ماه‌نامه علمی پژوهشی
مهندسی ساخت و تولید ایران
www.smeir.org
10.22034/IJME.2024.459472.1964

مشخصه‌یابی پوشش نانوساختار DLC، ایجادشده به روش PACVD روی استکانی فولادی و ارزیابی رفتار سایشی آن

محمد راستی اول[۱]، سید محمد مهدی شفیعی[۲*]، حامد رئیسی فرد[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲- عضو هیئت‌علمی، گروه مهندسی مکانیک، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
* ایمیل نویسنده مسئول: shafiei.mohammad@wtiu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی
دریافت: ۷ خرداد ۱۴۰۳
پذیرش: ۲۳ مرداد ۱۴۰۳

کلیدواژگان:
پوشش نانوساختار
پوشش‌های کربن الماس‌گون
PACVD
استکانی

چکیده

پوشش‌های کربن الماس‌گون (DLC) به دلیل ویژگی‌های بی‌نظیرشان، اخیراً در قطعات مربوط به موتور خودروها، به خصوص در قطعات استکانی (یکی از اجزای اصلی موتور احتراقی) محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. اصلی‌ترین هدف از استفاده‌ی این پوشش‌ها، افزایش چسبندگی آن‌ها به سطوح فلزی است تا هم مقاومت در برابر سایش افزایش یابد و هم از فرسایش زدایی تریبولوژیکی جلوگیری کند. به منظور بهبود این خصوصیات، روش‌های متعددی برای رسوب‌گذاری DLC روی فلزات مورد استفاده قرار گرفته که یکی از آن‌ها، تکنیک رسوب‌گذاری بخار شیمیایی تقویت‌شده با پلاسما (PACVD) است. این روش، امکان کنترل دقیق بر روی ضخامت پوشش‌ها را فراهم می‌کند و در نتیجه، افزایش عمر قطعات و بهبود کارایی آن‌ها را به همراه دارد. مطالعه‌ی اخیر به جنبه‌های مختلف این تکنولوژی و تأثیر آن بر کاهش فرسایش، افزایش بازده موتورها و حل مسائل مرتبط با خوردگی سه‌گانه بر فولاد استکانی می‌پردازد. به عنوان مثال، مشخص شده که لایه‌هایی مانند Si، SiH، Cr و CrN می‌توانند سطح صاف و یکنواختی را فراهم کنند که این خود به بهبود چسبندگی پوشش‌های DLC کمک می‌کند. در مقابل، وجود لایه‌هایی مانند Ti و TiN ممکن است تأثیر منفی بر چسبندگی داشته باشند، زیرا این عناصر قویاً به یکدیگر متصل می‌شوند و مانع از ایجاد ارتباطات موثر بین پوشش DLC و فولاد می‌گردند. همچنین، الحاق عناصر غیرفلزی تقویت شده همچون Si، N و F به پوشش‌های DLC نیز می‌تواند عملکرد آن‌ها را در برابر سایش بهبود بخشد و در نتیجه عمر مفید قطعات را افزایش دهد. این نشان از پتانسیل بالای این فناوری‌ها در صنعت خودروسازی دارد که قطعاً در سال‌های آتی، بهینه‌سازی‌ها و پیشرفت‌های بیشتری در این زمینه مشاهده خواهد شد.

Characterization of DLC nanostructure coating, created by PACVD method on steel material of the tappet and evaluation of its wear behavior

Mohammad Rasti Aval[1], Mohammad Mahdi Shafiei[2*], Hamed Raeisi Fard[2]

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
2- Faculty Member, Department of Mechanical Engineering, West Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* Corresponding Author's Email: shafiei.mohammad@wtiu.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received: 27 May 2024
Accepted: 13 August 2024

Keywords:
Nanostructure Coating
Diamond Like Carbon
PACVD
Tappet

Abstract

Diamond-like carbon (DLC) coatings have become highly popular in automotive engine components, particularly piston parts, owing to their unique properties. The main goal of these coatings is to enhance adhesion to metal surfaces, increasing wear resistance and providing tribological lubrication to prevent friction-related wear. Various methods, including Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition (PACVD), are employed for precise control over DLC coating thickness, leading to improved component lifespan and performance. Recent studies have explored different aspects of this technology, examining its impact on reducing wear, enhancing engine efficiency, and addressing triple-fretting corrosion issues on high-strength steel. For instance, layers like Si, SiH, Cr, and CrN have been identified to create a smooth surface, improving DLC coating adhesion. Conversely, layers such as Ti and TiN may negatively affect adhesion, hindering effective interactions between DLC coatings and steel. Additionally, the incorporation of non-metallic elements like Si, N, and F into DLC coatings can enhance their performance against wear, ultimately increasing component lifespan. This highlights the significant potential of these technologies in the automotive industry which will definitely see more optimizations and improvements in this field in the coming years.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Rasti Aval M, Shafiei MM, Raeisi Fard H. Characterization of DLC nanostructure coating, created by PACVD method on steel material of the tappet and evaluation of its wear behavior. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2024 Jul 22;11(5):40-48. doi: 10.22034/IJME.2024.459472.1964 [In Persian]

۱– مقدمه

پوشش‌های کربن الماس‌گون (DLC[1]) به دلیل ویژگی‌های بی‌نظیرشان، اخیراً در قطعات مربوط به موتور خودروها، به خصوص در قطعات استکانی (یکی از اجزای اصلی موتور احتراقی) محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. اصلی‌ترین هدف از استفاده‌ی این پوشش‌ها، افزایش چسبندگی آن‌ها به سطوح فلزی است تا هم مقاومت در برابر سایش افزایش یابد و هم از فرسایش‌زدایی تریبولوژیکی جلوگیری به عمل آید.

