مروری بر نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش

مرضیه قاسمی قلعه فرنگی*[1]، مجید تقیان[2]

۱- دانشجو کارشناسی، گروه مهندسی مواد، مرکز آموزش عالی آباده، دانشگاه شیراز، ایران، رایانامه نویسنده اول: (marzieh.qasemi.2003@gmail.com)

۲- استادیار، گروه مهندسی مواد، مرکز آموزش عالی آباده، دانشگاه شیراز، ایران (Majid.taghian@yahoo.com)

چکیده

نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش به عنوان یکی از فناوری‌های موثر در مهندسی سطح، نقش مهمی در افزایش دوام قطعات تحت سایش، خوردگی و دماهای بالا دارند. این پوشش‌ها به دلیل ریزساختار نانومتری، سختی بالا، چسبندگی مناسب و پایداری حرارتی، عملکردی برتر نسبت به پوشش‌های سنتی ارائه می‌دهند. انواع اصلی آن‌ها شامل پوشش‌های سرامیکی، نانو کامپوزیتی، نانو فلزی و نانو کربنی است که بسته به نوع زیرلایه و شرایط کاری انتخاب می‌شوند. روش‌های مختلف رسوب‌دهی مانند: PVD ، CVD، روکش لیزری، پاشش حرارتی و سل-ژل امکان ایجاد لایه‌هایی با ریزساختار کنترل شده و خواص تقویت شده را فراهم می‌کنند. نتایج آزمون‌های تریبولوژی نشان می‌دهد که این پوشش‌ها موجب کاهش قابل توجه سایش و اصطکاک و افزایش طول عمر قطعات در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، هوافضا و انرژی می‌شوند. با وجود این، چالش‌هایی مانند کنترل چسبندگی، تنش‌های پسماند و هزینه تولید همچنان پابرجاست. به طور کلی نانو پوشش‌ها با ارائه ترکیبی از سختی، چقرمگی و مقاومت محیطی، یک راهکار کارآمد برای ارتقای سطحی در کاربردهای صنعتی پیشرفته محسوب می‌شوند.

کلمات کلیدی: نانو پوشش‌های سخت، مقاومت به سایش، روش‌های پوشش‌دهی.

۱. مقدمه

تحولات شگرف دهه‌های اخیر در حوزه مهندسی سطح، ظهور نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش را به عنوان راهکاری پیشرفته برای مقابله با چالش‌های عمده‌ای چون سایش، خوردگی، اصطکاک و تخریب حرارتی در قطعات صنعتی به همراه داشته است. این پوشش‌ها با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصر به فرد نانو ساختارها توسعه یافته‌اند و امروزه به عنوان یکی از ارکان اساسی در صنایع پیشرفته‌ای همچون هوافضا، خودروسازی، انرژی و پزشکی نقش آفرینی می‌کنند. مکانیزم عملکرد آن‌ها مبتنی بر پدیده‌های نانو مقیاس از جمله اثر اندازه دانه، افزایش چگالی مرزدانه‌ها و تقویت برهم کنش‌های فصل مشترک است که در نهایت منجر به بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و اصطکاکی و سایشی می‌شود. این ویژگی‌ها شامل سختی فوق‌العاده بالا، چقرمگی بهبود یافته، ضریب اصطکاک پایین و پایداری حرارتی مطلوب هستند که در کنار هم توانسته‌اند محدودیت‌های پوشش‌های سنتی را پشت سر بگذارند [۱]. دراین‌راستا دسته‌بندی متنوعی از نانوپوشش‌ها توسعه یافته است؛ پوشش‌های سرامیکی سخت مانند: TiN و TiAlN و Al_2O_3 با وجود سختی بسیار بالا، و مشکل چقرمگی شکست پایین موجه‌اند [۱و۲]. درپوشش‌های نانو کامپوزیتی، ذرات تقویت کننده سرامیکی سخت(TiC و WC و SiC) در یک

بستر(ماتریس) فلزی یا سرامیکی توزیع شده و منجر به به روز ترکیب برجسته‌ای از خواص مکانیکی و شیمیایی می‌شوند [۳و۴]. پوشش‌های نانو فلزی توانسته‌اند تعادلی مطلوب میان سختی و چقرمگی ایجاد کنند [۵]. و پوشش‌های نانو کربنی مانند: DLC دوپ شده با گرافن به دلیل ضریب اصطکاک پایین و مقاومت سایشی فوق‌العاده، جایگاه ویژه‌ای در سیستم‌های لغزشی و قطعات تحت بار بالا یافته‌اند [۶]. انتخاب هر یک از این پوشش‌ها وابسته به نوع زیرلایه، شرایط کاری و الزمات عملکردی است. روش‌های مختلفی برای اعمال این پوشش‌ها وجود دارد، که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند. رسوب بخار فیزیکی(PVD) امکان ایجاد پوشش‌های نازک با ساختار یکنواخت را فراهم می‌کند [۷و۸]. در حالی که رسوب بخار شیمیایی(CVD) قادر به تولید پوشش‌های متراکم و یکنواخت بر روی سطوح پیچیده است [۹،۲و۱۰]. روکش لیزری با ایجاد اتصال متالورژیکی قوی به زیرلایه، پوشش‌هایی با چسبندگی بالا تولید می‌کند [۹،۱و۱۱]. و پاشش حرارتی برای ایجاد لایه های ضخیم با قابلیت تحمل بار سنگین به کار می‌رود [۲و۱۲]. روش سل-ژل نیز به عنوان فرآیندی کم هزینه برای تولید پوشش‌های نازک با کنترل دقیق ترکیب شیمیایی مطرح است [۱]. کیفیت نهایی این پوشش‌ها به شدت وابسته به کنترل دقیق پارامترهای فرآیندی است. ارزیابی عملکرد این پوشش‌ها معمولا از طریق آزمون‌های استاندارد تریبولوژی مانند: تست پین روی دیسک[1]، تست توپ روی دیسک[2]، تست بلوک روی دیسک[3] و همراه با آنالیزهای پیشرفته میکروسکوپی(SEM و EDS) انجام می‌شود [۱۶-۱۳]. این آزمون‌ها امکان چسبندگی و پایداری حرارتی پوشش‌ها را ایجاد کرده‌اند و مبنای مقایسه میان روش و ترکیبات مختلف هستند. با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌هایی همچون چسبندگی ناکافی به زیرلایه‌های خاص، تنش‌های پسماند، محدویت در پایداری حرارتی و هزینه‌های بالای تولید باقی مانده‌اند [۳].

۲. دسته بندی نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش

۱.۲. پوشش‌های سرامیکی سخت:

پوشش‌های سرامیکی مانند (TiN و Al_2O_3 و TiC) به منظور ایجاد لایه‌های با سختی بسیار بالا بر روی سطح قطعات اعمال می‌شوند. این پوشش‌ها به طور موثری مقاومت سطح را در برابر سایش و فرسایش افزایش داده و در بسیاری از موارد موجب کاهش عمق فرسایش می‌گردند. علاوه بر این، برخی از پوشش‌ها دارای پایداری حرارتی مطلوبی نیز هستند. با این حال، به دلیل ماهیت سرامیکی آن‌ها، معمولا از چقرمگی شکست پایین‌تری برخوردارند و نسبت به ترک خوردگی حساس‌تر هستند؛ بنابراین کنترل چسبندگی این پوشش‌ها به زیرلایه ممکن است با چالش‌هایی همراه باشد. کاربرد اصلی این پوشش‌ها در ابزارهای برش، قالب‌ها و قطعاتی است که در معرض سایش شدید قرار دارند، به ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی است [۱]. مطالعه‌ای مقایسه‌ای که در سال ۲۰۲۵ توسط انجمن ASMF منتشر شده به روش PVD از جمله TiN و TiAlN و پوشش‌های ترکیبی را در کاربردهای برشی مورد بررسی قرار داده است . نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پوشش‌های چند لایه و به ویژه TiAlN، در حفظ سختی در دماهای بالا و افزایش عمر ابزار، عملکرد بهتری نسبت به پوشش‌های تک لایه‌ای مانند TiN دارند [۲].

