

بررسی ساختار و خواص لایه نازک کربن شبه‌الماس ایجادشده بر روی فولاد AISI 4140 توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی

نوع مقاله: علمی پژوهشی

سعید مرساق دزفولی^۱، سید حجت‌اله حسینی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

^۲ استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

* nnshosseini@mut.ac.ir

چکیده:

پوشش‌های کربن شبه‌الماس به دلیل دارا بودن خواص برجسته مکانیکی و تریبولوژیکی، کاربرد فراوانی جهت بهبود خواص سطحی آلیاژها دارند. در این پژوهش، پوشش کربن شبه‌الماس با دو منبع گازی متان (CH_4) و استیلن (C_2H_2) با زمان رسوب‌دهی متفاوت بر روی آلیاژ فولادی ۴۱۴۰ توسط فرایند لایه‌نشانی پرتو یونی ایجاد گردید. در ادامه جهت ارزیابی‌های ساختاری پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجاد شده، از آزمون‌های رامان و میکروسکوپ الکترونی گسیل میدانی (FESEM) استفاده شد. همچنین جهت بررسی رفتار مکانیکی پوشش‌های اعمالی، از آنالیز نانوندانه‌گذاری استفاده شد. داده‌های به‌دست آمده از طیف‌سنجی رامان، نسبت I_D/I_G کمتر و مقدار پهنا در نصف بیشینه پیک G بزرگ‌تری را برای پوشش‌های کربنی ایجادشده با منبع گازی استیلن نشان داد. تصاویر FESEM از مقطع پوشش‌های ایجادشده، نشان‌دهنده بالاتر بودن نرخ رسوب پوشش کربنی با منبع گازی استیلن بود. نتایج حاصل از آزمون نانوسختی‌سنجی نشان داد که پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن (C_2H_2) در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه، از سختی (H) و مدول الاستیک (E) بالاتری برخوردار بود که به‌ترتیب برابر با ۱۸، ۲۰ و ۱۸۸ گیگاپاسکال بود.

اطلاعات مقاله:

دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۲

پذیرش: ۱۳ اسفند ۱۴۰۲

صفحه ۳۵ تا صفحه ۴۵

در دسترس در نشانی:

www.ijcse.ir

زبان نشریه: فارسی

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۳۵۲

شاپا الکترونیکی:

۲۷۸۳-۳۰۰۳

کلیدواژه:

کربن شبه‌الماس، رفتار مکانیکی،

منبع گازی، رسوب‌دهی پرتو یونی.

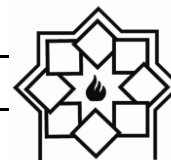
کد DOR: 20.1001.1.23222352.1403.13.1.5.1

۱- مقدمه

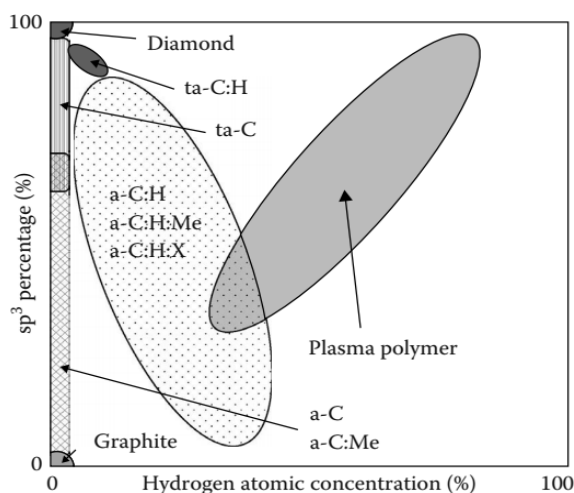
کربن شبه‌الماس (DLC)^۱ یک اصطلاح عمومی است که برای توصیف انواع مختلفی از فیلم‌های کربنی آمورف به کار می‌رود. این فیلم‌ها شامل پوشش‌های کربن شبه‌الماس بدون

هیدروژن (a-C)، کربن آمورف هیدروژنه (a-C:H)، کربن آمورف تتراهدرال (ta-C) و کربن آمورف تتراهدرال هیدروژنه (ta-C:H) هستند [۱-۳]. پوشش‌های کربن شبه‌الماس به دلیل دارا بودن خواص مکانیکی و شیمیایی عالی از جمله

¹ Diamond-like carbon



سختی بالا، اصطکاک کم، مقاومت در برابر سایش، بی‌اثر بودن شیمیایی و پایداری حرارتی، انتخابی جذاب برای کاربردهای مهندسی می‌باشند [۴-۶]. خواص مکانیکی و شیمیایی عالی پوشش‌های DLC برگرفته از ساختار آمورف آن‌ها است که هم پیوند الماس (تتراهدرال هیبریدی sp^3) و هم پیوند گرافیت (تری‌گوناال هیبریدی sp^2) را در ساختار خود دارند [۱]. وجود ویژگی‌های ایده‌آل در پوشش‌های کربن شبه‌الماس باعث به‌کارگیری آن‌ها در اجزاء و قطعات مهندسی در صنایع مختلف از جمله صنایع خودروسازی، صنایع هوافضا و صنعت پزشکی شده است. در شکل ۱ شماتیکی از ساختارهای مختلف کربن آمورف نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره از ساختارهای مختلف کربن آمورف