ساجی [۱] بر تکنیک‌هایی برای افزایش چسبندگی پوشش‌های کربن الماس‌گون تمرکز کرده است. این تکنیک‌ها شامل استفاده از لایه‌های میانی مانند سیلیکون (Si)، سیلیکون هیدرید (SiH)، کروم (Cr)، کروم نیترید (CrN)، تیتانیوم (Ti) و تیتانیوم نیترید (TiN) و همچنین دوپینگ با عناصر فلزی و غیرفلزی مانند مولیبدن (Mo)، تیتانیوم (Ti)، کروم (Cr)، تنگستن (W)، سیلیکون (Si)، نیتروژن (N) و فلورین (F) هستند. ساجی از تکنیک‌های مشخص‌سازی جامع مثل پروفیلومتری نوری سه‌بعدی، AFM، XPS، XRF، FTIR و UV-Vis برای ارزیابی خواص ساختاری، شیمیایی و مکانیکی این پوشش‌ها استفاده کرده است. براک [۲] نیز بر اهمیت بهبود چسبندگی پوشش‌های کربن الماس‌گون در دماهای بالا تأکید کرده و چالش‌های مرتبط با تنش فشاری داخلی و تفاوت انبساط حرارتی بین این پوشش‌ها و بسترهای فلزی را مورد بررسی قرار داده است. اوهانا و همکاران [۳] نشان دادند که مطالعه بر روی پوشش‌ها نه‌تنها به درک بهتر پوشش‌های کربن الماس‌گون کمک می‌کند، بلکه توصیه‌های ارزشمندی برای افزایش مقاومت به سایش قطعات موتور ارائه می‌دهد. این پوشش‌ها به بهبود عملکرد تریبولوژیکی و مقاومت در برابر خوردگی قطعات موتور کمک می‌کنند. کولاولو همکاران [۴] در مطالعه خود رفتار تریبولوژیکی پوشش‌های دوبلکس CrN/DLC و نانوچندلایه DLC-W روی استکانی سوپاپ را تحت دمای بالا و بار متغیر بررسی کردند و نشان دادند که این پوشش‌ها می‌توانند عملکرد تریبولوژیکی را بهبود بخشند. لپیکا و همکاران [۵] تأثیر خواص مکانیکی زیرلایه و پوشش را بر عملکرد سایشی فولاد زنگ‌نزن LVM316 پوشش داده شده با TiN یا DLC بررسی کردند و نشان دادند که این پوشش‌ها می‌توانند به‌طور قابل توجهی خواص سایشی را بهبود بخشند. لایو همکاران [۶] به تهیه و شناسایی نانوکامپوزیت‌های پلی (وینیلیدن فلوراید)/نانورس برای مقاومت در برابر سایش پرداخته و دریافتند که این نانوکامپوزیت‌ها نسبت به مواد بدون پوشش خواص سایشی بهتری دارند. راتامرو و ونچوفسکی [۷] تأثیر پوشش‌های H-DLC بر نیروهای اصطکاکی بادامک و استکانی مستقیم را بررسی کردند و نتایج نشان دادند که این پوشش‌ها می‌توانند نیروهای اصطکاکی را به‌طور قابل توجهی کاهش دهند. کاسیوروفسکی و همکاران [۸] به بررسی میکروساختاری و تریبولوژیکی پوشش‌های DLC تهیه شده با روش‌های پیشرفته پلاسما روی زیرلایه‌های فولادی پرداخته و نشان دادند که این پوشش‌ها می‌توانند خواص تریبولوژیکی عالی‌ای داشته باشند.

پوشش‌های کربن الماس‌گون به‌طور مؤثری سختی سطح و مقاومت در برابر سایش استکانی فولادی را بهبود بخشیده و پتانسیل استفاده در موتورهای خودرو را دارند. در این مطالعه در مورد آماده‌سازی، مورفولوژی پوشش‌های نانوساختار DLC بر روی فولاد استکانی گزارش داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که پوشش‌های نانو ساختار DLC دارای سطح صاف با زبری سطح پایین و سختی بالا هستند.