[1] **Pine-on-Disc**
[2] **Ball-on-Disc**
[3] **Block-on-Ring**

۲.۲.پوشش‌های نانو کامپوزیتی (ذرات سخت در ماتریس فلزی یا سرامیکی)

هدف اصلی از توسعه پوشش‌های نانو کامپوزیتی، دستیابی به ترکیبی بهینه از خواص مکانیکی و شیمیایی شامل سختی بالا، چقرمگی مناسب، مقاومت سایشی و مقاومت خوردگی است ؛ ویژگی‌هایی که در پوشش‌های تک فاز فلزی یا سرامیکی به سختی به صورت هم زمان حاصل می‌شوند. در این نوع پوشش‌ها، ذرات نانو مانند (WC، TiC، SiC و Al_2O_3) درون ماتریس فلزی مانند (Al، Co، TiوNi) به صورت یکنواخت توزیع می‌شوند. این ساختار چند فازی موجب بهبود رفتار مکانیکی ، افزایش مقاومت تریبولوژی و ارتقاء عملکرد در دماها و فشارهای بالا اشاره کرد. در ابزارهای برشی و قالب‌ها، قطعات موتور، توربین و صنایع خودروسازی، صنایع دریایی و نفت و گاز، سیستم تریبولوژی دقیق (یاتاقان‌ها، پمپ‌ها)، تجهیزات پزشکی استفاده می‌شوند [۳]. نقش نانو کامپوزیت‌ها و تقویت کننده‌های کاربیدی در پوشش‌های لیزری و پاشش حرارتی، مطالعات انجام شده در بازه زمانی ۲۰۲۳ تا ۲۰۲۵ نشان داده‌اند که افزودن ذرات کاربیدی نانو مانند TiC و WC به ماتریس‌های فلزی پایه نیکل یا کبالت، تاثیر قابل توجهی در بهبود عملکرد پوشش‌های سطحی دارد. این ترکیبات نانو کامپوزیتی، هنگامی که با روش‌هایی مانند پاشش حرارتی با سرعت بالا (HVOF) یا لیزر کلدینگ اعمال می‌شوند، موجب افزایش چشمگیر مقاومت سایشی و پایداری در برابر محیط‌های خورده و ساینده می‌گردند. همچنین افزایش سختی موضعی، بهبود انسجام ساختاری، و ارتقاء مقاومت در برابر تخریب سطحی از جمله مزایای مهم است [۴]. جدول۱ داده‌های تجربی و مرور مطالعات انجام شده در سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۱۸ را نشان می‌دهد.

بهبود نسبت به پوشش پایه	ویژگی
افزایش ۲ تا ۳ برابر نسبت به پوشش فلزی خالص	سختی
کاهش نرخ سایش حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد	مقاومت سایشی
بهبود قابل ملاحظه به دلیل انتقال موثر تنش بین فازها	چقرمگی شکست
حفظ سختی تا دماهای حدود ۵۰۰ تا ۶۰۰ سانتی‌گراد	پایداری حرارتی

جدول۱- پوشش‌های نانو کامپوزیتی نسبت به پوشش‌های پایه فلزی [۳و۱۷]،

۳.۲. پوشش‌های نانو فلزی

کاربرد فلزات یا آلیاژهای فلزی با ساختار نانومتری، چه به عنوان پوشش مستقیم و چه به عنوان ماتریس، با هدف دستیابی به ترکیبی از ویژگی‌های مطلوب شامل سختی مناسب، چقرمگی بالا و چسبندگی بهینه. در مقایسه با فلزات توده‌ای، پوشش‌های نانو فلزی قادرند سختی و مقاومت سایشی خوبی داشته باشند. چقرمگی و قابلیت تحمل تنش در این پوشش‌ها معمولا بالاتر از پوشش‌های سرامیکی است. این دسته از پوشش‌ها به طور گسترده در زیرلایه‌های فلزی، تجهیزات صنعتی با شرایط سایش متوسط، قطعات خودرو و صنایع عمومی مورد

استفاده قرار می‌گیرند؛ جایی که دستیابی به ترکیبی متوازن از سختی، چقرمگی و مقاومت به خوردگی ضروری است [۵].

۴.۲. پوشش‌های نانو کربنی

به کارگیری پوشش‌های کربنی سخت مانند : (DLC)[1] یا افزودن گرافن و نانو صفحات کربنی به پوشش‌ها، با هدف کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت سایشی و بهبود پایداری در محیط‌های خورنده. پوشش‌های DLC به عنوان یکی از سخت‌ترین پوشش‌ها شناخته شده، دارای ضریب اصطکاک بسیار پایین هستند و عملکرد مناسبی در کاهش سایش ارائه می‌دهند. افزودن گرافن یا نانو صفحات کربنی باعث کاهش نرخ سایش می‌شوند. چالش‌هایی همچون چسبندگی ناکافی به زیرلایه، ایجاد تنش‌های پسمانده، حساسیت به ترک خوردگی در ضخامت‌های زیاد و دشواری در کنترل شرایط رسوب‌دهی مطرح است. در سیستم‌های لغزشی، ابزارهای دقیق، قطعات تحت اصطکاک بالا، صنایع نیازمند کاهش مصرف انرژی مانند: تجهیزات دریایی، پمپ‌ها، یاتاقان‌ها؛ استفاده از این پوشش‌ها می تواند عملکرد و طول عمر قطعات را بهبود دهد [۶]. پیشرفت‌های اخیر در حوزه پوشش‌های کربنی نوعDLC نشان می‌دهد که ساختارهای ترکیبی نظیرDLC با فازهای الماس ریزبلور و پوشش‌های هیبریدیTiN/DLC قادرند به طور قابل توجه‌ای ضریب اصطکاک و نرخ سایش را کاهش دهند، در حالی که هم زمان سختی و مقاومت سایشی لایه را افزایش می‌دهند. مطالعات مروری که در سال‌های۲۰۲۴تا۲۰۲۵ انجام شده است تاکید می‌کنند؛ که یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در پوشش‌های DLC، چسبندگی محدود به زیر لایه‌های فلزی است [۱۸]. جدول۲ به مقایسه پیشرفت‌های اخیر گروه‌های نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش می‌پردازد.

