



تدوین دستورالعمل ارزیابی، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری از
نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

مجری دانشگاهی: محبوبه آزادی

دانشگاه مجری: سمنان

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تدوین دستورالعمل ارزیابی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری از نانو پوششهای مقاوم به فرسایش

مجری دانشگاهی: محبوبه آزادی

دانشگاه مجری: سمنان

همکاران پروژه:

امید میرزائی، محبوبه حاجی ملک احمدی، مریم محمودی

نماینده مدیر طرح: نازنین عبدی

واحد مجری: مرکز توسعه فناوری نانو در صنعت برق و انرژی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

اسفند ۱۴۰۰

کد ثبت گزارش: NRI-ER-861-PNTPN23-17-00-L

DOI: 10.30503/nripress.2020.326

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. مرکز توسعه فناوری نانو
تدوین دستورالعمل ارزیابی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری از نانو پوششهای مقاوم به فرسایش / نماینده
مدیر طرح: عبدی، نازنین. کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۰.

۵۶ ص: مصور، نمودار، جدول

۱. آزادی، محبوبه، همکار پروژه. ۲. نام دانشگاه مجری/ دانشگاه سمنان. ۳. مجری دانشگاهی
آزادی، محبوبه / مدیر پروژه (نام مدیر پروژه در شرکت): نام خانوادگی، نام. ۴. ریاحی نوری نسترن،
نام، مدیر واحد مجری. ۵. نام محور پژوهشی مرتبط مرکز توسعه فناوری نانو.



انتشارات پژوهشگاه نیرو
مرکز توسعه فناوری نانو

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در
حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان، پژوهشگاه نیرو، کدپستی: ۱۴۶۸۶۱۳۱۱۳

تلفن: ۸۸۰۷۹۴۰۱-۹

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹۶

وبگاه: www.nri.ac.ir

پست الکترونیک انتشارات: publications@nri.ac.ir

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی همکارانی از دانشگاه/ شرکت سمنان به شرح زیر و مورد تأیید اینجانب نازنین عبدی، نماینده مدیر طرح در پروژه تدوین دستورالعمل ارزیابی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری از نانو پوششهای مقاوم به فرسایش است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آنها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

☐ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

☐ گزارش حاصل انجام ۴ مرحله از ۴ مرحله پروژه است.

همکاران:

۱. محبوبه آزادی

۲. امید میرزائی

۳. محبوبه حاجی ملک احمدی

۴. مریم محمودی

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۱۰
۱- تعریف نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۱۱
۱-۱- کاربرد نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش در تجهیزات نیروگاهی.....	۱۱
۱-۱-۱- بویلرها.....	۱۱
۱-۱-۲- پره‌های کمپرسور.....	۱۱
۱-۱-۳- کندانسورها.....	۱۲
۱-۱-۴- پمپ‌ها و ولوها.....	۱۲
۱-۱-۵- بدنه شیرآلات مختلف، یاتاقان‌ها و لوله‌ها.....	۱۲
۱-۱-۶- رانرها، نازل و دریچه‌های هدایت کننده.....	۱۲
۱-۲- پارامترهای موثر در خصوصیات نانو پوشش ایجاد شده.....	۱۳
۱-۲-۱- جنس نانو پوشش مقاوم به فرسایش.....	۱۳
۱-۲-۱-۱- معیار انتخاب جنس نانو پوشش مقاوم به فرسایش.....	۱۵
۱-۲-۲- نوع روش ایجاد نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش و استانداردهای مربوطه.....	۱۵
۱-۲-۳- جنس مواد زیرلایه مجاز برای پوشش دهی.....	۱۷
۱-۲-۴- ضخامت پوشش و اندازه دانه پوشش.....	۱۷
۱-۳- پارامترهای موثر در خصوصیات نانو پوشش ایجاد شده.....	۱۷
۱-۴- معایب استفاده نامناسب از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۱۸
۱-۵- ضرورت دستورالعمل.....	۱۸
۲- نمادها و واحدها.....	۱۸
۳- هدف و دامنه کاربرد.....	۱۹
۴- محدوده اجرای دستورالعمل.....	۱۹
۵- تعاریف.....	۲۰
۶- ایمنی.....	۲۱
۷- مهارت مسئول.....	۲۱
۸- دستورالعمل ارزیابی نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش ایجاد شده.....	۲۱
۸-۱- ارزیابی خصوصیات نانو پوشش بر اساس استانداردهای مورد نیاز.....	۲۲
۸-۲- آزمون‌های مورد نیاز ارزیابی پوشش.....	۲۵
۸-۳- حد پذیرش خصوصیات مورد نیاز نانو پوشش.....	۲۶
۸-۴- کنترل خصوصیات تجهیزات نیروگاهی بعد از پوشش دهی.....	۲۸

۹- دستورالعمل بهره‌برداری از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۲۸
۹-۱- موارد لازم جهت بهره‌برداری.....	۲۸
۹-۲- استانداردهای موردنیاز.....	۲۹
۹-۳- زمان بازرسی.....	۲۹
۹-۴- موارد موردنیاز جهت بازرسی.....	۳۰
۱۰- دستورالعمل تعمیر و نگهداری از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۴
۱۰-۱- دستور کار تعمیر نانوپوشش‌ها.....	۳۵
۱۰-۲- آماده‌سازی سطح.....	۳۷
۱۱- فایل فنی پوشش.....	۳۷
۱۱-۱- به هنگام بهره‌برداری نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۸
۱۱-۲- به هنگام تعمیر و نگهداری نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۸
۱۲- عیوب احتمالی در نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۸
۱۲-۱- عیوب احتمالی در پوشش قبل از کارکرد.....	۳۸
۱۲-۲- عیوب احتمالی در پوشش در شرایط سرویس.....	۳۹
پیوست‌ها	۴۲
فهرست منابع	۵۶

فهرست اشکال

عنوان	صفحه
شکل ۱: شماتیک مراحل ارزیابی خصوصیات موردنیاز نانوپوشش‌ها بر اساس استانداردهای مربوطه.....	۲۳
شکل ۲: شکل ماکروسکوپی نانوپوشش با عیب جدایش پوشش.....	۳۹
شکل ۳: الف- پوشش در صورتی که دارای عدم چسبندگی باشد، ب- پوشش با عیب یکنواخت نبودن رنگ و ج- یک پوشش بدون عیب.....	۳۹
شکل ۴: عیوب رنگین کمانی در نانوپوشش‌های کرومی ایجاد شده در روش <i>PVD</i>	۳۹
شکل ۵: الف- تصویر <i>SEM</i> از سطح نانوپوشش الف- در صورتی که دارای زبری نایکنواخت و کندگی در سطح باشد و ب- عیب ایجاد ناخالصی‌های ذره‌ای یا رشته‌های در سطح.....	۴۰
شکل ۶: وجود حفره و ترک‌ها در پوشش به هنگام شرایط سرویس.....	۴۰
شکل ۷: حضور ترک‌ها در پوشش‌های چندلایه به هنگام اعمال بار.....	۴۱

فهرست جداول

عنوان	صفحه
جدول ۱: مزایا و معایب برخی از مهمترین نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۱۳
جدول ۲: برخی از خواص ذاتی نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش شامل رنگ، سختی، ضریب اصطکاک.....	۱۴
جدول ۳: مقایسه برخی از خصوصیات روش‌های پوشش‌دهی در ابعاد نانو.....	۱۵
جدول ۴: استانداردهای موردنیاز بررسی روش‌های پوشش‌دهی در ابعاد نانو.....	۱۶
جدول ۵: تاثیر خصوصیات هندسی نانوپوشش/زیرلایه بر خواص نانوپوشش مقاوم به فرسایش.....	۱۷
جدول ۶: نمادها و واحدهای ذکر شده در دستورالعمل.....	۱۸
جدول ۷: استانداردها و الویت انجام آزمون مربوط به ارزیابی خصوصیات نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۲۳
جدول ۸: تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام آزمون‌ها در هنگام ارزیابی پوشش‌ها.....	۲۵
جدول ۹: حد پذیرش تقریبی پارامترهای مربوط به خصوصیات نانوپوشش مقاوم به فرسایش.....	۲۷
جدول ۱۰: استاندارد، نوع روش و خصوصیات مورد بررسی تجهیز بعد از فرایند پوشش‌دهی.....	۲۸
جدول ۱۱: نام استانداردهای پیشنهادی موردنیاز جهت بازرسی و بهره‌برداری پوشش‌ها.....	۲۹
جدول ۱۲: تعریف از سه واژه خوب، متوسط و ضعیف.....	۲۹
جدول ۱۳: برنامه زمان‌بندی پیشنهادی بازرسی نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۰
جدول ۱۴: نام آزمون‌های درجا در حین بازرسی، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری همراه استاندارد مربوطه.....	۳۱
جدول ۱۵: تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام آزمون‌ها در هنگام بهره‌برداری و نگهداری پوشش‌ها.....	۳۲
جدول ۱۶: بازرسی شرایط محیط کارکرد قطعه در زمان فرسایش جهت افزایش طول عمر نانوپوشش.....	۳۲
جدول ۱۷: دستورالعمل پیشنهادی بازرسی به هنگام بهره‌برداری نانوپوشش‌ها.....	۳۴
جدول ۱۸: نام استانداردهای پیشنهادی موردنیاز جهت تعمیر و نگهداری از نانو پوشش‌ها.....	۳۵
جدول ۱۹: دستورکار پیشنهادی جهت تعمیر نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش.....	۳۵
جدول ۲۰: استانداردهای لازم آماده سازی سطح فولاد یا دیگر تجهیزات فلزی.....	۳۷

پیشگفتار

از آنجا که برخی از تجهیزات نیروگاهی همانند پره‌های کمپرسور، لوله‌ها در بویلرها و انواع نازل‌ها و مبدل‌ها و ... دچار فرسایش در شرایط گوناگون محیطی می‌شود و منجر به خسارات اقتصادی و کاهش راندمان و طول عمر مفید تجهیزات می‌شوند، استفاده از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش با سختی و چقرمگی بالا یکی از راههای اقتصادی کاهش این صدمات محسوب می‌شود. بنابراین این دستورالعمل به منظور یک ایجاد وحدت‌الویه برای ارزیابی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش برای تجهیزات نیروگاهی در معرض خطر فرسایش طراحی شده است.

این گزارش مربوط به مرحله پایانی از پروژه تدوین دستورالعمل ارزیابی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش است که انجام آن، با مسئولیت نام‌واحد مجری، به دانشگاه/ شرکت سمنان واگذار شده است و نظارت بر/داوری آن، بر عهده سرکار خانم/جناب آقای دکتر عباس یوسف پور و دکتر مهدیه اسداللهی بوده است.

فصل اول - تعریف نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

نانوپوشش‌ها موادی هستند که حداقل دارای یک بعد کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند. همچنین اصطلاح نانوپوشش به فیلم‌های نازک نانومقیاس (یعنی با ضخامت چند ده تا چند صد نانومتری) گفته می‌شود که برای ایجاد یا بهبود عملکرد مواد مانند محافظت در برابر خوردگی، محافظت در فرسایش، کاهش اصطکاک، خواص ضد آلودگی و ضد باکتری، مقاومت در برابر گرما و تابش روی سطوح اعمال می‌شود. بنابراین به‌طور کلی، نانوپوشش‌ها موادی هستند که دارای ساختار نانو بوده و یا دارای ضخامت نانو (یک لایه و یا چندلایه) می‌باشند. البته در برخی از موارد نیز، جزء مواد نانوکامپوزیتی محسوب می‌شوند، به این معنا که دارای ذرات نانو بلوری در یک زمینه معمولاً آمورف هستند.

در صورتی که نانوپوشش‌های ایجاد شده دارای سختی بالا، ضریب اصطکاک کم، مقاومت به سایش، خوردگی و چقرمگی مناسب باشند، معمولاً بعنوان نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش محسوب می‌شوند که می‌توانند در صنایع مختلف در معرض فرسایش به کار گرفته شوند. قابل ذکر است که در پیوست الف، توضیحات مربوط به استاندارد کلی نانومواد و نانوپوشش‌ها گزارش شده است. نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش باید پیش از اعمال روی تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش، از جنبه‌های مختلفی نظیر جنس پوشش و نحوه ایجاد پوشش، مطابق با ترکیب و شرایط محیطی کارکرد تجهیز نیروگاهی و همچنین مطابق با جنس و هندسه تجهیز نیروگاهی مورد بررسی و کنترل کیفیت قرار گیرند. برای استفاده مطلوب از نانوپوشش مناسب و بهره‌گیری از مزایای آن، اطلاعات درباره مشخصات فنی نانوپوشش الزامی است. همچنین باید بوسیله مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد عملکرد نانوپوشش، پیش از استفاده با مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت ایجادکننده نانوپوشش مطابقت داده شود. در این دستورالعمل آزمون‌ها و معیارهای پذیرش مربوطه برای سنجش پارامترهای تاثیرگذار در عملکرد نانوپوشش مقاوم به فرسایش معین شده است. این دستورالعمل با هدف ایجاد وحدت رویه در تعیین آزمون‌ها و ویژگی‌های کمی و کیفی نانوپوشش تنظیم شده است تا از بکارگیری نانوپوشش‌های ضعیف و غیراستاندارد جلوگیری شده و از آسیب رسیدن بیشتر به تجهیزات نیروگاهی پیشگیری شود.

۱-۱- کاربرد نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش در تجهیزات نیروگاهی

نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش در انواع تجهیزات نیروگاهی مختلفی می‌توانند به کار گرفته شوند تا موجب کاهش میزان فرسایش در تجهیزات و افزایش کارایی قطعات شوند که در ذیل به مهمترین این تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش اشاره می‌شود.

۱-۱-۱- بویلرها

در واقع بویلرها در نیروگاه‌های بزرگ حرارتی با توجه به شرایط کاری از آسیب‌پذیرترین قسمت‌های نیروگاه بوده و در اثر گذشت زمان قطعات مختلف بویلرها دچار تخریب و کاهش راندمان می‌گردند. بویلرها از جهات مختلف مانند دما (دمای بالای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد)، فشار و شرایط شیمیایی سیکل آب و بخار، سیستم سوخت و احتراق همیشه باید تحت کنترل باشند. بیشترین مکانیزم تخریب در بویلرها، فرسایش از نوع کاویتاسیون و خوردگی حفره‌ای گزارش شده است که موجب تسریع کاهش عمر تجهیزات بویلرها می‌گردد. فرسایش بطور قابل توجهی ضخامت لوله‌های بویلر را کاهش داده و موجب تخریب لوله در مدت بسیار کمتری نسبت به عمر قابل انتظار می‌شود. لذا استفاده از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش یکی از راه‌های کاهش تلفات قطعات بویلرهاست.