۲– مواد و روش‌ها

در روش رسوب بخار فیزیکی (PVD[2]) تامین بهتر انرژی لازم برای حرکت اتم‌ها، کمک می‌نماید که شرایط مطلوب‌تر نفوذ ایجاد شود. این اتفاق در دماهای بالا روی می‌دهد و باعث می‌شود، ذرات با زبری سطح بالاتری تشکیل شده و به دلیل خاصیت روش قوس کاتدی، ماکرو ذرات روی سطح بنشینند و زبری سطح را افزایش دهند.

روش PACVD[3] یک روش رسوب‌گذاری شیمیایی در خلأ است که از یک گاز پیش ماده و یک گاز فعال‌کننده استفاده می‌کند. این روش برای ایجاد پوشش‌های نانو ساختار DLC بر روی استکانی فولادی بسیار مناسب است. روش PACVD به دلیل استفاده از یک گاز پیش ماده، کنترل دقیق ضخامت پوشش را امکان‌پذیر می‌کند. این امر برای ایجاد پوشش‌های نانوساختار که ضخامت آن‌ها در مقیاس نانومتر است، ضروری است. روش PACVD در دمای نسبتاً پایین (معمولاً بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود. این امر از

[1] Diamond-Like Carbon
[2] Physical Vapor Deposition
[3] Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition

تغییر شکل یا آسیب دیدن استکانی فولادی جلوگیری می‌کند. این روش یعنی روش PACVD پوشش‌های نانو ساختار DLC با خلوص بالا تولید می‌نماید. این امر به دلیل استفاده از یک گاز فعال‌کننده است که باعث می‌شود گاز پیش ماده با دقت بیشتری روی سطح فولاد استکانی رسوب نماید.

در پوشش ایجاد شده به روش PACVD، به دلیل حضور سیلسیوم درون پوشش، جوانه‌زنی بیشتر انجام شده و دانه‌های جدید بیشتری روی سطح نمونه تشکیل می‌شوند. این دانه‌ها از رشد دانه‌های قبلی جلوگیری کرده و باعث می‌گردد ساختاری با دانه‌های بسیار ریز تشکیل شود. این دانه‌های کوچک سبب کاهش زبری سطح می‌شوند. صافی سطح نمونه‌های DLC از آن جهت اهمیت دارد که این ساختار یک پوشش نانو است و به دلیل عملکرد سایشی قطعه، نیاز دارد یک سری تست‌ها قبل از انتقال استکانی‌ها به داخل کوره انجام شود و میزان صافی سطح نمونه‌ها اندازه‌گیری گردد که صافی سطح خود قطعه استکانی و پین‌های نمونه با هم مشابهت داشته باشند.

جدول ۱ صافی سطح نمونه‌های DLC قبل از کوره را نمایش می‌دهد.

جدول ۱ صافی سطح نمونه‌های DLC قبل از کوره با دقت اندازه‌گیری تا ۱۰٪

پارامتر کنترلی	صافی سطح خطی (µm)	صافی سطح چرخشی (µm)
Ra	۰/۵۲۲	۰/۴۳۴
Rz	۴/۵۸۷	۳/۵۷۹

به‌طورکلی، ترکیب شیمیایی نمونه در محدوده ترکیبات معمولی فولاد است. جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه استکانی فولادی را نمایش می دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نمونه دارای کربن و منگنز تقریبا بالا و کروم و نیکل کمی است. این تغییرات احتمالاً تأثیر قابل‌توجهی بر خواص فولاد نخواهد داشت.

جدول ۲ ترکیب شیمیایی نمونه استکانی فولادی

C %	Si %	Mn %	V %	Cr %	Ni %	P %	S %
۰/۴۴	۰/۲۸	۰/۵۹	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۱

محتوای کربن بالا نشان می‌دهد که فولاد ممکن است با عملیات حرارتی سخت شود. مقدار بالای منگنز نشان می‌دهد که فولاد ممکن است در برابر خوردگی مقاوم باشد. محتوای کم کروم نشان می‌دهد که فولاد ممکن است به اکسیداسیون حساس باشد و مقدار کم نیکل نیز نشان می‌دهد که فولاد ممکن است خیلی انعطاف‌پذیر نباشد. به‌طورکلی، ترکیب شیمیایی نمونه مورد آزمایش برای کاربردهای مختلف، ازجمله کاربردهای ساختاری که در آن استحکام و سختی مهم است و کاربردهای مقاومت در برابر سایش، مناسب است. جدول ۳ مقادیر سختی نمونه ها قبل از کوره را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میانگین سختی نمونه ۷۱۵ HV است و در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی‌گراد و ۲۰٪RH سختی‌سنجی انجام شده است. نیروی اعمال‌شده ۱۰ کیلوگرم و زمان نگهداری ۱۲-۱۳ ثانیه بوده است.