جدول ۲- مقایسه پیشرفت‌های اخیر،

رفتار فرسایشی	سختی	چسبندگی به زیرلایه	حساسیت به دما و خوردگی	گروه پوشش
کاهش سایش در بار بالا، شکست ترد همچنان چالش	بالاترین سختی؛ طراحی نانو ساختار و کنترل فاز ها برای افزایش سختی	بهبود با لایه‌های میانی و پیش درمان سطحی	پایداری حرارتی بالا، حساسیت به ترک در سیکل حرارتی، مقاومت خوردگی وابسته به ترکیب	سرامیکی سخت
کاهش اصطکاک و فرسایش با فیلرهای چند بعدی	افزایش سختی با زیر دانه‌سازی و نانو فیلرها	چسندگی بهتر از سرامیک؛ وابسته به رسوب‌دهی	پایداری دمایی متوسط، مقاومت خوردگی وابسته به فلز / فیلر	نانو فلزی
کاهش چشمگیر نرخ فرسایش تا ۸۵درصد	افزایش سختی تا ۲۷درصد با نانو-WC	چسبندگی بهتر از سرامیک؛ وابسته به پارامترهای فرایند	پایداری مناسب در محیط‌های خورنده و دماهای متوسط/ بالا؛ حساس به تخلخل و فاز ثانویه	نانو کامپوزیتی
کاهش زیاد اصطکاک و سایش؛ ساختارهای ترکیبی عملکرد برتر	سختی بالا	چالش اصلی چسبندگی؛ راهکار: لایه‌های میانی و پیش درمان سطحی	حساسیت به دماهای بالا؛ افزودن گرافن مقاومت به خوردگی را بهبود می‌دهد.	نانو کربنی

[1] **Diamond-Like Carbon**

۳. روش‌های پوشش‌دهی نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش

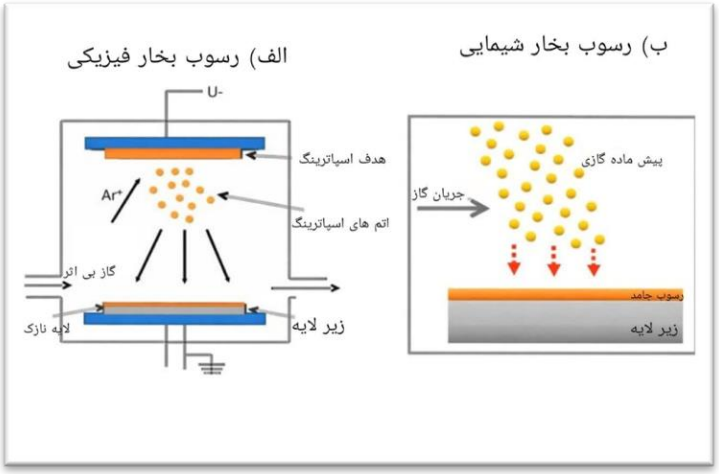
۱.۳. رسوب بخار فیزیکی (PVD)[1]

روش PVD برای تولید پوشش‌های نازک (معمولا چند میکرومتر یا کمتر) با سختی بالا، قابلیت کنترل ضخامت، ساختار یکنواخت و چسبندگی مناسب به زیرلایه توسعه یافته است. این پوشش‌ها به منظور افزایش مقاومت سطحی در برابر سایش و کاهش اصطکاک کاربرد دارند و قادراند به ایجاد سختی بسیار بالا، و کاهش نرخ سایش نسبت به زیر لایه بدون پوشش را تا چند برابر امکان پذیر می‌سازند [۷]. این روش امکان تولید پوشش‌های چند لایه، نانو ساختار و ترکیبی با ریزساختار بهینه را ایجاد می‌کند [۸]. افزایش سختی لایه به تنهایی تضمین کننده بهبود عملکرد سایشی نیست؛ عواملی مانند چسبندگی، تنش‌های باقی‌مانده، ضخامت پوشش، زاویه برخورد ذرات و نوع زیر لایه تاثیر بسزایی دارند؛ به دلیل این که این پوشش‌ها بسیار نازک هستند، ممکن است برای کاربردهای دارای سایش شدید یا نیاز به ضخامت زیاد مناسب نباشند. به عنوان نمونه، مطالعات نشان داده‌اند که پوشش TaN با ضخامت حدود ۲.۵ تا ۳ میکرومتر بر روی زیر لایه آلیاژ WC-Co در برخی شرایط علمی عملکرد سایشی ضعیف تر از انتظار داشته است، که این موضوع اهمیت کنترل پارامترهای فرآیندی، طراحی ریزساختار و بهینه‌سازی شرایط رسوب دهی را فراهم می‌کند [۷]. شکل ۱ الف) شماتیک روش PVD را نشان می‌دهد.

۲.۳. رسوب بخار شیمیایی(CVD)[2]

فرآیند رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) با هدف ایجاد پوشش‌های متراکم، چسبنده و یکنواخت بر روی سطوح مختلف توسعه یافته است. این روش به ویژه در مواردی کاربرد دارد که قطعه دارای هندسه‌ی پیچیده بوده یا نیاز به پوششی با پایداری حرارتی و شیمیایی بالا وجود داشته باشد. یکی از ویژگی‌های برجسته CVD، توانایی آن در پوشش‌دهی یکنواخت سطوح داخلی و نواحی با دسترسی دشوار است، که این ویژگی آن را برای کاربردهای صنعتی دقیق و دمای بالا بسیار ارزشمند می‌سازد. فرآیند CVD معمولا در دماهای بالا (اغلب بالاتر از ۸۰۰درجه سانتی‌گراد) انجام می‌شود، که ممکن است برای زیرلایه‌های حساس به حرارت نامناسب باشد. علاوه بر این، به دلیل نیاز به کنترل دقیق پارامترهای فرآیندی و تجهیزات پیچیده، هزینه اجرای این روش نسبت به برخی فرآیندهای پوشش‌دهی فیزیکی PVD بیشتر است [۹]. پوشش‌های تولید شده به روش CVD معمولا دارای چسبندگی، سختی و یکپارچگی ساختاری بسیار بالایی هستند وعملکرد قابل توجهی در برابر سایش، خوردگی و اکسیداسیون از خود نشان می دهند. به عنوان نمونه، پوشش‌های کاربید تنگستن WC تهیه شده به روش CVD عملکرد بهتری نسبت به پوشش‌های حاصل از عملیات سخت کروم از نظر مقاومت سایشی و دوام حرارتی نشان داده‌اند. این روش همچنین امکان تولید پوشش‌هایی با ریزساختار کنترل شده و خصوصیات مکانیکی را برای شرایط کاری شدید ایجاد می‌کند [۲و۱۰]. شکل ۱ب) شماتیک روش CVD را نشان می‌دهد.

[1] **PVD: Physical Vapor Deposition**
[2] **CVD: Chemical Vapor Deposition**



شکل ۱- تصویر شماتیک فرآیندهای الف - PVD ب - CVD [۲].

