Journal of Advanced Materials and Technologies

Journal Homepage: www.jamt.ir

Materials and Energy Research Center
MERC

Original Research Article - Extended Abstract

Effect of Ti and Cr interlayer on properties of diamond-like carbon coating formed by physical vapor deposition

Saeid Mersagh Dezfuli [1], **Seyed Hojatollah Hosseini** [2*]

[1] *PhD, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Tehran, Iran.*
[2] *Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Tehran, Iran.*

*Corresponding Author's Email: nnshosseini@mut.ac.ir (S. H. Hosseini)

Paper History:
Received: 2026-07-02
Revised: 2026-08-29
Accepted: 2026-10-27

Keywords:
Ion Beam Deposition,
Interlayers of Ti and Cr,
Mechanical Properties,
Sp3 Bond,
Diamond-Like Carbon

Abstract In the present study, diamond-like carbon thin films were formed by ion beam deposition using titanium (Ti) and chromium (Cr) interlayers. The effect of the interlayers on the structural and mechanical properties of the diamond-like carbon thin films was studied. Raman spectroscopy analysis was used to investigate the structural changes of the formed carbon coatings. Field emission scanning electron microscopy (FESEM) and atomic force microscopy (AFM) were used to examine the thickness and surface roughness of the layers. The mechanical properties of the diamond-like carbon coatings were investigated by nanoindentation testing. The results of Raman analysis showed that the diamond-like carbon coating formed with a Ti interlayer had a lower ID/IG ratio and more sp3 diamond bonds than the diamond-like carbon monolayer coating and the carbon coating with a Cr interlayer. The results of the nanoindentation test for the carbon coatings showed that the inclusion of Ti and Cr interlayers led to an increase in the hardness of the diamond-like carbon coating. Also, according to the results, the Ti/DLC coating had higher hardness and plastic strength (H/E) than the Cr/DLC coating.

https://doi.org/10.30501/jamt.2026.589434.1368 URL: https://www.jamt.ir/article_256259.html

1. INTRODUCTION

Carbon has different forms due to differences in the types of bonds and atomic arrangements in its structure. The existence of different forms of carbon is determined by the arrangement of atoms in the structure and the type of bonding between them [Robertson, 2002]. Carbon films possess outstanding properties such as high hardness, a low friction coefficient, and high wear resistance. A major obstacle to the development of industrial applications of DLC films is the high level of compressive stress. This leads to delamination and peeling due to poor adhesion of the carbon films to the substrate. The presence of excessive residual stresses and poor adhesion of these coatings to the substrate limits their application. One of the main causes of residual stress is the mismatch between the properties of the film and the substrate [Bewilogua & Hofmann, 2014]. One solution to reduce residual stress and improve properties is the use of interlayers. Interlayers reduce the difference in properties between the substrate and the top coating and enhance interfacial interactions, in which metal or ceramic layers are used to increase adhesion strength [Huang, 2018]. Improved adhesion reduces the compressive stress of the DLC film and increases its load-bearing capacity. Multilayer films increase adhesion strength due to the deflection or closure of transverse cracks at the interfaces between layers and the increase in stiffness by preventing the movement of dislocations across these interfaces [Huang, 2018]. Meanwhile, titanium (Ti) and chromium (Cr) have highly occupied d orbitals, which promote carbon diffusion and the formation of carbide phases at the interface between the carbon coating and the interlayer, thereby increasing the adhesion of carbon layers to the substrate [Huang, 2018]. Therefore, in the present research, the effect of Ti and Cr interlayers on the structural and mechanical changes of the carbon coating produced by ion beam deposition was investigated.

2. MATERIALS AND METHODS

In this study, the cathodic arc deposition (CAD) process was used to create the Ti and Cr interlayers. In the cathodic arc deposition chamber, titanium and chromium cathodes were placed at the bottom of the chamber, and an electric arc was generated between the cathode and the chamber body under vacuum conditions. The arc on the cathode formed a molten pool, which vaporized titanium and chromium and transported them to the substrate. These particles, separated from the cathode, formed a coating on the surface of the substrate. To deposit thin DLC layers, ion beam deposition was employed using acetylene (C_2H_2) gas with a purity of 99.99% as the source gas.

3. RESULTS AND DISCUSSION

In this section, the effect of using Ti and Cr interlayers on the structural changes of the DLC film is discussed. The results of Raman spectroscopy for DLC, Ti/DLC, and Cr/DLC films produced by ion beam deposition are shown in Figure 1.

The properties of the two peaks, D and G, can be used to characterize carbon coatings. For example, the ID/IG ratio is directly related to the sp2/sp3 bond ratio [Robertson, 2002]. In Raman analysis, the full width at half maximum (FWHM) of the G peak is also related to

Please cite this article as: Mersagh Dezfuli, S. & Hosseini, S. H. (2026). Effect of Ti and Cr interlayer on properties of diamond-like carbon coating formed by physical vapor deposition, *Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT)*, Vol. 15, No. 3, 17-27. https://doi.org/10.30501/jamt.2026.589434.1368.

2783-0829/© 2026 The Author(s). Published by MERC.
This is an open access article under the CC BY license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode).

the structural order of the film. This parameter, along with the position of the G peak, indicates the degree of disorder in the structure of the DLC film, which is caused by changes in bond angles and distortions along the bonds [Huang, 2018]. According to the results of Raman analysis, it is observed that the structural characteristics of the DLC film changed with the use of the interlayer. However, the results obtained for all three coatings are favorable. Regarding the ID/IG ratio, it should be noted that in the Ti/DLC coating, according to Figure 1b, this ratio is equal to 0.48, which is lower than that of the diamond-like carbon coating without an interlayer and the Cr/DLC film.

According to the results, the DLC film with a Cr interlayer exhibited an increased ID/IG ratio of 0.54. Based on the obtained data, the DLC film with a Ti interlayer has the lowest ID/IG ratio among the three films.

