پیام آبکار

نشریه پیام آبکار – بهار ۱۴۰۲

استحکام چسبندگی پوشش‌های نانوساختار؛ سازوکارها، عوامل موثر و روش‌های ارزیابی آن

حسن علم خواه؛ دکترای فناوری نانو (گرایش نانوپوشش) و عضو هیات علمی دانشگاه بوعلی سینا

h.elmkhah@basu.ac.ir

چکیده

«مهندسی سطح» به عنوان یکی از راهکارهای اصلی در حفاظت از سطح قطعات در برابر شرایط مخرب محیطی از جمله سایش، خوردگی، اکسیداسیون و فرسایش می‌باشد. فرایندهای مهندسی سطح به دو دسته اصلاح سطح (Surface modification) و پوشش سطح (Surface coating) تقسیم‌بندی می‌شود. در فرایندهای اصلاح سطح از جمله فرایند نفوذی نیتروژن‌دهی و سخت‌کاری القایی، تغییر خواص سطح در عمق قطعه انجام شده و در ابعاد قطعه تاثیر چندانی ندارد. اما در فرایندهای پوشش سطح مانند آبکاری الکتریکی و PVD یک لایه با ضخامت مشخص بر سطح قطعه اعمال می‌شود. از این‌رو مهمترین چالش فرایندهای پوشش سطح در مقایسه با فرایندهای اصلاح سطح، مسئله «چسبندگی» پوشش به زیرلایه می‌باشد. با توجه به اینکه معمولا جنس پوشش‌ها با جنس زیرلایه‌ها متفاوت است، استحکام چسبندگی همراه با ملاحظاتی است که رعایت آنها بسیار حائز اهمیت می‌باشد.

بنابراین ضرورت دارد تا مصرف‌کنندگان قطعات پوشش‌دار، استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه را کنترل و ارزیابی نمایند. زیرا تخریب و تضعیف چسبندگی، سازوکار غالب شکست و تخریب اولیه پوشش می‌باشد که عمرکاری و عملکرد آن را محدود می‌سازد. وجود چندین استاندارد و مرجع معتبر در این زمینه از جمله استانداردهای ASTM C۱۶۲٤، ISO۲٦٤٤۳ و VDI۳۱۹۸، نشان از اهمیت این ویژگی از پوشش‌ها است.

پیام آبکار

نشریه پیام آبکار – بهار ۱۴۰۲

در این مقاله بعد از بیان سازوکارهای استحکام چسبندگی به عوامل مختلف برای دستیابی به چسبندگی مطلوب پوشش به زیرلایه اشاره شده است. همچنین در این مقاله روش‌های ارزیابی و کنترل کیفی استحکام چسبندگی پوشش‌ها از جمله آزمون خراش، روش راکول‌سی و روش خراش متقاطع همراه با استانداردهای بین‌المللی بیان شده است تا اینکه صنعتگران محترم بر مبنای آن بتوانند نسبت به کیفیت چسبندگی پوشش اطمینان حاصل کنند.

کلمات کلیدی: استحکام چسبندگی، پوشش‌های سطح، مهندسی سطح.

۱- مقدمه

از چند دهه قبل، زمانی که لایه‌نشانی پوشش‌های سخت با استفاده از روش CVD و PVD ابداع شد، آن‌ها به‌عنوان پوشش غیرقابل اجتناب برای حفاظت از ابزارهای متداول از جمله ابزارهای برش، ابزارهای شکل‌دهی سرد، قالب‌های تزریق پلاستیک و ابزارهای پرس پودرها مورد استفاده قرار گرفت. با ابزارهای پوشش داده‌شده می‌توان به مزایای زیر دست‌یافت:

- افزایش بهره‌وری (افزایش عمر ابزار، افزایش میزان استفاده از آنها)
- کاهش هزینه‌های تولید (از طریق کاهش مصرف ابزارها و کاهش زمان تلف‌شده)
- بهبود کیفیت محصولات (به دلیل سطح صاف‌تر، پایداری ابعادی بهتر و کاهش مراحل تولید)
- کاهش مصرف مواد روان‌کننده (موجب حفاظت محیط‌زیست و کاهش هزینه) [۱].

امروزه کاربرد پوشش‌های سخت برای بهبود رفتار خوردگی و سایشی ابزارها (به‌عنوان مثال در ابزارهای برش

و ماشین‌کاری)، قالب‌های ساخت و تولید (قالب‌های شکل‌دهی ورق و اکستروژن) و اجزای ماشین‌آلات (مانند پره توربین، شیرآلات و یاتاقان‌ها) دائما در حال افزایش است. به‌طوری‌که در طی دهه اخیر تعداد مواد، ساختارها، ترکیب و کاربردهای جدید به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است. بنابراین نمی‌توان ماشین‌کاری سرعت‌بالا، ماشین‌کاری سخت و در محیط خشک را بدون استفاده از پوشش‌های محافظ سخت و با دوام تصور کرد.

