساناهای مغناطیسی صورت می‌گیرد. فیلم‌های بسیار نازک DLC به عنوان پوشش‌های محافظ در برابر خوردگی و پوشش‌های محافظ برای صفحات مغناطیسی و غیرمغناطیسی استفاده می‌شود. به نظر می‌رسد کربن شبه الماس سازگار با محیط است و برای کاربردهای عملی قابل استفاده می‌باشد.

¹ Tribological
² Diamond Like Carbon



شکل ۱- نمودار فازی مواد کربن شبه الماس [۴].



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

لایه می‌نشیند.

روش جدیدی برای رسوب دادن فیلم‌های DLC، ایمپلنت با منبع یونی پلاسما (PSII) می‌باشد. در این روش زیر لایه بصورت مستقیم در منبع پلاسما قرار می‌گیرد و بعد پالس - بایاس^۳ می‌شود. این روش غیرخطی است و امکان پوشش ساختارهای پیچیده را نیز فراهم می‌کند. خواص فوق سخت از فیلم‌های Tac توسط انرژی‌های بالای پیوند ذراتی که فیلم‌ها را تشکیل می‌دهند به دست می‌آیند. انرژی لازم برای اینگونه پوشش کاری‌ها با تغییرهای مختلفی در قوس خلا یا کاتد، مانند قوس فیلترشده، قوس پالسی، قوس با لیزر، ضایعات لیزری پالسی بدست می‌آید. تخلیه قوس خلا می‌تواند باعث گرمای بیش از حد در کاتد شده و در نتیجه باعث رسوب دانه‌های خشن شود. این مشکلات می‌تواند با اصلاحات پیشنهاد شده برای آبکاری نرم و خیلی سخت فیلم‌های Tac حل شود. همچنین روش PSII می‌تواند، برای آبکاری Tac نیز مورد استفاده قرار گیرد [۴]. بیشترین روش مورد استفاده تبخیر شیمیایی بخار (CVD) پلاسما ماکروویو فشار کم متان و گاز هیدروژن است. فرآیند فوق هزینه‌ی بالایی دارد و جستجو برای روش‌های کم هزینه برای رسوب DLC هنوز بحث داغ محسوب می‌شود. در زمان‌های اخیر امکان ته‌نشین کردن فیلم‌های DLC از مایعات آلی امکان‌پذیر شده است [۷]. روش آبکاری الکتریکی از لحاظ ارزانی تجهیزات و سادگی فرآیند برای تهیه فیلم‌های DLC و مواد کربنی مربوطه در حال رقابت با سایر روش‌ها می‌باشد [۸، ۹]. روش‌های رسوب‌دهی یکی از عوامل مهم بر پوشش DLC است. در حال حاضر انواع مختلفی از روش‌های رسوب فیلم‌های DLC وجود دارد. برای رسوب DLC می‌توان از طیف گسترده دمایی استفاده کرد. این دما ممکن است از زیر صفر تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد متفاوت باشد. فشار گاز آبکاری، ولتاژ بایاس و زمان اچ کردن می‌تواند در نوع رسوب تاثیر بگذارد. پوشش‌های DLC در صورتی می‌توانند خواص

با توجه به شکنندگی شیمیایی آن‌ها و عدم نفوذپذیری مایعات، پوشش‌های DLC می‌توانند ایمپلنت‌های زیستی را در برابر خوردگی محافظت کنند و به عنوان موانع انتشار استفاده شوند. فیلم‌های DLC برای استفاده به عنوان پوشش‌های فلزی و همچنین پلیمری مانند پلی کربنات و پلی اتیلن، کامپوزیت‌های زیستی برای بهبود سازگاری با بافت‌های بدن مورد استفاده قرار می‌گیرند. کربن شبه الماس پوشیده شده در فولاد ضدزنگ و آلیاژهای تیتانیوم که برای اجزا دریچه‌های قلب مصنوعی استفاده می‌شود، برآورده شده است که نیازهای مکانیکی و زیستی را برطرف می‌کند و قادر به بهبود عملکرد این اجزا می‌باشد. خواص مشابه می‌تواند DLC را به عنوان یک پوشش محافظ برای ایمپلنت‌ها مفید سازد. همچنین بهبود پروتز کامپوزیت کربن / کربن توسط پوشش‌های DLC نشان داده شده است. فیلم‌های غیرهیدروژنه Tac (فیلم‌های کربن شبه الماسی که در ساختار آنها هیدروژن بکار نرفته است) 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 سایشی برای کاربردهای هوا فضایی، توسعه روانکاری جامد - جامد ضروری است. پوشش‌های کربن شبه الماس در بسیاری از کاربردهای مکانیکی معمولی برای کاهش اصطکاک و سایش موفقیت‌آمیز بود [۳].

۴- روش‌های ساخت کربن شبه الماس

برای بدست آوردن ساختار شبه پایدار DLC از روش رسوب نشانی بخار شیمیایی (PECVD^۱) و یا روش تبخیر فیزیکی بخار (پاشش یا پرتو یونی) استفاده می‌شود. 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 نیز کنترل شود. در اغلب موارد رسوب به صورت خطی است و پوشش فقط در یک طرف زیر

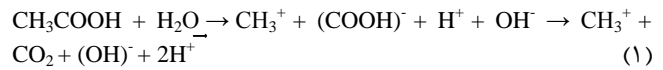
^۲ Plasma Source Ion Implantation (PSII)

^۳ Pulse-Biased

^۱ Plasma Enhanced Chemical Vapor Diposition

تولید کربن با پیوند SP^2 و SP^3 شود تا فیلم DLC روی SNO_2 به صورت پوشش تشکیل شود. تشکیل خوشه‌های بحرانی بعد از آن منجر به تشکیل فیلم‌های مداوم می‌شود. مدل ساده در شکل ۳ مشخص شده است. مطالعه تاثیر ولتاژ اعمال شده بین دو الکترود در طول آبرکاری بسیار جالب بود. شکل ۴ (الف-ج) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) فیلم‌های DLC از یک حمام حاوی اسید در ولتاژ مختلف را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که شکل ظاهری کلی فیلم‌ها ثابت باقی می‌ماند در حالیکه با افزایش ولتاژ دانه‌ها بیشتر فشرده می‌شوند. شکل ۴-د ریزنگار میکروسکوپ الکترونی عبوری^۳ (TEM) فیلم را نمایش می‌دهد. می‌توان درک کرد که رادیکال‌های متیل به یکدیگر متصل می‌شوند تا خوشه‌های بحرانی را تشکیل دهند که به نوبه خود می‌توانند یک فیلم یکنواخت را ایجاد کنند. الگوهای پراش پرتو ایکس فیلم‌های مربوط به شکل ۴، در شکل ۵ نشان داده شده است [۷].

مورد نظر را داشته باشند که چسبندگی بین پوشش و زیرلایه به اندازه کافی قوی باشد [۵، ۶].
 پال^۱ و همکارانش [۷] در مورد سنتز فیلم کربن شبه الماس با روکش الکترودهای جدید تحقیقاتی انجام دادند. در این روش اسید استیک به عنوان الکترولیت انتخاب می‌شود و سنتز فیلم‌های DLC به روش آبرکاری الکتریکی بر روی پوشش شیشه‌ای SNO_2 انجام می‌گیرد و گرافیت به عنوان آند مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضخامت پوشش، کم در نظر گرفته می‌شود و اسید استیک در آب یونیزه می‌شود (واکنش ۱).