جدول ۳ سختی سنجی ویکرز نمونه‌ها قبل از کوره با عدم دقت اندازه‌گیری تا ۱۰٪

شماره نمونه	سختی HV
نمونه ۱	۷۰۷
نمونه ۲	۷۱۴
نمونه ۳	۷۲۴

نوع و طریقه عملیات می‌تواند به شدت در نواحی و خصوصیات سطحی قطعه در حین انجام عملیات حرارتی موثر باشد. برای این‌که قطعه بهینه‌تری بعد از عملیات حرارتی به دست آید، نیاز است که درک درستی از قطعه کار و موارد مصرف قطعه وجود داشته باشد. به همین ترتیب داشتن دید مناسب برای مشخص کردن نقاط بحرانی قطعه و نیاز به سخت کردن یا بسته به کاربرد، ارتجاعی یا ترد

کردن آن الزامی می‌باشد که تمام این‌ها با توجه به تحلیلی که در آن نقطه نیاز است، انجام می‌شود. جزئیات باید در طراحی و ساخت قطعه لحاظ گردد. از این رو معمولا نمونه‌ها برای ساخت، به وسایل جانبی جدیدی نیاز دارند که فرایند سخت کاری آن‌ها را راحت‌تر و بهینه‌تر می‌کند که در شکل ۱ نمایش داده شده است. قطعه مورد مطالعه در این تحقیق یک پین به قطر ۱۰ میلی‌متر و با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر است. برای تست کشش نمونه دمبلی مطابق استاندارد E8 ساخته شده که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. برای اینکه بتوان به سختی درست دست پیدا کرد و شرایط واقعی ساخت قطعه را شبیه‌سازی نمود، نیاز است که در عملیات حرارتی وجه و مقطع دایره‌ای نمونه را سخت‌کاری کرد که فیکسچر مورد نظر و نوع قرارگیری پین در آن اطمینان کامل از سخت شدن سطح مورد نظر را ایجاد خواهد کرد. بنابراین از طریق این فیکسچر می‌توان قطعه مورد نظر را نگه داشت و درون کوره جهت عملیات سخت‌کاری قرار داد.

شکل ۱ فیکسچر عملیات حرارتی نمونه‌های استکانی فولادی (نمونه‌های۱۰ میلی‌متر در درون فیکسچر)

شکل ۲ شکل نمونه تست کشش E8

عملیات حرارتی نیتراسیون یک روش پوشش‌دهی سطح فولاد 1.7131 است که با استفاده از گاز نیتروژن به‌عنوان عامل نیتراسیون، به منظور افزایش سختی و مقاومت در برابر سایش و خوردگی، انجام می‌شود. در این روش، قطعات فولاد 1.7131 در دمای بالا (معمولاً بین ۵۲۰-۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) و در حضور گاز نیتروژن قرار می‌گیرند. در ابتدا، قطعات فولاد چندلایه آلومینایز شده و سپس، قطعات آلومینایز شده را به همراه گاز نیتروژن در دستگاه نفوذ دهنده قرار می‌دهند. دستگاه نفوذ دهنده شامل چند بخش است که شامل منبع حرارت (بخار آب، فورانس) و منبع نفوذکننده (NH_3) است. قطعه فولاد به‌صورت پودر آلفا تحت تأثیر حرارت قرار

می‌گیرد و با جذب نیتروژن، تغییر شکل می‌دهد. این عامل باعث تشکیل لایه‌های پودر فولاد (Fe2N) می‌شود و فولاد نیتراته می‌گردد. پس از اجرای عملیات حرارتی و خاموش شدن کوره، قطعات فولاد به مدت هشت ساعت در داخل کوره همراه با خود کوره به آهستگی خنک شده و به دمای محیط می‌رسند. عملیات حرارتی نیتراسیون یک روش پوشش‌دهی سطح فولاد با استفاده از نیتروژن است که در این روش، فولاد 1.7131 رفتار بسیار خوبی را در جذب نیتروژن در فرایند نیتراسیون از خود نشان داده است.

جزئیات این عملیات به شرح زیر است:

۱- پاک‌سازی سطح: قبل از شروع عملیات نیتراسیون، سطح فولاد باید به‌طور کامل پاک‌سازی شود تا از هرگونه آلاینده‌ای مانند روغن، چربی و ذرات خارجی پاک شود. برای این منظور، معمولاً از روش‌های شستشو با محلول‌های خاص استفاده می‌شود.

۲- آماده‌سازی نیتروژن: در این مرحله، نیتروژن باید به‌صورت مناسب آماده شود تا بتواند به سطح فولاد نفوذ کند. گاز نیتروژن با استفاده از تجهیزات خاص تولید و در دستگاه مناسب ذخیره و تأمین می‌شود.

۳- نفوذ نیتروژن: در این مرحله، قطعه فولاد 1.7131 در دستگاه قرار داده می‌شود و گاز نیتروژن به‌صورت جریانی روی سطح قطعه تأمین و جذب می‌گردد. در حین جذب نیتروژن، فولاد با آن واکنش داده و لایه کاملاً جامد خاکستری Nitride روی سطح قطعه تشکیل می‌دهد.

جدول ۴ پارامترهای نیتراسیون مربوط به نمونه استکانی فولادی را نمایش می دهد.