۳.۳. روکش لیزری[1]

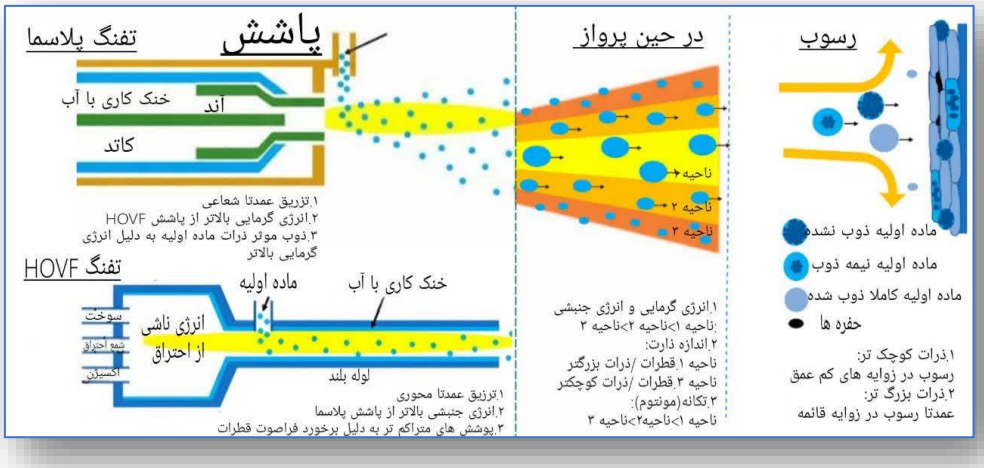
پوشش‌دهی لیزری یا لیزر کلَدینگ یکی از روش‌های پیشرفته‌ی سطح است که با هدف ایجاد لایه‌های پوششی دارای اتصال متالورژیکی به زیرلایه، ضخامت نسبتا زیاد، سختی بالا و مقاومت مطلوب در برابر سایش و خوردگی به کار می‌رود. این روش معمولا در شرایط کاری شدید مانند: فشار و دمای بالا یا محیط‌های ساینده مورد استفاده قرار می‌گرد. در این فرآیند پرتو لیزر موجب ذوب موضعی سطح زیرلایه و ذرات پودر پوشش دهنده شده و پس از انجماد سریع، یک لایه‌ی یکنواخت با چسبندگی عالی و ساختار متراکم ایجاد می‌شود. فرآیند نسبت به پارامترهای لیزر بسیار حساس بوده و در صورت کنترل نشدن ممکن است تنش حرارتی، ترک خوردگی یا تغییر فاز در پوشش رخ دهد [۱و۹]. نتایج پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که انتخاب بهینه‌ی ترکیب پودر، تنظیم دقیق پارامترهای لیزری(توان، سرعت اسکن، نرخ تغذیه پودر) و استفاده از افزودنی‌های مناسب می تواند به طور قابل توجهی مقاومت به سایش و دوام پوشش‌ها را بهبود ببخشد؛ برای نمونه در پوشش چند لایه Fe901 بر روی فولاد ۶۵Mn سختی لایه تا حدود ۳.۵برابر زیرلایه افزایش یافت [۱۱].

۴.۳. پاشش حرارتی[2]

هدف اصلی این فرآیند، ایجاد پوشش‌هایی نسبتا ضخیم با چگالی بالا و قابلیت تحمل بارهای سایشی، خوردگی و فرسایش شدید است. پاشش حرارتی امکان تولید پوشش‌هایی با تنوع گسترده مواد شامل فلزات، آلیاژها، سرامیک‌ها وکامپوزیت‌ها را فراهم می‌کند. مطالعات نشان داده‌اند که پوشش‌های حاصل از روش‌هایی مانندHVOF و پلاسما، عملکرد بهتری دارند. این پوشش‌ها به ویژه در محیط‌های صنعتی سنگین، موجب افزایش چشمگیر مقاومت سایشی می‌شوند. کنترل دقیق ضخامت، یکنواختی ریزساختار، چسبندگی و میزان تخلخل در روش‌های پاشش حرارتی نسبت به فرآیندهای پوشش‌دهی نازک(PVDوCVD) چالش برانگیزتر است. به علاوه

[1] **Laser Cladding**
[2] **Thermal Spraying**

ضخامت زیاد پوشش لزوما به بهبود عملکرد منجر نمی‌شود؛ زیرا کیفیت اتصال به زیرلایه، پارامترهای فرایندی و ویژگی مواد نقش تعیین کننده‌ای در رفتار نهایی پوشش دارند [۲و۱۲]. مقایسه هر دو روش پاشش پلاسما و HOVF در شکل۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیک فرآیندهای اسپری پلاسما وHVOF [۲].

۵.۳. سل-ژل[1]

روش سل-ژل یکی از فرآیندهای کم هزینه و کار آمد برای تولید پوشش‌های سرامیکی و هیبریدی با قابلیت کنترل دقیق ترکیب و ضخامت لایه است. این روش به ویژه در کاربردهایی مورد توجه قرار میگیرد که نیازمند ایجاد فیلم‌های نازک با ریزساختار یکنواخت، چگالی مناسب، مقاومت خوردگی مناسب و بهبود رفتار سایشی در شرایط کاری متوسط هستند. مشروط بر آن که پارامترهای فرآیندی همچون نرخ تبخیر، حرارت‌دهی و زمان ژل شدن به درستی کنترل شوند. برای پوشش‌دهی سطوحی است که نیازمند افزایش مقاومت خوردگی، اکسیداسیون یا سایش خفیف تا متوسط مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ در حالی که ضخامت‌های زیاد یا توان تحمل بارهای سنگین ضرورت ندارد. هزینه تولید پایین و سهولت فرآیند نسبت به روش‌های پیشرفته‌تری مانند پاشش حرارتی یا CVD است [۱]. Kumar و همکارانش با به کارگیری نانو ذرات مثل TiO_2 و ZrO_2 در ترکیب با سل-ژل برای افزایش سختی، مقاومت به خراش و سایش پوشش‌ها پرداخته‌اند [۱۹]. جدول۳ به مقایسه روش‌های پوشش دهی نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش می‌پردازد.

[1] **Sol-Gel**

جدول ۳- مقایسه روش های پوشش دهی،

کاربردها و محل استفاده	ویژگی‌ها و پیشرفت‌های اخیر	روش پوشش‌دهی
ابزارهای برش(مته،فرز)، قطعات موتور خودرو، توربین‌های گازی، صنایع هوافضا	توسعه پوشش‌های سرامیکی سخت با مقاومت بالا در برابر سایش و فرسایش، بهبود عملکرد در دماهای بالا، افزایش عمر ابزارها در شرایط تریبولوژی شدید	PVD
ابزارهای برش دقیق، قطعات مقاوم به اکسیداسیون در صنایع نفت وگاز، پوشش‌های مقاوم به سایش در صنایع معدنی	تولید پوشش‌های کاربید تنگستن با ریزساختار کنترل شده، سختی و چسبندگی بالا، عملکرد بهتر نسبت به سخت کروم در مقاومت سایشی و دوام حرارتی، پیشرفت در ماشین‌کاری دقیق و پرداخت سطحی	CVD
صنایع سنگین (غلتک‌ها، چرخ‌دنده‌ها)، صنایع معدنی، ابزارهای تحت بار شدید، قطعات ماشین‌آلات کشاورزی	ایجاد پوشش‌های چندلایه با ریزساختار بهبود یافته، افزایش سختی و مقاومت سایشی، مناسب برای شرایط کاری شدید	روکش لیزری
صنایع هوافضا(پره‌های توربین)، صنایع انرژی(بویلرهای لوله‌ها)، صنایع پزشکی(پوشش‌های زیست فعال)، صنایع دریایی	توسعه پوشش‌های عملکردی و هوشمند (Self-Healing وSensing)، افزایش مقاومت خوردگی و اکسیداسیون، کاربردهای چند منظوره در صنایع پیشرفته	پاشش حرارتی
صنایع خودروسازی(بدنه و قطعات)، صنایع دریایی(حفاظت فولاد در محیط نمکی)، تجهیزات پزشکی(ایمپلنت‌ها)	توسعه پوشش‌های هیبریدی نانو کامپوزیتی با خواص ضد سایش و مکانیکی بهتر، امکان افزودن نانو ذرات برای افزایش مقاومت، بهبود یکنواختی و چسبندگی	سل-ژل