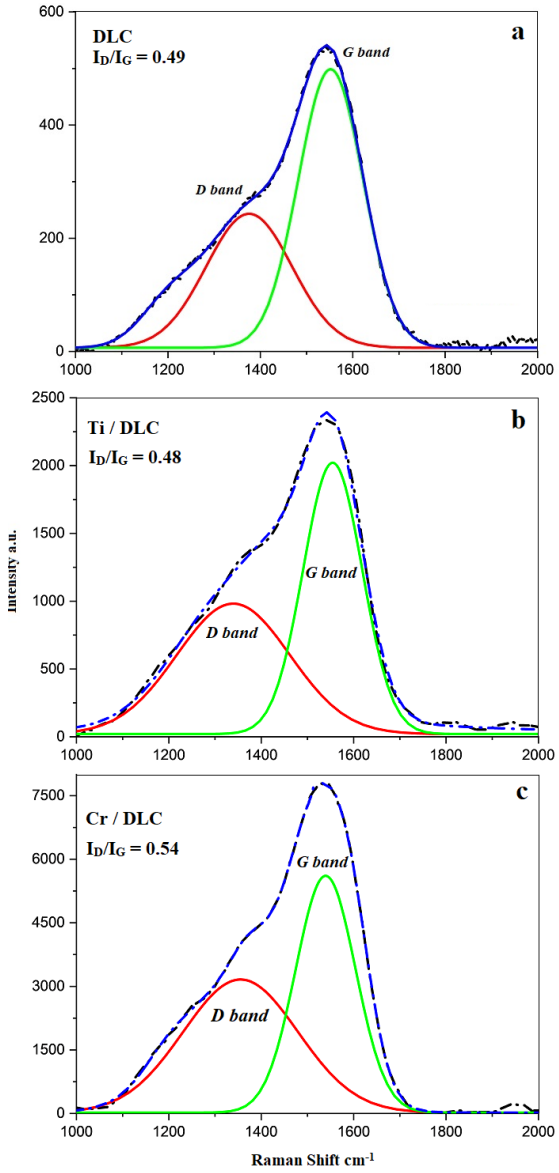


Figure 1. Fitted diagram of Raman analysis for diamond-like carbon coatings: a) DLC b) Ti/DLC c) Cr/DLC.

4. CONCLUSION

In this study, Ti and Cr interlayers were used to improve the structural properties of the DLC film. According to the results of Raman analysis, it was observed that the presence of the interlayer improved the structure and reduced the ID/IG ratio in the DLC film. This is consistent with the increase in sp3 diamond bonds in the structure.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to express their gratitude and appreciation to the officials of the Vacuum Lab at Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

REFERENCES

1. Bewilogua, K., Hofmann, Di., “History of diamond-like carbon films-From first experiments to worldwide applications”, Surface and Coatings Technology, Vol. 242, (2014), 214-225. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.031

2. Huang L., Yuan J., Li Ch., Hong D., “Microstructure, tribological and cutting performance of Ti-DLC/α-C:H multilayer film on cemented carbide”, Surface and Coatings Technology 353 (2018) 163-170. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109320

3. Robertson, J., “Diamond-like amorphous carbon”, Materials Science and Engineering: R: Reports, Vol. 37, No 4-6, (2002), 129-281. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0

فصلنامه مواد و فناوری‌های پیشرفته

Journal Homepage: www.jamt.ir

مقاله‌ی کامل پژوهشی

بررسی تأثیر لایه‌ی میانی Ti و Cr بر خواص پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط رسوب‌دهی فیزیکی از فاز بخار

سعید مرساق دزفولی[۱]، سید حجت‌اله حسینی[۲*]

[۱] دکتری، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

[۲] دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، تهران، ایران

تاریخچه‌ی مقاله:

ثبت اولیه: ۱۴۰۵/۰۴/۱۱

بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۷

پذیرش قطعی: ۱۴۰۵/۰۸/۰۵

کلیدواژه‌ها:

رسوب‌دهی پرتو یونی،

لایه‌ی میانی Ti و Cr،

پیوند sp^3،

کربن شبه‌الماس،

خواص مکانیکی

چکیده در این پژوهش، لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با به‌کارگیری لایه‌های میانی تیتانیم (Ti) و کروم (Cr) ایجاد شد. سپس، تأثیر لایه‌های میانی بر مشخصه‌های ساختاری و مکانیکی لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس مطالعه و بررسی شود. به‌منظور بررسی تحولات ساختاری پوشش‌های کربنی ایجادشده از آنالیز طیف‌سنجی رامان استفاده شد. برای بررسی ضخامت و زبری سطح لایه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM) و میکروسکوپ نیروی اتمی (AFM) استفاده شد. همچنین، خواص مکانیکی پوشش‌های کربن شبه‌الماس توسط آزمون نانودندانه‌گذاری بررسی شد. نتایج حاصل از آنالیز رامان نشان داد که پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده با لایه‌ی میانی Ti، در مقایسه با پوشش تک‌لایه‌ی کربنی و پوشش کربنی با لایه‌ی میانی Cr، نسبت I_D/I_G کمتر و پیوندهای الماسه‌ی sp^3 بیشتری داشت. نتایج حاصل از آزمون نانودندانه‌گذاری برای پوشش‌های کربنی نشان داد که به‌کارگیری لایه‌های میانی Ti و Cr به افزایش سختی در پوشش کربن شبه‌الماس منجر شد. همچنین، مطابق با نتایج، پوشش Ti/DLC در مقایسه با پوشش Cr/DLC دارای سختی و مقاومت پلاستیک (H/E) بالاتری بود.

https://doi.org/10.30501/jamt.2026.589434.1368 URL: https://www.jamt.ir/article_256259.html

۱- مقدمه

کربن دارای شکل‌ها و آلوتروپ‌های گوناگونی مانند گرافیت، الماس و حالت آمورف است. آنچه سبب شده تا کربن دارای شکل‌های متفاوتی باشد نحوه‌ی آرایش اتمی در ساختار و نوع پیوند میان اتم‌های آن است. یکی از ساختارهای کربن آمورف، که حاوی درصد بالایی از پیوندهای نیمه‌پایدار sp^3 است، کربن شبه‌الماس (DLC)[۱] نام دارد (Robertson, 2002). خانواده‌ی پوشش‌های کربن شبه‌الماس به دلیل داشتن مشخصه‌های مکانیکی و تریبولوژیکی مطلوب ازجمله سختی بالا، خنثی بودن از لحاظ شیمیایی، مقاومت به سایش عالی و ضریب اصطکاک پایین مورد توجه هستند. در شکل ۱، طرح‌واره‌ی ساختارهای گوناگون کربن و کربن آمورف به‌صورت نموداری سه‌تایی نمایش داده شده است. این نمودار براساس سه پارامترِ پیوند sp^3، پیوند sp^2 و هیدروژن تعریف شده است (Robertson, 2002). مانع اساسی، در توسعه‌ی کاربردهای صنعتی پوشش‌های DLC، سطح بالای تنش‌های فشاری است. این امر به پدیده‌ی لایه‌ای شدن و پوسته‌ای شدن ناشی از چسبندگی ضعیف به زیرلایه در پوشش‌های کربنی منجر می‌شود. وجود تنش پسماند بیش از حد و چسبندگی ضعیف این پوشش‌ها به زیرلایه کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. یکی از علل اصلی ایجاد تنش‌های پسماند عدم‌انطباق بین خواص