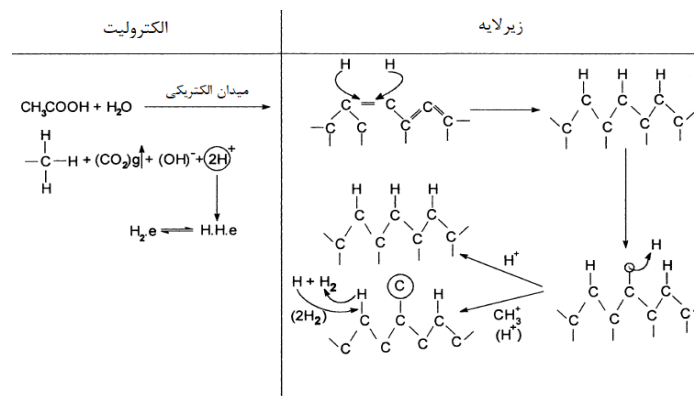


بنابراین سطح کاتد حضور غلظت بسیار بالایی از رادیکال‌های متیل و یون‌های هیدروژن را که ضروری برای رساندن الماس یا فیلم‌های DLC بر روی زیر لایه است، بدست می‌آورد. در حال حاضر سطح لایه‌ی SNO_2 که دارای محل‌های کمبود اکسیژن است، محل اتصال به رادیکال‌های CH_3 را همراه هیدروژن فراهم می‌کند که می‌تواند شامل شکستن پیوند و

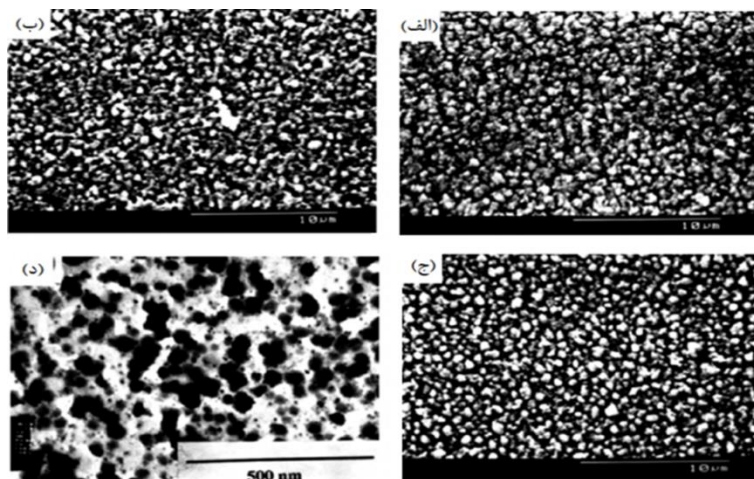
² Scanning Electron Microscope

³ Transmission Electron microscopy

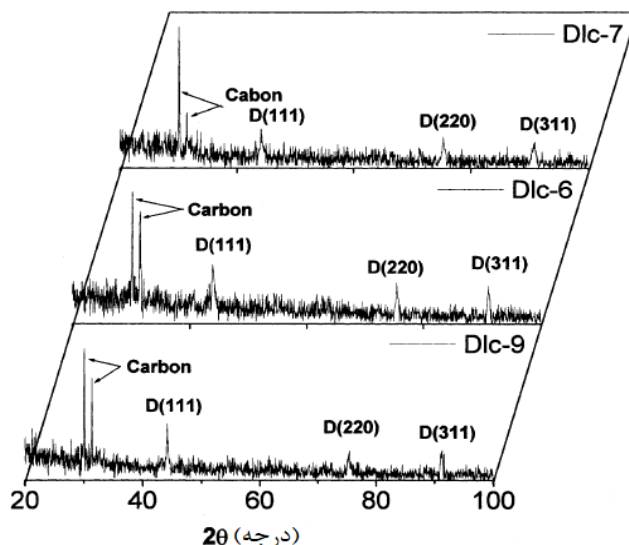
¹ Pal



شکل ۳- مدل ساده برای رشد فیلم‌های DLC با روش آبرکاری الکتریکی [۷].



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های DLC درون اسید استیک با ولتاژهای مختلف (الف) ۱ کیلوولت، (ب) ۲ کیلوولت، (ج) ۲/۵ کیلوولت و (د) تصویر TEM [۷].



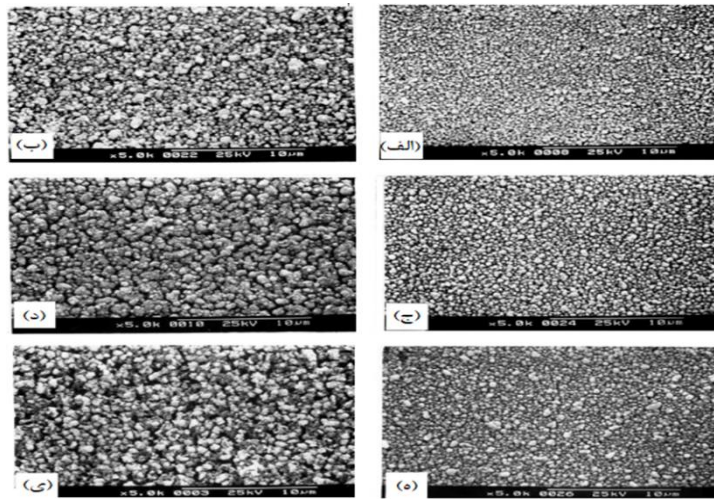
شکل ۵- الگوی پراش پرتو ایکس فیلم های DLC [۷].

شدت پیک‌های بین G و D (ID/IG) یک مولفه بسیار مهم برای تشخیص مواد DLC مانند است. مقالات گزارش کرده‌اند که افزایش نسبت ID/IG به افزایش پیوند sp^3 مربوط است. نسبت ID/IG برای پوشش DLC به دست آمده از روش‌های مختلف و تحت شرایط مختلف مابین ۰/۳ تا ۵ بود. طیف معمولی رامان فیلم DLC رسوب داده شده به روش الکتريکی بر روی فولاد در شکل ۸ نشان داده شده است و نسبت ID/IG برای هر نقطه از یک نمونه اندازه‌گیری شد و میانگین آن در جدول ۲ گزارش شده است [۱۳]. داده‌ها نشان داد که نسبت ID/IG از ۳/۰۳ به ۲/۸۳ برای نمونه تهیه شده در ولتاژ ۸- نسبت به نمونه‌ای که در ولتاژ ۱۵- بوده کاهش می‌یابد. در نتیجه فیلم با کیفیت پایین در ولتاژهای بالاتر قرار می‌گیرد علاوه بر این مشخص شد که غلظت اسید استیک بالاتر نسبت ID/IG را بیشتر می‌کند. شکل (a-c) ۹ میکروسختی فیلم‌های DLC را به عنوان تابعی از پتانسیل، زمان، غلظت اسید استیک نشان می‌دهد [۱۳].