۱-۱-۲- پره‌های کمپرسور

پره‌های کمپرسور در توربین‌های مختلف یکی از تجهیزات نیروگاهی است که در معرض فرسایش شدید است. کمپرسورها تحت تاثیر سه مکانیزم تخریب از جمله خوردگی، سایش، فرسایش ذرات خارجی و یا فرسایش قطرات مایع قرار می‌گیرند که موجب تخریب توربین می‌شود. همین امر منجر به افزایش دمای ورودی توربین و درنهایت افزایش خزش می‌گردد. نکته قابل توجه این است که تاثیر مکانیزم فرسایش به صورت مجزا روی توربین بوده که از طریق انسداد سوراخ‌های خنک‌کننده رخ می‌دهد. توربینها

ممکن است بر اثر ذرات سخت کوچک، دچار مشکل آسیب ذرات خارجی^۱ شوند. ذرات معلق جامد موجود در هوای مکیده شده توسط پره‌های کمپرسور گازی که عمدتاً شامل ماسه و غبار هستند، آسیب قابل توجهی به پره‌های ثابت و متحرک کمپرسور وارد می‌نماید. بنابراین بهره‌گیری از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش می‌تواند در کاهش میزان این نوع تخریب موثر باشد.

۳-۱-۱- کندانسورها

کندانسور یکی از مهم‌ترین قسمت‌های نیروگاه بخار را تشکیل داده که نقش میعان بخار خروجی از توربین را بر عهده دارد. یکی از روش‌های تخریب لوله‌های کندانسور در سمت بخار، فرسایش ناشی از برخورد بخار مرطوبی است که از توربین‌های با سرعت بالا به سمت لوله‌های کندانسور جریان دارد. بخار حاوی قطرات آب در اثر برخورد با لوله باعث تخریب سطح لوله می‌شود. سرعت سیال در سمت بخار، بیش از ۳۰۰ متر بر ثانیه است. البته قابل ذکر است که فرسایش و کاویتاسیون در قسمت آب کندانسورها نیز وجود دارد، اما چون میزان سرعت سیال کمتر از سمت بخار است، این میزان خوردگی کاهش می‌یابد. لذا استفاده از نانو پوشش‌ها می‌تواند در این تجهیزات راندمان سیستم را افزایش دهد.

۴-۱-۱- پمپ و ولوها

در انواع مختلف پمپ‌ها، بدنه پمپ و پره‌های پمپ در توربین‌های آبی و بخار در معرض تخریب فرسایش هستند که نوع فرسایش اینجا بیشتر از نوع کاویتاسیون می‌باشد. قابل ذکر است که کاویتاسیون را می‌توان به صورت تشکیل و تخریب حباب‌های بخار در درون یک مایع در اثر تغییرات فشار تعریف کرد. سطح قطعه تخریب به شکل اسفنجی، گوشه‌دار و موجی شکل می‌شود. اگر کاویتاسیون به تازگی رخ داده باشد، معمولاً سطح قطعه با تجمع محصولات حاصل از خوردگی پوشیده است. این نوع تخریب در سیستم‌های آب و بخار از نیروگاه‌های بخار، رایج است. بنابراین استفاده از یک نانو پوشش مناسب و مقاوم در برابر کاویتاسیون می‌تواند یک راه حل موثر در کاهش میزان فرسایش در پمپ‌ها و ولوها باشد.

۵-۱-۱- بدنه شیرآلات مختلف، یاتاقان‌ها و لوله‌ها

در بدنه شیرآلات مختلف، یاتاقان‌ها و انواع لوله‌ها نیز چون یک سیال با سرعت زیاد در جریان است امکان تخریب سطح قطعات با مکانیزم فرسایش اغلب در توربین‌های آبی و بخار وجود دارد. در این حالت چون معمولاً سطح قطعه توسط یک لایه سطحی محافظت می‌شود، در اثر جریان زیاد سیال امکان کندی این لایه پسیو و محافظ وجود دارد که به صورت موضعی موجب تخریب قطعه می‌شود. میزان فرسایش در این حالت، به دمای بخار یا آب (سیال)، میزان pH، میزان اکسیژن محلول در سیال، سرعت سیال، جنس قطعه و کیفیت لایه پسیو روی سطح بستگی دارد. قابل ذکر است که نوع فرسایش در لوله‌ها عموماً در قسمت‌های زانویی‌ها و سه راهی‌ها، بیشتر از نوع فرسایش کاویتاسیون هستند. پس در این قسمت، استفاده از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش می‌تواند منجر به کاهش فرسایش شده و موجب افزایش طول عمر قطعات شود.

۶-۱-۱- رانرها، نازل و دریچه‌های هدایت کننده

معمولاً امکان وجود فرسایش در رانرها^۲، نازل‌ها و دریچه‌های هدایت کننده^۳ نیز در توربین‌های آبی و بخار وجود دارد. رانرها بعنوان یک تجهیز مهم در این نوع توربین‌ها محسوب شده که در معرض خوردگی فرسایشی قرار دارند. از آنجا که در این قسمت‌ها به دلیل حضور توربولانسی سیال امکان تخریب بسیار وجود دارد. طراحی پره‌های رانر الگوریتم‌های پیچیده‌ای را در دو جهت محوری و شعاعی دنبال می‌کند. توزیع زاویه‌ای پره به گونه‌ای حفظ می‌شود که حداکثر مقدار انرژی هیدرولیکی در قسمت اول پره‌ها به

^۱ Foreign Object Damage (FOD)

^۲ Runner

^۳ Guide vanes

انرژی جنبشی تبدیل شود. با این حال، مشخص شده است که فرسایش در پره به توزیع زاویه پره حساس است و با کمی اصلاح این پارامتر و استفاده از نانو پوشش ها با عملکرد مناسب می توان فرسایش را به میزان قابل توجهی به حداقل رساند.

۲-۱- پارامترهای موثر در انتخاب و خصوصیات نانو پوشش

با توجه به اینکه، جنس نانو پوشش های مورد استفاده وابسته به عواملی چون جنس زیر لایه (تجهیز)، جنس محیط کارکرد قطعه، دما و سرعت سیال در ارتباط با تجهیز متفاوت است، پارامترهای متعددی در خصوصیات نانو پوشش مقاوم به فرسایش ایجاد شده موثر است که در ذیل به صورت خلاصه به آنها پرداخته می شود.

۱-۲-۱- جنس نانو پوشش مقاوم به فرسایش

نانو پوشش های مقاوم به فرسایش به صورت کلی می تواند در گروه های پنج گانه ذیل باشند.

الف- پوشش تک لایه و نانو ساختار سرامیکی که عمدتاً شامل نیتريد یا کاربیدهای فلزهای انتقالی است، مانند پوشش نیتريد تیتانیوم، کاربید تیتانیوم، نیتريد کروم، کاربید کروم، کاربید وانادیم و ... که ضخامت آنها در حد چند میکرومتر و کمتر از ۱۰ میکرومتر است.

ب- پوشش تک لایه و نانو ساختار و چند جزئی که شامل پوشش نیترو کاربید تیتانیوم، نیترو کاربید آلومینیوم، نیتريد آلومینیوم- تیتانیوم و یا نیترو کاربید سیلیسیوم- تیتانیوم است که ضخامت آنها همانند گروه الف است.

ج- پوشش چند لایه فلزی / سرامیکی مانند پوشش تیتانیوم / نیتريد تیتانیوم، و یا کروم / نیتريد کروم است که ضخامت هر لایه کمتر ۱۰۰ نانومتر و حداقل شامل دو لایه است و ضخامت کلی پوشش نیز کمتر از ۱۰ میکرومتر است.

د- پوشش چند لایه سرامیکی از ترکیبات مختلف مانند نیتريد تیتانیوم / کاربید تیتانیوم و یا نیتريد تیتانیوم / نیتريد کروم که ضخامت آنها همانند گروه الف است.

ه- پوشش نانوکامپوزیتی که حاوی نانوذرات بلوری در زمینه فلزی است، مانند پوشش نیکلی با نانوذرات تقویت کننده کاربید تنگستن، پوشش نیکلی همراه با نانوذرات کاربید کروم، پوشش تنگستنی با نانوذرات دی بوراید تیتانیوم. ذرات تقویت کننده در ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر و ضخامت آن مانند گروه الف است.

البته قابل ذکر است قبل از ایجاد تمامی این نانو پوشش ها، حضور یک لایه واسط نیتروژن دهی شده و یا فلزی به منظور افزایش استحکام چسبندگی پوشش به زیر لایه توصیه می شود. در جدول ۱، مزایا و معایب برخی از مهمترین نانو پوشش های مقاوم به فرسایش به صورت خلاصه ذکر شده است:

جدول ۱: مزایا و معایب برخی از مهمترین نانو پوشش های مقاوم به فرسایش در تجهیزات نیروگاهی

نوع مواد پوشش	مزایا	معایب
ZrN	*مقاومت خوب در برابر فرسایش در زیر دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد * مناسب تیغه های کمپرسور یا دیگر تجهیزات ساخته شده از فولاد زنگ زن و آلیاژهای تیتانیوم	* کاهش قابل توجه در مقاومت در برابر فرسایش در شرایط کاری بالای ۴۰۰ درجه سانتی گراد * افزایش خاصی در ویژگی های عملکرد پوشش چند لایه نشان نمی دهد. * دمای کاری مجاز تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد است.
Cr ₃ C ₂	*مقاومت در برابر فرسایش در ۵۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد به دلیل تشکیل اکسی کربونیتريد ها روی سطح.	*مشابه ZrN، این ماده افزایش خاصی در ویژگی های عملکرد پوشش چند لایه نشان نمی دهد. * دمای کاری مجاز تا ۶۵۰ درجه سانتی گراد است.

* مقاومت زیاد در برابر فرسایش و خوردگی * دوام تیغه کمپرسور را افزایش می‌دهد. * تخلخل کمتری دارد. * چسبندگی خوب با سطوح ساخته شده از آلومینیوم و تیتانیوم	WC-Co
* عملکرد پایین در زاویه‌های برخورد متوسط * تنش داخلی زیاد * مقاومت در برابر خوردگی ضعیف هنگام اعمال شدن روی سطوح فولادی * برای افزایش مقاومت در برابر خوردگی به لایه‌های میانی Ni یا Cr نیاز دارد.	TiN
* خواص مکانیکی خوب * مقاومت خوب در برابر خوردگی برای سطوح فولادی در محیط‌های خشک * در شرایط فشار بالا مقاومت مناسبی از خود نشان می‌دهد.	TiN/Ti
* با افزایش مقدار کروم به طور کلی خوردگی کاهش می‌یابد و مقاومت در برابر فرسایش را زیاد می‌کند. * پایداری شیمیایی خوب * بهبود سختی نانوپوشش	TiN/CrN
* سختی نانوپوشش با افزایش مقدار کروم کاهش می‌یابد. * مقاومت در برابر خوردگی توسط ضخامت لایه نانوپوشش تعیین می‌شود.	

قابل ذکر است برخی از خصوصیات نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش، جزء خواص ذاتی پوشش (مستقل از زیرلایه و نوع تکنیک پوشش‌دهی و شرایط کاری) محسوب می‌شود که این خصوصیات با توجه به استانداردها، مقالات و اسپک‌ها مشخص می‌شود. جدول ۲ به خواص رایج‌ترین نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش با کاربرد تجهیزات نیروگاهی اشاره می‌کند. خواص ذاتی پوشش‌ها از عوامل مشخص‌کننده کیفیت پوشش اعمال شده توسط شرکت پوشش‌دهی می‌باشد.

جدول ۲: برخی از خواص ذاتی نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش شامل رنگ، سختی، ضریب اصطکاک

ترکیب	سختی (ویکرز)	ضخامت (میکرومتر)	دمای پوشش (سانتی‌گراد)	ماکزیمم تحمل دما	ضریب اصطکاک	رنگ
TiN	۲۵۰۰-۲۰۰۰	۵-۲	۴۵۰-۱۵۰	۶۰۰	۰.۴۵	زرد طلایی
TiCN	۴۰۰۰-۳۰۰۰	۵-۲	۴۵۰-۱۵۰	۴۰۰	۰.۴۵	خاکستری-آبی
TiC	۳۲۰۰-۳۴۰۰	۱۰-۴	۱۲۰۰-۱۰۰۰	۶۰۰	۰.۳۵	خاکستری
AlTiN	۳۰۰۰-۲۸۰۰	۴-۲	۶۰۰-۱۵۰	۹۰۰	۰.۶	خاکستری-بنفش
AlTiN-Multilayer	۳۲۰۰-۲۶۰۰	۸-۲	۶۰۰-۴۸۰	۱۰۰۰	-	خاکستری-بنفش
AlTiCN	۳۲۰۰-۳۰۰۰	۸-۲	۴۵۰-۴۰۰	۶۰۰	۰.۳	خاکستری-قرمز

CrN	۱۸۰۰-۲۲۰۰	۲-۵	۱۵۰-۴۵۰	۷۰۰	۰.۴	خاکستری
ZrN	۳۲۰۰-۲۶۰۰	۲-۵	۴۵۰	۸۰۰	۰.۴۵	زرد
WC/C	۸۰۰-۱۰۰۰	۲-۵	۳۰۰-۱۶۰	۳۵۰-۳۰۰	۰.۲	-
AlCrN	۲۵۰۰-۳۶۰۰	۲-۸	۶۰۰-۴۸۰	۱۱۰۰	-	خاکستری-بنفش
AlCrN - Multilayer	۲۵۰۰-۳۰۰۰	۲-۸	۶۰۰-۴۸۰	۱۱۰۰	-	خاکستری-بنفش
TiSiN	۳۴۰۰-۳۶۰۰	۲-۴	۴۵۰	۱۲۰۰	-	مسی
DLC	بیشتر از ۲۰۰۰	۲-۴	۳۰۰-۱۶۰	۳۵۰	۰.۱۵-۰.۰۵	سیاه

۱-۲-۱-۱- معیار انتخاب جنس نانو پوشش مقاوم به فرسایش

انواع نانو پوشش های ذکر شده برای کاربرد مورد نظر می تواند با همکاری با شرکت سازنده پوشش انتخاب شود، که باید با توجه به شرایط تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش (شامل جنس تجهیز، جنس محیط کار، هندسه تجهیز و ...)، خصوصیات مورد نیاز برای پوشش (با توجه به جدول ۱ و ۲)، و سابقه شرکت در زمینه ارائه محصولات با عملکرد خوب، باشد. همچنین شرکت تولید کننده پوشش یا نماینده او باید بتواند خدمات مشاوره را ارائه دهند، در صورتی که تحت پوشش طرف یا شرکت دیگر قرار نگرفته باشد. فهرستی از شرکت های خدمات دهی برای ایجاد نانو پوشش های مقاوم به فرسایش و سازنده دستگاه های مورد نظر جهت ایجاد نانو پوشش در پیوست ب پیشنهاد شده است.