پوشش‌های سخت بر پایه نیتریدها، کاربیدها و بورایدهای فلزات واسطه (مانند TiC، CrN و TiB_2)، پوشش‌های بر پایه کربن (مانند الماس، کربن شبه الماس (DLC))، آلومینا و c-BN ساخته می‌شوند. انتخاب پوشش محافظ مناسب به نحوه و نوع سازوکار سایش در کاربرد موردنظر و خواص مورد نیاز بستگی دارد [۲].

امروزه به‌طور گسترده چندین نوع ساختار پوشش مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتنداز پوشش‌های تک‌لایه، پوشش‌های چندلایه، پوشش‌های نانوکامپوزیتی و پوشش‌های گرادیانی. لذا برحسب نیازهای صنعت بایستی مواد و روش مناسبی را برای لایه‌نشانی به کار گرفت. برخی از نیازهای اصلی و ثانویه صنعت در حوزه پوشش‌دهی در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- الزامات اصلی و ثانویه در ایجاد پوشش‌های سخت [۳]

الزامات اصلی در ایجاد پوشش‌های سخت	نیازهای ثانویه در ایجاد پوشش‌های سخت
✓ چسبندگی عالی پوشش به زیرلایه (ابزار)	✓ ریزساختار بلوری و ریزدانه
✓ حفظ سختی پوشش در دمای کاری ابزار	✓ تنش پسماند فشاری
✓ بالا بودن چقرمگی شکست پوشش	✓ مورفولوژی سطح صاف و عاری از ترک
✓ عدم واکنش‌پذیری پوشش با قطعه کار	✓ ضریب انتقال حرارت پایین

خواص نانوپوشش‌های مرسوم می‌تواند به سه دسته متفاوت تقسیم‌بندی شوند:

۱- خواص ساختاری و ریزساختاری اعم از مورفولوژی، ضخامت پوشش، ساختار بلوری، ترکیب شیمیایی، بافت بلوری و زبری سطحی.

۲- خواص فیزیکی و شیمیایی اعم از زاویه ترشوندگی، خواص حرارتی، مقاومت در برابر اکسیداسیون و مقاومت خوردگی.

۳- خواص مکانیکی و سایشی اعم از سختی، چسبندگی، تنش مکانیکی، استحکام شکست، سایش و اصطکاک [۲].

با کنترل متغیرهای فرآیند لایه‌نشانی، امکان دستیابی به خواص مطلوب برای پوشش میسر خواهد شد. برخی متغیرهای تاثیرگذار عبارتنداز: آماده‌سازی سطح، دما و فشار، سرعت لایه‌نشانی، کنترل ترکیب و سازوکار رشد. همچنین یکسری عواملی دیگر شامل یکنواختی و ابعاد قطعات، هندسه دستگاه، قابلیت چندلایه شدن، قابلیت گرادیانی شدن، تولید پیوسته/غیرپیوسته و مباحث اقتصادی، نیز در انتخاب روش مناسب موثر می‌باشد [۱]. در شکل ۱ علاوه بر متغیرهای فرآیند، خواص مدنظر از پوشش‌های نانوساختار سخت و مقاوم که بایستی برای طراحی مدنظر داشت، آمده است.

پیام آبکار

نشریه پیام آبکار – بهار ۱۴۰۲

متغیرهای فرآیند پوشش‌دهی

آماده سازی سطح دما و فشار سرعت لایه- نشانی کنترل ترکیب سازوکار رشد یکنواختی و ابعاد

هندسه دستگاه

قابلیت چندلایه شدن

قابلیت گرادیانی شدن

تولید پیوسته/غیرپیوسته

مباحث اقتصادی و غیره

برخی خواص نهایی مدنظر برای پوشش

- **چسبندگی**
- پیوند مکانیکی
- پیوند شیمیایی
- پیوند نفوذی
- ضخامت
- یکنواختی
- تخلخل
- ترکیب شیمیایی
- ریزساختار
- اندازه دانه
- جهت بلوری
- مرزدانه
- سختی بالا
- پایداری شیمیایی
- تنش/عیوب کم
- سطح نهایی صاف
- انبساط حرارتی
- هدایت حرارتی
- چقرمگی بالا
- مدول الاستیک کم
- مقاومت به خوردگی
- مقاومت به سایش
- مقاوم به اکسیداسیون
- و غیره

www.irancoat.ir

شکل ۱- دستیابی به خواص مطلوب پوشش‌ها بر اساس متغیرهای فرآیند پوشش‌دهی [۳].