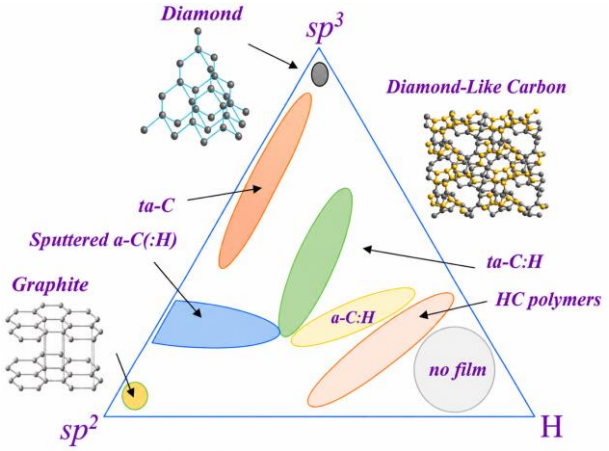
1. Diamond-Like Carbon

عهده‌دار مکاتبات: سید حجت‌اله حسینی

نشانی: *ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده مهندسی مواد*

پیام‌نگار: nnshosseini@mut.ac.ir

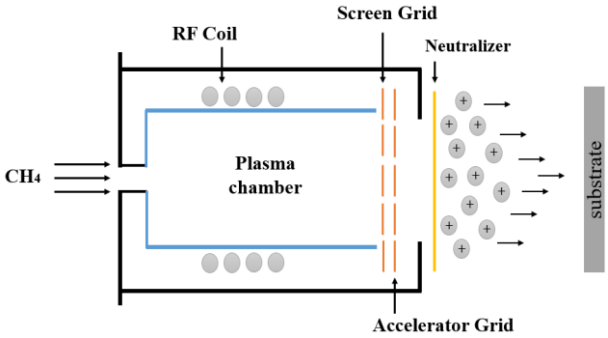
پوشش و زیرلایه است (Robertson, 2002; Bewilogua & Hofmann, 2014; Marks, 2005). در بیشتر موارد، اختلاف در ضریب انبساط حرارتی زیرلایه و پوشش تأثیر زیادی بر ماهیت و مقدار تنش پسماند دارد. همچنین، تفاوت در خواص شیمیایی و مکانیکی پوشش و زیرلایه به ایجاد تنش‌های پسماند ذاتی در پوشش می‌شود (Gotzmann et al., 2017; Wänstrand et al., 1999).



شکل ۱. طرح‌واره‌ی نمودار سه‌تایی ساختارهای گوناگون کربن آمورف (Robertson, 2002)

یکی از راهکارهای کاهش تنش‌های پسماند و بهبود خواص استفاده از لایه‌های میانی است. لایه‌های میانی اختلاف خواص را بین زیرلایه و پوشش فوقانی کاهش و تعامل و برهم‌کنش بین‌لایه‌ای را افزایش می‌دهند که در آن از لایه‌های فلزی یا سرامیکی استفاده می‌شود تا استحکام چسبندگی را افزایش دهد (Wänstrand et al., 1999; Huang et al., 2018). چسبندگی تنش فشاری فیلم DLC را کاهش و قابلیت تحمل بار را افزایش می‌دهد. پوشش‌های چندلایه به دلیل انحراف یا بسته شدن ترک‌های عرضی در فصل مشترک بین لایه‌ها و افزایش سختی ازطریق ممانعت از حرکت نابجایی‌ها در فصل مشترک بین لایه‌ها استحکام چسبندگی را افزایش می‌دهند (Huang et al., 2018). در این بین، عناصر تیتانیم (Ti) و کروم (Cr) بیشترین اوربیتال نیمه‌پر را در تراز d (پوسته‌ی الکترونی) خود دارند که باعث انتشار بهتر کربن و تشکیل فاز کاربید در فصل مشترک پوشش کربنی و لایه‌ی میانی می‌شود که این امر می‌تواند چسبندگی لایه‌های کربنی را به زیرلایه افزایش دهد (Wänstrand et al., 1999; Huang et al., 2018). لذا، در پژوهش حاضر، به بررسی تأثیر لایه‌های میانی Ti و Cr بر ساختار و خواص پوشش کربن شبه‌الماس پرداخته شده است. آنچه این پژوهش را از تحقیقات دیگر متمایز می‌کند این است که ایجاد پوشش کربن شبه‌الماس بر روی لایه‌های میانی Ti و Cr توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی انجام شده است. تحقیقات در این زمینه اغلب توسط فرایندهای رسوب‌دهی شیمیایی از فاز بخار و فرایند کندوپاش است. لذا در تحقیق حاضر به بررسی اثر لایه‌های میانی Ti و Cr بر تغییرات ساختاری و مکانیکی پوشش کربنی ایجادشده توسط فرایند پرتو یونی پرداخته شده است.

فرایندهای مبتنی بر پرتو یون مزایای منحصربه‌فردی در این فرایند دارند. این فرایندها از پیشرفته‌ترین روش‌های مهندسی سطح هستند که با انرژی بالای یون‌ها، توانایی ایجاد ساختاری با پیوندهای الماسه sp^3 بالا را دارند. همچنین، پرتو یونی می‌تواند باعث تزریق یا کاشت یون در سطوح زیرین لایه (زیرلایه) شود که این امر به دلیل ایجاد پیوند شیمیایی و مکانیکی عمیق از جدا شدن لایه جلوگیری می‌کند (Huang et al., 2018). در شکل ۲، طرح‌واره‌ای از فرایند پرتو یونی آورده شده است.



شکل ۲. طرح‌واره‌ی فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی (IBD)

۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش، برای ایجاد لایه‌های میانی Ti و Cr از فرایند رسوب‌دهی قوس کاتدی (CAD) استفاده شد. در محفظه‌ی لایه‌نشانی قوس کاتدی، کاتدهای تیتانیم و کروم در کف محفظه قرار می‌گیرند و، بین آن و بدنه‌ی محفظه در شرایط خلأ، قوس الکتریکی ایجاد می‌شود. ایجاد قوس روی کاتد سبب تشکیل حوضچه‌ی مذاب و تبخیر تیتانیم و کروم و هدایت آن‌ها به‌سمت زیرلایه می‌شود. این ذرات جداشده از کاتد روی سطح زیرلایه ایجاد پوشش می‌کنند. در این تحقیق، همچنین از فولاد AISI 4140 به‌عنوان زیرلایه استفاده شده است. نمونه‌ها توسط سنباده‌های شماره‌ی ۸۰ تا ۳۰۰۰ صیقل داده و سپس در حمام

التراسونیک به‌مدت ۲۰ دقیقه با دمای ۴۰ درجه‌ی سلسیوس و بسامد ۴۰ کیلوهرتز در محلول استون شست‌وشو داده شدند. در ادامه، برای رسوب‌دهی لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس از فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی با منبع گازی استیلن (C_2H_2) با خلوص ۹۹/۹۹ درصد استفاده شد. پارامترهای فرایندی مورد نظر برای ایجاد پوشش‌های کربن شبه‌الماس در این پژوهش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای لایه‌نشانی در فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی