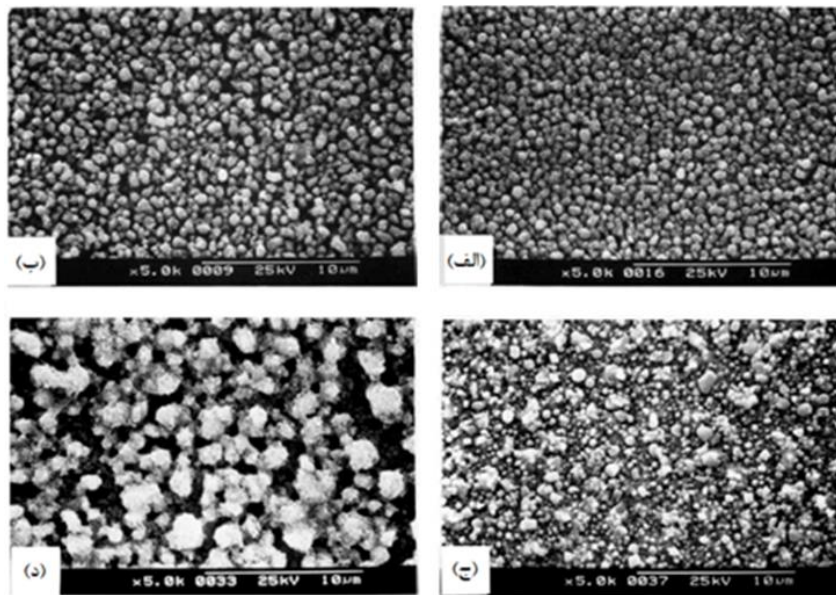
نامبا و همکارانش [۱۴] معتقدند که جریان عبوری از زیر لایه نقش مهمی در تشکیل پوشش از محلول آلی دارد. چگالی جریان بالا نشان می‌دهد که ذرات قطبی بیشتری از محلول به سمت الکتروود حرکت می‌کنند که ممکن است تاثیر مهمی در سرعت رشد فیلم‌ها داشته باشد. در تحقیقی دیگر تاثیر جوشیدن الکتروولیت تحت ولتاژ بالا و افزایش دما در کنار الکتروود بررسی گردید و نتایج نشان داد که 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 چگالی جریان و در نتیجه منجر به کاهش میزان رسوب می‌شود. برای برطرف کردن مشکل کاهش چگالی جریان می‌توان از کاهش فاصله الکتروودها استفاده کرد که با این روش دستیابی به چگالی جریان بالا حتی در ولتاژهای پایین نیز امکان پذیر است علاوه بر این با این روش احتمال بیشتری وجود دارد که یون‌ها یا رادیکال‌ها قبل از اتصال و ترکیب مجدد به الکتروودهای مربوطه وارد شوند [۱۵].

پال و همکارانش [۱۱، ۱۰] در تحقیقی دیگر در مورد سنتز فیلم‌های کربن شبه الماس با روش آبکاری و با استفاده از اسید فرمیک به عنوان الکتروولیت بررسی‌هایی انجام داده‌اند. اثر ولتاژ اعمال شده در طول الکتروولیز بر روی خواص فیلم مورد مطالعه قرار گرفت. جنس آند گرافیت می‌باشد. شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های پوشیده شده در ولتاژهای مختلف در سه حمام گوناگون اسید فرمیک و آب یونیزه شده را نشان می‌دهد. بنابراین فیلم‌های DLC تولید شده در پتانسیل کم، ساختار دانه ریزتری نسبت به فیلم‌های پوشیده شده در پتانسیل الکتریکی بالا دارند. اندازه دانه‌ها و سختی و زبری سطح با افزایش ولتاژ افزایش می‌یابد. اثر دمای حمام در میکرو ساختار فیلم‌ها در شکل ۷ نمایش داده شده است. در اثر افزایش دمای حمام رشد دانه‌ها اتفاق می‌افتد و مقدار فشردگی فیلم‌ها افزایش می‌یابد. بنابراین پوششکاری فیلم‌ها باید در دما و غلظت و پتانسیل مناسب انجام گیرد. در تحقیقی دیگر اثر متان، اتان، استیلن و ترکیبات مشابه را بر عملکرد اصطکاک و سایشی پوشش‌های DLC بر روی زیر لایه فولادی بررسی شد. نتایج نشان داد که هیدروژن برای بدست آوردن ضریب اصطکاک کم و مقاومت به سایش بالا در فیلم‌های DLC ضروری است. آنها پلاسمای متان را با هیدروژن رقیق کردند با افزایش مقدار هیدروژن کاهش ضریب اصطکاک بدست آمد. بمباران شدید یون‌های هیدروژن مانع ایجاد پیوند دوگانه کربن (C=C) در فیلم‌های DLC می‌شود و از مرحله گرافیتی شدن عبور می‌کند [۱۲].

پال و همکارانش [۱۳] روش رسوب‌دهی ساده با استفاده از اسید فرمیک، اسید استیک و آب دیونیزه به عنوان الکتروولیت پیشنهاد کردند. با استفاده از این الکتروولیت فاز الماس و فیلم‌های کربن بی‌شکل هردو تشکیل می‌شوند. با توجه به ساختار فیلم‌های DLC گزارش شد که آنها عمدتاً همگن و بی‌شکل هستند اما برخی از ساختارهای نانوبلوری کربن معمولاً در بستر بی‌شکل یافت می‌شود. نسبت SP^3/SP^2 مولفه اصلی تعیین میکروساختار است. آزمون‌های الکتروشیمیایی در شرایط مشخص شده در جدول ۱ برای تعیین شرایط مطلوب پوشش ارائه شده است. نسبت



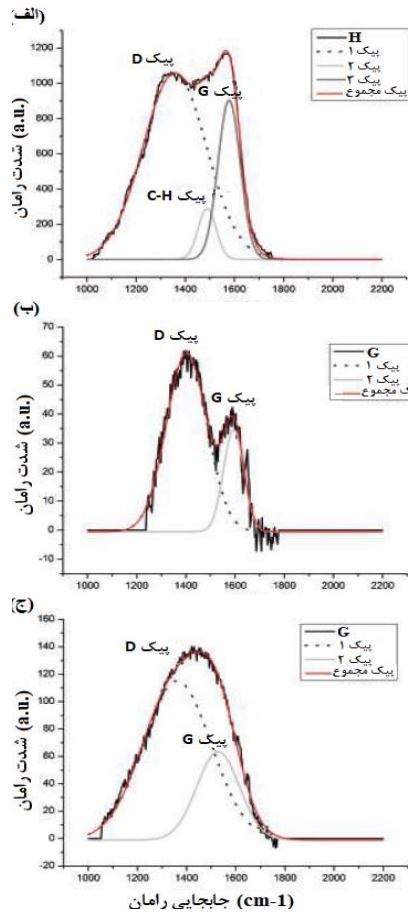
شکل ۶- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی برای دو مجموعه از فیلم‌های پوشیده شده در دو پتانسیل کاربردی ارائه شد. (الف، ج، ه) ۲/۱۳ ولت و (ب، د، ی) ۳/۶۹ ولت در حمام‌های حاوی غلظت مختلف اسید فرمیک در آب، (الف، ب) ۰/۵ درصد، (ج، د) ۱ درصد و (ه، ی) ۱۰ درصد [۱۰].