۴. خواص و کاربرد نانو پوشش‌ها

۱.۴. مقاومت به سایش

پوشش‌های که عمدتا با هدف افزایش مقاومت به سایش طراحی شده‌اند، به طور قابل‌قبولی موجب ارتقای طول عمر ابزارها، چرخ‌دنده‌ها و بلبرینگ‌ها شده‌اند. استفاده از ساختارهای نانویی در این پوشش‌ها علاوه بر افزایش چقرمگی، منجر به تشکیل میکروترک‌ها در سطوح تحت بار تماس شدید گردیده است. نانو پوشش‌ها با ریز ساختارهای نانومتری توانسته‌اند؛ نرخ سایش را به طور چشمگیری کاهش دهند و عملکرد مکانیکی اجزاء را بهبود دهند. مطالعات مروری اخیر نشان می‌دهند که سه مکانیسم اصلی شامل: ریزدانه سازی، سخت شدن ناشی از تبدیلات فازی و اثرات ویژه مقیاس نانو نقش تعیین کننده‌ای در عملکرد نهایی نانو پوشش‌ها دارند. همچنین به کارگیری روش‌های نوین لایه نشانی نانوکامپوزیت‌ها موجب افزایش سختی و مقاومت سایشی شده است، تحقیقات دیگر تایید می‌کنند که طراحی چند لایه و استفاده از ماتریس‌های تقویت شده در پوشش‌های نانو می‌توانند عمر کاری ابزارها، چرخ‌دنده‌ها و بلبرینگ‌ها را افزایش دهند [۱].

۲.۴. مقاومت به خوردگی

در این حوزه، نانو پوشش‌ها با ایجاد موانع موثر فیزیکی و الکتروشیمیایی، نقش کلیدی در کاهش نفوذ گونه‌های خورنده مانند: یون‌ها، رطوبت و اکسیژن به زیرلایه ایفا می‌کنند. مطالعات مروری از جمله پژوهش Abdeen وهمکاران، نشان داده‌اند که پوشش‌های نانومتری با ساختار متراکم، چسبندگی بالا و ریزساختار مهندسی شده قادر هستند نرخ پیشروی فرآیند خوردگی را به طور قابل توجهی کاهش دهند و طول عمر قطعات را در محیط‌های شدیدا خورنده بهبود بخشند. این نانو پوشش‌ها با کاهش تخلخل، افزایش یکنواختی لایه و ایجاد شبکه‌های پایدار اکسیدی، مانع از واکنش‌های الکتروشیمیایی مخرب در سطح زیرلایه می‌شوند [۲۰]. علاوه بر این، پژوهش‌های جدید بر روی نانو پوشش‌های فلزی چندلایه نشان می‌دهند که طراحی دقیق معماری لایه‌ها_از جمله کنترل ضخامت، ترتیب لایه بندی و ترکیب شیمیایی؛ می‌تواند پایداری خوردگی را در محیط‌های دریایی و صنعتی با شدت بالای عوامل خورنده به طور چشمگیری افزایش دهد. این بهبود عملکرد به عواملی مانند: ایجاد مسیرهای نفوذ طولانی‌تر برای یون‌ها، بهبود چسبندگی بین لایه‌ای و افزایش پایداری الکتروشیمیایی ساختار چندلایه نسبت داده می‌شود [۲۱].

۳.۴. کاهش اصطکاک

کاهش ضریب اصطکاک از مهم‌ترین کاربردهای نانو پوشش‌های در تماس‌های سطحی متحرک به شمار می‌رود. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که افزودن نانو ذرات به پوشش‌های مهندسی سطح می‌تواند با بهبود هموارتر سطح و ایجاد لایه‌های لغزنده، منجر به کاهش قابل توجه ضریب اصطکاک و در نتیجه کاهش نرخ سایش شود. این بهبود در صنایعی مانند: خودروسازی، هوافضا و ابزارسازی که تماس‌های چرخه‌ای و بارگذاری‌های تریبولوژی شدید رایج است، از اهمیت بالایی برخودار است [۳].

۴.۴. عملکرد در دمای بالا

نانو پوشش‌های سخت به دلیل ریزساختار نانومتری و پایداری حرارتی بالا، عملکرد مکانیکی خود را در دماهای تا حدود ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ می‌کنند. ریزدانه سازی موجب جلوگیری از رشد دانه و نرم شدن در دمای بالا شده و به تداوم سختی و مقاومت سایشی کمک می‌کند. ترکیباتی مانند: TiN و TiAlSiN، Al_2O_3 با تشکیل لایه‌های اکسیدی متراکم و چسبنده، مانع نفوذ اکسیژن شده و از اکسیداسیون و تخریب زیرلایه جلوگیری می‌کنند. در این شریط؛ مکانیزم غالب سایش از نوع مکانیکی به سایش اکسیداسیونی کنترل شده تغییر یافته و تشکیل لایه‌های اکسیدی پایدار موجب کاهش اصطکاک و افزایش عمر کاری می‌شود، برای کاربردهایی مانند: ابزارهای برش، توربین‌گازی و سامانه‌های هوافضا مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۲]. جدول۴ به مقایسه عملکرد، چالش‌ها و پیشرفت‌های نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش پرداخته است.

جدول۴- مقایسه عملکرد، چالش‌ها و پیشرفت‌های نانو پوشش‌ها،

پیشرفت‌های اخیر	چالش‌ها	ساز و کار عملکرد نانو پوشش‌ها	کاربرد اصلی
توسعه پوشش‌های TiAlNو AlCrNو TiAlSiN با سختی بالا و پایداری حرارتی	تنش‌های داخلی بالا، افت سختی در دماهای بالا	ریزدانه سازی،سخت شدن فازی،ساختار چندلایه نانومتری	مقاومت به سایش
نانو چند لایه‌های Ni-W ، پوشش‌های سل-ژل SiO_2/ ZrO_2 با تراکم بالا	ایجاد ترک در عملیات حرارتی، چسبندگی پایین در زیرلایه‌های خاص	ایجاد سد فیزیکی و الکتروشیمیایی، کاهش نفوذ یون‌ها و رطوبت	مقاومت به خوردگی
توسعه پوشش‌های DLC دوپ شده و نانو کامپوزیت‌های گرافنی پایدار	پایداری محدود در رطوبت بالا، افت عملکرد در دماهای بالا	تشکیل فیلم لغزنده(گرافن/DLC)، هموارسازی سطح ، کاهش انرژی سطحی	کاهش اصطکاک
پوشش‌های چندلایهTiAlN/ AlCrN با مقاومت اکسیداسیون تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد	اکسیداسیون سریع و افت سختی در دماهای بالا	تشکیل لایه‌های اکسیدی پایدار، پایداری فازی نانومتری	عملکرد در دمای بالا

۵. مکانیزم‌های عملکرد نانو پوشش‌ها

۱.۵. چسبندگی بسیار بالا به زیرلایه

چسبندگی بالا میان نانو پوشش‌های سخت و زیرلایه، یکی از عوامل مهمی در تعیین عملکرد تریبولوژی و دوام حرارتی این پوشش‌ها محسوب می‌شود. در مقیاس نانومتری، افزایش نسبت سطح به حجم موجب تقویت پیوندهای شیمیایی، مکانیکی و متالورژیکی در فصل مشترک پوشش-زیرلایه می‌گردد. این چسبندگی قوی به طور مستقیم بر مقاومت به سایش، تحمل بار،پایداری در دماهای بالا و جلوگیری ازگسیختگی موضعی اثر گذار است [۲۳]. مطالعات Milanese و همکاران بر نقش حیاتی چسبندگی در کاهش تمرکز تنش در مرز پوشش-زیرلایه تاکید کرده‌اند؛ به طوری که چسبندگی مناسب نه تنها انتقال بار مکانیکی را تسهیل می‌کند، بلکه از جدا شدگی پوشش تحت شرایط تماس شدید جلوگیری کرده است [۲۴].