* استفاده از نانو پوشش ها با رنگ رویه ظاهری روشن به جهت سهولت در بازرسی های چشمی و برخط پیشنهاد می گردد. با توجه به جدول ۲، نانو پوشش های مقاوم به فرسایش با توجه به جنس می توانند طیف خاکستری تیره، بنفش و طلایی را به خود اختصاص دهد.

* برای اطلاعات بیشتر در مورد جنس نانو پوشش های مقاوم به فرسایش می توان به گزارش پشتیبان رجوع کرد.

۱-۲-۲- نوع روش ایجاد نانو پوشش های مقاوم به فرسایش و استانداردهای مربوطه

روش های ایجاد نانو پوشش های مقاوم به فرسایش متنوع هستند که با توجه به مراجع موجود، سه روش اصلی، روش رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار^۴ و رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار^۵، پاشش و الکترو لیس / آبکاری برای تولید نانو پوشش ها وجود دارد. لذا در جدول ۳، به صورت خلاصه بعضی از خصوصیات این روش ها، شامل هزینه تجهیزات و جاری، محیط انجام فرایند، قابلیت پوشش دهی فرایند، محدوده ضخامت پوشش در کاربردهای مختلف، افزایش دمای زیر لایه، چسبندگی پوشش تا زیر لایه، سطح تمام شده، امکان ایجاد پوشش نانو ساختار و مواد پوشش دهی مورد مقایسه قرار گرفته اند.

جدول ۳: مقایسه برخی از خصوصیات روش های پوشش دهی در ابعاد نانو

خصوصیات	پاشش حرارتی	آبکاری / الکترو لیس	CVD	PVD
هزینه تجهیزات	کم تا متوسط	کم	متوسط	متوسط به بالا
هزینه های جاری	کم تا متوسط	کم	کم تا متوسط	متوسط به بالا

^۴ PVD

^۵ CVD

محیط انجام فرایند	هوای آزاد تا خلأ کم	محللول آبی	هوای آزاد تا خلأ متوسط	خلأ بالا
قابلیت پوشش دهی فرایند	خط دید	چندسویه	چندسویه	خط دید
محدوده ضخامت پوشش در کاربردهای مختلف تجهیزات نیروگاهی	۵۰ میکرومتر تا چند سانتی متر	۱۰ میکرومتر تا چند میلی متر	۰.۱ میکرومتر تا چند میلی متر	۰.۱ تا ۲۰ میکرومتر
افزایش دمای زیرلایه	کم تا متوسط	کم	متوسط به بالا	کم
چسبندگی پوشش به زیرلایه	مکانیکی نسبتاً خوب	مکانیکی متوسط تا شیمیایی خوب	شیمیایی خیلی خوب تا نفوذی بالا	مکانیکی متوسط تا شیمیایی خوب
سطح تمام شده	زبر	خشن تا صیقلی	صاف تا صیقلی	صاف تا بسیار صیقلی
مواد پوشش دهی	انواع پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها	فلزات و آلیاژها	پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها	پلیمرها، فلزات، آلیاژها، سرامیک و کاربیدها
امکان ایجاد پوشش نانوساختار	بله	بله	بله	بله

همچنین در جدول ۴، استانداردهای مربوط به روشهای ایجاد نانوپوششهای مقاوم به فرسایش ذکر شده است که باید الزامات پوشش ایجادشده توسط شرکت سازنده، با استانداردهای مربوطه مورد مقایسه قرار گیرد. روشهای اعمال نانوپوشش شامل روش رسوب شیمیایی / فیزیکی از فاز بخار، روش پاشش و الکترولس / آبکاری می باشد. لذا با توجه به نوع روش اعمال نانوپوشش، استاندارد مربوطه می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

قابل ذکر است از آنجا که نوع روش اعمال نانوپوشش، بر پارامترهای موثر بر خصوصیات پوشش عاملی تاثیرگذار است، برای جزئیات بیشتر می توان به گزارش پشتیبان رجوع کرد.

جدول ۴: استانداردهای مورد نیاز بررسی روشهای پوشش دهی در ابعاد نانو

روش اعمال پوشش	استاندارد مورد نیاز
رسوب فیزیکی از فاز بخار / رسوب شیمیایی از فاز بخار	1-VDI 3824 SHEET 1-PVD and CVD hard coatings - Quality assurance - Characteristic profiles and fields of application of hard coatings. 2- ISO 21874:2019,-PVD multi-layer hard coatings — Composition, structure and properties 3- AMS2444A- Coating, Titanium Nitride Physical Vapor Deposition 4- ISO/TC 107/SC 9- Physical vapor deposition coatings 5-ISO/CD 24674- Method and requirement of plasma nitriding and follow-up PVD hard coatings on cold-work mould steels
پاشش	1-ISO 12679:2011(en), Thermal spraying 2- AMS 2437B- Coating, Plasma Spray Deposition 3- AWS C2.16/C2.16M:2002- Guide For Thermal-Spray Operator Qualification 4-ISO 17836:2004-Thermal spraying -Determination of the deposition efficiency for thermal spraying 5- H8666-90- Testing Methods for Thermal Sprayed Ceramic Coatings 6- DIN 32521- Acceptance test and quality control for thermal spraying equipment 7- GS EP COR 355-External protection of piping and equipment by thermal spray coating

1- DIN 50960 PT-1-86- Electroplated and Chemical Coatings: Designation and Specification in Technical Documents 2- ASTM B374- Terminology Relating to Electroplating 3-ASTM B580 - 79(2019)- Standard Specification for Anodic Oxide Coatings on Aluminum 4- ASTM D4538 - 21 Standard Terminology Relating to Protective Coating and Lining Work for Power Generation Facilities 5- B689 - 97(2018)e1- Standard Specification for Electroplated Engineering Nickel Coatings 6- ASTM B343- Standard Practice for Preparation of Nickel for Electroplating with Nickel 7- STI/33 - Electrodeposited and related coating 8- ASTM B 733- Standard Specification for Autocatalytic (Electroless) Nickel- Phosphorous Coatings on Metals	الکترولس / آبکاری
---	-------------------

۳-۲-۱- جنس مواد زیرلایه مجاز برای پوشش دهی در ابعاد نانو به صورت کلی مواد زیرین که می توان آنها را پوشش دهی کرد، شامل فولاد، فولاد ابزار، فولادهای تندبر، فولادهای زنگ نزن، آلیاژهای تیتانیوم، آلیاژهای مقاوم در دمای بالا، آلیاژهای نیکل، آلیاژهای کبالت، آلیاژهای مس، آلومینیوم برنز و غیره است. * به طور کلی مواد زیرلایه برای تکنیک های شبیه PVD باید با شرایط خلأ بالا در دمای نسبتاً بالا سازگار باشند و باید دارای سطحی باشند که برای اتصال متالورژی به پوشش آماده شده باشد. جنس ماده زیرلایه نیز از عواملی است که می تواند به عنوان عاملی تاثیرگذار در عملکرد نانو پوشش اعمالی محسوب شود.

۴-۲-۱- ضخامت پوشش و اندازه دانه نانو پوشش علاوه بر جنس نانو پوشش، روش اعمال و مواد زیرلایه، خصوصیات هندسی نانو پوشش و زیرلایه می تواند نقشی موثر در عملکرد بهینه نانو پوشش داشته باشد که برخی از این عوامل متغیر در جدول ۵ ذکر شده است. پیشنهاد می گردد، برای بررسی بیشتر این مورد به گزارش پشتیبان مراجعه شود.

جدول ۵: تاثیر خصوصیات هندسی نانو پوشش/زیرلایه بر خواص نانو پوشش مقاوم به فرسایش

عامل متغیر/ خصوصیات هندسی	تاثیر بر خواص نانو پوشش
ترکیب شیمیایی نانو پوشش	سختی نانو پوشش، میزان تنش پسماند، چقرمگی، چسبندگی نانو پوشش به زیرلایه، مقاومت به فرسایش و ضریب اصطکاک
سختی زیرلایه	سختی نانو پوشش، میزان تنش پسماند و مقاومت به فرسایش
ضخامت نانو پوشش	جهت ترجیحی دانه، مرفولوژی نانو پوشش، چسبندگی نانو پوشش به زیرلایه، سختی نانو پوشش، میزان تنش پسماند، مقاومت به فرسایش و ضریب اصطکاک، مقاومت به خوردگی، چقرمگی
زبری سطح زیرلایه	زبری نهایی پوشش، مقاومت به خوردگی، میزان انتقال حرارت
اندازه دانه/خوشه نانو پوشش	مقاومت به خوردگی، چقرمگی، سختی
چندلایه بودن پوشش	چقرمگی، سختی، مدول الاستیک، تخلخل

۳-۱- مزایای استفاده از نانو پوشش های مقاوم به فرسایش از مزایای نانو پوشش های مقاوم به فرسایش می توان به عوامل ذیل اشاره کرد:

- عملکرد بهتر تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش به دلیل افزایش مقاومت در برابر خوردگی، عوامل سایشی، اکسیداسیون و شوک‌های حرارتی
- افزایش طول عمر مفید (حداقل ۲-۳ برابر) تجهیز و افزایش بهره‌وری
- طولانی‌تر شدن فواصل بازرسی
- نداشتن محدودیت دمایی برای تجهیزات با دمای عملکرد بالا
- عدم محدودیت رطوبت برای کاربرد
- کاهش هزینه تعمیرات تجهیزات و خاموشی سیستم
- استفاده از مواد با فناوری جدید و به روز نانو
- سازگاری این فناوری با محیط زیست و عدم ایجاد آلودگی‌های زیستی

۴-۱- معایب استفاده نامناسب از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش

از معایب نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش می‌توان به عوامل ذیل اشاره کرد:

- در صورتی که جنس پوشش انتخابی با خصوصیات منحصر بفرد برای تجهیزات نیروگاهی به خوبی انتخاب نشود، ممکن است که منجر به خسارت بیشتر و ایجاد خوردگی حفره‌ای و حتی کندگی پوشش در قسمت‌های مختلف شود.
- با توجه به نوع تکنیک انتخابی برای ایجاد نانو پوشش، امکان افزایش هزینه ساخت قطعات وجود دارد.
- در تجهیزاتی که پیچیدگی هندسی و یا ابعاد بسیار بزرگ داشته باشند، قابلیت استفاده کمتری دارد.
- عمر مفید نانو پوشش می‌تواند بسته به جنس مواد نانو پوشش، تجهیز و شرایط محیطی متفاوت باشد.

۵-۱- ضرورت دستورالعمل

برای استفاده مطلوب از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش مناسب و بهره‌گیری از مزایای آن، اطلاعات درباره نحوه ارزیابی خصوصیات پوشش ایجاد شده به وسیله مجموعه‌ای از آزمون‌های استاندارد الزامی بوده و البته باید خصوصیات و مشخصات فنی ارائه شده توسط شرکت ایجاد کننده پوشش مطابقت داده شود. همچنین در این دستورالعمل، آزمون‌ها و معیارهای پذیرش مربوطه برای تعمیر و نگهداری نانو پوشش مقاوم به فرسایش نیز مشخص شده است. لذا هدف اصلی این دستورالعمل، تعیین استانداردها و آزمون‌های واحد برای سنجش ویژگی‌های نانو پوشش، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری پوشش به منظور عملکرد بهتر و پیشگیری از آسیب رسیدن به سیستم‌های در معرض فرسایش نیروگاهی می‌باشد.

فصل دوم- نمادها و واحدها

در جدول ۶ نمادها و واحدهای ذکر شده در دستورالعمل گزارش شده است.

جدول ۶: نمادها و واحدهای ذکر شده در دستورالعمل

نماد	کمیت / روش	واحد
-	نرخ خوردگی	mpy
H	میکروسختی	VHN
-	میزان چقرمگی	MPa·m ^{1/2}
-	غلظت ناخالصی	ppb

$mm^3/N.M$	سرعت سایش	-
MPa, psi	استحکام، استحکام چسبندگی / فشار	-
-	تفرق پرتو ایکس / با زاویه مایل	<i>XRD/GIXRD</i>
-	میکروسکوپ نیروی اتمی	<i>AFM</i>
-	میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان	<i>FESEM</i>
-	روش بی ای تی به منظور تخلخل سنجی	<i>BET</i>
-	میکروسکوپ الکترونی عبوری	<i>TEM</i>
-	بازتاب سنج پرتو ایکس	<i>XRR</i>
-	طیف سنجی فوتوالکترون پرتو ایکس	<i>XPS</i>
-	طیف سنجی پس پراکندگی رادرفورد	<i>RBS</i>
-	طیف سنجی الکترون اوژه	<i>AES</i>
-	میکروآنالیز روبش الکترونی	<i>EPMA</i>
-	طیف سنجی جرمی یون ثانویه	<i>SIMS</i>
-	طیف سنج فلورسانس پرتو ایکس	<i>XRF</i>
-	طیف سنج مادون قرمز تبدیل فوری	<i>FTIR</i>
-	رسوب دهی فیزیکی از فاز بخار	<i>PVD</i>
-	رسوب دهی شیمیایی از فاز بخار	<i>CVD</i>

فصل سوم- هدف و دامنه کاربرد

این دستورالعمل با هدف ایجاد یک وحدت رویه، در تعیین ارزیابی، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش نگارش شده است. کاربرد این دستورالعمل برای استفاده از این نوع نانوپوشش‌ها در تجهیزات نیروگاهی همچون لوله‌های مختلف در بویلرها و کندانسورها، پره‌های کمپرسور در انواع توربین‌ها، بدنه انواع شیرآلات، پمپ‌ها، ولوها، رانرها، نازل‌ها و دریچه‌های هدایت‌کننده و ... است.

اطلاعات مندرج در این دستورالعمل در زمان انتشار معتبر تلقی می‌شود، اما ممکن است در نتیجه قوانین، مقررات، استانداردها، روشها و/یا اطلاعات بیشتر به روز شود و نیاز به اصلاحات اساسی پیدا کند.

فصل چهارم- محدوده اجرای دستورالعمل

محدوده اجرای این دستورالعمل می‌تواند به شرح ذیل باشد:

- ۱- شرکت مادر تخصصی تولید نیروی برق حرارتی
- ۲- معاونت برق و انرژی وزارت نیرو
- ۳- شرکت‌های مدیریت تولید برق نیروگاه‌ها و شرکت‌های تولید نیروی برق
- ۴- پژوهشگاه نیرو (آزمایشگاه‌های مرجع، پژوهشکده تولید، گروه‌های پژوهشی و مراکز فناوری و اسناد ذیربط)
- ۵- ستاد ویژه توسعه فناوری نانو ریاست جمهوری
- ۶- شرکت‌های ایجاد کننده نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش
- ۷- شرکت مدیریت پروژه‌های نیروگاهی ایران (مپنا)
- ۸- شرکت تعمیرات نیروگاهی ایران
- ۹- تامین‌کنندگان و تولیدکنندگان تجهیزات تولید نیرو

فصل پنجم - تعاریف

فرسایش^۶، بر اساس استاندارد NACE فرسایش عبارتند از: از دست دادن تدریجی مواد (کاهش وزن) از یک سطح جامد، ناشی از برهمکنش مکانیکی بین آن سطح و یک سیال، یک مایع چند جزئی یا ذرات جامد حمل شده با سیال.