جدول ۴ پارامترهای نیتراسیون نمونه استکانی فولادی

جریان (A)	ولتاژ (V)	دما (درجه سانتیگراد)	زمان (hr)	فرکانس (Hz)	چرخه کار
۲۰	۴۵۴	۴۹۰	۱۴	۷۵۰۰	٪ ۶۵

پس از پوشش‌گذاری و انجام تمامی عملیات‌های ذکر شده، نمونه استکانی فولادی مورد آزمایش سایش قرار می‌گیرد. برای تست سایش از استاندارد مرجع ASTM G99 استفاده شده است. شرایط ایجادی جهت تست سایش به صورت جدول ۵ می‌باشد:

جدول ۵ پارامترهای تست سایش نمونه استکانی فولادی

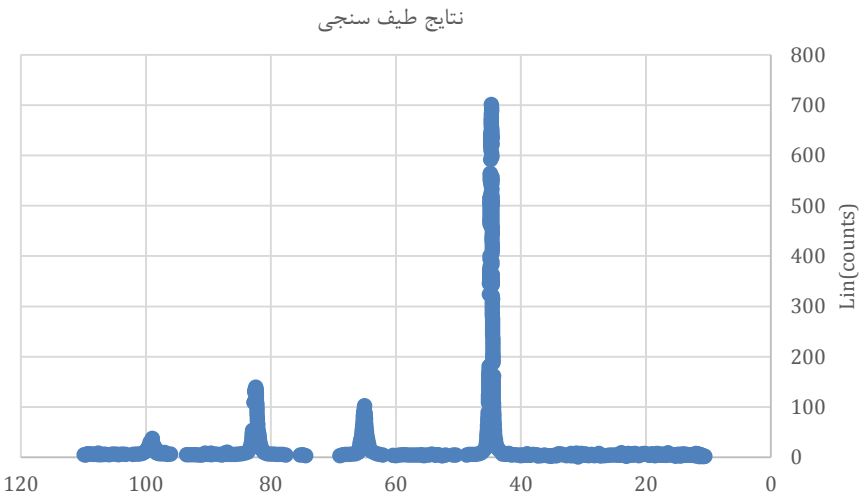
پارامتر	مقدار
تنش اعمال شده	100 KPa
سطح ساینده	سنباده نمره ۶۰
سرعت دوران دیسک	20 m/min
طول اولیه	10.10 mm
طول نهایی	10.07 mm
سطح مقطع نمونه	78.66 mm^2

۳- نتایج و بحث

طیف‌سنجی برای نمونه‌ای از پوشش‌های نانو ساختار DLC ایجاد شده با روش PACVD بر روی استکانی فولادی با طیف پراش اشعه ایکس (XRD)، دو پیک وسیع در مقادیر 2θ حدود ۲۳ درجه و ۴۳ درجه را نشان می‌دهد. این پیک‌ها مشخصه پوشش‌های DLC هستند و به صفحات (۰۰۲) و (۱۰۱) که به ساختار الماس است نسبت داده می‌شوند. گستردگی قله‌ها نشان می‌دهد که پوشش DLC آمورف است. وجود قله (۰۰۲) نشان می‌دهد که پوشش DLC دارای محتوای کربن sp3 بالایی است. پیوندهای کربنی sp3 مسئول سختی و مقاومت بالای پوشش‌های DLC هستند. وجود قله (۱۰۱) نشان می‌دهد که پوشش DLC دارای پیوندهای کربنی sp2 نیز می‌باشد. پیوندهای کربنی sp2 مسئول ضریب اصطکاک پایین پوشش‌های DLC هستند.

طیف XRD همچنین تعدادی پیک کوچک‌تر را نیز در مقادیر 2θ در حدود ۴۴ درجه، ۵۰ درجه و ۷۴ درجه نشان می‌دهد. این پیک‌ها به وجود کاربید آهن (Fe_3C) در پوشش DLC اشاره می‌کند. Fe_3C محصول فرعی فرایند PACVD است و زمانی که کربن با آهن موجود در بستر فولادی استکانی واکنش می‌دهد، تشکیل می‌شود. وجود Fe_3C در پوشش DLC برای برخی کاربردها مانند مقاومت در برابر سایش مفید است. با این‌حال، می‌تواند سختی و ضریب اصطکاک پوشش را نیز کاهش دهد.

شکل ۳ نتیجه آزمایش اشعه ایکس پوشش نانو ساختار DLC روی استکانی فولادی نشان می‌دهد که این پوشش به‌خوبی به بستر فولادی چسبیده است و ضخامت یکنواختی دارد. همچنین مشهود است که پوشش از نانو ذرات DLC با اندازه ۵ تا ۱۰ نانومتر تشکیل شده است. وجود این نانو ذرات به پوشش سختی ۲۰۰۰ HV می‌دهد که به طور قابل توجهی بالاتر از فولاد است. علاوه‌بر این، پوشش دارای ضریب اصطکاک پایین و مقاوم در برابر سایش است.