براساس مقدار پیوند sp^3 و هیدروژن [۱]

پلاسمایی استوار است. در این میان فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی مورد استفاده در این پژوهش از مزایایی همچون انرژی بالای یونی، میزان یونیزاسیون بالا، دمای پایین پوشش‌دهی و ... برخوردار است. این ویژگی‌ها در تشکیل لایه کربن آمورف با مشخصه‌های شبه‌الماسه و تشکیل پیوندهای الماسه (sp^3) تاثیر بسزایی دارد [۹]. در این فرایند، یون‌ها در یک چشمه پلاسمای تولید می‌شوند که در آن بخشی از اتم‌های گاز تحت‌تأثیر میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به یون‌ها و الکترون‌ها تجزیه می‌شوند. یون‌های تولیدشده به کمک یک سامانه استخراج الکتروستاتیک، شامل چند توری فلزی که در فواصل و پتانسیل‌های مشخصی نسبت به هم قرار دارند، از پلاسمای استخراج شده و تحت تأثیر این اختلاف پتانسیل‌ها شتاب گرفته و به‌صورت پرتو یون در می‌آیند [۹، ۱]. جهت اعمال لایه‌های کربن شبه‌الماس هیدروژنه از گازهای هیدروکربنی همانند متان (CH_4)، استیلن (C_2H_2)، اتان (C_2H_6)، بنزن (C_6H_6) و ... استفاده می‌شود [۱]. به دلیل وجود تفاوت در ساختار مولکولی منابع گازی ایجاد پوشش کربن شبه‌الماس، پوشش ایجادشده می‌تواند دارای ساختار (sp^3/sp^2) و خواص متفاوتی باشد [۱۰، ۱]. گزارشات در زمینه تاثیر منبع گازی بر ساختار و خواص پوشش DLC بسیار اندک می‌باشد و یا به روش CVD صورت گرفته است. بنابراین با توجه به نبود یا وجود گزارشات اندک در خصوص تاثیر منبع گازی و زمان لایه‌نشانی بر ساختار و خواص مکانیکی پوشش کربن شبه‌الماس، در این پژوهش به ایجاد و بررسی عملکرد مکانیکی پوشش کربن شبه‌الماس توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با دو منبع گازی متان (CH_4) و استیلن (C_2H_2) با ضخامت متفاوت پرداخته شده است.

پوشش‌های کربن شبه‌الماس توسط فرایندهای مختلفی از جمله رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار (CVD)، قوس کاتدی فیلترشده (FCAD)، کندوپاش، پرتو یون و ... ایجاد می‌شود [۶-۸]. اساس لایه‌نشانی پوشش‌های DLC بر پایه پلاسمای فرایند فیزیکی بمباران یونی لایه در حال رشد توسط گونه‌های



۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش از فولاد AISI 4140 به عنوان زیرلایه استفاده شد. نمونه‌ها توسط سنباده‌های شماره ۸۰ تا ۳۰۰۰ صیقل یافتند و سپس در حمام التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد و بسامد ۴۰ کیلوهرتز در محلول استون شستشو داده شدند. سپس جهت رسوب‌دهی لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با منبع رادیو فرکانس و از دو منبع گازی استیلن (C_2H_2) و متان (CH_4) با خلوص ۹۹/۹۹ درصد استفاده شد. در جدول ۱ مقادیر پارامترهای فرایندی آورده شده است. پس از اعمال پوشش‌های کربن شبه‌الماس، جهت بررسی ساختار و رفتار مکانیکی پوشش‌های کربن شبه‌الماس از آنالیزهای رامان، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی^۱ (FESEM) و آنالیز نانوسختی‌سنجی استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آنالیز رامان

در این بخش به بررسی تغییر پیوندهای sp^3 و sp^2 ، پهنا در نصف بیشینه ارتفاع قله G (FWHM) و مقدار I_D/I_G ، متاثر از تغییرات منبع گازی و زمان لایه‌نشانی پرداخته شده است.

نسبت پیوندهای sp^2/sp^3 می‌تواند خواص پوشش کربن شبه‌الماس از جمله چگالی و سختی را تحت تاثیر قرار دهد [۱۰، ۱۱]. پهنا در نصف بیشینه ارتفاع قله G (FWHM) نیز مربوط به نظم ساختاری پوشش می‌باشد. این پارامتر و موقعیت قله G، بی‌نظمی موجود در ساختار پوشش کربن شبه‌الماس را نشان می‌دهد که ناشی از تغییر زوایا و اعوجاج در طول پیوندها می‌باشد. افزایش موقعیت پیک G همواره به معنی افزایش بی‌نظمی است [۱۰، ۱۱]. طیف حاصل از آنالیز رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی استیلن (C_2H_2) و متان (CH_4) و زمان لایه‌نشانی مختلف در شکل ۲ و ۳ نشان داده شده است.