کاویتاسیون^۷، بر اساس استاندارد NACE فرسایش ناشی از کاویتاسیون در نتیجه تشکیل و فروپاشی حباب در سطح یا نزدیک آن رخ می‌دهد که منجر به برداشتن سطحی مواد می‌شود. کاویتاسیون تهدیدی در جریان سیال با سرعت بالا با تغییرات ناگهانی فشار است.

فرتینگ^۸، نوعی فرسایش است که در ناحیه تماس میان دو فلز تحت نیرو که در معرض اندکی جابه جایی نسبی توسط ارتعاش یا برخی دیگر نیروها قرار دارند، رخ می‌دهد. معمولاً خسارت با چسبندگی موضعی میان سطوح جفت‌شده آغاز می‌شود و هنگامی که ذرات چسبیده از یک سطح کنده شده و با هوا یا دیگر محیط‌های خورنده واکنش دهند، پیش می‌رود. سطوح آسیب دیده شامل حفرات و شیارهایی است که توسط محصولات خوردگی پوشیده شده‌اند.

فرسایش قطرات مایع^۹، کم شدن سطح یک ماده جامد که پیوسته در معرض ضربه‌های ناشی از قطرات مایع یا بخار در اندازه (۰.۰۵ تا ۴۰ میکرومتر) است. این فرسایش شایع در قسمت بالای^{۱۰} پره‌های توربین‌های بخار است که می‌تواند با سرعت نسبی تا چند صد متر بر ثانیه با پره برخورد کرده و آن را دچار آسیب کند. میزان pH قطرات مایع از موثرترین عوامل بر سرعت فرسایش است.

فرسایش ذرات جامد^{۱۱}، مکانیزم فرسایش ذرات جامد در واقع یک پدیده حذف مواد است که سطح مواد مورد هدف به دلیل تأثیر مکرر ذرات جامد با اندازه متفاوت و سرعت بالای آنها، تجربه می‌کنند. مثلاً در توربین‌های گازی ممکن است بر اثر ذرات سخت کوچک، دچار مشکل آسیب ذرات خارجی شوند. ذرات معلق جامد موجود در هوای مکیده شده توسط توربین که عمدتاً شامل ماسه و غبار هستند، آسیب قابل توجهی به پره‌های ثابت و متحرک کمپرسور وارد می‌نماید.

نگهداری^{۱۲}، نگهداری به معنی کار جزئی ترمیم پوشش است که به‌طور منظم توسط بازرس یک تجهیز با استفاده از وسایل و ابزار معمولی و درجا در هنگام کار در محل کارکرد تجهیز فراهم می‌شود تا شرایط پوشش "خوب" یا "متوسط" حفظ شود. نگهداری، باعث تأخیر یا کندشدن خرابی نانوپوشش می‌شود و محافظت از تجهیز را در کوتاه مدت ایجاد می‌کند.

تعمیر^{۱۳}، تعمیر به معنای عملیات ترمیم نانوپوشش با ماهیت طولانی مدت است، که معمولاً در زمان خاموشی سیستم یا دوره تعمیر برنامه‌ریزی شده تجهیز نیروگاهی برای بازگرداندن وضعیت پوشش "متوسط" یا "ضعیف" به حالت "خوب" انجام می‌شود. همچنین تعمیر به فعالیت‌هایی که برای بازگرداندن یکپارچگی پوشش زمانی که آسیب در ناحیه‌های کوچک ایجاد شده است، اختصاص داده شده است. این امر معمولاً به آماده‌سازی نیروگاه، نیروی انسانی و تجهیزاتی مانند پوشش‌دهی و اپراتورها برای آماده‌سازی سطح و استفاده از نانوپوشش نیاز دارد.

⁶ Erosion

⁷ Cavitation

⁸ Fretting

⁹ Water droplet erosion

¹⁰ Shroud

¹¹ Solid particle erosion

¹² Maintenance

¹³ Repair

شرایط پوشش^{۱۴} در هنگام بازرسی و بهره‌برداری، بر اساس بازرسی بصری و درصد تخمین زده شده از مناطق دارای خرابی پوشش و اندازه‌گیری ضخامت پوشش، وضعیت پوشش به "متوسط"، "ضعیف" یا "خوب" تعیین و طبقه‌بندی می‌شود. برای تعاریف و جزئیات بیشتر وضعیت پوشش، عکس‌ها و مقیاس‌های ارزیابی یکنواخت/ موضعی به مراجع مرتبط^{۱۵} مراجعه کنید.

نقص (هالیدی)^{۱۶} در نانوپوشش، ناپیوستگی در یک نانوپوشش غیرفلزی که در صورت قرار گرفتن در معرض ولتاژ خاص، رسانایی الکتریکی را نشان می‌دهد.

فصل ششم - ایمنی

شرکت تامین کننده باید از لحاظ ایمنی و سایر ملاحظات مربوط به نانوپوشش‌ها، بر اساس طراحی تجهیز و جنس نانوپوشش و محیط عملکرد تجهیز نیروگاهی، الزامات مربوط به سلامت، ایمنی و محیط زیست (HSE) را مشخص کند. همچنین شرکت ایجادکننده پوشش ملزم به ارائه برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (1MSDS) می‌باشد. اپراتورها به دلیل ارتباط مستقیم با پوشش‌ها در حین بازرسی پوشش‌ها باید ایمنی مورد نیاز را جهت خطرات ناشناخته رعایت کنند. لذا جهت اصول ایمنی استانداردهای فناوری نانو- آموزش سلامت و ایمنی برای نیروی کار- راهنما (INSO21198) باید رعایت شود. البته این نکته قابل ذکر است که نانوپوشش‌های مطرح شده در این سند عموماً از لحاظ سمیت و محیط زیست، مشکل و محدودیت خاصی ندارند.

فصل هفتم - مهارت مسئول

کارفرما می‌تواند تیمی به عنوان مسئولان فنی برای اجرای این دستورالعمل با شرایط زیر تشکیل دهد.

- کارشناس مسلط به مسائل نیروگاه با سابقه اجرایی، حداقل با مدرک کارشناسی مهندسی مواد، مکانیک، شیمی و مهندسی شیمی
- کارشناس مسلط به کنترل فرایند با سابقه اجرایی، حداقل با مدرک کارشناسی مهندسی مواد، مکانیک یا شیمی
- کارشناس آشنا به مسائل روز فناوری نانو با حداقل مدرک کارشناسی ارشد مهندسی مواد با گرایش نانو فناوری
- کارشناس مهندسی مواد نیروگاه مسلط به مباحث خوردگی و نانوپوشش‌ها حداقل با مدرک کارشناسی ارشد مواد گرایش خوردگی

فصل هشتم - دستورالعمل ارزیابی نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش ایجاد شده

این دستورالعمل توسط مجری و تحت نظارت مسئولان فنی، برای ارزیابی نانوپوشش مقاوم به فرسایش در تجهیزات مختلف نیروگاهی تعریف شده است. این دستورالعمل در سه بخش استانداردها، آزمون‌ها و حد پذیرش تقریبی خصوصیات مورد نیاز به شرح ذیل تدوین شده است.

در ابتدا مصرف‌کننده، بر اساس حد پذیرش تقریبی (جدول ۹)، خصوصیات موردنیاز از نانوپوشش مقاوم به فرسایش و آزمون‌های تعیین مشخصات (جدول ۸) را بر اساس استانداردهای ذکر شده در جدول ۷، به تولیدکننده نانوپوشش ارائه می‌دهد. سپس شرکت ایجادکننده نانوپوشش باید علاوه بر تحویل نمونه مناسب با مشخصات ارائه شده، جهت آزمایش مشخصات فنی محصول خود را ارائه نماید. جهت سنجش کیفیت نانوپوشش ایجادشده، نیروگاه باید برای ارزیابی کامل خصوصیات نانوپوشش‌ها بر اساس الویت (جدول ۷)، با استفاده از آزمون‌های ذکر شده (جدول ۸) پس از سنجش در آزمایشگاه‌های معتبر پیشنهادی پیوست د، نتایج ارزیابی

¹⁴ Coating Conditions

¹⁵ Refer to appendix 10 to IACS Recommendation 87 - Guidelines for Coating Maintenance and Repairs for Ballast Tanks and Combined Cargo/Ballast Tanks on Oil Tankers, revision 1, 2006.

¹⁶ Holiday

خود را با نتایج شرکت مطابقت دهد تا در صورت مطلوب بودن از نانوپوشش ایجاد استفاده شود. همچنین کلیه مراحل ذکر شده تحت نظارت مسئولان فنی انجام پذیرد.

۱-۸- ارزیابی خصوصیات مورد نیاز نانوپوششها بر اساس استانداردهای مربوطه

در ذیل مراحل استفاده از جدول ۷ به صورت گام به گام و پیشنهادی ارائه شده است:

۱- گام اول: تشخیص نوع فرسایش با توجه به شناخت شرایط کاری قطعه و انتخاب استاندارد مربوطه
با توجه به اینکه فرسایش خود دارای دو زیرمجموعه کاویتاسیون و فرتینگ و دارای دو مکانیزم فرسایش قطرات مایع و فرسایش ذرات جامد می باشد، لذا تشخیص نوع فرسایش، در درجه اول اهمیت بسزایی دارد که تشخیص آن به عهده متخصصان این امر شامل کارشناسان مهندسی خوردگی است. همچنین در فصل ششم، برای بررسی نوع تشخیص اطلاعاتی به صورت خلاصه آمده است. قابل ذکر است بعنوان مثال در پره های کمپرسور گازی، بدنه شیرآلات مختلف، فرسایش همراه با ذرات جامد، در پره های توربین های بخار فرسایش همراه با قطرات مایع، در یاتاقان ها فرتینگ و در لوله های بویلر و کندانسورها، کاویتاسیون مکانیزم غالب به شمار می رود. در پیوست ج (توضیحات مربوط به استانداردهای گزارش شده) با توجه به نوع فرسایش نوع استاندارد قابل تعیین است.

۲- گام دوم: تعیین اجباری بودن ارزیابی خصوصیات مورد نیاز

با توجه به اینکه محیط کارکرد قطعات نیروگاهی متفاوت است، مثلاً اگر زیرلایه (قطعه) در ارتباط با محیط آب یا دیگر مایعات (در بویلر و کندانسورها) و یا هوا (پره های کمپرسور) باشد، نیاز به ارزیابی نانوپوشش در موارد خاص است، لذا برخی از خصوصیات مطرح شده در جدول ۷، برای ارزیابی خصوصیات تمامی نانوپوشش های مقاوم به فرسایش در تجهیزات نیروگاهی مورد نیاز است و برخی دیگر با توجه به شرایط کاری قطعه و محیط مورد تماس می تواند در صورت لزوم انجام شود.
تذکر ۱: در صورتی که دمای کارکرد قطعه بالا باشد، بررسی خصوصیات خوردگی دمای بالا، تنش پسماند و پایداری حرارتی نانوپوشش مورد نیاز است.

تذکر ۲: در صورتی که مکانیزم غالب فرسایش، فرتینگ باشد، بررسی خصوصیات مقاومت به سایش، تعیین ضریب اصطکاک و مقاومت به خراش نانوپوشش مورد نیاز است.

تذکر ۳: در صورتی که کارکرد قطعه در معرض یک محیط خورنده باشد بررسی خصوصیات خوردگی نانوپوشش از موارد لزوم محسوب می شود.

۳- گام سوم: تعیین الویت انجام کار

تعیین ارزیابی خصوصیات نانوپوششها در سه الویت انجام آزمون تعریف شده اند که با سه شماره ۱، ۲ و ۳ مشخص شده اند.

۴- گام چهارم: تعیین نوع آزمون مورد ارزیابی

با توجه به شرایط کارکرد قطعه نیروگاهی مورد فرسایش، نوع آزمون مورد ارزیابی انتخاب می شود. همچنین با توجه به در دسترس بودن آزمون، قیمت، سهولت امکانات و استاندارد مورد نیاز می تواند یکی از آزمون های تعیین ویژگی های خصوصیات نوع نانوپوشش با توجه به جدول ۸ انتخاب گردد. توضیحات بیشتر در بخش ۹-۲ و پیوست ه ذکر شده است.

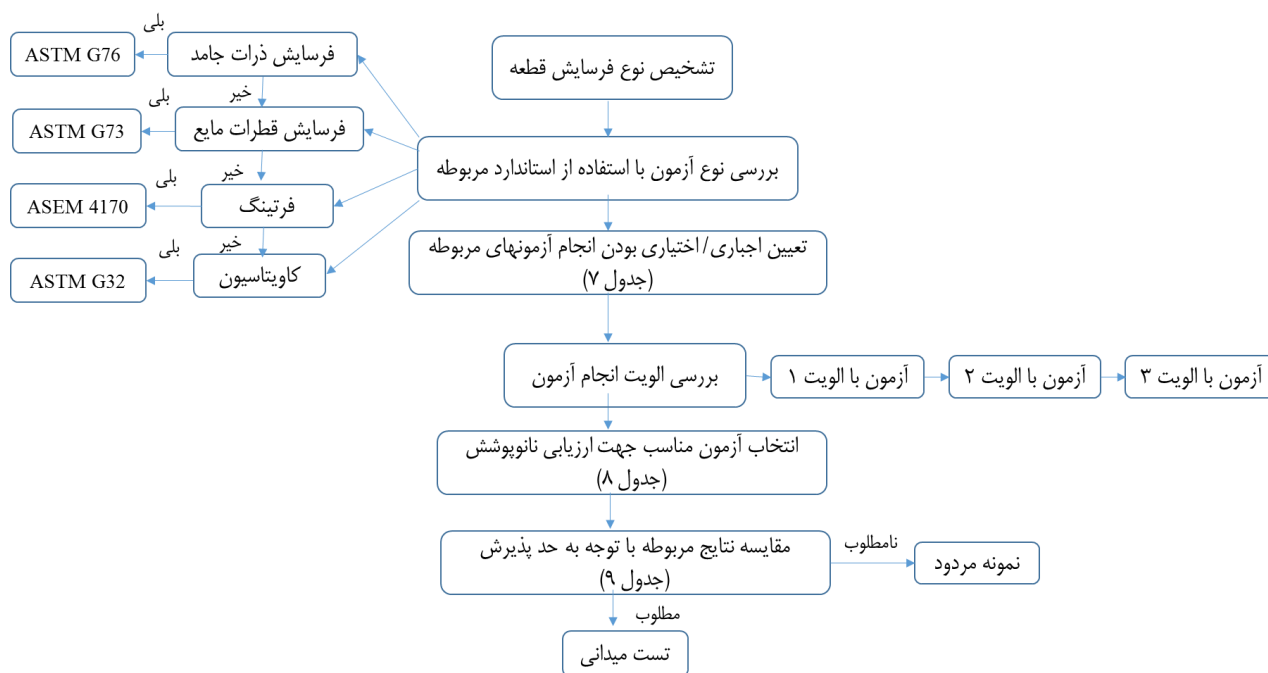
۵- گام پنجم: بررسی و تعیین حد پذیرش

حد پذیرش تقریبی خصوصیات مورد نیاز ارزیابی نانوپوشش های مقاوم به فرسایش در تجهیزات نیروگاهی در جدول ۹ با توجه به مقالات موجود گزارش شده است. توضیحات بیشتر در بخش ۹-۳ ذکر شده است.