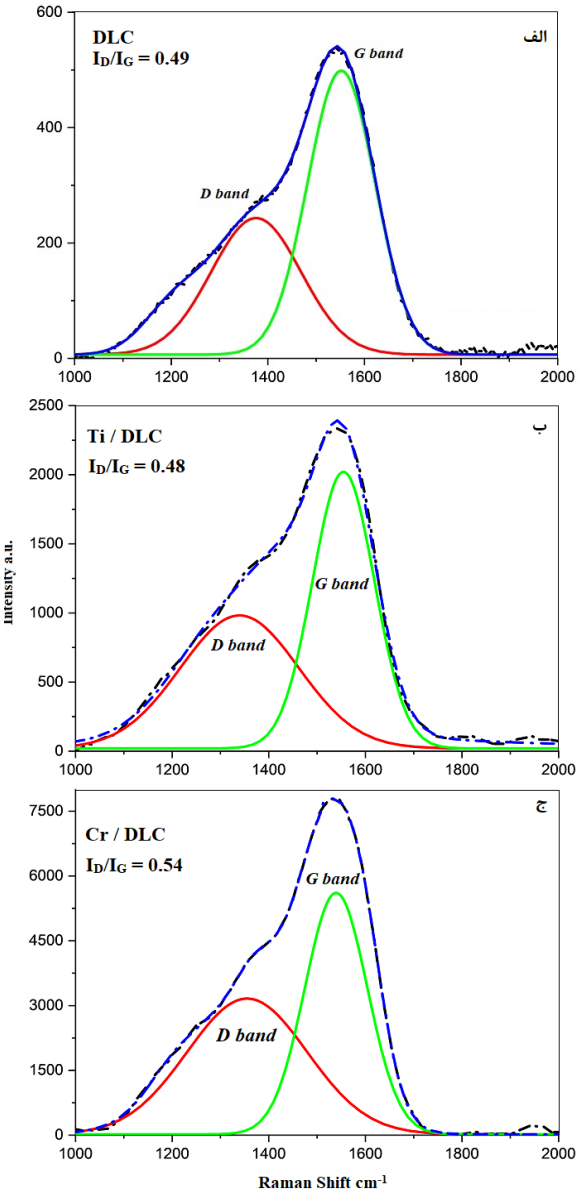
نمونه	نرخ شار گاز منبع (sccm)	زمان رسوب‌دهی (دقیقه)	دمای زیرلایه (درجه سلسیوس)	انرژی یون (الکترون ولت)
DLC	۱۲	۹۰	۲۵	۱۲۵
Ti/DLC	۱۲	۹۰	۲۵	۱۲۵
Cr/DLC	۱۲	۹۰	۲۵	۱۲۵

پس از اعمال لایه‌های نازک کربن شبه‌الماس، برای بررسی‌های ساختاری و مکانیکی لایه‌ها، از آنالیزهای رامان، میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی گسیل میدانی (FESEM)، نیروی اتمی (AFM) و آنالیز نانودندانه‌گذاری استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- نتایج آنالیز رامان

در این بخش به تأثیر به‌کارگیری لایه‌های میانی Ti و Cr بر تحولات ساختاری پوشش کربن شبه‌الماس پرداخته شده است. نتایج حاصل از طیف‌سنجی رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس DLC، Ti/DLC و Cr/DLC ایجادشده توسط فرایند پرتو یونی در شکل ۳ نشان داده شده است. منحنی‌های طیف رامان با استفاده از تابع گوسین توسط نرم‌افزار اوریجین فیت شده و دو قله‌ی G و D از یکدیگر تفکیک شده‌اند. داده‌های حاصل از آنالیز رامان در جدول ۲ شامل نسبت I_D/I_G، موقعیت پیک G و پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع پیک G (FWHM) آورده شده‌اند.



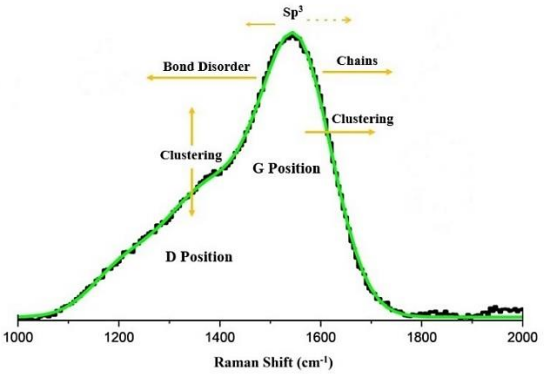
شکل ۳. نمودار فیت‌شده‌ی آنالیز رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس الف) DLC؛ ب) Ti/DLC و ج) Cr/DLC

خواص دو قله‌ی D و G می‌تواند برای مشخصه‌یابی پوشش‌های کربنی استفاده شوند. برای مثال، نسبت I_D/I_G رابطه‌ی مستقیمی با مقدار نسبت پیوندهای sp^2/sp^3 دارد (Robertson, 2002). در آنالیز رامان، پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع قله‌ی G (FWHM) نیز مربوط به نظم ساختاری پوشش است. این پارامتر و موقعیت قله‌ی G، بی‌نظمی موجود در ساختار پوشش کربن شبه‌الماس را نشان می‌دهد که ناشی از تغییر زوایا و اعوجاج در طول پیوندها است (Yu et al., 2020). کاهش موقعیت قله‌ی G همواره به معنی افزایش بی‌نظمی است (Lifshitz, 1999; Robertson, 1994). در شکل ۴، عوامل مؤثر بر محل و ارتفاع

قله‌های D و G برای کربن‌های غیربلوری به‌صورت طرح‌واره نشان داده شده است.

جدول ۲. نتایج حاصل از آنالیز رامان برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی تیتانیم و کروم

sample	I_D/I_G	La	FWHM G	σ Gpa	G position cm^{-1}
DLC	۰/۴۹	۹/۴	۱۶۲	۹	۱۵۵۲
Ti/DLC	۰/۴۸	۸/۹	۱۵۷/۷۶	۰/۵۶	۱۵۴۸/۳۷
Cr/DLC	۰/۵۴	۹/۹	۱۵۲/۵	۱/۸۸	۱۵۳۹/۴



شکل ۴. نمایش عوامل مؤثر بر محل و ارتفاع قله‌های D و G کربن‌های غیربلوری (Wänstrand et al., 1999)

با توجه به نتایج حاصل از آنالیز رامان مشاهده می‌شود که مشخصه‌های ساختاری پوشش کربن شبه‌الماس با به‌کارگیری لایه‌ی میانی دچار تغییر شده است، هرچند نتایج حاصله در هر سه پوشش نتایجی مطلوب است. درخصوص نسبت I_D/I_G باید ذکر شود در پوشش Ti/DLC، مطابق با نمودار ب در شکل ۳، این نسبت برابر با ۰/۴۸ است که در مقایسه با پوشش کربن شبه‌الماس بدون لایه‌ی میانی و پوشش Cr/DLC عدد کمتری را نشان می‌دهد. مطابق با نتایج، مقدار نسبت I_D/I_G در پوشش کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Cr افزایش یافته و به عدد ۰/۵۴ رسیده است. مطابق با داده‌های به‌دست‌آمده، پوشش کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Ti، در مقایسه با دو پوشش دیگر، کمترین نسبت I_D/I_G را دارد که نشان‌دهنده‌ی کمترین میزان پیوندهای sp^2 و بیشترین میزان پیوندهای sp^3 در ساختار خود است. این رخداد نشان می‌دهد که میان‌لایه‌ی Ti برای ارتقای فرایند کاشت زیرسطحی گونه‌ها و اتم‌های کربنی و درنتیجه تشکیل لایه‌های غنی از پیوندهای sp^3 بهتر از میان‌لایه‌ی Cr بوده است (Robertson, 1994; Robertson, 2002). با دستیابی به مقدار I_D/I_G می‌توان برای محاسبه‌ی اندازهٔ خوشه‌های sp^2 در لایه‌های DLC از رابطه‌ی ۱ استفاده کرد (Robertson, 1994; Robertson, 2002):

$$I_D/I_G = C(\lambda)L^2 \qquad (۱)$$

در این رابطه، L اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی و $C(\lambda)$ یک عدد ثابت است که به طول موج لیزر وابسته است و مقدار آن برابر ۰/۰۰۵۵ در نظر گرفته می‌شود (Robertson, 2002).