یک پارامتر مهم در آنالیز رامان، نسبت I_D/I_G می‌باشد. خواص دو پیک D و G برای مشخصه‌یابی پوشش کربنی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در مورد نسبت I_D/I_G باید ذکر شود در پوشش DLC- C_2H_2 مطابق با نمودار شکل ۲ این نسبت برابر با ۰/۵۸ است و اما این مقدار برای پوشش DLC- CH_4 برابر با ۰/۷۵ می‌باشد. این کاهش در مقدار نسبت I_D/I_G نشان‌دهنده‌ی کاهش پیوندهای گرافیتی sp^2 است. این امر نشان می‌دهد که پوشش کربنی ایجادشده با منبع گازی استیلن، از مشخصه‌های شبه‌الماسه بالاتری برخوردار است.

جدول ۱- مقادیر پارامترهای لایه‌نشانی در فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی

انرژی یون (eV)	فاصله زیرلایه تا چشمه یون (cm)	زمان رسوب‌دهی (دقیقه)	نرخ شار گاز منبع (sccm)	نمونه
۱۲۵	۱۰	۶۰	۱۲	DLC- CH_4
۱۲۵	۱۰	۹۰	۱۲	DLC- CH_4
۱۲۵	۱۰	۶۰	۱۲	DLC- C_2H_2
۱۲۵	۱۰	۹۰	۱۲	DLC- C_2H_2

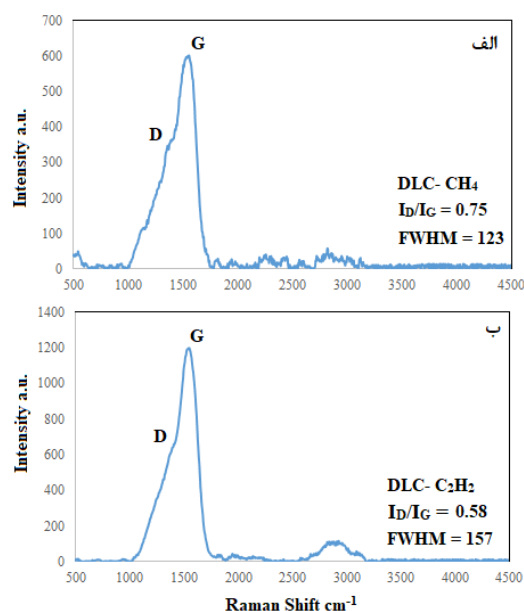
^۱ Field Emission Scanning Electron Microscope



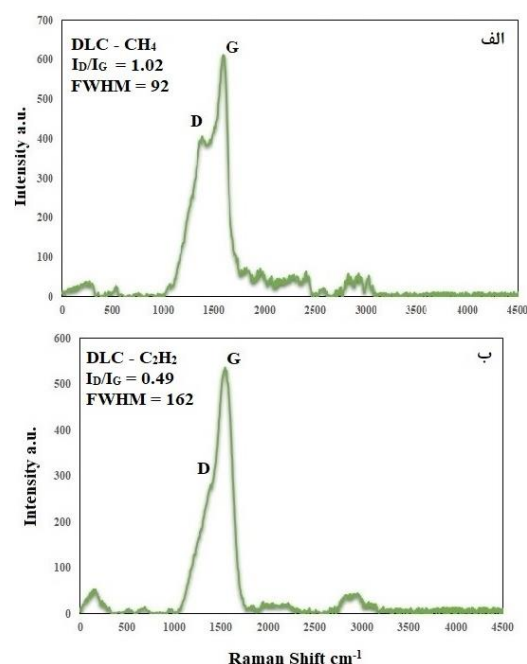
در شکل ۳، در نمودار رامان پوشش DLC-CH₄ موقعیت قله‌ی G برابر با ۱۵۹۰ cm⁻¹ است. اما برای پوشش DLC-C₂H₂ موقعیت قله‌ی G به مقدار ۱۵۵۲ cm⁻¹ می‌رسد که این کاهش نشان‌دهنده‌ی این است که درصد پیوندهای گرافیت موجود در پوشش کم شده است. این کاهش می‌تواند به دلیل تفاوت در ساختار مولکولی منبع گازی و بالتبع تفاوت در میزان یونیزاسیون پلاسما باشد که این امر بر انرژی یون گونه‌های کربنی تاثیرگذار بوده و باعث افزایش تراکم پوشش و افزایش مقدار پیوندهای sp³ در ساختار شده است. بدین ترتیب که یون‌های با انرژی بالا به داخل سطح نفوذ کرده و به یک موقعیت زیر سطحی وارد می‌شوند. این امر باعث افزایش چگالی موضعی می‌شود. سپس پیوند موضعی حول آن یون‌ها، بر طبق چگالی جدید اصلاح خواهد شد [۱، ۲].

مطابق تحقیق وی دای مشخص است که در شرایط بمباران یونی با انرژی بالا که در زمان رشد لایه وجود دارد، هیبریداسیون‌های اتمی به سادگی برای تغییر در چگالی موضعی تنظیم می‌شوند به‌طوری که اگر چگالی کم باشد، بیش‌تر به حالت sp² تبدیل شده و اگر چگالی زیاد باشد به حالت sp³ تبدیل می‌شوند [۱۲].