۶- گام ششم: بررسی مثالهای کاربردی

به منظور راهنمایی بازرس، دو مثال کاربردی برای دو قطعه خاص پره توربین بخار با پوشش نانو ساختار نیتريد تیتانیوم به روش

PVD و میل سوپاپ^{۱۷} توربین بخار از جنس Inconel 901 و 422 stainless steel با پوشش نانوساختار کربو نیتريد سيليسیوم –تیتانیوم (TiSiCN) به روش کندوپاش به ترتیب در پیوست-و و پیوست-ز ذکر شده است. به صورت شماتیک این ۶ گام در شکل ۱ خلاصه شده است.



شکل ۱: شماتیک مراحل ارزیابی خصوصیات موردنیاز نانوپوششها بر اساس استانداردهای مربوطه

جدول ۷: استانداردها و الویت انجام آزمون مربوط به ارزیابی خصوصیات نانو پوششهای مقاوم به فرسایش

الویت انجام آزمون	در صورت لزوم	اجباری	خصوصیات پوشش	نام استانداردهای مورد استفاده
۱	-	×	مقاومت به فرسایش (ذرات جامد و قطرات آب)	ASTM F1864 - 16 ASTM G76 - 18 ASTM G73 - 10 ASTM G40 - 17 STP 0474 ASTM G65 - 16e1 ASTM G40-21 ASME STP-PT-066 ASTM STP946 GS EP COR 161
۱	-	×	مقاومت در برابر فرتینگ	ASTM D4170 - 16 ASTM D7594 - 19
۱	-	×	مقاومت در برابر کاویتاسیون	ASTM G32 - 16 ASTM G32 - 10 ASTM G134 - 17 ASTM D2809
۱	-	×	سختی	ASTM E384

¹⁷ Valve stem

ISO 14577 ISO/TC 164/SC3 BS 5411-part 6				
ISO 20267 ASTM E 399-99 ASTM E1820 –20b ASTM C1326-08 ASTM C1327-08	چقرمگی شکست	X	-	۱
ASTM C633 - 13(2017) ASTM C1624 - 05(2015) ASTM D 4541 ASRM E290 - 14 ASTM D3359-08 ISO 27307:2015 DIN 4856:2018-02 VDI 3198	چسبندگی	X	-	۱
ASTM B487-85(2007) ISO 1463 BS ISO 16413 ASTM B733 - 15	ضخامت سنجی	X	-	۱
ISO/TC 201 ISO/TC 202 ISO 22581 ISO TR 14187 ISO 22415 DIN ISO 11505 ISO 13424 ISO 17109 ISO 22278 ISO 21874:2019	ترکیب پوشش به صورت سطحی	X	-	۱
NACE standard SP0188 ASTM D 5162-B ISO 18550	نقص در پوشش	X	-	۲
ISO 4287-1:1984 ISO 4518:2021 ASTM E1274	زبری سنجی	X	-	۲
ISO 9220 ASTM E1920 - 03(2014) ISO 29301:2010	یکنواختی ضخامت پوشش	X	-	۲
ASTM C1259 – 08 ASTM E1876 – 15 ISO 14577	مدول الاستیک	X		۲
ASTM E3-01(2007) ISO 4288	مرفولوژی پوشش	-	X	۲
ASTM B117 NACE standard 2004 ASTM STP-421 ASTM G44-99(2005) ASTM G31 ISO 10289 ASTM G91 - 11(2018) ASTM G33 - 99(2020)	مقاومت به خوردگی	-	X	۲

ASTM G106 - 89(2015) ASTM G5 - 14e1 ASTM G96 - 90(2018) ASTM G102 - 89(2015)e1 ASTM MNL20 ASTM G3 - 14(2019) ASTM B 287				
ASTM E2550 - 17 ASTM E1582 - 21 ASTM E1131 - 20 ASTM D2485 - 18	پایداری حرارتی	-	x	۲
ISO 10308:2006 ASTM E2109 - 01 ASTM B765 - 03(2018) DIN EN ISO 10309	چگالی سنجی / تخلخل پوشش	x	-	۳
ASTM G99 - 17 ASTM G65-04 ASTM B611 - 13(2018) ASTM G132 - 96(2018) ISO 18535	مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک	-	x	۳
ISO 19252:2008 ASTM C1624 ASTM G171 - 03(2017)	مقاومت به خراش	-	x	۳
ASTM E2245 - 11(2018) ASTM B636 / B636M - 15 ASTM B975 - 18e1 ASTM E837	تنش پسماند		x	۳

۲-۸- آزمون‌های موردنیاز ارزیابی پوشش

در جدول ۸، تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام آزمون‌ها در هنگام ارزیابی نانوپوشش‌ها ارائه شده است. قابل ذکر است با توجه به نوع پوشش، جنس تجهیز، شرایط هندسی تجهیز و شرایط محیطی (شامل دما، فشار، سرعت، مقدار اکسیژن، درصد رطوبت، میزان خوردگی) در دسترس بودن، نیز آزمون‌های مورد استفاده می‌تواند متغیر و انتخابی باشد.

جدول ۸: تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام آزمون‌ها در هنگام ارزیابی پوشش‌ها

نام آزمون/روش مورد استفاده	خصوصیات پوشش
میکروهاردنس (میکروویکرز)، نانو ایندنتیشن (AFM)	سختی
میکروهاردنس (میکروویکرز)، سختی سنجی (ویکرز)	چقرمگی شکست
پین روی دیسک- سایش رفت و برگشتی، تریبومتر	مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک
آزمایش ضربه چند جهته ^{۱۸} ، آزمایش جت گاز ^{۱۹} ، آزمایش مقایسه‌ای خارجی ^{۲۰} ، آزمون فرسایش شن و ماسه-هوا ^{۲۱} ، آزمایش فرسایش جت آب ^{۲۲}	مقاومت به فرسایش
پول-اف، تست خراش، تست راکول سی، کالو	چسبندگی

¹⁸ Multi-Directional Impact Testing

¹⁹ Gas jet test rig

²⁰ Foreign Comparative Testing (FCT)

²¹ Air-sand erosion test rig

²² Water jet erosion test

مقاومت به خراش	نانو ایندنتیشن (<i>AFM</i>)
زبری سنجی	نانو ایندنتیشن (<i>AFM</i>)، پروفایل متر استایلووس
ضخامت سنجی	دستگاه <i>FESEM</i> ، دستگاه <i>XRR</i> ، روش جریان گردابی ^{۲۳} ، آلتراسونیک، آزمون کالو ^{۲۴} ، گیج مغناطیسی
مرفولوژی پوشش	دستگاه <i>FESEM</i> ، <i>TEM</i>
ترکیب پوشش	<i>SIMS</i> , <i>XRD</i> , <i>EPMA</i> , <i>RBS</i> , <i>AES</i> , <i>GIXRD</i> , <i>XPS</i> , <i>XRF</i> , <i>FTIR</i>
مقاومت به خوردگی	کاهش وزن، پولاریزاسیون تافل، طیف سنجی امپدانس الکتروشیمیایی
پایداری حرارتی	ترموگرویمتری، آزمون شوک حرارتی، کالری متری، دیلاتومتری
مقاومت در برابر فرتینگ	دستگاه فرتینگ ^{۲۵}
مقاومت در برابر کاویتاسیون	دستگاه کاویتاسیون، دستگاه آلتراسونیک
چگالی سنجی/ تخلخل پوشش	<i>FESEM</i> ، <i>BET</i>
نقوص در پوشش	<i>XRD</i> ، دستگاه <i>FESEM</i>
تنش پسماند	روش فویل نازک، <i>XRD</i>
مدول الاستیک	نانو ایندنتیشن (<i>AFM</i>)

این آزمایش‌ها باید توسط سازنده یا آزمایشگاه مستقلی که دارای مجوز است، انجام شود. همه آزمون‌ها باید طبق بندها و استانداردهای مربوط گزارش شوند. در پیوست-د، آزمایشگاه‌های مرجع پیشنهادی جهت ارزیابی نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش ذکر شده است. توضیحات تکمیلی در مورد برخی از این آزمون‌ها که کاربرد بیشتری دارند نیز در پیوست-ه، ذکر شده است.

۳-۸- حد پذیرش خصوصیات موردنیاز نانوپوشش

برای تأیید نانوپوشش‌ها مطابق با الزامات استانداردها، مشخصات و سفارش خرید نیازمند به انجام آزمون‌های مختلف با توجه به استانداردهای مربوطه است. لذا باید حد پذیرش خصوصیات موردنیاز نانوپوشش‌ها مشخص شود. قابل ذکر است که با توجه به جنس پوشش مورد استفاده، نوع تکنیک ایجاد نانوپوشش و شرایط کاری تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش، نوع آزمون انجام شده و پارامترهای مورد استفاده در آزمون‌ها، حد پذیرش مربوط به خصوصیات پوشش متفاوت خواهد بود. ولی به صورت کلی در جدول ۹، حد پذیرش تقریبی پارامترهای مربوط به خصوصیات نانو پوشش مقاوم به فرسایش و استانداردها/ روش‌های آزمون مربوطه با توجه به مراجع موجود مرتبط با تجهیزات نیروگاهی (مقالات، ثبت اختراع‌ها و کاتالوگ ارائه محصولات شرکتهای معتبر) ذکر شده است.

همچنین دو مثال کاربردی برای دو قطعه خاص پره توربین بخار با پوشش نانو ساختار نیتريد تیتانیوم به روش PVD و میل سوپاپ^{۲۶} توربین بخار از جنس 422 stainless steel و Inconel 901 با پوشش نانو ساختار کربو نیتريد سیلیسیوم -تیتانیوم (TiSiCN) به روش کندوپاش به ترتیب در پیوست-و و پیوست-ز ذکر شده است.

²³ Eddy current

²⁴ Calo test

²⁵ Fretting tester

²⁶ Valve stem

جدول ۹: حد پذیرش تقریبی پارامترهای مربوط به خصوصیات نانو پوشش مقاوم به فرسایش

شماره استاندارد یا نوع روش	حد پذیرش	خصوصیات پوشش
ASTM C1327-08 ASTM E384 – 17	بیشتر از ۱۳۰۰ میکروویکرز ۱۵-۴۰ گیگاپاسکال	سختی
روش فرورفتگی	بیشتر از $10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$	چقرمگی شکست
ASTM G99	در محدوده ۷۰ تا ۱۴۰ میلی گرم بر کیلوگرم	میزان نرخ سایش
روش پین روی دیسک	کمتر از ۰.۵ (معمولا ۰.۲-۰.۴)	ضریب اصطکاک
ASTM G76-83	در محدوده ۰.۰۵ تا ۰.۴۵ میکرو گیلوگرم بر گیلوگرم در محدوده ۱ تا ۰.۰۱ گرم بر سانتی متر مکعب در محدوده ۰.۶ تا ۱۶ میکرومتر بر گرم در محدوده ۰.۱ تا ۰.۶ میلی گرم بر دقیقه بدون در نظر گرفتن زاویه برخورد	میزان فرسایش
ASTM D 4541 ISO 27307:2015	بیشینه نیرو برای اولین ترک: ۱۰۰-۴۰ نیوتن بیشینه نیرو برای جدایش پوشش: ۲۰۰-۱۵۰ نیوتن ۱۲۰۰۰ psi – ۶۰۰۰ برای نانو پوشش های ایجاد شده توسط اسپری	پیوستگی چسبندگی
روش خراش راکول	کیفی و ضریب اصطکاک کمتر از ۰.۴	استحکام به خراش
روش فرورفتگی نانو	- در محدوده کمتر از ۱۰۰ نانومتر - زبری حتما باید کمتر از ضخامت لایه باشد	زبری سنجی
ISO 21363:2020	- کمتر از ۱۰۰ نانومتر هر لایه - ضخامت کلی بیشتر از ۱۰ میکرومتر نباشد (معمولا ۱-۵ میکرومتر)	ضخامت سنجی
ISO 21363:2020	کمتر از ۱۰۰ نانومتر	اندازه دانه / خوشه پوشش
ASTM G102 ASTM G59 – 97 ASTM C694 ASTM B 287	کمتر از ۵۰ mpy کمتر از ۱ میلی متر بر سال کمتر از ۱۰ میکروآمپر بر سانتی متر مربع در محیط آب دریا کمتر از ۱ میکروآمپر بر سانتی متر مربع در محیط سولفات سدیم ۲۰۰-۳۰۰ ساعت در آزمون پاشش نمک	نرخ خوردگی
ASTM D4170 - 16 ASTM D7594 –19	ارزیابی کیفی بر اساس استاندارد	مقاومت در برابر فرتینگ
ASTM G32	میزان کاهش وزن کمتر از یک درصد	مقاومت در برابر کاویتاسیون
ASTM E2109 ISO 21363:2020	کمتر از ۵ درصد برای نانو پوشش ایجاد شده به روش اسپری کمتر از یک درصد برای دیگر پوشش ها	تخلخل پوشش
روش فویل نازک از روش XRD	در محدوده ۸-۴ گیگاپاسکال در محدوده کمتر از ۱ گیگاپاسکال	تنش پسماند (معمولا از نوع فشاری)
روش فرورفتگی روش فویل نازک	۲۰ تا ۴۰۰ گیگاپاسکال ۱۰۰ تا ۶۰۰ گیگاپاسکال	مدول الاستیک
روش فرورفتگی	در محدوده ۵۰ تا ۵۵۰ ژول	استحکام ضربه ای
ASTM E2550 - 17	از ۴۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد	پایداری حرارتی

۴-۸- کنترل خصوصیات تجهیزات نیروگاهی بعد از پوشش‌دهی

با توجه به اینکه ممکن است برخی از خصوصیات تجهیزات نیروگاهی پس از فرایند پوشش‌دهی تغییر یابد و موجب افول خواص اولیه تجهیز شود، لذا کنترل برخی از خصوصیات تجهیزات بعد از پوشش‌دهی، توسط انجام آزمون‌ها الزامی به نظر می‌رسد. البته قابل ذکر است جنس تجهیز، نوع فرایند پوشش‌دهی و پارامترهای آن نیز از عوامل موثر بر تغییرات خصوصیات تجهیز بعد از روش پوشش‌دهی محسوب می‌شوند. بنابراین حد منطقی تغییرات خصوصیات تجهیز مورد پوشش‌دهی، نوع روش آزمون و استاندارد مربوطه در جدول ۱۰ ذکر شده است تا با کنترل حد پذیرش تقریبی خواص خود تجهیز نیز مورد بررسی قرار گیرد. بررسی سختی، سایش، فرسایش، تنش پسماند، پایداری حرارتی، ترکیب شیمیایی، مقاومت به خوردگی و زبری از خصوصیات مهم تجهیز هستند که باید بعد از پوشش‌دهی مورد ارزیابی قرار گیرند.