شکل ۷- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های پوشش داده شده در ۳۶۰ درجه کلوین و ولتاژ اعمالی ۴/۲۶ ولت در حمام‌هایی با غلظت اسید فرمیک متفاوت (الف) ۰/۵ درصد، (ب) ۱ درصد، (ج) ۵ درصد و (د) ۱۰ درصد [۱۰].

جدول ۱- مولفه‌های تجربی مورد استفاده برای پوشش‌دهی الکتریکی DLC در دمای اتاق [۱۳].

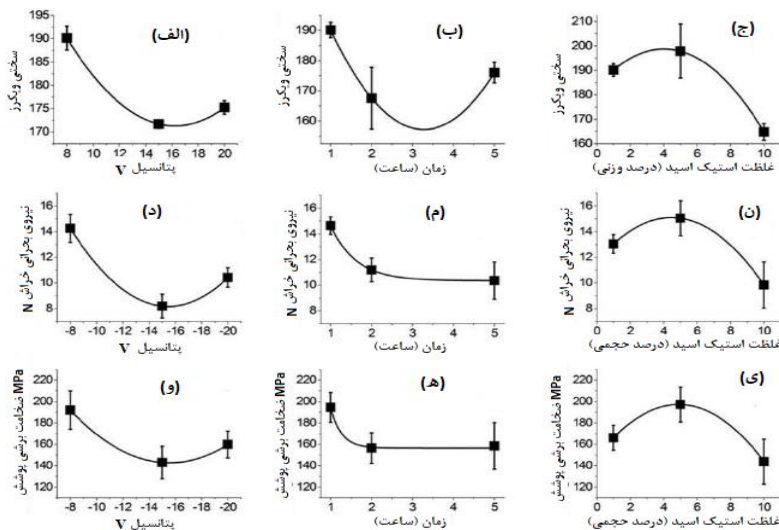
نمونه	پتانسیل (V)	درصد اسید استیک	زمان (ساعت)
۱	-۸	۱	۱
۲	-۸	۱	۲
۳	-۸	۱	۵
۴	-۸	۲	۱
۵	-۸	۵	۱
۶	-۸	۱۰	۱
۷	-۱۵	۱	۱
۸	-۲۰	۱	۱



شکل ۸- طیف رامان فیلم‌های DLC رسوب داده شده در الف) ۸- برای ۱ ساعت در ۱٪ حجمی اسید استیک، ب) ۸- برای ۱ ساعت ۵٪ حجمی اسید استیک ج) ۱۵- ۷ برای ۱ ساعت و ۱٪ حجمی اسید استیک [۱۳].

جدول ۲- مولفه‌های رسوب‌دهی الکتریکی DLC و الماس مربوط به نسبت گرافیت (ID/IG)، به وسیله طیف‌سنجی رامان [۱۳].

نمونه	پتانسیل (V)	درصد اسید استیک	زمان (ساعت)	I_D/I_G
۱	-۸	۱	۱	0.12 ± 0.03
۲	-۸	۵	۱	0.12 ± 0.02
۳	-۱۵	۱	۱	0.06 ± 0.02



شکل ۹- تاثیر زمان، پتانسیل و غلظت اسید استیک بر روی خواص مکانیکی فیلم‌های DLC بر روی فولاد کربنی (شرایط رسوب: پتانسیل ۲۸ V، غلظت اسید استیک ۵ vol٪، زمان ۱ ساعت. الف) میکروسختی، د) چسبندگی، ز) باتوجه به بار خراش بحرانی و و) سختی برش. خطوط برای راهنمای چشم هستند [۱۳].

۵ - فیلم‌های DLC آلیاژ شده با فلزات (Me-DLC)

فیلم‌های نازک Me-DLC دارای خواص مکانیکی، شیمیایی و الکترونیکی منحصر به فرد هستند، بنابراین دارای پتانسیل بالایی برای کاربردهای مهمی در تریبولوژیک، الکترونیک، پزشکی و فناوری اطلاعات می‌باشند. رفتار تریبولوژیک عمدتاً به ویژگی‌های سطحی مربوط است و بنابراین این فیلم‌ها پتانسیل فوق‌العاده‌ای برای تغییر و بهبود خواص سطح و بهینه‌سازی سایش مواد و رفتار اصطکاکی دارند. علاوه بر این خواص مواد بالک مانند چقرمگی و مقاومت حفظ می‌گردد. فیلم‌های DLC عمدتاً دارای کربن هستند که در اشکال مختلف مانند الماس، گرافیت، فولرین، نانولوله‌های کربنی و پلیمر می‌باشد. گرافیت نرم و پایدار است و برای روانکاری قابل استفاده می‌باشد. روش رسوب، مقدار هیدروژن و مقدار دوپینگ مقدار پیوند SP_2 و SP_3 را مشخص می‌کنند. فیلم‌های Metal - DLC ابتدا در سال ۱۹۸۵ توسط دیمیگن و همکارانش گزارش شد. آنها کار بر روی Metal - DLC با عناصر تشکیل دهنده کاربرد (Cr, Ti, Si-DLC) و عناصر تشکیل دهنده غیر کاربیدی (Pt, Ag, Cu) را آغاز کردند. این‌ها برای بهبود چسبندگی و کاهش تنش داخلی توسعه پیدا کرده‌اند با این حال دوپینگ سختی و مدول را کاهش می‌دهد که می‌تواند منجر به نرخ سایش بالاتر، شود. بنابراین برای کاهش سایش، چسبندگی باید همراه با مدول بالاتر باشد و سختی در سطح بهبود یابد. روش‌های مختلفی برای سنتز فیلم‌های Me-DLC بکار گرفته شده است. بر اساس استفاده از روش‌های مختلف طیف گسترده‌ای از خواص مختلف در این فیلم‌ها دیده می‌شود. پوشش کاری فیلم‌های Me-DLC با اعمال ولتاژ و با یاس منفی بر روی زیر لایه تاثیر مثبت به خواص فیلم در مقایسه با حالت معمولی یا با یاس مثبت دارد [۱۲].

۶ - کربن شبه الماس آلیاژ شده (دوپ) با نیکل

متاسفانه فیلم‌های DLC که به روش الکتروشیمیایی بدست می‌آیند دارای تنش باقیمانده هستند که سبب کاهش مقاومت پوشش و زیر لایه و شکست فیلم توسط بارگذاری زیاد می‌شود. تلاش زیادی برای کاهش تنش باقیمانده و یا بهبود خواص فیلم‌های DLC از طریق ترکیب کردن با عناصر فلزی انجام شده است. عناصر Cr, Ti, Si, Mo, Fe, Cu, N, F اغلب به عنوان دوپ استفاده می‌شود. به عنوان مثال پال و همکارانش نانو ذرات نقره در مخلوط DLC را با استفاده از روش الکتروشیمیایی بر روی شیشه‌ای با پوشش SnO_2