پارامتر مهم دیگر حاصل از نتایج رامان، نسبت I_D/I_G می‌باشد. برای مثال نسبت این دو پیک (I_D/I_G) رابطه‌ی مستقیمی با مقدار نسبت sp²/sp³ دارد [۱]. به این معنی که اگر نسبت I_D/I_G کاهش یابد، مقدار پیوندهای sp² نیز کاهش می‌یابد. در مورد نسبت I_D/I_G باید ذکر شود در پوشش DLC-C₂H₂ مطابق با نمودار شکل ۳ این نسبت برابر با ۰/۴۹ است و اما این مقدار برای پوشش DLC-CH₄ برابر با ۱/۰۲ می‌باشد. این کاهش در مقدار نسبت I_D/I_G نشان‌دهنده‌ی کاهش پیوندهای گرافیت



شکل ۲- نمودار حاصل از آنالیز رامان برای پوشش کربن شبه‌الماس با منابع گازی الف) متان (CH₄) و ب) استیلن (C₂H₂) در مدت زمان لایه‌نشانی ۶۰ دقیقه

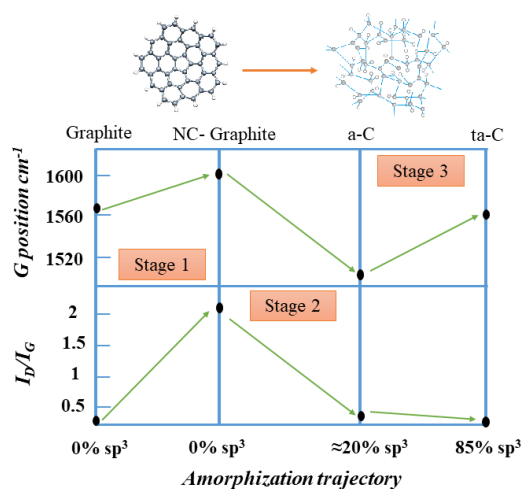


شکل ۳- نمودار حاصل از آنالیز رامان برای پوشش کربن شبه‌الماس با منابع گازی الف) متان (CH₄) و ب) استیلن (C₂H₂) در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه



نشانی ۶۰ دقیقه، به ترتیب برابر با 157 cm^{-1} و 123 cm^{-1} است. مقدار داده‌های FWHM مربوط به پوشش‌های DLC-C₂H₂ و DLC-CH₄ در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه، به ترتیب برابر با 162 cm^{-1} و 92 cm^{-1} است. مشاهده می‌شود که مقدار پارامتر FWHM برای پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن در هر دو زمان لایه‌نشانی، دارای اندازه بیش‌تری می‌باشد. این عددها از مقدار پهنا در نصف بیشینه G، نشانگر بالا بودن پیوندهای sp³ و بی‌نظمی ساختاری بیش‌تر در پوشش DLC-C₂H₂ است.

تشکیل ساختار کربن شبه‌الماس را می‌توان با مدل سه‌مرحله‌ای پیشنهادشده توسط فراری توضیح داد [۳-۱]. در شکل ۴، مدل سه‌مرحله‌ای از روند تغییرات ساختاری گرافیت به کربن شبه‌الماس به صورت طرحواره نشان داده شده است.



شکل ۴- مدل سه‌مرحله‌ای از روند تغییرات ساختاری گرافیت به کربن آمورف

براساس نظر محققینی مانند روبرتسون و با توجه به تعریف قله‌های D و G در طیف رامان، با کاهش نسبت I_D/I_G تعداد

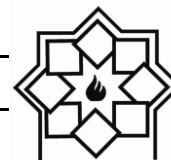
sp² است. این امر نشان می‌دهد که پوشش کربن شبه‌الماس اعمال‌شده با منبع گازی استیلن، دارای ویژگی‌های شبه‌الماسه بیش‌تری می‌باشد. پایین بودن نسبت I_D/I_G نشان از وجود گروه‌های زنجیره‌ای زیاد است که این پدیده همراه با افزایش مقدار پیوندهای sp³ است. در هر دو زمان لایه‌نشانی ۶۰ و ۹۰ دقیقه، مشاهده می‌شود که پوشش کربنی ایجادشده با منبع گازی استیلن، از ویژگی‌های ساختاری برتری برخوردار است.

با دستیابی به مقدار نسبت I_D/I_G از آنالیز رامان، می‌توان برای محاسبه اندازه خوشه‌های گرافیتی sp² در لایه‌های DLC از رابطه زیراستفاده کرد [۳-۱]:

$$I_D/I_G = C(\lambda)L^2$$

در این رابطه L اندازه خوشه‌های گرافیتی و C(λ) یک عدد ثابت بوده که به طول موج لیزر وابسته است و مقدار آن برابر ۰/۰۰۵۵ در نظر گرفته می‌شود [۳-۱]. اندازه خوشه‌های گرافیتی در پوشش‌های DLC-CH₄ و DLC-C₂H₂ در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه، محاسبه شده است که اندازه‌ی آن به ترتیب برابر ۹ و ۱۳ آنگستروم است. بنابراین اندازه خوشه‌های گرافیتی در پوشش DLC-C₂H₂ دارای اندازه کم‌تری بوده و این پوشش از مشخصه‌های شبه‌الماسه بالاتری برخوردار است.