جدول ۱۰: استاندارد، نوع روش و خصوصیات مورد بررسی تجهیز بعد از فرایند پوشش‌دهی

شماره استاندارد یا نوع روش	حد تغییرات خواص تجهیز قبل و بعد از فرایند پوشش‌دهی	خصوصیات تجهیز	روش نانوپوشش‌دهی
ASTM C1327-08 روش میکروویکرز	کمتر از ده درصد نسبی	سختی	PVD/CVD
ASTM G99 روش پین روی دیسک	$H_m/H_a \geq 0.7$ H_m سختی قطعه و H_a سختی محیط/تجهیز در ارتباط	سایش	PVD/CVD روش اسپری
ASTM G76 دستگاه فرسایش	میزان فرسایش کمتر از ۲ g/g باشد ^{۲۷} زاویه برخورد برای مواد نرم = ۱۸ درجه زاویه برخورد برای مواد ترد = ۹۰ درجه	فرسایش	PVD/CVD روش اسپری روش آبکاری/ الکترولس
XRD روش	در محدوده کمتر از ۰.۵ گیگاپاسکال	تنش پسماند	PVD/CVD روش اسپری
ASTM E2550 – 17	کمتر از ده درصد نسبی	پایداری حرارتی	PVD/CVD روش اسپری
XRD دستگاه	به صورت کیفی تغییر ترکیب رخ ندهد	ترکیب شیمیایی	روش آبکاری/ الکترولس
ASTM G102 آزمون کاهش وزن	به صورت کیفی خوردگی در تجهیز رخ ندهند و میزان نرخ خوردگی کمتر از ۵ mpy	مقاومت به خوردگی	روش آبکاری/ الکترولس
ASTM E1274 دستگاه پروفیلومتر	زبری سطح تجهیز کمتر از زبری نانوپوشش نباشد.	زبری	روش اسپری

فصل نهم- دستورالعمل بهره‌برداری از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

۹-۱- موارد لازم جهت بهره‌برداری از نانوپوشش‌ها

اطلاعاتی که یک بازرس قبل از انجام بازرسی نانوپوشش‌ها باید داشته باشد، می‌تواند شامل موارد ذیل باشد:

۱. کلیه مشخصات مربوط به تجهیز و نانوپوشش‌های اعمالی
۲. کلیه کدها و استانداردهای قابل اجرا
۳. برگه‌های داده محصول سازنده (PDS) و برگه‌های اطلاعات ایمنی مواد (MSDS)

²⁷ Friction, Lubrication, and Wear of Surfaces, ASM International Technical Books Committee (2001)

۴. بولتن‌های کاربردی سازنده نانوپوشش

۵. هر گونه نقشه از ناحیه و تجهیزاتی که کار در آن انجام می‌شود.

۶. اطلاعات تماس با مالک، مهندس، پیمانکار، سازنده پوشش و نماینده خدمات فنی

۲-۹- استانداردهای مورد نیاز

مبنای اصلی روش اجرای بازرسی و بهره‌برداری نانوپوشش‌ها می‌تواند بر اساس استانداردهای پیشنهادی در جدول ۱۱، باشد که با توجه به روش اعمال نانوپوشش تهیه شده است. این استانداردها به صورت کلی اطلاعاتی را در مورد بازرسی به هنگام بهره‌برداری از پوشش، در اختیار بازرس قرار خواهد داد. فرایند کار ذکر شده در استاندارد مذکور، مبنای اجرای بازرسی پوشش خواهد بود، مگر در مواردی که به دلیل مسائل و محدودیت‌های اجرایی، کارفرما روش دیگری را به صراحت در شرایط ارزیابی خصوصیات و بهره‌برداری نانو پوشش ذکر نماید. قابل ذکر است نوع استاندارد مورد استفاده می‌تواند با توجه به نوع روش نانوپوشش ایجاد انتخاب شود.

جدول ۱۱: نام استانداردهای پیشنهادی مورد نیاز جهت بازرسی و بهره‌برداری نانوپوشش‌ها

استاندارد مورد نیاز برای جهت بازرسی و بهره‌برداری پوشش‌ها
1- ASTM B697 - 88(2016) Standard Guide for Selection of Sampling Plans for Inspection of Electrodeposited Metallic and Inorganic Coatings 2- ASTM D33.02- Service and Material Parameters 3- ASTM D33.04- Quality Systems and Inspection 4- VDI 3824 Blatt 4 - 2001-08 Quality assurance of PVD and CVD hard coating - Inspection planning of hard coatings. 5- DIN 32521:1983-01 – Acceptance tests and quality inspection for thermal spraying equipments 6-ISO 14918:2018- Thermal spraying — Qualification testing of thermal sprayers 7-NACE SP0502-2010, Pipeline External Corrosion Direct Assessment Methodology 8- ASTM D33- Protective Coating and Lining Work for Power Generation Facilities 9- API 598 -Valve Inspection and Testing 10- MSS SP 55- Quality Standard for Steel Castings for Valves, Flanges, Fittings, and Other Piping Components

۳-۹- زمان بازرسی

توصیه می‌شود جهت بهره‌برداری مناسب از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش، بازرسی دوره‌ای برخط (حداقل هر سه ماه یکبار) توسط کارشناسان انجام شود و گزارشات مربوطه نیز ارائه شود. ارزیابی پوشش با تست کیفی "خوب"، "متوسط" و "ضعیف" انجام شود. تعریف واژگان خوب، متوسط و ضعیف در جدول ۱۲ بر اساس منابع موجود گزارش شده است.

جدول ۱۲: توصیف و تعریف کمی از سه واژه خوب، متوسط و ضعیف

شرایط با زنگ زدگی نقطه‌ای در کمتر از ۳ درصد از ناحیه مورد بررسی بدون خرابی قابل مشاهده نانوپوشش باشد. زنگ زدگی در لبه‌ها یا زانویی‌ها باید در کمتر از ۲۰ درصد از همان مناطق مورد نظر باشد. تغییر رنگ و غیریکخوانی نانوپوشش مشاهده نشود.	خوب
شرایط با خرابی نانوپوشش یا زنگ‌زدگی در کمتر از ۲۰ درصد از منطقه مورد بررسی باشد. زنگ سخت باید کمتر از ۱۰ درصد مساحت مورد بررسی باشد. زنگ زدگی در لبه‌ها یا زانویی‌ها باید در کمتر از ۵۰ درصد از همان مناطق مورد نظر باشد. تغییر رنگ و غیریکخوانی نانوپوشش کمتر از ۱۰ درصد باشد.	متوسط

ضعیف	شرایط با خرابی نانوپوشش یا زنگ زدگی یا زنگ سخت در بیش از ۲۰ درصد از منطقه مورد بررسی، یا زنگ سخت بیش از ۱۰ درصد مساحت مورد بررسی، یا زنگ زدگی در لبه ها یا زانویی ها بیشتر از ۵۰ درصد از همان مناطق مورد نظر باشد. تغییر رنگ و غیریکتوانختی نانوپوشش بیشتر از ۱۰ درصد باشد.
------	---

* قابل ذکر است که معیار تغییرات ضخامت می تواند بر اساس شرکت ایجادکننده پوشش نیز تعیین شود. همچنین برای بازرسی با کیفیت مناسب، بهتر است مناطق مستعد فرسایش در هر تجهیز که شامل زانویی، پره ها، دهانه نازل ها و بیشتر برخورد سیال با تجهیز است، مشخص شوند.

۴-۹- موارد مورد نیاز جهت بازرسی

عمده اقداماتی که باید به منظور صیانت از نانوپوشش های در حال بهره برداری، توسط واحدهای تخصصی در مناطق عملیاتی انجام شود به شرح ذیل در سه عنوان دسته بندی شده است:

الف- تهیه و بررسی گزارشات دوره ای نانوپوشش

به منظور بررسی و ارزیابی مطلوب وضعیت کیفیت نانوپوشش های مقاوم به فرسایش در انواع تجهیزات نیروگاهی باید تجهیزات به صورت دوره ای و منظم در طول سال توسط کارشناسان مربوطه، مورد بازدید و ارزیابی قرار گیرند و در طول سال گزارشات دوره ای مطابق برنامه زمان بندی ذکر شده در جدول مربوطه تهیه گردد. در جدول ۱۳، برنامه زمان بندی و جزئیات گزارش پیشنهادی بازرسی نانوپوشش های مقاوم به فرسایش ذکر شده است. این گزارشات ضمن بررسی توسط کارشناسان، توسط بازرسی فنی نیز مورد بررسی و اظهار نظر قرار می گیرد. بازرسی نانوپوشش ها به هنگام بهره برداری، به صورت بازدید چشمی و انجام تست های مکانیکی / فیزیکی بوده که به صورت مستقیم و غیر مستقیم می تواند صورت گیرد. قابل ذکر است که مستنداتی چون عکس برداری در حین بازدید چشمی نیز الزامی است.

جدول ۱۳: برنامه زمان بندی پیشنهادی بازرسی نانوپوشش های مقاوم به فرسایش

زمان بازدید	جزئیات گزارش
سه ماهه	گزارش بازدید چشمی و اندازه گیری ضخامت نانوپوشش بر اساس استانداردهای مربوطه
شش ماهه	گزارش بازدید چشمی و گزارش آزمونهای غیرمخرب جهت بررسی عیوب نانوپوشش و اندازه گیری زبری سطح بر اساس استانداردهای مربوطه، بررسی کوبین های خوردگی در صورت نیاز
دوازده ماهه	گزارش بازدید چشمی، بررسی چسبندگی نانوپوشش و گزارش مربوطه جهت تعمیر کلی یا سنگ زنی مورد نیاز نانوپوشش بر اساس استانداردهای مربوطه، بررسی تخریب احتمالی تجهیز

* عیوب احتمالی در نانوپوشش ها در فصل دوازدهم ذکر شده است.

* زمان بازدید می تواند به گارانتی محصول ایجاد شده و پیشنهاد شرکت سازنده، تغییر و افزایش نماید. پیشنهاد می شود بعد از اتمام دوره گارانتی فواصل بازرسی کوتاه تر شود.

برای بازرسی نانوپوشش های مقاوم به فرسایش نیاز به انجام آزمون های درجا است که معمولاً غیرمخرب است. استانداردهای مورد نیاز آزمون های پیشنهادی در جدول ۱۴ و تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام این آزمون ها در هنگام بهره برداری و نگهداری پوشش ها در جدول ۱۵ گزارش شده است.

جدول ۱۴: نام آزمون‌های درجا در حین بازرسی، بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری همراه استاندارد مربوطه

نام آزمون‌های درجا در حین نگهداری	استاندارد مورد نیاز
ضخامت سنجی / اندازه‌گیری ابعاد	ASTM D 1186 Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to a Ferrous Base
	ASTM D 4138 Measurement of Dry Film Thickness of Protective Coating Systems by Destructive Means
	ASTM D7091 Nondestructive Measurement of Dry Film Thickness of Nonmagnetic Coatings Applied to Ferrous Metals and Nonmagnetic, Nonconductive Coatings Applied to Non-Ferrous Metals
	BSI - PREN 17290- on-destructive testing - Ultrasonic testing - Examination for loss of thickness due to erosion and/or corrosion using the TOFD technique
	ASTM D8331/D8331M - Standard Test Method for Measurement of Film Thickness of Thin-Film Coatings by Non-Destructive Means Using Ruggedized Optical Interference
	SP0515 – 2015 -SG- Implementing Nondestructive Evaluation Technologies to Evaluate Buried Pipe in Nuclear Power Plants
	ASTM B499 - 09(2021) Standard Test Method for Measurement of Coating Thicknesses by the Magnetic Method: Nonmagnetic Coatings on Magnetic Basis Metals
بازرسی چشمی	SSPC-Vis 1 Visual Standard
	MSS SP 55-Quality Standards for Steel Castings for Valves, Flanges, and Fittings and Other Piping Components - Visual Inspection
زبری سنجی	ASTM D7127-Standard Test Method for Measurement of Surface Roughness of Abrasive Blast Cleaned Metal Surfaces Using a Portable Stylus Instrument
تست مایع نافذ	ASTM E165 / E165M – 18- Standard Practice for Liquid Penetrant Testing for General Industry
کوپن گذاری در صورت امکان	AWT – Standards for Corrosion Rates
	NACE SP0775- Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations
چسبندگی یا استحکام کششی پوشش	ASTM D4541Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers
	ASTM D 3359 Measuring Adhesion by Tape Test
نظارت آنلاین بر خوردگی	ASTM G96 - 90(2018)- Standard Guide for Online Monitoring of Corrosion in Plant Equipment (Electrical and Electrochemical Methods)
	ASTM MNL20- Corrosion Tests and Standards: Application and Interpretation
	ASTM 03.02 Online Renewal –Corrosion of Metals; Wear and Erosion - (IHS V0302)

ASTM D 5162 Discontinuity (Holiday) Testing of Nonconductive Protective Coating on Metallic Substrates NACE RP0490-2001- Holiday Detection of Coatings	وجود نواقص در پوشش
ISO 2746- Vitreous and porcelain enamels - High voltage test	
ASTM G62-B- Standard Test Methods for Holiday Detection in Pipeline Coatings	
ASTM E999-Standard Guide for Controlling the Quality of Industrial Radiographic Film Processing	
ISO TR 16203-Corrosion of metals and alloys - Guidelines for the selection of methods for particle-free erosion corrosion testing in flowing liquids	فیلتراسیون سیال (مایع) ورودی
ISO DIS 18897 - Corrosion of metals and alloys - Standard test method for particle-free erosion corrosion of metallic materials by jet-in-slit	فیلتراسیون سیال (گاز) ورودی
NACE SP21464-Erosion Management in the Oil and Gas Industry	مدیریت میزان فرسایش

جدول ۱۵: تجهیزات/روش مورد نیاز برای انجام آزمون‌ها در هنگام بهره‌برداری و نگهداری پوشش‌ها

نوع تجهیز	نوع آزمون
ضخامت سنج آلتراسونیک	ضخامت سنجی / اندازه‌گیری ابعاد
تجهیزات آزمون مایع نافذ	تست مایع نافذ
استفاده از کوبین‌های استاندارد	کوبین گذاری در صورت امکان
چسب‌های درجا	چسبندگی یا استحکام کششی پوشش
زبری سنج پرتابل	زبری پوشش
دستگاه رادیوگرافی، بازتاب سنج ^{۲۸}	نقص پوشش (مانند حفره یا ترک)
دستگاه پتانسیو استات، استفاده از الکتروود مرجع	نظارت آنالین بر خوردگی

ب- تهیه و بررسی گزارشات دوره‌ای محیط

پیشنهاد می‌شود که گزارش دوره‌ای شرایط محیطی که نانوپوشش در آن کار می‌کند، مانند حضور ذرات معلق جامد و یا مایع، دما، سرعت سیال، فیلتر ورودی سیال و میزان خوردگی به صورت ماهیانه مورد ارزیابی قرار گیرد. تغییر هر کدام از این عوامل در هنگام کارکرد قطعه موجب تخریب زودرس نانوپوشش‌ها خواهد شد به صورت خلاصه، تاثیر هر کدام از این عوامل بر میزان فرسایش در جدول ۱۶ مورد ارزیابی قرار گرفته است. قابل ذکر است که با توجه به جدول ۱۵ بررسی شرایط محیطی در کنار بازرسی‌های دوره‌ای تجهیز و نانوپوشش اعمالی، از عواملی است که می‌تواند موجب افزایش طول عمر نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش شود.