مقدار اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در پوشش کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Ti به دست آمده است که برابر با ۸/۹ آنگستروم است. کاهش اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی با ایجاد میان‌لایه‌ی Ti به دلیل کاهش یون‌های برگشتی به سطح و جلوگیری از رشد خوشه‌های گرافیتی است (Lifshitz, 1999; Robertson, 1994). پارامتر مهم دیگر در طیف رامان، پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع قله‌ی G (FWHM) است که به نظم ساختاری ناشی از زاویه و طول پیوند وابسته است (Robertson, 2002). کاهش پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع قله‌ی G نشانه‌ی کاهش درجه‌ی آمورف شدن و افزایش نظم در لایه‌ها است. داده‌های پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع قله‌ی G برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس در جدول ۲ نشان داده شده است. مقدار پهنا در نصف بیشینه‌ی ارتفاع قله‌ی G برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس DLC، Ti/DLC و Cr/DLC به‌ترتیب برابر با ۱۶۲ cm^{-1}، ۱۵۷/۷۶ و ۱۵۲/۵ cm^{-1} است.

پارامتر دیگر در طیف‌سنجی رامان موقعیت قله‌ی G در طیف پوشش کربن شبه‌الماس است. قله‌ی G مربوط به پیوندهای sp^2 موجود در حلقه‌ها و زنجیره‌ها است. مطابق با نتایج حاصله، موقعیت قله‌ی G برای پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC به‌ترتیب برابر با ۱۵۵۲ cm^{-1}، ۱۵۴۸/۳۷ cm^{-1} و ۱۵۳۹/۴ cm^{-1} است. به‌طورکلی، جابه‌جایی باند G اعداد موج کمتر معمولاً منعکس‌کننده‌ی افزایش پیوندهای الماسه sp^3 است که در آن نسبت I_D/I_G با اختلال در زاویه‌ی پیوند و طول پیوند مرتبط است و با افزایش پیوندهای sp^3 کاهش می‌یابد (Chowdhury et al., 2004; Kanda et al., 2003; Lifshitz et al., 1994; Eckertova, 1990).

همان‌طور که مشاهده می‌شود، موقعیت قله‌ی G پوشش کربن شبه‌الماس با به‌کارگیری لایه‌ی میانی به‌سمت اعداد موج

کمتر جابه‌جا شده است. مطابق با داده‌های به‌دست‌آمده از آنالیز رامان، با توجه به اینکه پوشش Ti/DLC کمترین نسبت I_D/I_G را دارد، اما موقعیت قله‌ی G نمودار آن در مقایسه با موقعیت قله‌ی G پوشش Cr/DLC، عدد موج بالاتری را نشان می‌دهد. این امر درواقع نشان‌دهنده‌ی کمتر بودن تنش پسماند در لایه‌ی Ti/DLC است که این نیز می‌تواند به دلیل تشکیل فاز کاربید در ساختار پوشش باشد (Huang et al., 2018). این امر نیز برای پارامتر FWHM قله‌ی G پوشش Ti/DLC نیز صادق است.

یکی دیگر از پارامترهای قابل‌بررسی، تعیین مقدار تنش پسماند در پوشش‌های کربن شبه‌الماس توسط طیف‌سنجی رامان است (Robertson, 2002). اگر ماده‌ای تحت فشار مکانیکی قرار گیرد، فواصل بین اتمی و طول پیوند کاهش و ثابت نیروی بین اتمی افزایش می‌یابد و فرکانس‌های ارتعاشی اتمی افزایش می‌یابند. درنتیجه، تغییر قله‌ی G در طیف‌های رامان پوشش‌های DLC را می‌توان با بزرگی تنش‌های پسماند به‌صورت رابطه‌ی ۲ مرتبط کرد (Robertson, 2002; Eckertova, 1990):

$$\sigma = 2Gf\left(\frac{1+\upsilon f}{1-\upsilon f}\right)\frac{\Delta\omega}{\omega 0} \qquad (۲)$$

در این رابطه، G_f و V_f به‌ترتیب مدول برشی و نسبت پواسون پوشش، $\Delta\omega$ تغییر عدد موج رامان و ω_0 عدد موج مرجع هستند. همچنین، مدول برشی (G) را می‌توان ازطریق رابطه‌ی ۳ اندازه‌گیری کرد که در آن E مدول یانگ است که از نتایج نانوسختی‌سنجی به دست آمده است:

$$G = \frac{E}{2\,(1+\upsilon)} \qquad (۳)$$

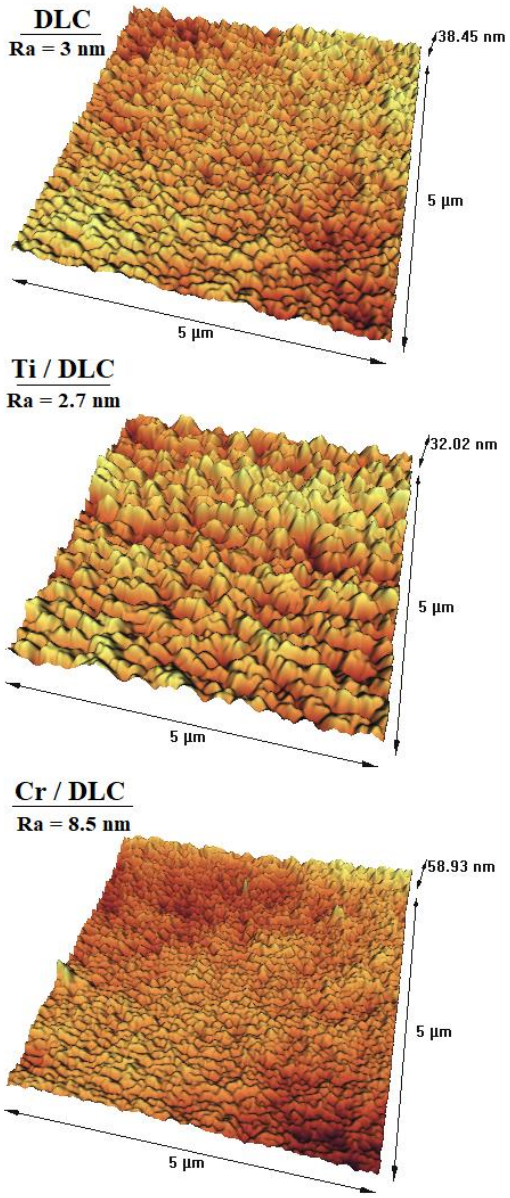
با توجه به مقادیر تنش پسماند به‌دست‌آمده در جدول ۲ و دیگر پارامترهای مستخرج از آنالیز رامان، پوشش کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Ti مطلوب‌ترین مشخصه‌های ساختاری را دارد. قابل‌ذکر است که لایه‌های میانی Ti و Cr به‌خوبی با پوشش کربن شبه‌الماس هماهنگ می‌شوند؛ چراکه تمایل خوبی هم با کربن و هم با زیرلایه‌ی فولادی دارند که باعث کاهش تنش‌های پسماند ذاتی در پوشش کربنی می‌شود.