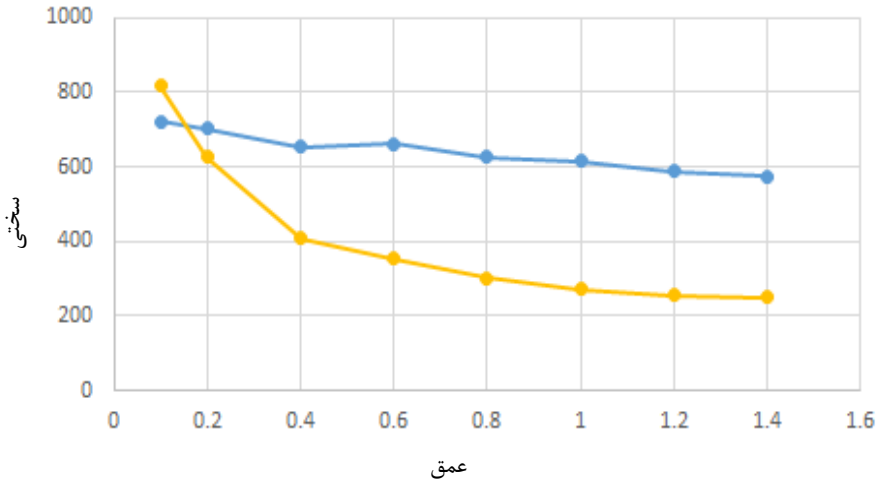
شکل ۳ نتیجه آزمایش اشعه ایکس پوشش نانوساختار DLC روی استکانی فولادی (وجود قله تیز که نشان دهنده پوشش امورف می‌باشد)

این اطلاعات نشان می‌دهد که پوشش نانو ساختار DLC یک پوشش امیدوارکننده برای استفاده در کاربردهای استکانی است. این پوشش می‌تواند از فولاد استکانی در برابر سایش محافظت کند. علاوه‌بر این، ضریب اصطکاک پایین پوشش می‌تواند سایش را کاهش دهد. به‌طورکلی، نتایج آزمایش اشعه ایکس نشان می‌دهد که پوشش نانو ساختار DLC یک پوشش باکیفیت بالا است که می‌تواند الزامات مورد نیاز را برآورده کند.

مقاومت کششی نمونه ۹۲۸ مگاپاسکال به دست آمده که در محدوده مقاومت کششی معمولی برای فولاد است. نمونه از نظر استحکام کششی کمی بالاتر از برخی فولادها است، اما به‌طور قابل‌توجهی بالاتر نیست. این نشان می‌دهد که نمونه احتمالاً می‌تواند برای اکثر کاربردهای خودرویی به اندازه کافی قوی باشد. استحکام کششی نمونه با ترکیب شیمیایی نمونه مطابقت دارد. نمونه دارای کربن و منگنز بالایی است که هر دو عنصری هستند که به استحکام کششی بالا کمک می‌کنند. به‌طور کلی، استحکام کششی نمونه در محدوده فولادهای معمولی است و با ترکیب شیمیایی و زبری سطح نمونه مطابقت دارد. عناصر دوپینگ فلزی و غیرفلزی می‌توانند تأثیرات مختلفی بر استحکام چسبندگی و رفتار سایشی پوشش‌های DLC بر روی استکانی فولادی داشته باشند. به‌عنوان مثال، عناصر دوپینگ فلزی مانند Mo، Ti و Cr می‌توانند استحکام چسبندگی پوشش‌های DLC را افزایش دهند. این عناصر می‌توانند پیوندهای قوی بین پوشش DLC و فولاد استکانی ایجاد کنند. عناصر دوپینگ غیرفلزی مانند Si، N و F می‌توانند رفتار سایشی پوشش‌های DLC را بهبود بخشند. این عناصر می‌توانند مقاومت در برابر سایش پوشش‌های DLC را افزایش دهند. خواص چسبندگی پوشش‌های DLC بر روی استکانی فولادی تحت شرایط و پارامترهای مختلف رسوب‌گذاری متفاوت است. به‌عنوان مثال، دمای رسوب‌گذاری می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر استحکام چسبندگی پوشش‌ها داشته باشد. در دماهای بالاتر، پوشش‌ها تمایل دارند که سخت‌تر و شکننده‌تر شوند که می‌تواند منجر به کاهش استحکام چسبندگی آن‌ها شود.