در ذیل مجموع خواص پوشش‌های نانوساختار در چهار دسته معرفی می‌شود:

- استحکام چسبندگی (نوع اتصال، روش‌های ارزیابی کیفی و کمی آن)
- خواص مکانیکی پوشش (سختی، مدول یانگ، چقرمگی شکست، تنش پسماند)
- رفتار تریبولوژیکی پوشش (روانکاری، ضریب اصطکاک، نرخ سایش و سازوکار تخریب)
- رفتار خوردگی پوشش (اعم از خوردگی شیمیایی و اکسیداسیون دما بالا)

در این مقاله صرفا به بررسی استحکام چسبندگی پرداخته شده و در مقاله‌های آتی دیگر خصوصیات پوشش‌ها مورد مطالعه و بررسی قرار خواهد گرفت.

۲- انواع سازوکارهای چسبندگی

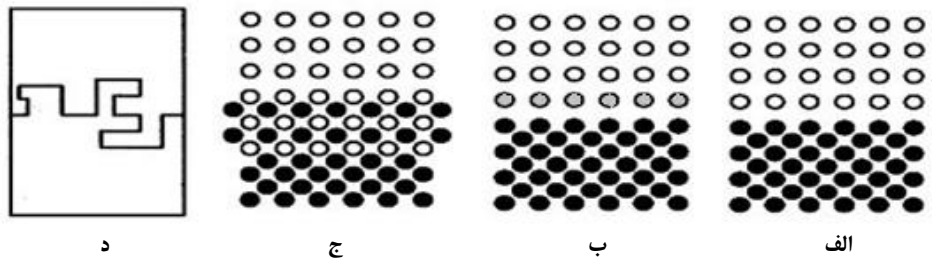
واژه چسبندگی[۱] به برهمکنش بین نزدیک‌ترین اتم‌های مجاور سطوح بین پوشش و سطح زیرلایه مربوط می‌شود. چسبندگی به‌عنوان شرایط موجود که پوشش و زیرلایه یکدیگر را نگه می‌دارند تعریف می‌شود. در این حالت پوشش/زیرلایه یا به‌واسطه نیروهای جاذبه یا به‌واسطه سازوکار اتصال و یا هر دو، یکدیگر را نگه‌داشته‌اند [۴]. برای کاربردهای صنعتی، چسبندگی ضعیف واندروالسی (شکل ۲ الف) چندان کارایی نداشته، لذا سایر سازوکارهای ممکن برای چسبندگی پوشش به زیرلایه در ذیل آمده است:

[۱] Adhesion

۱) **سازوکار اعمال میان‌لایه:** یکی از راهکارهای موثر برای افزایش استحکام چسبندگی پوشش/زیرلایه که از دو جنس مختلف با ساختار بلوری و پارامتر شبکه متفاوت است، استفاده از میان‌لایه می‌باشد (مطابق شکل ۲ ب). به‌عنوان مثال برای چسبندگی مناسب پوشش TiAlN بر WC-Co از میان‌لایه Ti و یا Cr فلزی استفاده شد [۵].

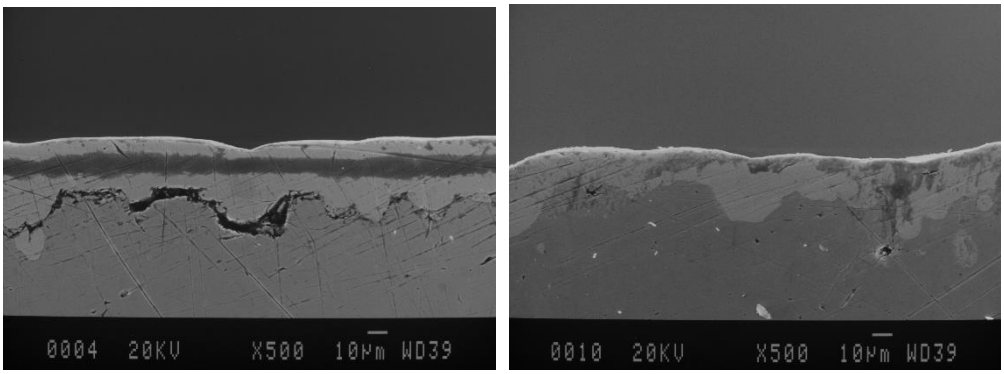
۲) **سازوکار اتصال نفوذی:** به دلیل بالا بودن دمای فرآیند CVD، احتمال نفوذ اتم‌های پوشش در زیرلایه و بالعکس وجود دارد که باعث افزایش استحکام چسبندگی می‌شود (شکل ۲ ج).