۳-۲- نتایج آنالیز FESEM و AFM

به‌منظور بررسی توپوگرافی سطح لایه‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فرایند پرتو یونی با لایه‌های میانی تیتانیم و کروم از آنالیز AFM استفاده شد. زبری سطح ازجمله مؤلفه‌هایی است که نحوه‌ی واکنش یک جسم با محیط اطراف را مشخص می‌کند. به‌طوری که هرچه میزان زبری سطح بیشتر باشد، میزان اصطکاک، آسیب‌دیدگی و تخریب‌پذیری بیشتر می‌شود (Chowdhury et al., 2004; Kanda et al., 2003; Lifshitz et al., 1994; Eckertova, 1990; Ferrari & Robertson, 2000; Ahmed et al., 2009; Mersagh Dezfuli & Sabzi, 2019). در شکل ۵، تصاویر AFM و مقادیر زبری سطح Ra برای پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC که به‌ترتیب برابر با ۳، ۲/۷ و ۸/۵ نانومتر است، محاسبه و ذکر شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پوشش کربن شبه‌الماس برروی لایه‌ی میانی Ti ، دارای کمترین مقدار زبری سطح است. اما بر روی پوشش کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Cr مقدار زبری در مقایسه با پوشش کربنی تک‌لایه افزایش یافته است. مطابق با نتایج حاصل از آنالیز رامان، پوشش کربن شبه‌الماس Ti/DLC، دارای کمترین مقدار اندازه خوشه‌های گرافیت و کمترین مقدار نسبت I_D/I_G بود. درواقع، درخصوص ساختار، دو پارامتر پیوندهای sp^3 و خوشه‌های sp^2 از عوامل مهم در تعیین ویژگی‌های سطح پوشش‌های کربن شبه‌الماس هستند (Ferrari & Robertson, 2000; Mersagh Dezfuli et al, 2022). ر این اساس، هرچه مقدار پیوندهای sp^3 در ساختار پوشش افزایش یابد، زبری سطح کاهش می‌یابد. همچنین، هرچه اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی در ساختار کاهش یابد، زبری سطح کاهش می‌یابد (Robertson, 2002; Marks, 2005). لیفشیتز و همکاران گزارش کردند (Lifshitz et al., 1994) که هم‌بستگی واضحی بین زبری سطح و میزان ویژگی شبه‌الماس (پیوند sp^3) وجود دارد و بیان کردند که زبری سطح با کاهش مقدار فاز گرافیته (sp^2) کاهش می‌یابد. لذا، با توجه به نتایج حاصل از آنالیز رامان، پوشش Ti/DLC، در مقایسه با دو پوشش دیگر، نسبت I_D/I_G کمتری دارد که این امر در کاهش اندازه‌ی خوشه‌های گرافیتی و کاهش زبری سطح پوشش مؤثر است.

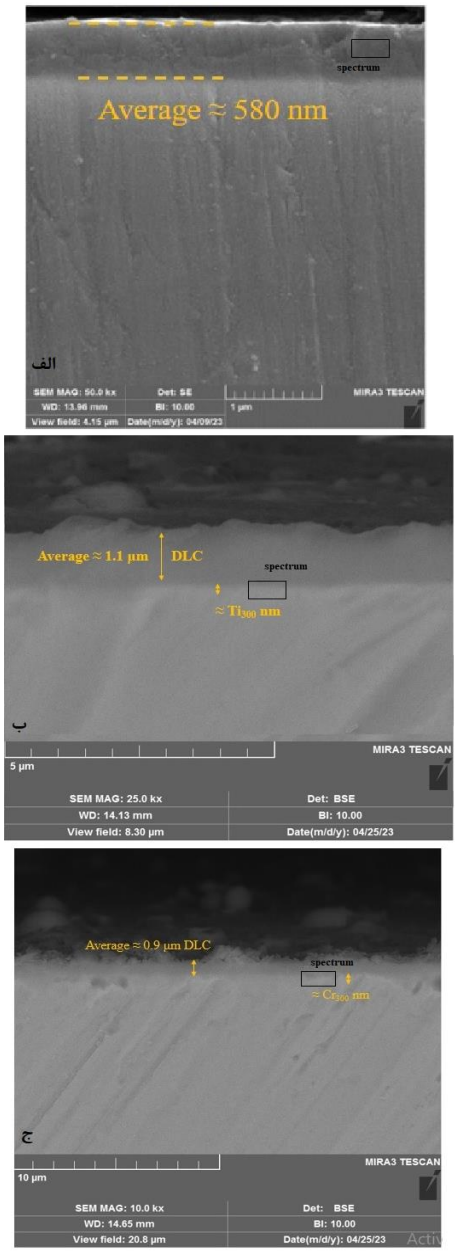
در ادامه، برای بررسی ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس و همچنین ضخامت لایه‌های میانی Ti و Cr، از آنالیز FESEM استفاده شد که نتایج آن در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق با تصاویر مقطع عرضی، مشاهده می‌شود که ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس ایجادشده بر روی لایه‌های میانی،

در مقایسه با پوشش کربن شبه‌الماس بدون لایه‌ی میانی، افزایش چشمگیری داشته است.