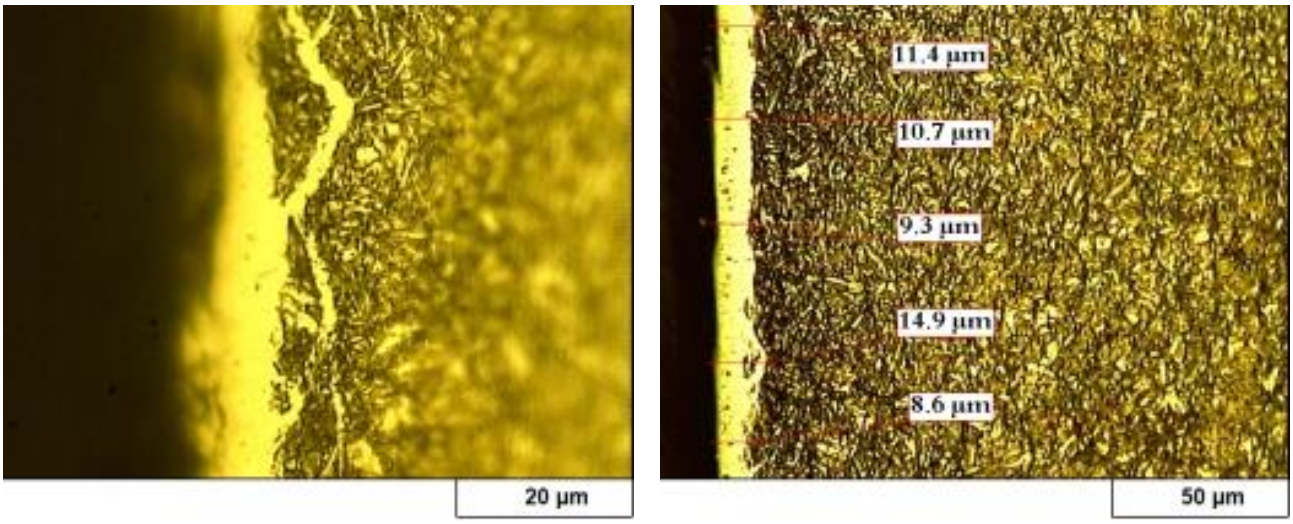
فشار رسوب‌گذاری نیز می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص چسبندگی پوشش‌ها داشته باشد. در فشارهای بالاتر، پوشش‌ها تمایل دارند که متراکم‌تر و یکنواخت‌تر شوند که می‌تواند منجر به افزایش استحکام چسبندگی آن‌ها شود. علاوه بر دما و فشار، سایر پارامترهای رسوب‌گذاری مانند زمان رسوب‌گذاری و نوع گاز پیش ماده نیز می‌توانند تأثیر قابل‌توجهی بر خواص چسبندگی پوشش‌ها داشته باشند.

مقایسه نتایج پروفیل سختی و ریزسختی نمونه پس از کوره که در اعماق مختلف اندازه‌گیری شده، در شکل ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان سختی پس از انجام عملیات بهبود یافته است.



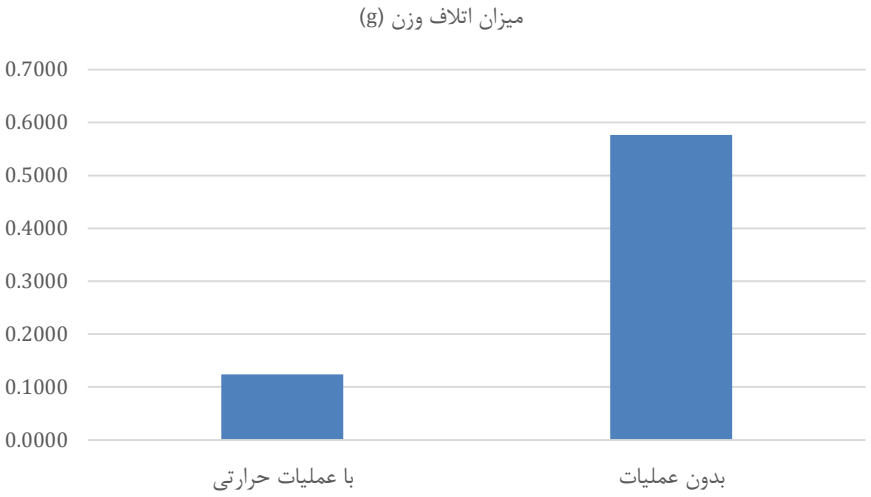
شکل ۴ مقایسه نتایج پروفیل سختی و ریز سختی نمونه فولاد استکانی پس از کوره و قبل از کوره (منحنی آبی: سختی، منحنی زرد: میکروسختی)

همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، پوشش یکپارچه به سطح چسبیده و دارای گسستگی و پستی و بلندی نمی‌باشد.