۳) **سازوکار قفل مکانیکی:** در فرآیندهایی که دمای لایه‌نشانی پایینی دارند، اعمال بمباران یونی با هدف ایجاد زبری میکرونی، برای دستیابی به چسبندگی از طریق سازوکار قفل مکانیکی است (شکل ۲ د).



شکل ۲- سازوکارهای چسبندگی: الف) نیروی واندروالس، ب) حضور لایه میانی، ج) لایه نفوذی و د) قفل شدن مکانیکی [۴].

همانطور که تصویر SEM سطح مقطع پوشش در شکل ۳ (سمت راست) مشاهده می‌شود، چسبندگی پوشش به زیرلایه از طریق سازوکار قفل مکانیکی فراهم شده است. اما در تصویر سمت چپ، به دلیل وجود آلودگی یا حفره‌های هوا، چسبندگی مناسبی ندارد.



شکل ۳- تصاویر SEM از فصل مشترک پوشش به زیرلایه، چسبندگی مناسب (راست) و نامناسب (چپ).

بی‌شک میان پوشش و زیرلایه بایستی چسبندگی مناسبی وجود داشته باشد تا دیگر خواص بتوانند به‌طور موفقیت‌آمیز و مطلوبی مورد بهره‌برداری قرار گیرند.

در رویکرد آکادمی، چسبندگی به طبیعت پیوند و جزئیات میکروسکوپی اندرکنش‌های شیمیایی و الکتریکی در فصل مشترک آن‌ها متمرکز شده است. در حقیقت فهم جزئیات بیشتر در فصل مشترک به‌وسیله مدل‌های اتمی بوده که تحلیل‌ها چندان موفقیت‌آمیز نبوده است. به این دلیل برای ارزیابی خواص چسبندگی بین پوشش/زیرلایه دیدگاه عمل‌گرایانه، ارزیابی عملی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴].

ضرورت دارد تا مصرف‌کنندگان قطعات پوشش‌دار، استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه را کنترل و ارزیابی نمایند. زیرا تخریب و تضعیف چسبندگی، سازوکار غالب شکست و تخریب اولیه پوشش می‌باشد که عمرکاری و عملکرد آن را محدود می‌سازد. وجود چندین استاندارد و مرجع معتبر در این زمینه از جمله ASTM C۱۶۲٤، ISO۲٦٤٤۳ و VDI۳۱۹۸، نشان از اهمیت این ویژگی از پوشش‌ها است.

۳- عوامل مؤثر بر استحکام چسبندگی

وضعیت فصل مشترک (چسبندگی پوشش به ماده) یکی از پارامترهای مهم پوشش‌دهی است. عوامل زیادی برای کنترل استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه وجود دارد که بایستی در طراحی پوشش آنها را مدنظر قرار داد. در ذیل صرفاً برخی عوامل موثر بر استحکام چسبندگی آمده است:

۱) **وجود آلودگی روی سطح:** گردوخاک، چربی، اکسیدها، مولکول‌های هوا، بخارات آب از جمله آلودگی‌های رایج بر سطح قطعات است که لازم است قبل از فرآیند لایه‌نشانی، در حد مطلوب تمیزکاری صورت گیرد.

۲) **وضعیت آماده‌سازی سطح:** پستی‌بلندی‌ها، سطوح ناهموار و پلیسه‌ها ماشین‌کاری از جمله عوامل مزاحم بر استحکام چسبندگی است که بایستی در حد امکان با ابزارهای ماشین‌کاری دقیق و پولیش‌کاری حذف شده یا به حداقل برسد.

۳) **ویژگی‌های ذاتی دو طرف پوشش و زیرلایه:** در طراحی و انتخاب پوشش مناسب لازم است ویژگی‌های زیرلایه و پوشش را از لحاظ جنس، ساختار بلوری و نوع ماده (مانند فلز/سرامیک) مدنظر قرار داد. استفاده از میان‌لایه مناسب راهکار موثر برای حل این مشکل است.