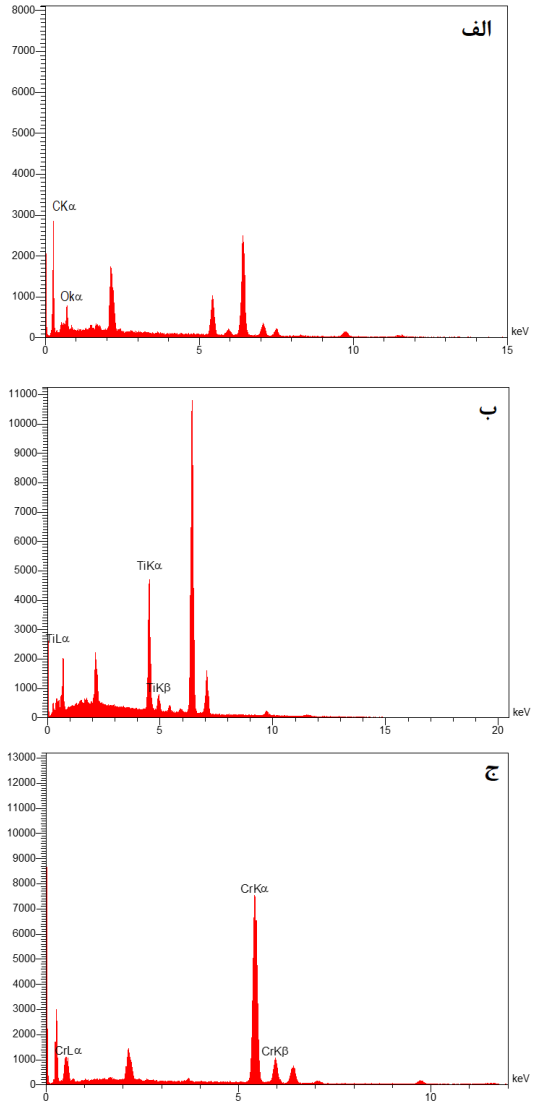


شکل ۵. تصاویر AFM از پوشش‌های کربن شبه‌الماس با لایه‌ی میانی Ti و Cr

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ضخامت پوشش تک‌لایه‌ی کربن شبه‌الماس حدود ۵۸۰ نانومتر است. اما ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس با وجود لایه‌های میانی Ti و Cr افزایش یافته و در حدود ۱ میکرومتر است. این امر نشان‌دهنده‌ی نقش مؤثر تیتانیم و کروم در جذب و هسته‌زایی لایه‌های کربن شبه‌الماس است. همچنین، این امر نشان‌دهنده‌ی کاهش تنش داخلی پوشش کربنی است که باعث تشکیل لایه‌های DLC ضخیم‌تر شده است. به‌علاوه، برای بررسی جنس لایه‌های میانی ایجادشده از آنالیز EDS استفاده شده است که نتایج حاصل از آن در شکل ۷ گویای وجود تیتانیم و کروم به‌عنوان لایه‌ی میانی است.



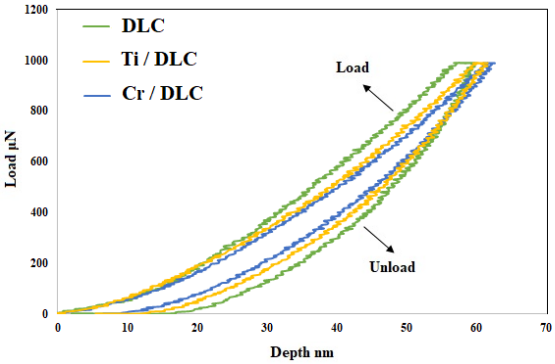
شکل ۶. تصاویر FESEM از پوشش‌های کربن شبه‌الماس الف) DLC؛ ب) Ti/DLC و ج) Cr/DLC



شکل ۷. نتایج EDS از پوشش کربن شبه‌الماس و لایه‌های میانی الف) DLC؛ ب) Ti/DLC و ج) Cr/DLC

۳-۳- خواص مکانیکی

به‌منظور بررسی تأثیر لایه‌های میانی Ti و Cr بر خواص مکانیکی پوشش‌های کربن شبه‌الماس از آزمون نانودندانه‌گذاری استفاده شده است. اندازه‌گیری‌های نانوفرورونده بر روی پوشش‌های DLC (پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC) در حداکثر بار فرورونده‌ی ۱ mN انجام شده است. این بار برای جلوگیری از اثر بستر (میان‌لایه) درخصوص عمق نفوذ و ضخامت فیلم اعمال شده است. در این آنالیز، مواردی چون سختی، مدول الاستیک، بازیابی الاستیک و ضریب پلاستیک نیز ارزیابی شده است. نمودارهای حاصل از آزمون نانوفرورونده در شکل ۸ آورده شده است. همچنین، نتایج حاصل از آن در جدول ۳ آورده شده است. در نمودارهای نانوفرورونده، نیرو به‌عنوان تابعی از جابه‌جایی برای پوشش‌های کربن شبه‌الماس با لایه‌های میانی Ti و Cr نشان داده شده است.



شکل ۸. نمودار نیرو برحسب جابه‌جایی برای پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC

جدول ۳. مقادیر ER، H، E و H/E حاصل از آنالیز نانوسختی‌سنجی برای پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC

sample	H / GPa	E / GPa	H/E	ER (%)
DLC	۲۰	۱۸۷	۰/۱۰۷	۲۵/۵
Ti/DLC	۲۵	۱۴۷	۰/۱۷	۳۶
Cr/DLC	۲۲	۱۶۳	۰/۱۳	۳۱

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نانوفرورونده برای پوشش‌های تک‌لایه‌ی کربن شبه‌الماس و دولایه‌ی Ti/DLC و Cr/DLC مشاهده می‌شود که سختی به‌دست‌آمده برای پوشش‌های Ti/DLC و Cr/DLC از پوشش کربنی تک‌لایه بیشتر است. مطابق با نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که به‌کارگیری لایه‌ی میانی می‌تواند باعث بهبود مشخصه‌های مکانیکی و افزایش سختی پوشش کربن شبه‌الماس شود. نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نانوفرورونده نیز با نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز رامان نیز مطابقت دارد. درواقع، پایین‌تر بودن نسبت I_D/I_G برای پوشش Ti/DLC در مقایسه با پوشش‌های دیگر تأییدی بر نتایج آزمون فرورونده است.

میزان الاستیک بودن پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC با استفاده از پارامتر بازگشت الاستیک (ER) و از روی نمودارهای بار – جابه‌جایی بررسی شد. ER از فرمول زیر محاسبه می‌شود (Wänstrand et al., 1999; Huang et al., 2018; Yu et al., 2020):

$$ER = H_{max} - H_{res} / H_{max} \quad (۴)$$

در این فرمول، H_{max} و H_{res} به‌ترتیب عمق حداکثر در نیروی حداکثر و عمق باقی‌مانده بعد از حذف نیرو هستند. بنا بر تعریف ER، افزایش ER نشان‌دهنده‌ی افزایش الاستیسیته‌ی پوشش است (Eckertova, 1990). بالاتر بودن پارامتر ER در پوشش Ti/DLC نشان از بالاتر بودن الاستیسیته‌ی پوشش دارد. این پارامتر با نسبت H/E، که مقاومت پلاستیک پوشش را نیز نشان می‌دهد، همخوانی دارد. لذا، مشاهده می‌شود که مشخصه‌های مکانیکی پوشش DLC با وجود لایه‌های میانی Ti و Cr بهبود پیدا کرده است که دلیل آن ایجاد پیوند قوی بین پوشش DLC، لایه‌ی میانی و زیرلایه است.

با استفاده از مقادیر H/E، خواص الاستیک-پلاستیک را می‌توان از آنالیز نانوفرورونده تعیین کرد که مقاومت به سایش پوشش‌ها را می‌توان براساس آن پیش‌بینی کرد. نسبت H/E پاسخ فیزیکی شبکه‌ی 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 (Eckertova, 1990). حد بالایی و پایینی به‌ترتیب رفتار الاستیک و الاستیک-پلاستیک فیلم‌ها را نشان می‌دهند. همچنین، برای پوشش‌های با مقاومت به سایش بالا، H/E باید عدد بالایی باشد (Mersagh Dezfuli & Hosseini, 2024; Eckertova, 1990).