جدول ۱۶: بازرسی شرایط محیط کارکرد قطعه در زمان فرسایش جهت افزایش طول عمر نانوپوشش

افزایش درصد رطوبت در قسمت‌های همچون پره‌های کمپرسور موجب افزایش نرخ فرسایش می‌شود. بازرسی‌های غیرمخرب دوره‌ای برای اندازه‌گیری میزان رطوبت پیشنهاد می‌شود.	درصد رطوبت
--	------------

²⁸ Reflectometer

میزان اکسیژن و pH	افزایش میزان اکسیژن و pH موجود در محیط مثلا در انواع لوله‌ها موجب افزایش نرخ فرسایش می‌شود. معمولا pH در بازه ۸-۱۰ کمترین مقدار فرسایش را به خود اختصاص می‌دهد. بازرسی‌های منظم جهت تغییر میزان آن در طول دوره‌های مختلف الزامات است.
دما	در شرایط دو فازی سیال، زمانی که دما حدود ۱۸۰ درجه سانتی گراد باشد، بیشترین نرخ فرسایش را موجب می‌شود. بیشترین میزان نرخ سایش در شرایط تک فازی در ۱۳۰ درجه سانتی گراد رخ می‌دهد. میزان نرخ سایش در دمای کمتر از ۵۰ سانتی گراد بسیار کم است. لذا اندازه‌گیری تغییرات دمایی در حین بازرسی از پارامترهای مهم است.
سرعت سیال	با افزایش سرعت سیال مخصوصا در زانوهایی، در اتصالات، در ورودی نازل‌ها، در پره‌ها با افزایش جریان توربالانسی، نرخ فرسایش افزایش می‌یابد. لذا بازرسی این مناطق از الزامات محسوب می‌شود.
بازدارنده‌ها	در صورتی که بازدارنده در محیط وجود داشته باشد همانند لوله‌های بویلر باید میزان آنها و ترکیب شیمیایی و اثربخشی آنها روی پوشش‌ها بررسی شود. لذا بازرسی دوره‌ای در این مورد پیشنهاد می‌شود.
حضور ذرات معلق جامد	ذرات جامد معلق در گاز (در توربین گازی) و یا حضور قطرات مایع در فضای گاز (در توربین بخار) می‌تواند نرخ فرسایش نانو پوشش‌ها به سرعت بالا برد. لذا معمولا از فیلتراسیون برای کاهش این عوامل استفاده می‌شود.

*استانداردهای مربوط به بحث فیلتراسیون در جدول ۱۵ ذکر شده است.

ج- موارد پیشنهادی درج شده برای ارائه گزارش دوره ای بازرسان

موارد پیشنهادی درج شده برای ارائه گزارش دوره ای بازرسان می‌تواند شامل موارد ذیل باشد:

نام تجهیز مورد بررسی، تاریخ بازرسی، نام بازرس، جنس نانو پوشش، سال نانو پوشش، وضعیت نانو پوشش (بر اساس جدول ۱۱)، آخرین زمان تعمیر، گزارش وضعیت محیطی (بر اساس جدول ۱۵)، گزارش نتایج آزمونهای درجا (بر اساس جدول ۱۴) و سایر نکات مهم.

د- تمیزکاری سطح پوشش و سنگ زنی

شستشوی مناسب و مکرر قسمت نانو پوشش ایجاد شده به صورت دوره‌ای یکی از نکات مهم بهره‌برداری و نگهداری پوشش است. تمیزکاری سطحی با مواد شوینده در الویت است. در صورتی که زبری پوشش ایجاد شده افزایش یابد، عملیات سنگ زنی موضعی یا کلی با توجه به استاندارد مربوطه تعیین شده از طرف سازنده نانو پوشش باید صورت گیرد. دستورالعمل پیشنهادی بازرسی به هنگام بهره‌برداری نانو پوشش‌ها در جدول ۱۷ ذکر شده است. این دستورالعمل برای افزایش عمر بهره‌برداری از نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش پیشنهاد شده است.

جدول ۱۷: دستورالعمل پیشنهادی بازرسی به هنگام بهره‌برداری نانوپوشش‌ها

هدف طول عمر	شرایط مناطق تحت بررسی	آماده‌سازی سطحی / کنترل پارامترها	سیستم پوشش‌دهی	
			جنس پوشش	ضخامت پوشش
نگهداری کوتاه مدت (کمتر از ۵ سال)	خوب	- حذف تمام آلودگی‌های سطحی شامل برداشت روغن، گریس، و ... - شستشوی مناسب تجهیز با آب - خشک کردن تجهیز - کنترل شرایط محیطی تجهیز - کنترل ضخامت نانوپوشش	می‌تواند از جدول ۱ استفاده شود یا پیشنهادی شرکت سازنده باشد. اما به طور کلی شامل یک پوشش سخت و چقرمه می‌شود.	با توجه به جنس پوشش و شرایط کاری قطعه توسط شرکت سازنده تغییرات ابعادی مجاز تعیین می‌شود.
	متوسط / ضعیف	- حذف تمام آلودگی‌های سطحی شامل برداشت روغن، گریس، و ... - شستشوی مناسب تجهیز با آب - خشک کردن تجهیز - کنترل ضخامت نانوپوشش و عیوب احتمالی پوشش - کنترل شرایط محیطی تجهیز - سنگ‌زنی در صورت لزوم در قسمت آسیب		

*قابل ذکر است شستشو با آبی باید انجام شود که میزان ناخالصی در آن همچون یونهای سدیم یا کلریدی در آب شستشو کمتر از ۵۰ ppb باشد.

بررسی نتایج بدست آمده از ارزیابی‌ها، این امکان را فراهم می‌کند که تصمیم‌گیری نهایی در مورد وضعیت نانو پوشش اتخاذ گردد. این تصمیم‌گیری منتج به تعمیرات نانوپوشش و یا تعویض پوشش خواهد شد که در ادامه این دستورالعمل به چگونگی تعمیرات پوشش اشاره خواهد شد. همچنین لیست شرکت‌های پیشنهادی جهت تعمیر نانوپوشش‌ها در پیوست-ب ذکر شده است.

فصل دهم- دستورالعمل تعمیر و نگهداری نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

استفاده از نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش یکی از موثرترین روش‌ها برای حفظ استحکام تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش است. با این حال، پوشش‌ها در طول زمان و در طول سرویس خراب می‌شوند. به منظور به حداقل رساندن عمر مفید با کاهش هزینه، نگهداری و تعمیر نانوپوشش در مراحل اولیه، قبل از خرابی پوشش بسیار مهم است. لذا رعایت استانداردهای مربوط به عملکرد و نگهداری نانوپوشش‌های محافظ برای تجهیزات نیروگاهی با عمر بیشتر از ۵ سال یک الزام نظارتی است. با این حال، عمر مفید واقعی بسته به متغیرهای متعدد از جمله شرایط واقعی مواجهه با سرویس، روش پوشش‌دهی، جنس پوشش، جنس زیرلایه، محیط کارکرد پوشش، طراحی تجهیز نیروگاهی و همچنین تعمیر و نگهداری در حین سرویس و شرایط واقعی پوشش، متفاوت خواهد بود. لذا این یادداشت راهنما، دستورالعمل نگهداری و ترمیم پوشش‌های مقاوم به فرسایش را برای دستیابی به حداقل هدف، برای مدیران، سازندگان، مالکان و دیگر افراد مرتبط با تجهیزات نیروگاهی در معرض فرسایش ارائه می‌دهد. در جدول ۱۸، نام استانداردهای پیشنهادی موردنیاز جهت تعمیر و نگهداری از نانوپوشش‌ها با توجه به روش اعمالی پوشش، به صورت خلاصه ذکر شده است. همچنین قابل ذکر است که دو استاندارد ASTM MNL8 و ASTM WK36282 برای تجهیزات نیروگاهی هسته‌ای معرفی شده است.

جدول ۱۸: نام استانداردهای پیشنهادی مورد نیاز جهت تعمیر و نگهداری از نانو پوشش ها

استاندارد مورد نیاز برای تعمیر و نگهداری پوشش ها
1- ASTM A780 / A780M – 20- Standard Practice for Repair of Damaged and Uncoated Areas of Hot-Dip Galvanized Coatings
2- ASTM D33.10- Protective Coatings Maintenance Work for Power Generation Facilities
3- ASTM D33.02- Service and Material Parameters
4- ASTM MNL8-Manual on Maintenance Coatings for Nuclear Power Plants
5-ASTM WK36282- Guide for Selection of Coating for Repair and Rehabilitation of Buried Pipe Coatings for Nuclear Power Plants
6- GS EP PLR 310 –Pipeline Composite Repair Systems

با گذشت زمان، یک نانو پوشش در اثر تماس با رطوبت هوا، اکسیژن، محیط خورنده، تغییرات دما، تغییرات فشار، تغییرات سرعت سیال، حضور مواد ساینده و دیگر عوامل احتمالی، به صورت جزئی و یا کلی تخریب می شود. لذا لازم است که به موقع و اصولی تعمیر گردد تا استفاده بهینه از نانو پوشش حاصل شود. ضمن آنکه، انتخاب و اجرای تعمیر پوشش معمولاً بسیار پیچیده تر از نصب پوشش اولیه است. قابل ذکر است برای مواردی که تعمیر و بازسازی می شوند باید با پوشش اصلی سازگاری داشته باشد. کلیه تعمیرات پوشش باید مطابق با آماده سازی اولیه سطح و الزامات کاربرد پوشش انجام شود. این بخش در دو قسمت تعمیر و آماده سازی سطح تنظیم شده است، زیرا قبل از تعمیر پوشش باید یک عملیات آماده سازی سطح نیز صورت گیرد. الزامات آماده سازی سطح پیشنهادی در ذیل با توجه به استانداردهای مربوطه آورده شده است. استفاده از ملزومات و روش های اجرایی پیشنهادی جهت تعمیر نانو پوشش ها معمولاً توسط شرکت ایجاد کننده پوشش توصیه می شود.

۱-۱۰-۱- دستور کار تعمیر نانو پوشش ها

توصیه می شود جهت بهره برداری مناسب از پوشش های مقاوم به فرسایش، بازرسی دوره ای برخط حداقل هر سه ماه یکبار توسط کارشناسان مربوطه باید انجام شود و گزارشات مربوطه نیز ارائه شود. ارزیابی پوشش با تست کیفی خوب، متوسط و ضعیف انجام شود. شرکت های پیشنهادی جهت تعمیر نانو پوشش های مقاوم به فرسایش در پیوست-ب ذکر شده است. دستور کار لازم و پیشنهادی جهت تعمیر نانو پوشش های مقاوم به فرسایش به منظور افزایش عمر نانو پوشش ها در جدول ۱۹ آورده شده است.

جدول ۱۹: دستور کار پیشنهادی جهت تعمیر نانو پوشش های مقاوم به فرسایش

هدف	آماده سازی سطحی	سیستم پوشش دهی	
		جنس پوشش	ضخامت پوشش
تعمیر نقاط آسیب دیده تبدیل وضعیت پوشش از متوسط به خوب یا تبدیل از ضعیف به خوب	- حذف تمام آلودگی های سطحی شامل برداشت، روغن، گریس، رسوبات و ... - شستشوی مناسب تجهیز - خشک کردن تجهیز - آماده سازی سطح جهت تعمیر پوشش - کنترل شرایط محیطی تجهیز - تعمیر مناطق مورد نظر. طبق توصیه سازنده پوشش اعمال می شود.	می تواند از جدول ۱ استفاده شود یا پیشنهادی شرکت سازنده باشد.	با توجه به جنس پوشش و شرایط کاری قطعه توسط شرکت سازنده تعیین می شود.

البته قابل ذکر است که تعمیر نانو پوشش های ایجاد شده توسط روش اسپری یا رسوب فیزیکی / شیمیایی عموماً، حتی با فراهم آمدن امکانات، به ندرت در مکان عملکرد تجهیز توصیه می شود. حتی اگر محل تعمیر پوشش کاملاً مورد عملیات آماده سازی قرار

گیرد، چون استحکام کافی بین لایه‌های پوشش به‌ندرت به دست می‌آید و در حال حاضر هیچ تکنیک آزمایشی غیرمخرب با دقت بالا و قابل اعتمادی برای تأیید یک رابط به هم پیوسته مناسب وجود ندارد. بنابراین، روش ترجیحی این است که کل پوشش موجود را از بین ببرید و یک پوشش کاملاً جدید اعمال کنید. لذا قطعات تعمیری باید از حالت سرویس خارج شده و مورد تعمیر قرار گیرد. قابل ذکر است تعمیر نانوپوشش‌ها همراه فرایند آماده‌سازی، یک فرایند بسیار طولانی محسوب نمی‌شود. با توجه به مشاوره شرکت‌های سازنده نانوپوشش‌ها، زمان تعمیر پوشش حدود ۳۰ روز تا ۴۵ روز می‌باشد و البته بر اساس توافق با شرکت تعمیر نانوپوشش می‌تواند این زمان متغیر باشد.