۴) **وجود تنش پسماند**: از دیگر عوامل مهم تاثیرگذار می‌باشد در استحکام چسبندگی وجود تنش پسماند می‌باشد. به‌عنوان مثال در ضخامت بالای پوشش، تنش پسماند افزایش یافته و موجب کاهش چسبندگی و در نتیجه پوشش پوسته‌پوسته می‌شود. متغیرهای زیادی برای کنترل آن وجود دارد که مراجع معتبر می‌توان بررسی نمود.

۵) **دمای فرآیند لایه‌نشانی:** دمای فرایند از یک طرف باعث نفوذ بیشتر و در نتیجه چسبندگی بهتر

پوشش به زیرلایه می‌شود، اما از طرف دیگر تنش پسماند کششی را افزایش می‌دهد. از این‌رو است که در روش CVD که فرآیند لایه‌نشانی دمای بالایی دارد، اتصال پوشش به زیرلایه با سازوکار نفوذ اتمی پوشش در زیرلایه می‌باشد.

۴- روش‌های ارزیابی استحکام چسبندگی

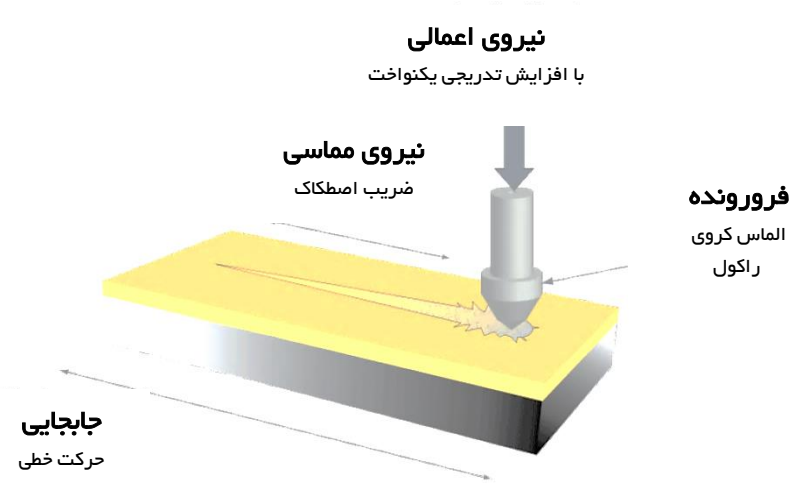
برای ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش/زیرلایه، روش‌های زیادی وجود دارد. در یک دسته‌بندی کلی روش-های ارزیابی استحکام و کیفیت چسبندگی پوشش به زیرلایه، به روش‌های کمّی (آزمون خراش) و کیفی (آزمون راکول‌سی) تقسیم‌بندی می‌شود. لذا در ذیل برخی از این روش‌های پرکاربرد اشاره می‌شود.

۴-۱- آزمون چسبندگی خراش[۲]

آزمون چسبندگی خراش، یکی از روش‌های کمّی در ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه است که مطابق استاندارد ASTM C۱۶۲٤ مورد استفاده تحقیقاتی و صنعتی قرار دارد.

در این روش، یک قلم الماس با افزایش بار نرمال در طول مشخصی بر سطح پوشش کشیده می‌شود و آسیب دیدن پوشش در برابر بار اعمال‌شده ارزیابی می‌شود. در این روش میزان چسبندگی پوشش به زیرلایه به‌صورت عددی و برحسب نیوتن بیان می‌شود که اصطلاحا *بار بحرانی*[۳] گویند. در ضمن همان‌طور که در شکل ۴ نشان داده‌شده است، این روش مخرب می‌باشد.

[۲] Scratch adhesion test
[۳] Critical Load (L_c)

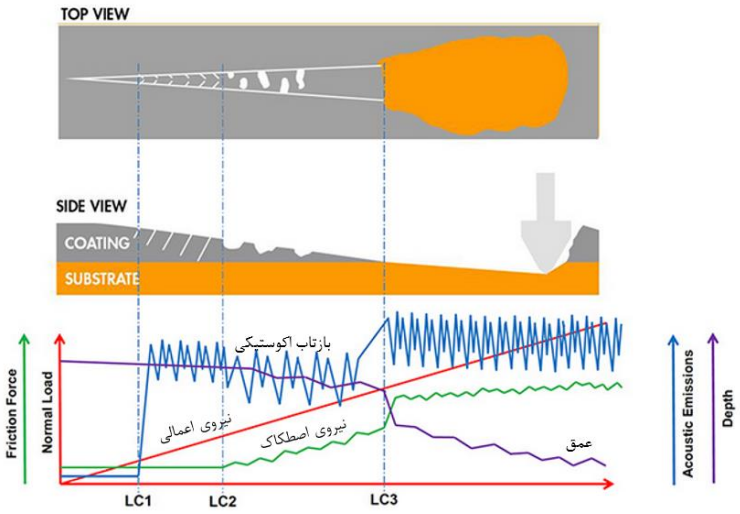


شکل ۴- طرح‌واره‌ای از آزمون خراش برای ارزیابی چسبندگی و مؤلفه‌های اثرگذار بر آن [۶].