مقادیر H/E در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقادیر H/E برای پوشش‌های Ti/DLC و Cr/DLC در مقایسه با پوشش DLC اعداد بالاتری را نشان می‌دهد. در لایه‌های کربن شبه‌الماس، وجود لایه‌ی میانی با ساختار دولایه یا چندلایه به آزادسازی تنش خارجی منجر می‌شود و این اتفاق در فصل مشترک میان لایه‌ها رخ می‌دهد. با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده، سیستم پوششی Ti/DLC بیشترین میزان سختی را داشته است. لذا، پیش بینی می‌شود که دارای مقاومت به سایش بالاتری در بین نمونه‌ها باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تأثیر به‌کارگیری لایه‌های میانی Ti و Cr با هدف بهبود ساختار و خواص مکانیکی پوشش کربن شبه‌الماس ایجادشده توسط فرایند رسوب‌دهی پرتو یونی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج کلی حاصل از این پژوهش به شرح زیر است:

۱- نتایج حاصل از آنالیز رامان نشان داد که پوشش کربن شبه‌الماس Ti/DLC مطلوب‌ترین مشخصه‌های ساختاری را داشت.

۲- با توجه به نتایج AFM، مقادیر زبری سطح Ra برای پوشش‌های DLC، Ti/DLC و Cr/DLC به‌ترتیب برابر با ۳، ۲/۷ و ۸/۵ نانومتر بود.

۳- مطابق با نتایج FESEM، ضخامت پوشش تک‌لایه‌ی کربن شبه‌الماس حدود ۵۸۰ نانومتر بود. همچنین، ضخامت پوشش‌های کربن شبه‌الماس با به‌کارگیری لایه‌های میانی Ti و Cr افزایش و در حدود ۱ میکرومتر بود.

۴- با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از آنالیز نانودندانه‌گذاری، مشاهده شد که سختی به‌دست‌آمده برای پوشش‌های Ti/DLC و Cr/DLC از پوشش کربنی تک‌لایه بیشتر بود.

۵- مطابق با نتایج آنالیز نانودندانه‌گذاری، مشاهده شد که مشخصه‌های مکانیکی پوشش DLC با وجود لایه‌های میانی Ti و Cr بهبود یافته است که دلیل آن ایجاد پیوند قوی بین پوشش DLC، لایه‌ی میانی و زیرلایه است.

سپاسگزاری

از مسئولیت محترم آزمایشگاه لایه‌نشانی در خلأ دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران برای همکاری در این پژوهش بسیار سپاسگزاریم.

منابع

1. Ahmed, S. F., Moon, M. W., & Lee, K. R. (2009). Effect of silver doping on optical property of diamond like carbon films. *Thin Solid Films*, *517*(14), 4035-4038. https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.01.135

2. Bewilogua, K., & Hofmann, D. (2014). History of diamond-like carbon films-From first experiments to worldwide applications. *Surface and Coatings Technology*, *242*, 214-225. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.01.031

3. Chowdhury, S., Laugier, M. T., & Rahman, I. Z. (2004). Effects of substrate temperature on bonding structure and mechanical properties of amorphous carbon films. *Thin Solid Films*, *447*, 174-180. https://doi.org/10.1016/S0040-6090(03)01076-9

4. Eckertova, L. (1990). *Physics of thin films*, Chapter 1.

5. Ferrari, A. C., & Robertson, J. (2000). Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical review B*, *61*(20), 14095-14107. https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095

6. Gotzmann, G., Beckmann, J., Wetzel, C., Scholz, B., Herrmann, U., & Neunzehn, J. (2017). Electron-beam modification of DLC coatings for biomedical applications. *Surface and Coatings*

Technology, *311*, 248-256. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.12.080

7. Huang L., Yuan J., Li Ch., & Hong D. (2018). Microstructure, tribological and cutting performance of Ti-DLC/α-C:H multilayer film on cemented carbide. *Surface and Coatings Technology*, *353*, 163-170. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109320

8. Kanda, K., Shimizugawa, Y., Haruyama, Y., Yamada, I., Matsui, S., Kitagawa, T., Tsubakino, H., & Gejo, T. (2003). NEXAFS study on substrate temperature dependence of DLC films formed by Ar cluster ion beam assisted deposition. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, *206*, 880-883. https://doi.org/10.1016/S0168-583X(03)00888-7

9. Lifshitz, Y., Lempert, G. D., & Grossman, E. (1994). Substantiation of subplantation model for diamondlike film growth by atomic force microscopy. *Physics Review Letter*, *72*(17), 2727-2753. https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.72.2753

10. Lifshitz, Y. (1999). Diamond-like carbon-present status. *Diamond and Related Materials*, *8*(8-9), 1659-1676. https://doi.org/10.1016/S0925-9635(99)00087-4

11. Marks, N. A. (2005). Thin film deposition of tetrahedral amorphous carbon: a molecular dynamics study. *Diamond and Related Material*, *14*(8), 1223-1231. https://doi.org/10.1016/j.diamond.2004.10.047

12. Mersagh Dezfuli, S., & Sabzi, M. (2019). Review of the Effect of Presence of Yttria and Benzotriazole Inhibitor Factor on Electrochemical Properties and Activation of Self-Healing Mechanism in Alumina-Based Coatings. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, *7*(4), 75-92. https://doi.org/10.30501/JAMT.2019.84402

13. Mersagh Dezfuli, S., Rouholahi, S., Hosseini, S. H., Zangeneh Madar, K., Ebrahimi Fordoei, M. R., "Investigating of structural evolution of diamond-like carbon thin film applied by ion beam deposition technology under the effect of substrate temperature", Journal of Advanced Materials and Technologies (JAMT), Vol. 11, No. 3, (2022), 31-42. https://doi.org/10.30501/jamt.2022.349543.1233

14. Mersagh Dezfuli, S. & Hosseini, S. H. (2024). A Study on the Role of Hydrocarbon Precursor on Structure of Diamond Like Carbon Coating Applied by Ion Beam Deposition Technology. Journal of Advanced Materials and Technologies, Vol. 13, No. 3, 63-74. [in Persian]. https://doi.org/10.30501/jamt.2024.473494.1304

15. Robertson, J. (1994). The deposition mechanism of diamond-like a-C and a-C: H. *Diamond Related Material*, *3*(4-6), 361-368. https://doi.org/10.1016/0925-9635(94)90186-4

16. Robertson, J. (2002). Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, *37*(4-6), 129-281. https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0

17. Wänstrand, O., Larsson, M., & Hedenqvist, P. (1999). Mechanical and tribological evaluation of PVD WC/C coatings. *Surface and Coatings Technology*, *111*, (2-3), 247-254. https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)00821-4

18. Yu, W., Wang, J., Huang, W., Cui, L., & Wang, L. (2020). Improving high temperature tribological performances of Si doped diamond-like carbon by using W interlayer. *Tribology International*, *146*, 106241. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106241