۲.۵. سختی بالا همراه با کاهش تغییر شکل پلاستیک

این ویژگی نقش مهمی در پایداری مکانیکی پوشش تحت بارگذاری‌های شدید ایفا می‌کند [۱۶]. نتایج گزارش شده توسط Gu و همکاران نشان می‌دهد که ریزساختار نانومتری با افزایش سختی موثر و محدود کردن تغییر شکل پلاستیک، توان پوشش را در مقاومت در برابر خراش و آسیب‌های زیرسطحی به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد. افزایش سختی می‌تواند باعث توزیع یکنواخت‌تر بار در سطح تماس شده و از تمرکز تنش در نواحی بحرانی جلوگیری می‌کند؛ عاملی که به طور مستقیم احتمال گسترش ترک، ریز آسیب‌ها و جدایش لایه را کاهش می‌دهد. این رفتار مکانیکی به ویژه در ابزار برشی، اجزای تحت فشار مداوم و قطعاتی که در معرض تماس سطحی شدید قرار دارند، اهمیت بالایی دارد [۱].

۳.۵. اثر نانو کامپوزیتی

اثر نانو کامپوزیتی ناشی از هم افزایی بین ذرات سخت تقویت کننده، ماتریس فلزی یا سرامیکی و رابط‌های مهندسی شده، یک مکانیزم چند مقیاسی ایجاد می‌کند که به افزایش چقرمگی، مهار انتشار ترک و ارتقای عملکرد منجر می‌شود؛ به گونه‌ای که این رفتار در پوشش تک ماده‌ای مشاهده نمی‌شود [۵]. Singh و همکاران گزارش کردند که ترکیب این اثرات با پیکر بندی‌های چند لایه، امکان بهبود همزمان مقاومت مکانیکی و چقرمگی شکست را فراهم می‌آورد. حضور هم زمان فازهای سخت تقویت کننده در یک ماتریس پیوسته و رابط‌های پایدار، از گسترش ترک جلوگیری کرده، مقاومت به خزش سطحی را افزایش می‌دهد و پایداری ساختاری پوشش را در برابر بارهای مکانیکی حفظ می‌کند. این پاسخ چند مقیاسی سبب دستیابی به پوشش‌هایی با خواص همزمان ضد سایش، مقاومت به خوردگی و اصطکاک کاهش یافته می‌شود و در نتیجه دوام و کارایی اجزا ر تحت شرایط عملیاتی پیچیده افزایش می‌دهد. در کاربردهای صنعتی شامل تماس‌های شدید، دماهای بالا و محیط‌های خورنده عملکردی برتر نسبت به پوشش‌های تک ماده‌ای ارائه می‌کنند [۲۵].

۶. روش‌های ارزیابی نانو پوشش‌ها

۱.۶. آزمون پین روی دیسک

یکی از روش‌های استاندارد و پر کاربرد در تریبولوژی برای ارزیابی رفتار سایش و اصطکاک مواد است. در این آزمون، یک پین ثابت تحت بار عمودی مشخص روی یک دیسک چرخان قرار گرفته و لغزش نسبی موجب ایجاد سایش در سطح تماس می‌شود. شکل۳ دستگاه پین روی دیسک را نشان می‌دهد. امکان اندازه گیری دقیق ضریب اصطکاک، حجم و نرخ سایش را فراهم کرده و مطابق استانداردهای بین المللی از جمله ASTM G99 اجرا می‌گردد. پارامترهایی همچون بار اعمالی، سرعت و فاصله لغزش و شرایط روانکاری از عوامل مهم بر نتایج آزمون است [۱۳]. این آزمون برای بررسی نانو پوشش‌های سخت مانند: DLC و TiN وAlTiN به کار می‌رود [۱۴]. نتایج تجربی به همراه تحلیل سطح با میکروسکوپ SEM و استفاده از مدل‌های عددی مبتنی بر قانون آرچارد نشان می‌دهد که این پوشش‌ها به طور چشمگیری ضریب اصطکاک و حجم سایش را کاهش داده و در نتیجه موجب افزایش دوام و کارایی قطعات مهندسی می‌شوند [۱۳].



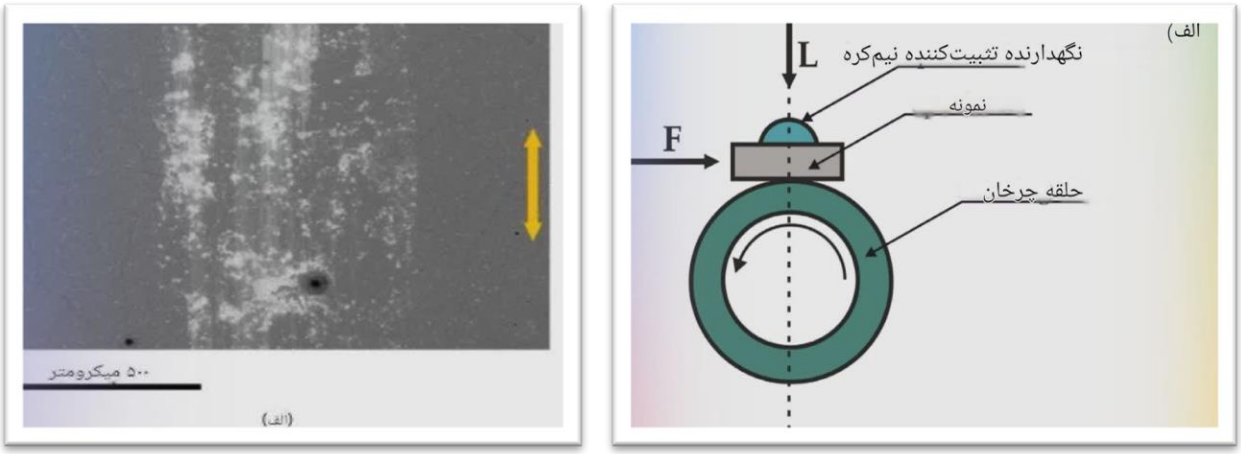
شکل ۳- دستگاه پین و دیسک [۱۳].

۲.۶. آزمون توپ روی دیسک

آزمون Boll-on-Disc یک روش استاندارد تریبولوژی مطابق با ASTM G99 و DIN 50324 برای ارزیابی اصطکاک و مقاومت به سایش پوشش‌های سخت است. در این آزمون، کره‌ای با جنس مشخص (فولاد کرومی یا زیرکونیا) تحت بار عمودی کنترل شده بر سطح دیسکی چرخان قرار می‌گیرد و تماس نقطه‌ای Hertzian شرایط واقعی سایش را شبیه سازی می‌کند. در طول آزمون، نیروی اصطکاک ثبت و ضریب اصطکاک محاسبه می‌شود؛ پس از آن، رد سایش با میکروسکوپ نوری یا پروفیلومتر بررسی و نرخ سایش براساس حجم یا عمق رد تعیین می‌گردد. تحلیل‌های SEM و EDS نیاز برای شناسایی مکانیزم‌های سایش مانند چسبندگی، انتقال لایه، اکسیداسیون و سایش به کار می‌روند [۱۵]. شکل۴- ب) تصویر میکروسکوپی SEM از مسیر سایش دیسک را نشان می دهد.