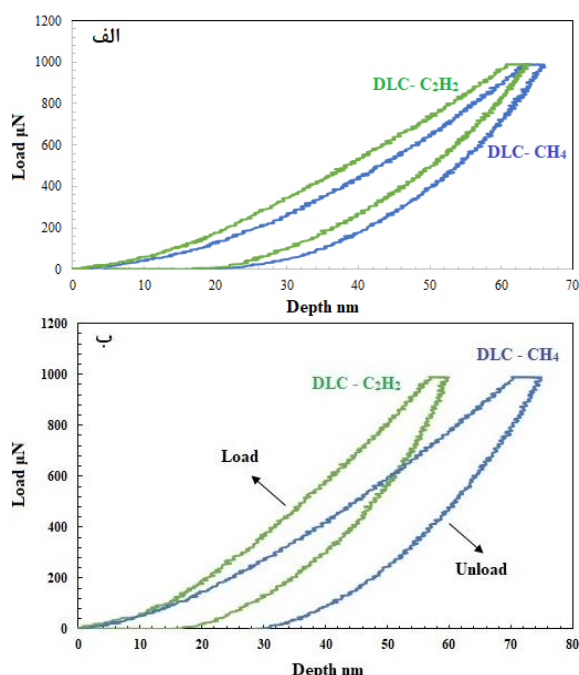
پارامتر مهم دیگر در طیف رامان، پهنا در نصف بیشینه‌ی قله‌ی G می‌باشد (FWHM) که به نظم ساختاری ناشی از زاویه و طول پیوند وابسته است. کاهش پهنا در نصف بیشینه‌ی پیک G نشانه‌ی کاهش درجه‌ی آمورف شدن و افزایش نظم لایه‌ها است. مقدار داده‌های FWHM مربوط به پوشش‌های DLC-CH₄ و DLC-C₂H₂ در مدت زمان لایه



جدول ۲- مقادیر H/E و E/H حاصل از آنالیز

نانوسختی‌سنجی

sample	H/GPa	E/GPa	H/E
DLC-C ₂ H ₂ (60 min)	۱۸/۵	۱۶۳	۰/۱۱۳
DLC-C ₂ H ₂ (90 min)	۲۰/۱۸	۱۸۸	۰/۱۰۷
DLC-CH ₄ (60 min)	۱۵/۶	۱۶۸	۰/۰۹۲
DLC-CH ₄ (90 min)	۱۲/۵	۱۲۸	۰/۰۹۷



شکل ۵- نمودار نیرو بر حسب جابه‌جایی برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده با منابع گازی استیلن (C₂H₂) و متان (CH₄) در مدت زمان لایه‌نشانی الف) ۶۰ دقیقه و ب) ۹۰ دقیقه

مقادیر سختی به‌دست آمده برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس حاصل از منابع گازی استیلن و متان در مدت زمان لایه‌نشانی ۶۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۱۸/۵ و ۱۵/۶ گیگاپاسکال می‌باشد. همچنین مقادیر سختی به‌دست آمده برای پوشش‌های

حلقه‌ها در هر خوشه کاهش می‌یابد. افزایش بی‌نظمی در ساختار کربن از ساختار گرافیت خالص به کربن آمورف تتراهدراال قابل تقسیم به سه مرحله می‌باشد (علامت فلش جهت تغییرات ساختاری با تغییر درصد پیوندهای sp² را نشان می‌دهد). در مرحله اول، ساختار کاملاً گرافیتی به سمت گرافیت نانوساختار حرکت می‌کند. در مرحله دوم، گرافیت نانوساختار به سمت کربن آمورف (a-C) با درصد بالای sp² رفته و در مرحله سوم، کربن آمورف با درصد بالای پیوندهای sp² به سمت کربن آمورف با درصد بالای sp³ حرکت می‌کند [۱-۳، ۱۰].

۳-۲- نتایج آزمون نانوسختی‌سنجی

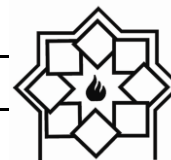
در این پژوهش جهت بررسی تاثیر منابع گازی متان (CH₄) و استیلن (C₂H₂) و زمان لایه‌نشانی بر خواص مکانیکی (سختی و مدول الاستیک) پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فرایند پرتو یونی از آنالیز نانوسختی‌سنجی (نانودندانه‌گذاری)^۱ استفاده گردید. نتایج حاصل از آزمون نانوسختی‌سنجی در شکل ۵ و جدول ۲ آورده شده است. از منحنی‌های بار-جابجایی حاصل از آنالیز نانوسختی‌سنجی نیز برای تعیین خواص مکانیکی از جمله سختی (H)، مدول الاستیک (E) و پارامتر ضریب پلاستیک (H/E) استفاده می‌شود [۱۳]. با توجه به نمودارها و نتایج حاصل از آنالیز نانوسختی‌سنجی، مشاهده می‌شود که پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن (C₂H₂)، در هر دو زمان لایه‌نشانی، از سختی و مدول الاستیک بالاتری برخوردار است.