در مسافت مشخص (مثلا یک سانتی‌متر) نیروی تدریجی یکنواخت از صفر تا ۱۰۰ نیوتن بر فرورونده الماسی وارد می‌شود. چون نیروی اعمالی به‌طور پیوسته در حال افزایش است، در نیرویی که موجب کنده شدن پوشش از زیرلایه می‌شود، حداکثر استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه قلمداد می‌شود. لذا این نیروی بحرانی به‌عنوان عدد مشخصی برای چسبندگی پوشش به زیرلایه در نظر گرفته می‌شود [۷]. مطابق شکل ۵، برای ارزیابی و تحلیل بیش‌تر، از عبارت‌های L_{C1}، L_{C2} و L_{C3} استفاده می‌شود:

- در L_{C1} اولین ترک‌ها در مسیر شیار خراش مشاهده می‌شود.
- در L_{C2} پوشش خرد شده ولی کماکان چسبندگی دارد.
- اما در L_{C3} پوشش به صورت کامل جدا شده و زیرلایه قابل رویت می‌باشد.

همچنین نمودار آکوستیکی از مسیر خراش، عمق فرورفتگی و نیروی اصطکاک از نمودار خروجی دستگاه قابل دستیابی می‌باشد.



شکل ۵- طرحواره مسیر شیار در آزمون خراش نتایج بدست آمده از دستگاه.

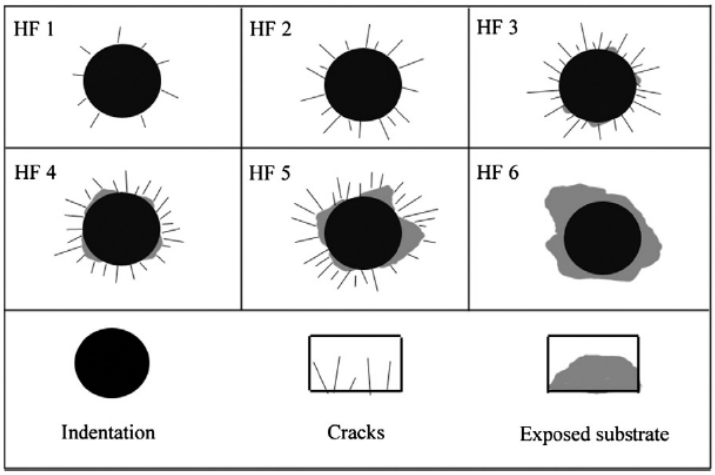
۲-۴- آزمون چسبندگی راکول‌سی[۴]

آزمون چسبندگی راکول‌سی، یک روش کیفی برای ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه است که مطابق استاندارد VDI۳۱۹۸ و ISO۲٦٤٤۳ انجام می‌شود. در این آزمون با استفاده از اثر فرورونده که بر سطح پوشش اعمال می‌شود، امکان ارزیابی کیفی میزان چسبندگی امکان‌پذیر می‌شود. در این روش، ابتدا با استفاده از آزمون راکول‌سی با نیروی اعمالی ۱۵۰ کیلوگرم (۱۴۷۰ نیوتن) و به مدت ۲۰ ثانیه نیرو اعمال می‌شود. بعد از باربرداری با میکروسکوپ نوری وضعیت پوشش در پیرامون اثر فرورونده مشاهده و بررسی می‌شود. نکته قابل ذکر که سختی زیرلایه در این روش، نباید کمتر از ۵۳ راکول‌سی باشد. اما اگر سختی زیرلایه کمتر از آن باشد، بایستی

[۴] Rockwell-C adhesion test

از آزمون راکول‌بی با نیروی ۱۰۰ کیلوگرم استفاده شود.