۳.۶. آزمون بلوک روی دیسک

این آزمون مطابق استاندارد بین المللی ASTM G77 یکی از روش‌های مهم در تریبولوژی برای ارزیابی رفتار سایشی و اصطکاکی مواد است. در این آزمون، بلوک تحت بار مشخص روی سطح خارجی حلقه چرخان قرار می‌گیرد، شکل ۴- الف) تصویر بلوک روی دیسک را نشان می‌دهد. و تماس خطی مشابه شرایط واقعی عملکرد قطعاتی مانند: یاتاقان‌ها و بوش‌ها ایجاد می‌شود. نتایج این آزمون به شدت تحت تاثیر جنس بلوک و حلقه، شرایط سطحی، دما و روانکاری قرار دارد و تغییر این عوامل نرخ سایش و ضریب اصطکاک را تغییر می‌دهند؛ بررسی ریزساختار سطح با روش‌های SEMو EDS امکان شناسایی مکانیزم‌های سایش از جمله چسبندگی و سایشی را فراهم می‌کند و به دلیل تکرار پذیری بالا، قابلیت و شباهت هندسی با قطعات صنعتی، این آزمون به عنوان روشی مطمعن برای بررسی رفتار پوشش‌ها است [۱۶].



شکل ۴- الف- تصویر بلوک روی حلقه و ب- تصاویر میکروسکوپ SEM از مسیر سایش دیسک [۱۵و ۱۶].

۷. کاربردهای صنعتی نانو پوشش‌ها

۱.۷. خودروسازی

نانو پوشش‌های مقاوم به سایش در خودروسازی به عنوان فناوری پیشرفته‌ای برای افزایش دوام و کارایی قطعات مهم به کار می‌روند. این پوشش‌ها با کاهش اصطکاک در موتور و سیستم انتقال قدرت، عمر قطعات را افزایش داده و مصرف سوخت را کاهش می‌دهند؛ در ترمز و کلاچ نیز مقاومت بالای آن‌ها در برابر سایش و حرارت موجب کاهش نیاز به تعمیرات می‌شود. علاوه بر این در بدنه و تزئینات داخلی خودرو سطوح ضدخش و پایدار در برابر نور فرابنفش ایجاد می‌کنند و کیفیت ظاهری را حفظ می‌کنند. مزیت اصلی این فناوری کاهش هزینه نگهداری و ارتقای راندمان انرژی است، اما هزینه بالای تولید، پیچیدگی فرآیند، محدویت عملکرد در شرایط خاص و نگرانی‌های زیست محیطی مانع گسترش کامل آن در صنعت می‌شوند [۲۶]. مطالعات مروری اخیر اهمیت این فناوری را برجسته کرده‌اند. برای مثالVijayو همکارش نشان می‌دهد که فناوری‌های میکرو و نانو در صنعت خودرو نه تنها در بهبود دوام قطعات، بلکه در ارتقای ایمنی و کارایی خودرو نقش دارند [۲۷].

۲.۷. هوافضا

نانو پوشش‌های؛ نانوکامپوزیتی مقاوم به سایش در صنعت هوافضا به عنوان بخشی از فناوری‌های پیشرفته مهندسی سطح، نقش مهمی در افزایش دوام و بهبود عملکرد قطعات مهم ایفا می‌کنند. این پوشش‌ها با ایجاد سختی بالا، کاهش ضریب اصطکاک و تقویت رفتار تریبولوژیک، موجب افزایش عمرخستگی و کاهش نرخ سایش اجزای متحرک، به ویژه در موتورهای جت و سامانه‌های پیشران می شوند. بررسی های انجام شده در این حوزه نشان می دهد که نانو کاموپوزیت ها مبتنی بر ریزساختارهای سخت، پایداری حرارتی و مقاومت اکسیداسیونی مطلوبی دارند و می‌توانند تحت دماهای بالا عملکرد قابل اعتمادی داشته باشند. همچنین بهبود چسبندگی، استحکام مکانیکی و ثبات ساختاری در این پوشش‌ها به حفظ کارایی قطعات در محیط‌های عملیاتی شدید کمک می‌کند. چالش‌هایی مانند: هزینه بالای تولید، پیچیدگی فرآیندهای لایه نشانی و محدویت کارایی در شرایط فوق بحرانی این‌ها مانع گسترش این صنعت شده است [۲۸].

۸. چالش و محدودیت‌ها

۱) انتخاب نوع مناسب نانو پوشش برای یک زیرلایه مشخص و شرایط عملکردی ویژه اهمیت زیادی دارد؛ زیرا عواملی مانند:سهولت اعمال پوشش، چسبندگی به زیرلایه و دشواری رسوب‌دهی بر سطوح با هندسه پیچیده یا ابعاد متغیر در نتیجه نهایی تاثیر می‌گذارند.۲) تعیین تقویت کننده یا نانوفیلر مناسب برای یک ماتریس پوششی معین از اهمیت بالایی برخودار است، چرا که سازگاری مکانیکی و جلوگیری از عدم تطابق حرارتی میان فازهای پوشش، نقش مهمی در پایداری و کارایی آن دارد.۳) هزینه و زمان لازم برای طراحی، توسعه و اجرای نانو پوشش‌ها مربوط می‌شود؛ موضوعی که می‌تواند کاربرد صنعتی آن‌ها را محدود کند. همچنین توانایی پوشش‌دهی سطوح بزرگ، عملکرد و نگهداری طولانی مدت و ... را شامل می‌شود [۳].

۹. نتیجه‌گیری

مرور جامع انجام شده در این مقاله نشان می‌دهد که نانو پوشش‌های سخت و مقاوم به سایش، به عنوان راهکارهای مهندسی سطح، توانایی قابل توجهی در بهبود عملکرد و طول عمر قطعات تحت شرایط سایشی، خورنده و دمای بالا دارند. این پوشش‌ها با استفاده از مکانیزم‌هایی مانند: ریزساختار نانومتری، چسبندگی بالا، اثر نانو کامپوزیتی و تشکیل لایه‌های محافظ پایدار، امکان دستیابی همزمان به سختی، چقرمگی و پایداری حرارتی ایجاد می‌کنند. با این وجود، چالش‌هایی از جمله کنترل چسبندگی تنش‌های پسماند، هزینه‌های تولید و محدودیت در پوشش‌دهی سطوح پیچیده هنوز وجود دارد. جهت گسترش کاربرد این پوشش‌ها در مقیاس صنعتی، تمرکز بر توسعه پوشش‌های چند لایه و نانوکامپوزیتی مهندسی شده، بهینه‌سازی پارامترهای فرآیندهای رسوب‌دهی و استفاده از روش‌های ترکیبی نوین ضروری به نظر می‌آید. در آینده، فناوری نانو با روش‌های هوش مصنوعی و شبیه‌سازی پیشرفته می‌تواند امکان طراحی پوشش‌های هوشمند با قابلیت خودترمیمی و سازگاری با شرایط عملیاتی را ایجاد کنند.