¹ Nano-indentation



کربن شبه‌الماس حاصل از منابع گازی استیلن و متان در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه به ترتیب برابر با ۱۸، ۲۰ و ۱۲/۵ گیگاپاسکال می‌باشد. مقادیر کمتر H و E برای پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی متان (CH_4) در هر دو زمان لایه‌نشانی مربوط به بالاتر بودن مقدار I_D/I_G است که به افزایش غلظت پیوند کربن هیبریدشده sp^2 و کاهش sp^3/sp^2 نسبت داده می‌شود. کمیت سختی، یکی از مهم‌ترین مشخصه‌های مکانیکی یک سطح است که مقاومت ماده در برابر تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد [۱۳-۱۵]. سختی (H) و مدول الاستیک (E) در پوشش‌های کربن شبه‌الماس به شدت به ریزساختار و پیوندهای sp^3 وابسته است. در واقع افزایش پیوندهای sp^3 در پوشش کربنی، سختی و مدول الاستیک پوشش را افزایش می‌دهد [۱۳-۱۴]. با توجه به نتایج حاصل از آنالیز رامان مشاهده شد که پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی استیلن (C_2H_2)، از مشخصه‌های شبه‌الماسه بالاتری برخوردار بوده و دارای پیوندهای sp^3 بیش‌تری نسبت به پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با منبع گازی متان (CH_4) در ساختار خود است. این امر توسط آنالیز نانوسختی‌سنجی نیز تایید شده است. لذا مطابق با نمودارهای به‌دست آمده از آنالیز نانوسختی‌سنجی مشاهده می‌شود که عمق نفوذ فرورونده به پوشش $\text{DLC-C}_2\text{H}_2$ نسبت به پوشش DLC-CH_4 کمتر می‌باشد که این امر نشان از بالاتر بودن سختی پوشش $\text{DLC-C}_2\text{H}_2$ در هر دو زمان لایه‌نشانی است. مقادیر مدول الاستیک (E) حاصل نیز از روند مشابهی همانند سختی، پیروی می‌کنند. قابل ذکر است که ترکیب منبع گازی (پیش‌ماده هیدروکربنی) نه تنها بر ترکیب و کیفیت پلاسم، بلکه بر ساختار و خواص پوشش نیز

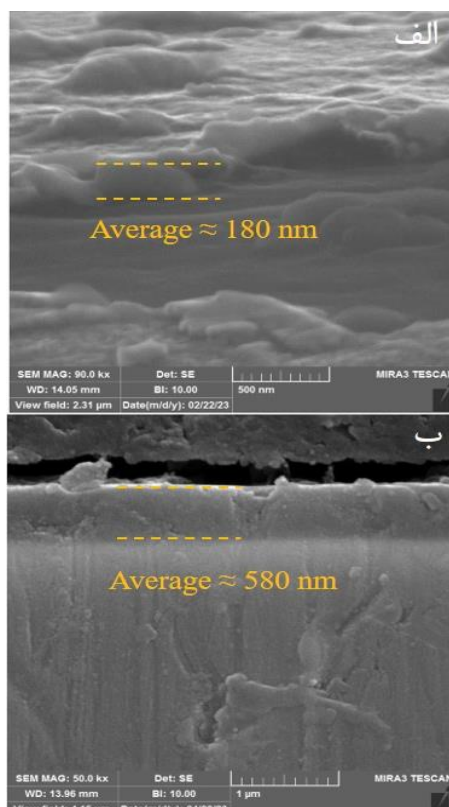
تأثیر می‌گذارد. مشخصه‌هایی مانند سختی، تنش پسماند، چگالی، کسر اتم‌های کربن با پیوند sp^3 و ... با تغییر منبع گازی دچار تغییر می‌شوند [۱]. علاوه بر H و E، در آنالیز نانوسختی‌سنجی، مقاومت پوشش در برابر سایش نیز پارامتر بسیار مهمی برای تعیین کیفیت فیلم‌ها است. یکی دیگر از داده‌های قابل استخراج از آنالیز نانوسختی‌سنجی، کمیت ضریب پلاستیک می‌باشد. پارامتر مقاومت پلاستیک (H/E) نه تنها خواص الاستیک-پلاستیک را توضیح می‌دهد، بلکه اطلاعاتی در مورد مقاومت به سایش ماده نیز ارائه می‌کند. نسبت H/E پاسخ فیزیکی شبکه اتمی را به نیروی خارجی نشان می‌دهد و به استحکام شکست بالک مربوط می‌شود. دامنه‌ی اعتبار H/E برای پوشش‌های DLC در محدوده‌ی ۰ تا ۰/۱ متغیر است. حد بالایی و پایینی به ترتیب رفتار الاستیک و الاستیک-پلاستیک فیلم‌ها را نشان می‌دهند. همچنین برای پوشش‌های با مقاومت به سایش بالا، H/E باید عدد بالایی باشد [۱۳]. بنابراین، فیلم‌های DLC که H/E بالا را نشان می‌دهند، مقاومت در برابر سایش بالایی نیز دارند. مشاهده می‌شود که مقدار H/E برای پوشش کربنی ایجادشده با منبع گازی متان، مقادیر کم‌تری دارند. مقدار H/E کم‌تر در پوشش DLC-CH_4 نشانگر این است که کسر بیش‌تری از کار در تغییر شکل پلاستیک (کرنش پلاستیک) هنگام تماس با یک ماده اعمال می‌شود. حداکثر مقدار $H/E \sim 0/1$ در پوشش $\text{DLC-C}_2\text{H}_2$ مربوط به تغییر شکل پلاستیک کم‌تر، مقاومت به سایش بیش‌تر و در نتیجه بالا بودن خواص شبه‌الماسه آن است. لازم به ذکر است که الماس با 100 GPa H- و 1000 GPa E- مقدار $H/E \sim 0/1$ را نشان می‌دهد. بنابراین، در بین پوشش‌های DLC-CH_4 و $\text{DLC-C}_2\text{H}_2$ ، پوشش کربنی



DLC-C₂H₂ نه‌تنها برای کاربردهای مستلزم سختی زیاد بلکه برای کاربردهای پوشش با مقاومت سایشی بالا مناسب‌تر می‌باشد.