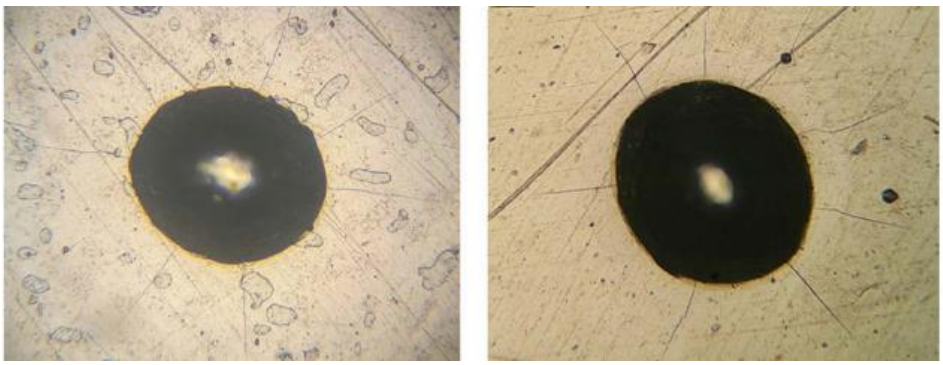
مطابق استاندارد VDI۳۱۹۸ (شکل ۶)، شش حالت از HF۱ تا HF٦ در ارزیابی کیفی چسبندگی پوشش در نظر گرفته شده است (اما برای استاندارد ISO۲٦٤٤۳ چهار طبقه درنظر گرفته شده است). با مشاهدات اثر فرورفتگی (راکول‌سی) و مقایسه با یکی از شش حالت تعیین‌شده، می‌توان نسبت به کیفیت از مطلوب (HF۱) تا غیرقابل قبول (HF٦) ارزیابی نمود [۹][۸].



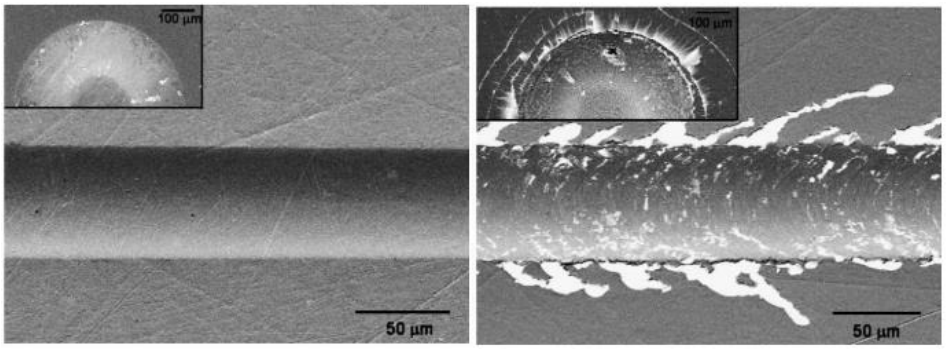
شکل ۶- ارزیابی کیفی چسبندگی پوشش به زیرلایه مطابق استاندارد VDI۳۱۹۸ [۸] [۵].

بر اساس استاندارد VDI۳۱۹۸، پوشش‌های دارای حالت HF۱ تا HF۳ از نظر کنترل کیفی قابل قبول و پوشش‌های HF٤ تا HF٦ مردود و غیرقابل قبول می‌باشد. البته شکل ظاهری HF۳ و HF٤ در مرز پوشش‌های قبول و مردود قرار داشته که در این میان نقش فرد کنترل‌کننده و حساسیت کار، تعیین‌کننده می‌باشد. لذا این روش با توجه به سریع و اقتصادی بودن نسبت به روش تست خراش، در کاربردهای صنعتی قابل اعتماد می‌باشد [۸]. به‌عنوان نمونه در پژوهش تیم نگارنده، به‌دلیل استفاده از قفل مکانیکی و میان‌لایه مناسب برای پوشش CrN

و CrAlN، چسبندگی عالی در حد HF۱ گزارش شد [۱۰]. همانطور که در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، یکسری ترک‌ها تولید شده است که مجاز می‌باشد. همچنین در شکل ۸ مطابقت ارزیابی چسبندگی کیفی و کمی را کنار یکدیگر نشان می‌دهد [۱۲][۱۱].



شکل ۷- ارزیابی کیفی چسبندگی پوشش CrN و CrAlN مطابق استاندارد VDI۳۱۹۸ [۱۰].



شکل ۸- مطابقت در نتایج ارزیابی کیفی و کمی چسبندگی پوشش TiAlN [۱۲].