۱۰. مراجع:

1. Gu, Y.; Xia, K.; Wu, D.; Mou, J.; Zheng, S. (2020), "Technical characteristics and wear-resistant mechanism of nano coatings: A review," Coatings, 10(3), pp. 233.
2. Jose, S.A.; Lapierre, Z.; Williams, T.; Hope, C.; Jardin, T.; Rodriguez, R.; Menezes, P. (2025), "Wear- and corrosion-resistant coatings for extreme environments: Advances, challenges, and future perspectives," Coatings, 15(8), pp. 878.
3. Farooq, S.A.; Raina, A.; Mohan, S.; Singh, R.A.; Jayalakshmi, S.; Haq, M.I.U. (2022), "Nanostructured coating: Review on processing techniques, corrosion behaviour and tribological performance," Nanomaterials, 12(8), pp. 1323.
4. Krylova, K.; Safina, L.R.; Rusalev, Y.V.; Baimova, J.A. (2025), "The impact of composite graphene/Ni coating on nanoindentation of Ni: Deformation mechanism," Surfaces and Interfaces, 61, pp. 106093.
5. Wang, R.; Xiong, Y.; Yang, K.; Zhang, T.; Zhang, F.; Xiong, B.; Hao, Y.; Zhang, H.; Chen, Y.; Tang, J. (2023), "Advanced progress on the significant influences of multi-dimensional nanofillers on the tribological performance of coatings," RSC Advances, 13(29), pp. 17645–17660.
6. Wu, L.; Bai, Z.; Hao, Q.; Qin, J. (2025), "Improving wear resistance of DLC-coated metal components during service: A review," Lubricants, 13(6), pp. 257.
7. Krella, A. (2020), "Resistance of PVD coatings to erosive and wear processes: A review," Coatings, 10(10), pp. 921.
8. Devarajan, D.K.; Rangasamy, B.; Mosas, K.K.A. (2023), "State-of-the-art developments in advanced hard ceramic coating using PVD techniques for high-temperature tribological applications," Ceramics, 6(1), pp. 301–329.
9. Wang, X.; Zhao, W.; Shi, T.; Cheng, L.; Hu, S.; Zhou, C.; Cui, L.; Li, N.; Liaw, P.K. (2025), "A review on tribological wear and corrosion resistance of surface coatings on steel substrates," Coatings, 15(11), pp. 1314.
10. Micallef, C.; Zhuk, Y.; Aria, A.I. (2020), "Recent progress in precision machining and surface finishing of tungsten carbide hard composite coatings," Coatings, 10(8), pp. 731.
11. Yu, Y.; Ding, W.; Wang, X.; Mo, D.; Chen, F. (2025), "Study on microstructure and wear resistance of multi-layer laser cladding Fe901 coating on 65 Mn steel," Materials, 18(15), pp. 3505.
12. Tejero, D.; Mcdonald, A.; Rezvani Rah, M.; Hossein, T. (2019), "Beyond traditional coatings: A review on thermal-sprayed functional and smart coatings," Journal of Thermal Spray Technology, 28, pp. 598–644.
13. Yan, Y.; Helmons, R.; Schott, D. (2020), "Pin-on-disc modelling with mesh deformation using discrete element method," Materials, 15(5), pp. 1813.
14. Staszuk, M.; Pakula, D.; Olszowska, M.; Ptaszna, A.K.; Szindler, M.; Wieczorek, A.N.; Honysz, R.; Jonda, E.; Basiaga, M. (2025), "Structure and tribological properties of TiN/DLC, CrN/DLC, TiAlCN/DLC, AlTiCN/DLC and AlCrTiN/DLC hybrid coatings on tool steel," Materials, 18(17), pp. 4188.

15. Baroni, E.; Fortini, A.; Meo, L.; Soffritti, C.; Merlin, M.; Garagnani, G.L. (2024), "Ball-on-disk wear maps for bearing steel-hard anodized EN AW-6082 aluminum alloy tribocouple in dry sliding conditions," Coatings, 14(11), pp. 1469.

16. Madej, M.; Madej, B.L. (2025), "The influence of friction parameters and material type on results in the block-on-ring friction system," Lubricants, 13(2), pp. 94.

17. Wang, J.; Zhang, X.; Qiao, L.; Zhao, Y.; Ren, M.; Li, T.; Li, R. (2024), "A comprehensive study on microstructure and wear behavior of nano-WC reinforced Ni60 laser coating in 17-4PH stainless steel," Coatings, 14(4), pp. 484.

18. Chen, J.; Parsi, P.K.; Marklund, P.; Bjorling, M.; Shi, Y. (2024), "Graphene-enhanced, wear-resistant, and thermal-conductive, anti-/de-icing gelcoat composite coating," Advanced Composites and Hybrid Materials, 7, pp. 9.

19. Suresh Kumar, R.; Vishwadeep, V.; Viswarathan, V.; Adhilingavignesh, K.; Shamanth, S. (2024), "A review on sol-gel method and coating of hybrid nano-composite," AIP Conference Proceedings, 3221, pp. 020012.

20. Abdeen, D.; Hachach, M.C.; Koc, M.; Atieh, M.A. (2019), "A review on the corrosion behaviour of nanocoatings on metallic substrates," Materials, 12(2), pp. 210.

21. Vereschaka, A.; Cherenda, N.; Sotova, C.; Uglov, V.; Reva, O.; Basalai, A.; Isobell, A.; Baranova, N. (2023), "Development of multicomponent nanostructured nitride coating to protect against corrosion products from titanium alloy," Coatings, 13(12), pp. 2028.

22. Li, J.; Mei, H.; Hua, J.; Wang, J.; Wang, Y.; Yi, G.; Deng, X. (2023), "High-temperature oxidation and wear resistance of TiAlSiN/AlCrN multilayer coatings prepared by multi-arc ion plating," Nanomaterials, 15(7), pp. 503.

23. Li, C.; Gao, Y.; Shang, L.; Zhai, H. (2025), "Influence of microstructure design on high-temperature tribological and cutting properties of PVD hard coatings," Journal of Materials Engineering and Performance, 34(10).

24. Milanese, E.; Brink, T.; Aghababaei, R.; Molinari, J.F. (2020), "Role of interfacial adhesion on minimum wear particle size and roughness evolution," Physical Review E, 102(14), pp. 043001.

25. Singh, V.; Aithal, V.S.; Kumar, N. (2024), "Multilayered nanocomposite coatings: Synergistic mechanisms for enhanced wear, corrosion, and friction performance," Advanced Engineering Materials, 26(4), pp. 2300154.

26. Ajuka, L.O.; Ogedenbe, T.S.; Adeyi, T.; Ikumapayi, O.M.; Akinlabi, E.T. (2023), "Wear characteristics, reduction techniques and its application in automotive parts – A review," Coatings Engineering, 10(1), pp. 2170741.

27. Subramanian, K.; Kumar, V.B. (2024), "Micro-/nano-technology in the automotive industry: A review," Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 9, pp. 323–334.

28. Mohammed, O.R.; Balaji, S.R.; Pandey, S.K.; Khan, S.M.; Patil, K.A.; Chin, J.; Sivakumar, K.K. (2025), "Wear resistance and mechanical properties of nanocomposite coatings: Applications in aerospace engineering," Nanotechnology Perceptions, 21(2), pp. 186–199.