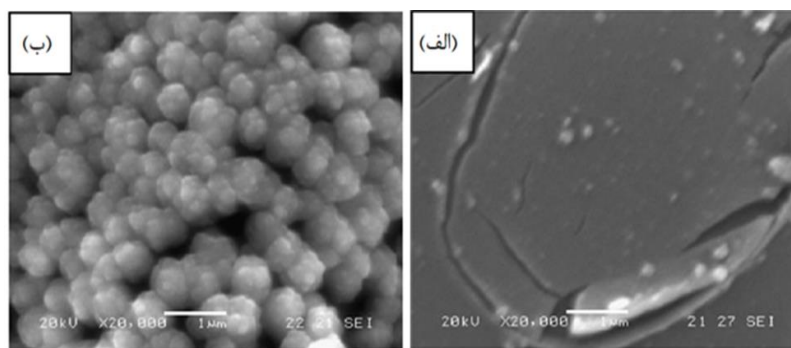
تحت شرایط ولتاژ فوق العاده پایین نشانند. چن^۱ و همکارانش یک روش جدید الکتروشیمیایی برای تهیه دوپ طلا بر روی a-c:H با زیر لایه سیلیکونی تک بلوری ارائه کردند. یو^۲ و همکارانش یک فرآیند ساده و مؤثر آبکاری الکتریکی برای ساخت فیلم کامپوزیتی فوق رسانا Ru/a-CN_x:H و دوپ نانو ذرات Pd که دارای پلی کربن هیدروژنه بی شکل است را گزارش کردند. چن و همکارانش از طریق نشانند نیکل خالص روی هدف گرافیت پوشش دهی کردند. فیلم‌های کربن حاوی نیکل بوسیله روش خلاء کاتدی فیلتر شده و دریافتند که اتم‌های نیکل به راحتی اتم‌های کربن اطراف را رسوب می‌دهند. این بدان دلیل است که نیکل می‌تواند هدایت الکتریکی فیلم را افزایش دهد که باعث می‌شود نیکل به عنوان دوپ ایده آل با کاربرد بالقوه در دستگاه انتشار الکترونی میدان استفاده شود که ما را تشویق می‌کند نیکل را در فیلم‌های DLC به منظور کاهش تنش داخلی فیلم DLC و برای افزایش قدرت اتصال بین فیلم DLC و زیر لایه بطور هم‌زمان استفاده کنیم. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های DLC دوپ شده با نانو ذرات نیکل بدست آمده تحت پتانسیل کم با استفاده از دی متیل سولفوکسید به عنوان منبع کربن و محلول اسید استیک استات نیکل به عنوان منبع دوپ در شکل ۱۰ آورده شده است. جنس آند و کاتد در این مطالعه گرافیت می‌باشد. مشخص است که ترک‌های شدید در سطح فیلم DLC دوپ نشده وجود دارد که می‌تواند منجر به تنش باقیمانده زیاد در این فیلم شود. در مقایسه در فیلم‌های DLC- دوپ نیکل تشکیل دانه‌های کروی با میانگین اندازه در حدود ۵۰۰ نانومتر قابل ملاحظه است و این بدان معنی است که دوپ کردن نیکل می‌تواند بطور مؤثر باعث کاهش تنش باقیمانده در فیلم DLC شود [۹، ۸].

پانندی^۳ و همکارانش [۱۶] بر روی فیلم‌های نازک DLC که به روش رسوب دهی الکتریکی بر روی پایه شیشه‌ای تحت پوشش SnO_2 با الکترولیت اسید استیک و آب رسوب داده شده‌اند نانو ذرات نیکل را به بستر DLC وارد کردند. نتایج نشان می‌دهند که مقاومت به خوردگی فیلم‌های Ni-DLC با افزایش محتوای نیکل در فیلم‌ها کاهش می‌یابد.

¹ Chen

² Yu

³ Pandey



شکل ۱۰ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) فیلم DLC دوپ نشده و (ب) فیلم DLC - دوپ نیکل [۸].

مقاله

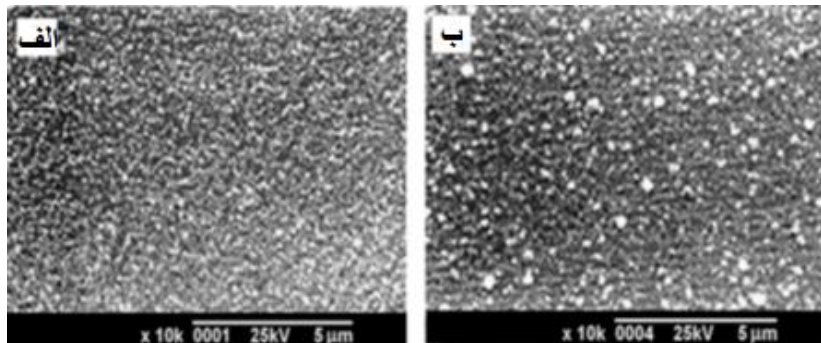
بهبود مقاومت سایشی فیلم DLC می‌شود. این به خوبی مطابقت تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های DLC دوپ‌نشده و دوپ‌شده با نیکل را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۳ قسمت‌های باریک فیلم DLC - دوپ نیکل نشان داده شده است. شکل (ب، د) ۱۰ که فیلم‌های DLC دوپ‌شده را نشان می‌دهند در مقایسه با فیلم DLC دوپ‌نشده (الف، ج) شدت شکست کمتری دارد. فیلم‌های DLC دوپ نشده بدست آمده از طریق الکتروشیمیایی توانایی پوشش ضدسایش کمتری دارد که عمدتاً به دلیل تنش باقیمانده بالا و چسبندگی ضعیف به زیر لایه سیلیکونی می‌باشد و باعث شکست در بارگذاری بالا می‌شود. در نتیجه فیلم DLC دوپ شده دارای مقاومت به سایش بهتری در مقابل فیلم DLC دوپ‌نشده می‌باشد. شکل ۱۴ نتایج تست خراش را بر روی فیلم DLC دوپ شده و نشده نشان می‌دهد، در حالیکه نیروی اصطکاک F_x و نیروی عادی F_z به عنوان تابع زمان بر حسب ثانیه آزمون شده‌اند. در آزمایش ابتدایی میکروبار در برابر فیلم به آرامی حرکت کرد. حذف شدن مواد فیلم بطور پیوسته رخ می‌دهد. بار که بطور کامل از سطح حذف شد به عنوان بار بحرانی ثبت گردید و افزایش شدید نیروی اصطکاک در آن مشاهده شد. همانطور که در شکل ۱۴ نشان داده شد فیلم DLC - دوپ نیکل دارای باند انرژی قوی‌تری با زیر لایه سیلیکونی نسبت به فیلم دوپ‌نشده می‌باشد. این ممکن است به فعل و انفعال بین نیکل و سیلیکون مربوط باشد. به عبارت دیگر نیکل دوپ‌شده در فیلم DLC می‌تواند باعث کاهش تفاوت ضریب دمای انبساط بین فیلم DLC و زیر لایه سیلیکونی شود [۹، ۸].