۳-۴- آزمون چسبندگی خراش متقاطع[۵](برای پوشش فلزی و پلیمری مانند رنگ‌ها)

آزمون خراش متقاطع از روش‌های ارزیابی پوشش‌های نرم از جمله پوشش‌های فلزی است که بر زیرلایه

[۵] Cross-cut adhesion test

پلاستیکی اعمال شده است. لذا به هیچ‌وجه امکان ارزیابی چسبندگی پوشش‌های سخت نیتریدی با این روش وجود ندارد. نمونه مثال آن پوشش نازک آلومینیومی است که بر ABS پلیمری و با روش PVD تبخیر حرارتی اعمال می‌شود (کاربرد در کاسه چراغ خودرو یا لوازم خانگی). برای این منظور از استاندارد ASTM D۳۳۵۹ استفاده می‌شود. هرچند این روش برای ارزیابی استحکام چسبندگی پوشش‌های پلیمری و رنگ‌ها استفاده می‌شود، برای پوشش‌های فلزی نیز قابل اعتماد می‌باشد.

در این آزمون با استفاده از ابزار مخصوص در دو جهت عمود بر هم خطوطی بر پوشش اعمال می‌شود، سپس چسب مخصوصی روی آن قرار داده و با نیرو عمودی و یکباره چسب جدا می‌شود. میزان کندگی پوشش در محل خطوط، شاخص میزان چسبندگی است که در شکل ۹ قابل مشاهده می‌باشد. در این استاندارد با توجه به درصد جدایش پوشش از زیرلایه، کدهای B۰ تا B۵ به آن تعلق می‌گیرد.

طبقه	بدون کندگی					کندگی زیاد
کندگی ٪	۰ درصد	کمتر از ۵ درصد	بین ۵ تا ۱۵ درصد	بین ۱۵-۳۵ درصد	بین ۳۵-۶۵ درصد	بالای ۶۵ ٪
کد طبقه	۵B	۴B	۳B	۲B	۱B	۰B

شکل ۹- معیار ارزیابی چسبندگی پوشش نرم (فلزی) مطابق استاندارد ASTM D۳۳۵۹.

یادآوری می‌شود به هیچ‌وجه با استفاده از این روش برای ارزیابی پوشش‌های سرامیکی نمی‌توان استفاده نمود. زیرا سختی پوشش‌های نیترید فلزات واسطه مانند TiN از سختی کاتر مورد استفاده در این آزمون بالاتر است و چه بسا امکان خط انداختن بر پوشش وجود ندارد!

مراجع

[۱] علم‌خواه حسن، *مهندسی نانوپوشش های سخت و مقاوم*، چاپ اول، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا، ۱۳۹۷.

[2] K. Holmberg and A. Matthews, *Coating tribology*, First. Amsterdam: Elsevier Science B.V., 1998.

[3] R. F. Bunshah, *Handbook of Hard Coatings; Deposition technologies, Properties and Applications*. USA: Noyes Publications, 2001.

[4] M. Ohring, *Materials science of thin films; deposition and structure*. New York, 1991.

[5] H. Du, H. Zhao, J. Xiong, and G. Xian, “Effect of interlayers on the structure and properties of TiAlN based coatings on WC-Co cemented carbide substrate,” *Int . J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 37, pp. 60–6۶, ۲۰۱۳.

[6] S. J. Bull, “Tribology of carbon coatings: DLC, diamond and beyond,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 4, pp. 827–836, 1995.

[7] K. Holmberg and A. Matthews, *Coatings Tribology; Properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering*, Second Edi. Elsevier, 2009.

[8] N. Vidakis, A. Antoniadis, and N. Bilalis, “The VDI 3198 indentation test evaluation of a reliable qualitative control for layered compounds,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 143–1۴۴, □□. ۴۸۱□۴۸۵, ۲۰۰۳.

[9] W. Heinke, A. Leyland, A. Matthews, G. Berg, C. Friedrich, and E. Broszeit, “Evaluation of PVD nitride coatings, using impact, scratch and Rockwell-C adhesion tests,” *Thin Solid Films*, vol. 270, pp. 431–438, 1995.

[10] K. Jokar, H. Elmkhah, A. Fattah-Alhosseini, K. Babaei, and A. Zolriasatein, “Comparison of the wear and corrosion behavior between CrN and AlCrN coatings deposited by Arc-PVD method,” *Mater. Res. Express*, vol. 6, p. ۱۱۶۴۲۶, ۲۰۱۹.

[11] D. Lee, S. Lee, and J. Lee, “The structure and mechanical properties of multilayer TiN/(Ti0.5Al0.5)N coatings deposited by plasma enhanced

chemical vapor deposition,” *Surf. Coat. Technol.*, vol. 170, pp. 433–437, ۲۰۰۳.

[12] P. W. Shum, W. C. Tam, K. Y. Li, Z. F. Zhou, and Y. G. Shen, “Mechanical and tribological properties of titanium – aluminium – nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering,” *Wear*, vol. 257, pp. ۱۰۳۰–۱۰۴۰, ۲۰۰۴.