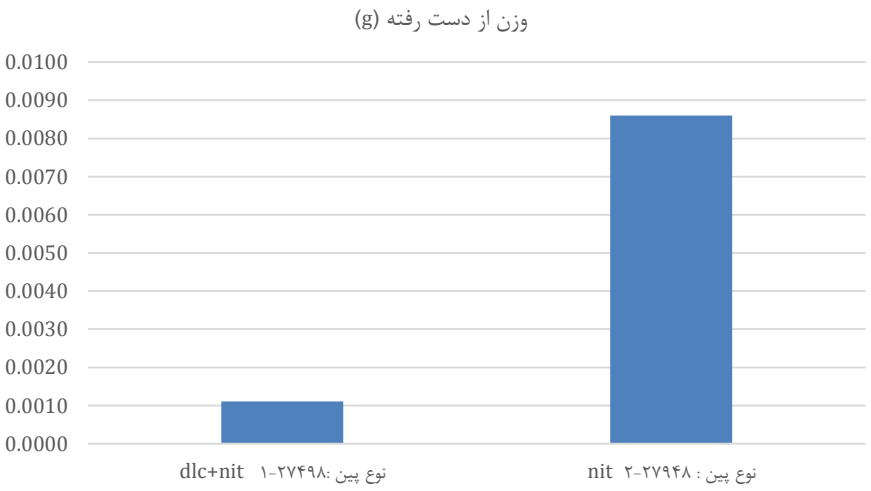


شکل ۵ تصاویر بررسی چسبنگی پوشش و مورفولوژی استاندارد ASTM E407

نتایج ناشی از تست سایش نشان می‌دهد که خود نمونه به میزان قابل توجهی سخت شده و مقاومت به سایش با روکش الماس‌گون به مقدار قابل توجهی بالا رفته است. شکل ۶ و ۷ بسته به نوع عملیات، مرحله به مرحله میزان اتلاف وزن پس از تست سایش را نمایش می‌دهد.



شکل ۶ تفاوت میزان اتلاف وزنی پس از تست سایش بین پین بدون عملیات حرارتی و عملیات حرارتی شده



شکل ۷ تفاوت میزان اتلاف وزنی پس از تست سایش بین پین نیتراته شده و روکش DLC

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تکنیک رسوب‌گذاری بخار شیمیایی تقویت‌شده با پلاسما (PACVD) در قطعات استکانی که یکی از اجزای اصلی موتورهای احتراق داخلی می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. اصلی‌ترین هدف استفاده از این پوشش‌ها، افزایش چسبندگی آن‌ها به سطوح فلزی است تا هم مقاومت در برابر سایش افزایش یابد و هم از فرسایش‌زدایی تریبولوژیکی جلوگیری به عمل آید. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش به شرح زیر می‌باشد:

- روش PACVD به دلیل کنترل دقیق ضخامت پوشش، دمای پایین و خلوص بالای پوشش، برای ایجاد پوشش‌های نانو ساختار DLC بر روی فولاد استکانی بسیار مناسب است.
- لایه‌های CrN می‌توانند به بهبود چسبندگی پوشش‌های DLC کمک کنند. لایه‌های Ti و TiN نیز می‌توانند چسبندگی پوشش‌های DLC را در این مورد نمونه، کاهش دهند.
- عناصر دوپینگ فلزی مانند Mo، Ti و Cr می‌توانند استحکام چسبندگی پوشش‌های DLC را افزایش دهند. عناصر دوپینگ غیرفلزی مانند Si، N و F می‌توانند رفتار سایشی پوشش‌های DLC را بهبود بخشند.
- مقاومت به سایش فولادهای 1.7131 با رسوب‌گذاری نیتراتی و DLC می‌توانند به طور قابل ملاحظه ای بهبود داده شوند.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب قدردانی خود را از شرکت تحقیق، طراحی و تولید موتور ایران‌خودرو (ایپکو) اعلام می‌دارند.

References

[1] Saji VS. Carbon nanostructure-based superhydrophobic surfaces and coatings. Nanotechnology Reviews. 2021 Jun 25;10(1):518-71.

[2] Braak R. Assessment of the Adhesion Performance of Diamond-Like Carbon Coatings at Elevated Temperature [dissertation]. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt; 2021. doi: 10.26083/tuprints-00014577

[3] Ohana T, Suzuki M, Nakamura T, Tanaka A, Koga Y. Tribological properties of DLC films deposited on steel substrate with various surface roughness. Diamond and Related Materials. 2004 Nov 1;13(11-12):2211-5. doi: 13. 2211-2215. 10.1016/j.diamond.2004.06.037

[4] Kolawole FO. Tribological behavior of duplex CrN/DLC and nano-multilayer DLC-W coatings on valve tappet under elevated temperature and varying load. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. 2024 Jun 1;121:106660. doi: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106660

[5] Łępicka M, Grądzka-Dahlke M, Pieniak D, Pasierbiewicz K, Niewczas A. Effect of mechanical properties of substrate and coating on wear performance of TiN-or DLC-coated 316LVM stainless steel. Wear. 2017 Jul 15;382:62-70. doi: 10.1016/j.wear.2017.04.017

[6] Lai CY, Groth A, Gray S, Duke M. Preparation and characterization of poly (vinylidene fluoride)/nanoclay nanocomposite flat sheet membranes for abrasion resistance. Water research. 2014 Jun 15;57:56-66. doi: 10.1016/j.watres.2014.03.005

[7] Ratamero L, Vencovsky P. Effect of H-DLC coatings on direct acting cam-tappet friction forces. VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias. 2022 Jul 29;32(1):23-30. doi: 10.14295/vetor.v32i1.13417

[8] Kasiorowski T, Lin J, Soares P, Lepienski CM, Neitzke CA, De Souza GB, Torres RD. Microstructural and tribological characterization of DLC coatings deposited by plasma enhanced techniques on steel substrates. Surface and Coatings Technology. 2020 May 15;389:125615. doi: 10.1016/j.surfcoat.2020.125615