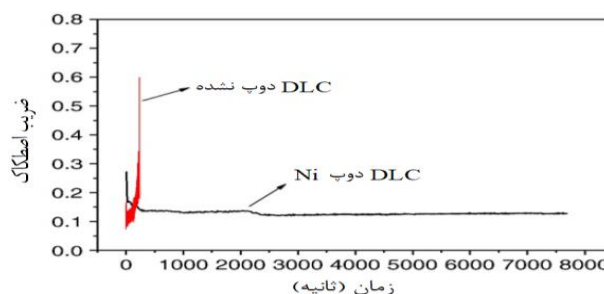
با مقایسه فیلم‌های کربن خالص ترکیب نیکل بطور قابل توجهی گرافیتی کردن فیلم‌های کربنی را کاهش می‌دهد و باعث کاهش کشش سطحی می‌شود. فیلم‌های DLC شامل Ni نسبت به فیلم‌های DLC خالص چسبندگی بیشتری دارند. اگر چگالی جریان یا مقدار نمک نیکل از حد بحرانی بیشتر شود، قطعاً طبیعت نانوبلوری ایمپلنت نیکل در بستر DLC کم می‌شود و می‌تواند با فیلم‌های نیکل غالب به دانه‌های پلی‌بلوری بزرگ تبدیل شوند. بنابراین با تغییر مقدار استات نیکل و چگالی جریان در هنگام رسوب فیلم‌هایی با همان اندازه اما با کسر حجمی مختلف فلز (f) می‌توان بدست آورد. شکل ۱۱ ریزنگار میکروسکوپ الکترونی روبشی دو نمونه فیلم Ni/400 و Ni-DLC /1000 که به روش الکتروشیمیایی رسوب داده شده را نشان می‌دهد. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی این فیلم‌ها فشردگی بالا و اتصال قوی بین ذرات را نشان می‌دهد.

۷- خواص مکانیکی و سایشی

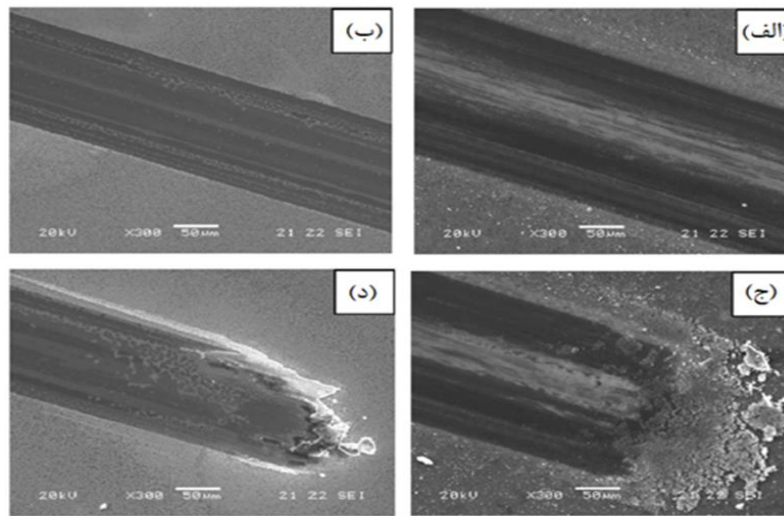
فیلم‌های کربن شبه الماس سختی و یکرز بالا، مدول الاستیک بالا و تنش داخلی بالایی دارند. این خواص بطور مستقیم با درصد کسری پیوند SP^3 در ارتباط هستند. شکل ۱۲ تغییرات ضریب اصطکاک را در زمان لغزش برای فیلم DLC دوپ‌نشده و فیلم DLC - دوپ نیکل بر روی توپ فولادی ضدزنگ نشان می‌دهد. ضریب اصطکاک فیلم DLC دوپ‌نشده بعد از لغزش به مدت ۲۰۰ ثانیه به مقدار نسبتاً بالایی افزایش یافت و این بدان معنی است که فیلم DLC دوپ نشده دارای مقاومت سایشی پایینی است. بر خلاف آنچه که در بالا ذکر شد فیلم DLC - دوپ نیکل دارای حالت پایدار است و ضریب اصطکاک آن حتی بعد از لغزش بیش از ۸۰۰۰ ثانیه حدود ۱۳ باقی می‌ماند. این نتیجه نشان از آن می‌باشد که نانو ذرات نیکل بطور مؤثر باعث



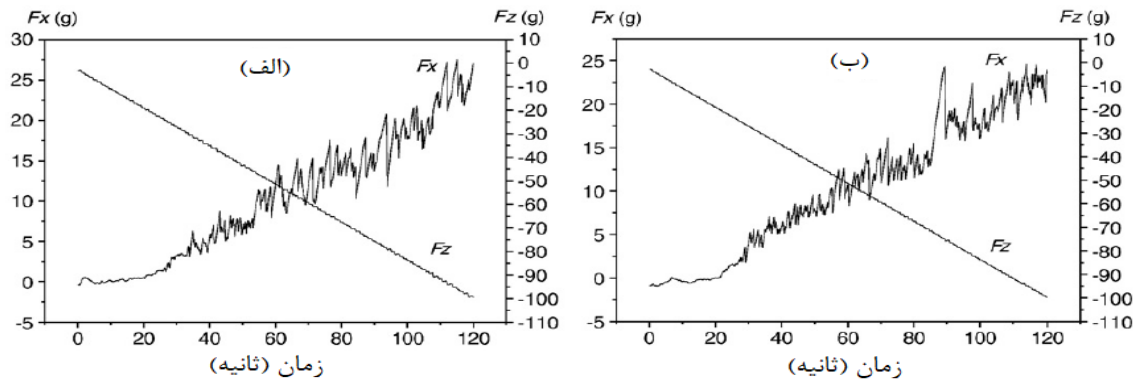
شکل (۱۱) - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی فیلم‌های Ni-DLC در (الف) N/400 و (ب) N/1000 غلظت حمام [۱۶].



شکل ۱۲ - منحنی ضریب اصطکاک نسبت به زمان کشش فیلم DLC دوپ نشده و فیلم DLC - دوپ Ni بدون ضخامت پوشیده شده در ولتاژ ۱۵۰ ولت به مدت ۱ ساعت در برابر فولاد ضدزنگ C ۴۴۰ است [۸].



شکل ۱۳ - تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سایش (الف، ج) فیلم DLC دوپ نشده (ب، د) فیلم DLC - دوپ نیکل در ولتاژ ۱۵۰ ولت برای ۱ ساعت در مقابل توپ فولادی ضدزنگ ۴C [۸].



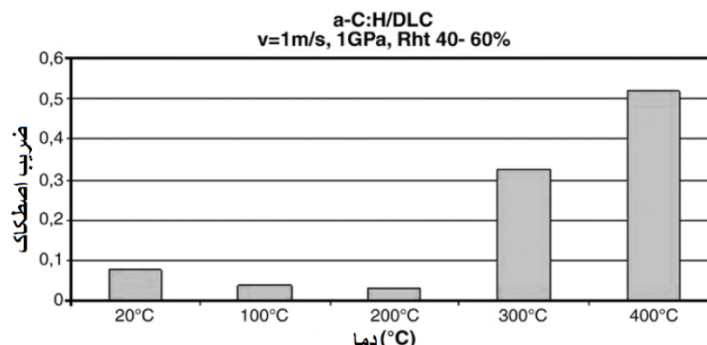
شکل ۱۴ - تغییر نیروی اصطکاک F_x و نیروی عادی F_z با زمان خراش دادن برای (الف) فیلم DLC دوپ نشده و (ب) فیلم DLC - دوپ نیکل [۸].