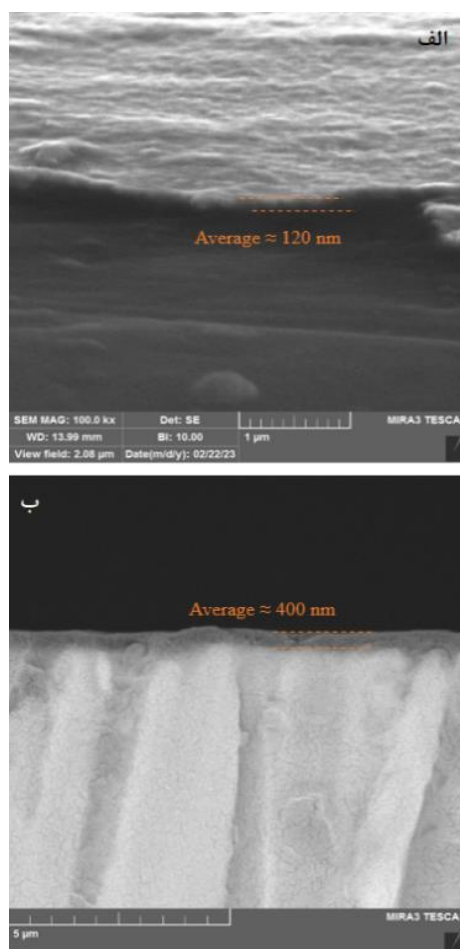
۳-۳- نتایج آنالیز FESEM

جهت بررسی ضخامت و نرخ رسوب پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با دو منبع گازی متان (CH₄) و استیلن (C₂H₂)، از میکروسکوپ FESEM استفاده شده است و نتایج آن در شکل ۶ و ۷ آورده شده است.



شکل ۷- تصاویر مقطع عرضی FESEM برای پوشش کربن شبه‌الماس با منابع گازی الف) متان (CH₄) و ب) استیلن (C₂H₂) در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه

با توجه به تصاویر مقطع عرضی، مشاهده می‌شود که ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط منابع گازی استیلن (C₂H₂) و متان (CH₄)، با هم متفاوت است. در مدت زمان لایه‌نشانی ۶۰ دقیقه، ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی استیلن (C₂H₂)، در حدود ۴۰۰ نانومتر و ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی متان (CH₄)، در حدود ۱۲۰ نانومتر است. همچنین در مدت زمان لایه‌نشانی ۹۰ دقیقه، ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی استیلن (C₂H₂)، در حدود ۵۸۰ نانومتر و ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی متان (CH₄)، در حدود ۱۸۰ نانومتر است. این امر نشان می‌دهد که نرخ رسوب پوشش کربنی با تغییر



شکل ۶- تصاویر مقطع عرضی FESEM برای پوشش کربن شبه‌الماس با منابع گازی الف) متان (CH₄) و ب) استیلن (C₂H₂) در مدت زمان لایه‌نشانی ۶۰ دقیقه



شد که پوشش کربن شبه‌الماس ایجاد شده با منبع گازی استیلن (C_2H_2)، از سختی و مدول الاستیک بالاتری برخوردار بود. مقدار سختی به‌دست آمده برای پوشش کربن شبه‌الماس حاصل از منبع گازی استیلن در مدت زمان ۹۰ دقیقه لایه‌نشانی برابر با ۲۰/۱۸ گیگاپاسکال بود. ۳- با توجه به تصاویر FESEM، مشاهده شد که ضخامت پوشش کربنی حاصل از منبع گازی استیلن (C_2H_2)، در مدت زمان ۹۰ دقیقه لایه‌نشانی در حدود ۵۸۰ نانومتر بود.

مراجع

- [1]. C. Donnet and A. Erdemir, "Tribology of diamond-like carbon films: fundamentals and applications", Advanced Materials Research, (2007), 1-147.
- [2]. J. Robertson, "Diamond-like amorphous carbon", Materials and Science Engineering: R: Reports, (2002) 129-281.
- [3]. Y. Lifshitz, "Diamond-like carbon-present status", Diamond and Related Materials, 8 (1999) 1659-1676.
- [4]. P. Wongpanya, P. Silawong, P. Photongkam, "Nanomechanical properties and thermal stability of Al-N-co-doped DLC films prepared by filtered cathodic vacuum arc deposition", Surface & Coatings Technology 424 (2021) 127655.
- [5]. R. Hauert, K. Thorwarth, G. Thorwarth, "An overview on diamond-like carbon coatings in medical applications", Surface & Coatings Technology, 233 (2013) 119-130.
- [6]. T. F. Zhang, Z. X. Wan, J. C. Ding, S. Zhang, Q. M. Wang, K. H. Kim, "Microstructure and high-temperature tribological properties of Si-doped hydrogenated diamond-like carbon films", Applied Surface Science, 435 (2018) 963-973.
- [7]. G. Gotzmann, J. Beckmann, C. Wetzel, B. Schol, U. Herrmann, J. Neunzehn, "Electron-beam modification of DLC