فلزات مختلف باعث تغییر خواص مکانیکی آنها (تنش و سختی داخلی پایین تر و بهبود چسبندگی) و همچنین خواص سایشی آنها می شود [۱۷]. فیلم های DLC می توانند محافظ خوبی برای زیر لایه های فلزی در مقابل خوردگی باشند با این حال عملکرد خوردگی پوشش های DLC به شدت با ریزساختار آن و یا وجود نقص در آن مرتبط است. تخلخل یکی از مهم ترین عوامل در ارزیابی قابلیت حفاظت خوردگی پوشش های DLC است. مقاومت به خوردگی فیلم های DLC فوق نازک بطور قابل توجهی با زمان غوطه وری در یک محلول الکترولیتی به دلیل پر شدن حفره ها مواد PASSIVATING که مانع دسترسی الکترولیت به بستر می شود افزایش می یابد. از سوی دیگر مقاومت به خوردگی پوشش های DLC با افزایش ضخامت پوشش افزایش می یابد. با این حال مقاومت به چسبندگی پوشش های DLC به محافظت در برابر خوردگی فیلم ها تاثیر می گذارد یعنی مقاومت به چسبندگی بالای فیلم مقاومت به خوردگی را بهبود می بخشد. ساختار و خصوصیات فیلم های DLC به طور قابل ملاحظه ای با استفاده از روش های رسوب و همچنین شرایط رسوب مانند زیرلایه، دما، فشار گاز، و سطحی که دوپ می شود تحت تاثیر قرار می گیرد [۱۸]. پوشش DLC محافظ خوبی برای جلوگیری از خراشیده شدن و حمله شیمیایی می باشد.

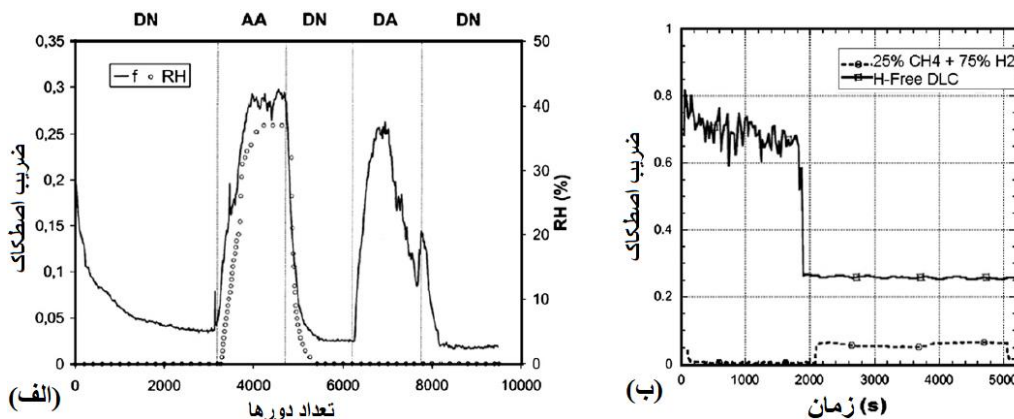
در مهندسی مکانیک، اصطکاک کم نشان دهنده کاهش انرژی، قابلیت اطمینان بالاتر و مقاومت به سایش بهتر است. انواع مختلف پوشش های DLC خواص مکانیکی و الکتریکی متفاوتی دارند که عمدتاً بستگی به رسوب است. داده شده است. خصوصیات سایشی پوشش های DLC فقط به نوع پوشش بستگی ندارد بلکه به شرایط کار و یا مشخصه های تماس بستگی دارد. به همین دلیل ضریب اصطکاک بستگی به پایداری حرارتی پوشش دارد که به ساختار و به اتمسفری که پوشش در آن عمل می کند بستگی دارد که در شکل ۱۵ این وابستگی نمایش داده شده است [۱۷]. عامل بسیار مهم در عملکرد پوشش های DLC، رطوبت و نوع گازی است که پوشش در آن عمل می کند که در شکل ۱۶ مشخص شده است. پوشش های DLC با مقداری هیدروژن اصطکاک بسیار کم در هوای خشک (حدود ۰/۰۵) را نشان می دهد. افزایش رطوبت باعث افزایش ضریب اصطکاک می شود بطوریکه رطوبت بیش از ۹۰٪ مقادیر اصطکاک ۰/۱۵ تا ۰/۳ را نشان می دهد. از سوی دیگر برای کرن بی شکل (a-c) ضریب اصطکاک با افزایش رطوبت نسبی کاهش می یابد. همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده می شود دوپ کردن پوشش ها DLC با

جدول ۳- خواص مکانیکی و الکتریکی پوشش‌های مختلف DLC [۱۷].

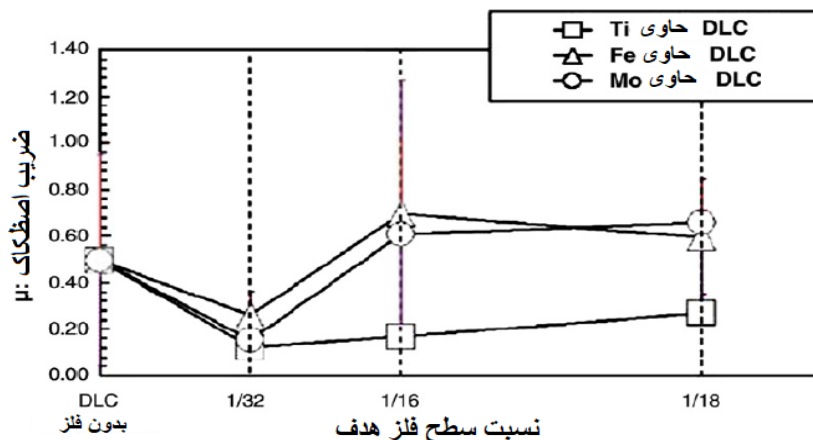
مقاومت الکتریکی ($\Omega \text{ cm}$)	میکروسختی (HV)	انرژی (GPa)	چگالی (kg/m^3)	پوشش/مواد
10^{-7} - 10^{-20}	۸۰۰-۱۰۴۰۰	۱۱۰۰	۳۵۱۵	الماس
5×10^{-5}	نرم	-	۲۲۶۰	گرافیت
10^{-2} - 10^{-3}	۸۰۰-۱۲۰۰	-	۱۳۰۰-۱۵۵۰	کربن شیشه‌ای
10^{-1} - 10^{-10}	۲۰-۵۰	۱۱-۷۰	۱۸۰۰-۲۲۰۰	تبخیر a-c
10^{-1} - 10^{-5}	۱۰۰۰-۱۰۰۰۰	۱۱-۷۰	۱۸۰۰-۲۴۰۰	اسپاترینگ a-c
10^{-7} - 10^{-14}	۱۲۰۰-۳۰۰۰	۵-۲۵	۱۵۰۰-۲۰۰۰	رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار به کمک پلاسما a-c:H
10^{-7} - 10^{-14}	۴۰۰۰-۶۰۰۰	۵-۲۵	۱۵۰۰-۲۰۰۰	یون a-c:H
$> 10^{-13}$	۶۰۰۰-۱۲۰۰۰	-	۲۸۰۰	رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار به کمک پلاسما الماس



شکل ۱۵- تاثیر دمای کار بر ضریب اصطکاک پوشش a-c:H [۱۷].



شکل ۱۶- تاثیر الف) رطوبت نسبی و ب) اتمسفر (ب) بر ضریب اصطکاک پوشش a-c:H [۱۷].