در منبع گازی دچار تغییر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که پوشش $DLC-CH_4$ در هر دو زمان لایه‌نشانی، نسبت به پوشش $DLC-C_2H_2$ از چسبندگی کم‌تری به زیرلایه برخوردار است. تصاویر حاصل از آنالیز FESEM، نشان از این دارد که نرخ رسوب پوشش کربنی توسط منبع گازی استیلن بسیار بالاتر از نرخ رسوب پوشش کربنی توسط منبع گازی متان است. این امر نشان می‌دهد که ترکیب (شیمی) منبع گازی هیدروکربنی بر نرخ و میزان رسوب‌گذاری تأثیر زیادی دارد. علت این رفتار، تفاوت در پتانسیل یونیزاسیون استیلن (C_2H_2) و متان (CH_4) است که این امر ناشی از وجود مولکول‌های غیراشباع در استیلن است [۱]. در واقع در اثر میزان یونیزاسیون بالا، تغذیه گونه‌های کربنی به سطح ماده افزایش می‌یابد و این امر در افزایش میزان رسوب و ضخامت پوشش حاصله موثر می‌باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی ساختار و رفتار مکانیکی پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجاد شده توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با دو منبع گازی استیلن (C_2H_2) و متان (CH_4) پرداخته شد. نتایج کلی پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:

۱- نتایج آنالیز رامان حاصل از پوشش‌های کربنی، دو پیک G و D را نشان داد که بیانگر تشکیل کربن شبه‌الماس بود. کم‌ترین مقدار I_D/I_G در پوشش کربن شبه‌الماس در پوشش $DLC-C_2H_2$ در مدت زمان ۹۰ دقیقه لایه‌نشانی مشاهده شد. همچنین مقدار $FWHM (G)$ برای پوشش $DLC-C_2H_2$ برابر با 162 cm^{-1} بود که مقدار آن نسبت به پوشش $DLC-CH_4$ بیش‌تر بود.

۲- با توجه به نتایج حاصل از آنالیز نانوسختی‌سنجی، مشاهده



- coatings for biomedical applications”, Surface & Coatings Technology, 311 (2017) 248-256
- [8]. G.F. Huang a, Zhou Lingping b, Huang Weiqing a, Zhao Lihua a, Li Shaolu b, Li Deyi, “The mechanical performance and anti-corrosion behavior of diamond-like carbon film”, Diamond and Related Materials, 12 (2003) 1406-1410.
- [9]. S. Aisenberg, R. Chabot. “Ion-beam deposition of thin films of diamond like carbon”, Journal of applied physics, (1971) 2953-2958.
- [10]. J. Robertson, “Diamond-like amorphous carbon”, Materials and Science Engineering: R: Reports, (2002) 129–281.
- [11]. J. Robertson, “The deposition mechanism of diamond-like a-C and a-C: H”, Diamond Related Material, 3 (1994) 361-368.
- [12]. W. Dai, H. Zheng, G. Wu, A. Wang. “Effect of bias voltage on growth property of Cr-DLC film prepared by linear ion beam deposition technique”, Vacuum 85 (2010) 231-235.
- [13]. N. Dwivedi, S. Kumar, H. K. Malik, “Nanoindentation measurements on modified diamond-like carbon thin films”, Applied Surface Science, 257 (2011) 9953–9959.
- [14]. N.A. Marks, “Thin film deposition of tetrahedral amorphous carbon: a molecular dynamics study”, Diamond and Related Materials, 8 (2005) 1223-1231.
- [15]. T. Haiping, R. Luming, Z. Pengjiao, “Optimization of structure and properties of hydrogen-containing DLC films by pulse auxiliary anode duty ratio”, Diamond and Related Materials, (2024), 111337.

Investigation of the structure and Properties of Diamond-Like Carbon Thin Film Formed on AISI 4140 Steel by Ion Beam Deposition

Saeid Mersagh Dezfuli, Seyed Hojatollah Hosseini*

¹ Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

* nnshosseini@mut.ac.ir

Abstract: Diamond-like carbon coatings are widely used to improve the surface properties of alloys due to their excellent mechanical and tribological properties. In this study, diamond-like carbon coatings were created on 4140 steel alloy by ion beam deposition process with two gas sources, methane (CH_4) and acetylene (C_2H_2) with different deposition times. Next, Raman and field emission electron microscopy (FESEM) tests were used to evaluate the structure of the diamond-like carbon coatings. Nano-indentation analysis was also used to investigate the mechanical behavior of the applied coatings. Raman spectroscopy data showed a lower I_D/I_G ratio and a larger width at half maximum of the G peak for carbon coatings formed with an acetylene gas source. FESEM images of the cross-sections of the created coatings showed a higher deposition rate of the carbon coating with an acetylene gas source. The results of the nanohardness test showed that the diamond-like carbon coating created with the acetylene gas source (C_2H_2) during the deposition time of 90 minutes had a higher hardness (H) and elastic modulus (E), which were respectively equal to with 20.18 and 188 GPa.

Keywords: Diamond like carbon, Mechanical behavior, Gas sources, Ion beam deposition.