شکل ۱۷- تاثیر دوپ فلز بر ضریب اصطکاک برای پوشش‌های DLC در تماس کششی خشک [۱۷].

افزایش سختی سطح مواد و بهبود کار آنها می‌شود [۲۳].

۸- نتیجه‌گیری

پوشش‌های DLC خواصی مانند شفافیت در منطقه زیرقرمز، سختی بالا و مقاومت به سایش عالی دارند که بسته به روش رسوب‌دهی خواص متفاوتی حاصل می‌شود. امروزه پوشش‌های DLC کاربردهای فراوانی دارند که مهم‌ترین آنها استفاده در فضا به عنوان روان‌کننده جامد برای افزایش مقاومت به سایش و کاهش اصطکاک در شرایط خلا می‌باشد. فیلم‌های DLC دو عیب دارند که یکی تنش داخلی بالا و دیگری پایداری حرارتی کم آنها است که برای رفع این مشکل‌ها از دوپ‌کردن سایر فلزات در DLC استفاده می‌شود. فیلم‌های DLC دوپ‌شده دارای مقاومت به سایش و اصطکاک بهتری نسبت به فیلم‌های DLC دوپ‌نشده و چسبندگی به زیر لایه فیلم‌های دوپ‌شده بیشتر از دوپ‌نشده است. شرایط کار باعث خواص و ویژگی‌های مختلف در پوشش کربن شبه الماس می‌شود مثلاً همان‌طور که ذکر شد با افزایش ولتاژ اندازه دانه، سختی و زبری سطح افزایش می‌یابد، افزایش دما باعث افزایش فشردگی دانه‌ها می‌شود، هرچقدر غلظت اسید استیک بیشتر شود نسبت ID/IG بیشتر می‌شود، افزایش رطوبت محیط کاری DLC ضریب اصطکاک آن را افزایش می‌دهد.

انواع مختلفی از ورق‌ها، مته و پیچ و مهره را که با پوشش DLC پوشانده شده، بررسی شده است بعضی از این‌ها در معرض اتمسفر و در طی ۷ سال قرار گرفته‌اند و هیچ تخریبی صورت نگرفته است [۱۹]. پوشش‌های DLC به دلیل مقاومت به خوردگی بالای خود در قطعات خودرو و در اتومبیل‌های مسابقه‌ای به عنوان مثال در سیستم تزریق دیزل استفاده می‌شود [۲۰]. در دنیای مدرن تقاضای روزافزون برای ایمپلنت‌ها و فناوری‌های مربوطه به تولید آن‌ها وجود دارد. به نظری می‌رسد استفاده از پوشش‌های کربن شبه الماس بر روی مواد پزشکی زیستی روشی امیدوار کننده برای بهبود عملکرد سایشی است زیرا دارای سازگاری عالی و مقاومت به خوردگی بالایی می‌باشد. بهبود خواص ذکر شده می‌تواند با استفاده از دوپینگ پوشش‌ها ایجاد شود. یکی از مهم‌ترین راه ارتباطی بافت با ماده زیستی در هر دو روش درمان کوتاه یا بلند مدت از طریق سطح می‌باشد. استفاده از پوشش‌های زیست‌سازگار مانند پوشش DLC به نظر بهترین راهکار می‌آید. این پوشش‌ها مانع نفوذ یون فلزی به بافت نزدیک می‌شود و علاوه بر آن کربن خود دارای ویژگی زیست‌سازگاری عالی می‌باشد [۱۹، ۲۰]. امروزه سیستم انتقال‌دهنده به سمت وزن کم و عمر طولانی به ویژه در زمینه هوافضا پیش می‌رود. انتقال دنده سنتی در شرایط کار سخت نمی‌تواند به خوبی کار کند. بنابراین ارزشمند است که راه‌های مقرون به صرفه برای کاهش وزن چرخ‌دنده و بهبود عمر مفید آن پیدا شود. نتیجه‌گیری شده است که پوشش‌های DLC باعث

۹- مراجع

1. Astm hand book, "Surface engineering", Astm international, VOL. 5, 11th ed. USA.
۲. م. کریمی، ف. عباسی، م. مهدویان احدی، "مروری بر پوشش‌های روان‌کننده"، نشریه علمی ترویجی مطالعات در دنیای رنگ، ۸، ۵۳-۴۱، ۱۳۹۷.
3. J. Fontaine, "Towards the use of diamond-like carbon solid lubricant coatings in vacuum and space environments", J. Eng. Mater. Technol, 222, Doi: 10.1243/13506501JET323, 2008.
4. A. Grill, "Diamond-like carbon: state of the art", Diamond Relat. Mater. 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", Crit. Rev. Solid State Mater. Sci. 40, 90-118, 2015.
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", Vac. 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", Surf. Coat. Technol. 204, 2546-2550, 2010.
9. J. Robertson, "Properties of diamond-like carbon", Surf. Coat. Technol. 50, 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 Relat. Mater. 13, 1680- 1689, 2004.
11. Ch. Cao, H. Zhu, H. Wang, "Electrodeposition diamond-like carbon films from organic liquids", Thin Solid Films. 368, 203-207, 2000.
12. S. K. Pal, "Synthesis, characterization and tribological behavior of nitrogen-doped chromium-diamondlike carbon nanocomposite thin film", Louisiana State University Master's Theses, 2004.
13. H. Hassannejad, F. Bogani, M. Boniardi, A. Casaroli, C. Mele, B. Bozzini, "Electrodeposition of DLC films on carbon steel from acetic acid solutions", Trans. Inst. Met. Finish. 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", Appl. Surf. Sci. 256, 6403-6407, 2010.
15. K. Sreejith, J. Nuwad, C.G.S. Pillai, "Low voltage electrodeposition of diamond like carbon (DLC)", Appl. Surf. Sci. 252, 296-302, 2005.
16. B. Pandey, S.Hussain, "Effect of nickel incorporation on the optical properties of diamond-like Carbon (DLC) matrix", J. Phys. Chem. Solids, 72, 1111-1116, 2011.
17. M. Sedlaček, B. Podgornik, J. Vižintin, "Tribological properties of DLC coatings and comparison with test results: Development of a database", Mater. Charact. 59, 151-161, 2008.

مقاله

18. M. Scendo, K.staszewska, "Effect of temperature on anti-corrosive properties of diamond-like carbon coating on S355 Steel", Institute of chemistry, jan kochanowski university, **2019**.
19. A. H. Lettington, "Optical properties and applications of diamond-like carbon coatings", Elsevier Science Publishers B.V, 805- 809, **1992**.
20. E.Alakoski, V. Matti Tiainen, A. Soininen, Y. T. Kontinen, "Load-bearing biomedical applications of diamond-like carbon coatings - current status", Open Orthop. J. 2, 43-50, **2008**.
21. F. Guo, G.Dong, L. Qin, D. Zhang, J. Guo, "*Tribological performance of DLC coating under aqueous solutions*", Natural Science Foundation of Shaanxi Province of China, **2019**.
22. A. Jastrzębska, K. Jastrzębski, "A review of mechanical properties of diamond-like carbon coatings with various dopants as candidates for biomedical applications", Acta Innovations. 2300-5599, **2017**.
23. Y. Xiao, W. Shi, L. Li, "Fatigue performance of cylindrical gearing with DLC coatings", The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, **2014**.