نکاتی مهم که به هنگام تعمیر پوشش نیز باید رعایت کرد در موارد ذیل خلاصه شده است:

- از آنجا که در همه موارد پوشش‌دهی، همه مناطق در معرض پوشش قرار می‌گیرند. برای جلوگیری از پوشش در برخی از قسمت‌های قطعه، ماسک زدن یا پوشاندن قطعه در جاهایی که نیاز به پوشش نیست، لازم است. بسته به پیچیدگی هندسه، ماسک زدن می‌تواند هزینه‌بر باشد.
- زبری پایانی سطح باید متناسب با اهداف طراحی باشد. اگر زبری قطعه بسیار بیشتر از ضخامت نانوپوشش باشد، نانوپوشش نمی‌تواند به درستی کار کند. در یک کاربرد سایش رفت و برگشتی (فرتینگ)، قله‌های زبر می‌توانند بریده شوند و مواد زیرلایه را در معرض فرسایش قرار دهند.
- قطعات باید قبل از پوشش‌دهی در وضعیت کاری خوبی باشند. استفاده از نانوپوشش‌ها، قطعات بی‌کیفیت یا هندسه نامناسب را جبران نمی‌کند. نانوپوشش‌ها تنها چند میکرون ضخامت دارند. اگر هندسه قطعات به اندازه کافی ساده نباشد، یا اگر سطح قطعات بیش از حد ناهموار باشد (بسیار ناهموارتر از ضخامت پوشش)، در این صورت یک نانوپوشش نمی‌تواند به درستی کار کند. لذا آماده‌سازی سطح یکی از عوامل مهم است.
- باید مواد/آلیاژ و همچنین سختی یا دمای تمپرینگ را برای اطلاع از بهترین شرایط فرآیند، مشخص باشد.
- نانوپوشش را می‌توان روی قطعات با هندسه‌های پیچیده اعمال کرد. در سوراخ‌ها، نانوپوشش را می‌توان با ضخامت کامل تا عمق تقریباً معادل قطر سوراخ اجرا کرد. در سوراخ‌های عمیق، ضخامت نانوپوشش با عمق افزوده کاهش می‌یابد.
- قطعات استفاده شده اغلب دارای آلاینده‌هایی در سطح هستند. در برخی موارد، این آلاینده‌ها می‌توانند در ایجاد پیوند مناسب نانوپوشش مشکل ایجاد کنند.
- قطعات حرارتی باید بتوانند دمای فرآیند پوشش‌دهی را تحمل کنند. دمای استاندارد پوشش برای نانوپوشش‌های سخت ۴۰۰ درجه سانتی گراد است. البته فرآیندهای دمای پایین نیز با تکنیک‌های خاص‌تر در دسترس است. برای قطعات با دقت بالا، با تلورانس ده هزارم (۰.۰۰۰۱)، نگرانی در مورد رشد/انقباض جزئی یا پیچ خوردگی در دمای پوشش وجود دارد. سنگ‌زنی با مقدار بار بالا همچنین می‌تواند باعث ایجاد تنش شود.
- اگر جوش‌ها بسیار تمیز، اکسیدنشده و عاری از آلودگی باشند که در خلأ زیاد نشت نکنند، می‌توان قطعات جوش داده شده را پوشش داد.
- موادی که در شرایط خلأ بیش از حد بخار می‌شوند، برای نانوپوشش مناسب نیستند. کادمیوم، سرب، قلع و دیگر فلزات فشار بخار بالا مشکلاتی هستند. مواد متخلخل نیز دارای مشکل پوشش‌دهی هستند.
- مواد زیرلایه باید با شرایط خلأ بالا در دمای بالا سازگار باشند و باید دارای سطحی باشند که برای اتصال متالورژی به پوشش آماده شده باشد.
- کل قسمت داخل پوشش محفظه خلأ قرار می‌گیرد. بنابراین، حتی مناطق با روکش باید با شرایط خلأ سازگار باشند.

۲-۱۰- آماده‌سازی سطح

قابل ذکر است قبل از تعمیر نانوپوشش‌ها، باید یک عملیات آماده‌سازی سطح نیز صورت گیرد. آماده‌سازی سطح پیشنهادی در ذیل با توجه به استانداردهای مربوطه آورده شده است. استانداردهای مربوط به آماده‌سازی سطحی جهت تعمیر موضعی نانوپوشش در جدول ۲۰ خلاصه شده است. توضیحات بیشتر این استانداردها در گزارش پشتیبان ذکر شده است.

جدول ۲۰: استانداردهای لازم آماده‌سازی سطح فولاد یا دیگر تجهیزات فلزی پیش از پوشش‌دهی

نام استاندارد	توضیحات مربوطه
SSPC-SP1 Solvent Cleaning	تمیز کردن شیمیایی
SSPC-SP2 Hand Tool Cleaning	تمیز کردن دستی ابزار
SSPC-SP3 Power Tool Cleaning	تمیز کردن برقی ابزار
SSPC-SP11 Power Tool Cleaning to Bare Metal	تمیز کردن برقی ابزار تا زیرلایه فلزی
SSPC-SP5/NACE 1 White Metal Blast	تمیز کردن تا رسیدن به سطح سفید فلز
SSPC-SP10/NACE 2 Near White Metal Blast	تمیز کردن تا رسیدن به سطح تقریباً سفید فلز
SSPC-SP6/NACE 3 Commercial Blast	تمیزکاری تجاری
SSPC-SP7/NACE 4 Brush-Off Blast	تمیزکاری عاری از آلودگی‌های چشمی
SSPC-SP12/NACE 5 Surface Preparation and Cleaning of Metals by Waterjetting Prior to Recoating	تمیز کردن آب با فشار کم/زیاد و یا ترکیبی

البته هنگام آماده‌سازی سطح برای نانوپوشش PVD، باید از تکنیک‌های صحیح پرداخت استفاده شود که در ذیل به آنها اشاره می‌شود:

- هنگام آماده‌سازی سطح برای نانوپوشش PVD، نباید از ترکیبات پولیش حاوی سیلیکون استفاده شود. هنگامی که از ترکیب صیقل دهنده حاوی سیلیکون استفاده می‌شود، بقایای سیلیکون روی سطح باقی می‌ماند و مشکلات چسبندگی ایجاد می‌کند.
- هنگام پاشش ماسه باید مراقب باشید. در صورت امکان باید از دانه‌های شیشه‌ای اجتناب کرد. در صورت استفاده از دانه‌های شیشه‌ای فشار نازل باید کمتر از ۳۰ psi باشد.
- هنگام سنگ زنی سطح باید مراقب بود که گرمای زیاد ایجاد نشود. اگر حرارت بیش از حد در حین سنگ زنی ایجاد شود، می‌تواند منجر به ایجاد ترک‌های تنشی در سطح بستر شود و یا سطح را بازپخت کند. همچنین هنگامی که گرمای بیش از حد در حین پولیش فولاد با سرعت بالا ایجاد شود، زیرلایه می‌تواند بازپخت شود یا سوختگی که روی سطح باقی می‌ماند، می‌تواند مشکلات چسبندگی ایجاد کند.
- محصولاتی که با لحیم‌کاری به هم وصل می‌شوند باید با یک ترکیب لحیم‌کاری مناسب در دمای بالا پیوند داده شوند. این ترکیب باید عاری از کادمیوم و روی باشد. کادمیوم و روی در دمای بسیار پایین طی فرایند پوشش‌دهی شروع به تبخیر می‌کنند. این می‌تواند منجر به ضعف چسبندگی نانوپوشش شود.

فصل یازدهم- فایل فنی پوشش

قابل ذکر است بهره‌برداری، تعمیر و نگهداری نانوپوشش‌ها باید مطابق روش‌ها و توصیه‌های ارائه شده در فایل فنی پوشش (CTF) انجام شود.

۱-۱۱- به هنگام بهره‌برداری نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش برای بهره‌برداری این نانوپوشش‌ها، CTF باید حداقل موارد زیر را داشته باشد:

۱- کپی از برگه اطلاعات فنی، شامل:

- نام محصول و علامت شناسایی و/یا شماره
- جنس نانوپوشش اعمالی و رنگ آن
- حداقل و حداکثر ضخامت نانوپوشش
- روش اعمالی نانوپوشش
- وضعیت سطح مورد پوشش
- محدودیت‌های محیطی (دما و رطوبت و ...)

۲- سوابق نگهداری و شرایط کاری تجهیز تحت پوشش

۲-۱۱- به هنگام تعمیر و نگهداری نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش برای تعمیر و نگهداری این نانوپوشش‌ها، CTF باید حداقل موارد زیر را داشته باشد:

۱- کپی گواهی تأیید نوع محصول از طرف شرکت سازنده

۲- کپی از برگه اطلاعات فنی

۳- سوابق نگهداری و شرایط کاری تجهیز تحت پوشش

۴- گزارش دوره‌ای بازرسان

۵- روش‌های نگهداری و تعمیر در حین سرویس سیستم تعمیر، در صورت متفاوت بودن با سیستم نانوپوشش اولیه.

فصل دوازدهم- عیوب احتمالی در نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

عیوبی که در نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش ایجاد می‌شود، می‌تواند قبل از کارکرد و یا در شرایط سرویس‌دهی ایجاد شود که در ذیل به صورت مختصر توضیح داده می‌شود.

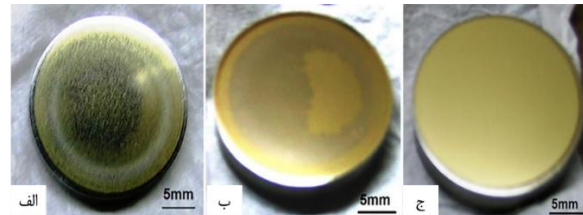
۱-۱۲- عیوب احتمالی در نانوپوشش قبل از کارکرد

کندگی، جدایش و عدم چسبندگی مناسب نانوپوشش به زیرلایه و همچنین یکنواخت نبودن فام نانوپوشش در شرایط قبل از کارکرد، دو عیب شایع در پوشش‌های نازک محسوب می‌شود. قابل ذکر است که کندگی و عدم چسبندگی می‌تواند به دلیل شرایط نامناسب پوشش‌دهی باشد. یکی از راه‌های افزایش چسبندگی نانوپوشش، آماده‌سازی مناسب سطح زیرلایه قبل از پوشش‌دهی و استفاده از یک لایه واسط می‌باشد. در صورتی که یک لایه واسط استفاده شود به دلیل توزیع مناسب سختی، چسبندگی نانوپوشش را افزایش می‌دهد. در شکل ۲، شکل ماکروسکوپی نانوپوشش با عیب جدایش پوشش مشاهده می‌شود.

همچنین یکنواخت نبودن فام پوشش به دلیل عدم کنترل پارامترهای پوشش‌دهی در طول زمان پوشش‌دهی می‌باشد. لذا ثبات و پایداری تمامی عوامل در هنگام پوشش‌دهی یکی راه‌هایی است که می‌تواند موجب کاهش چنین عیبی در نانوپوشش‌ها شود. این عیوب در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

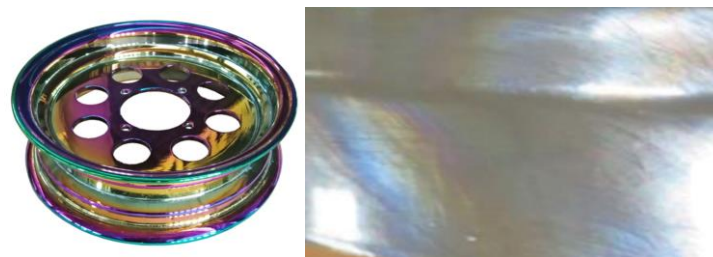


شکل ۲: شکل میکروسکوپی نانو پوشش با عیب جدایش پوشش



شکل ۳: الف- پوشش در صورتی که دارای عدم چسبندگی باشد، ب- پوشش با عیب یکنواخت نبودن رنگ و ج- یک پوشش بدون عیب^{۲۹}

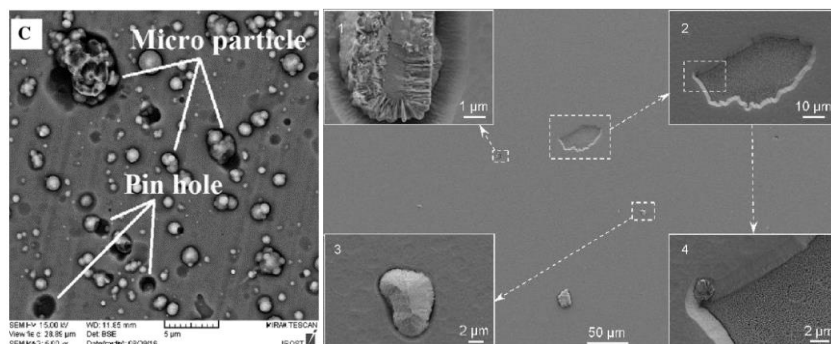
در برخی موارد یکنواخت نبودن فام پوشش موجب رنگین کمانی بودن فام پوشش شود. عیب رنگین کمانی به یک اثر شبیه رنگین کمان روی سطح قطعه اشاره دارد که البته همیشه یک نقص در نانو پوشش محسوب نمی شود. به عبارت دیگر، در صورت استفاده صحیح، رنگین کمان می تواند مانند یکی از ویژگی های محصولات باشد. این مورد در شکل ۴ مشاهده می شود.



شکل ۴: عیوب رنگین کمانی در نانو پوشش های کرومی ایجاد شده در روش PVD

تصاویر میکروسکوپی عیوب شامل کندگی پوشش، ایجاد زبری غیر یکنواخت در سطح نانو پوشش در شکل ۵ (الف)، همچنین عیب ایجاد ناخالصی های ذره ای یا رشته های در سطح در شکل ۵ (ب) مشاهده می شود. عدم کنترل شرایط پوشش دهی موجب ایجاد این نوع عیوب می شود که کنترل شرایط پوشش دهی می تواند مانع از ایجاد آنها شود.

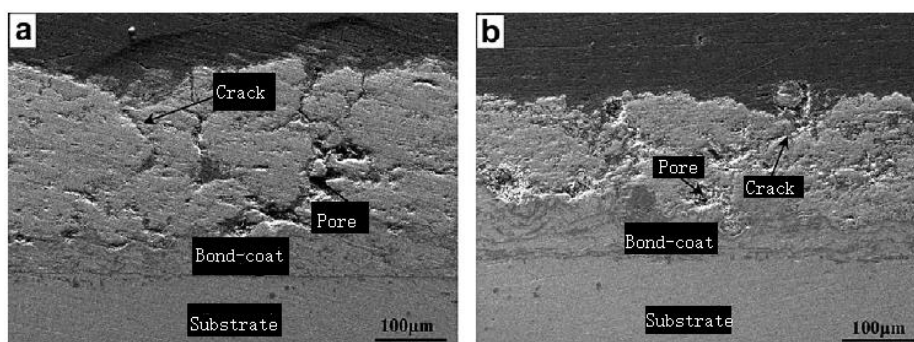
²⁹ L.S. Vaca, Influence of the Pre-Treatments and Process Temperature on the Adhesion of TiN Films Deposited by PBII&D Over Nitrided Austenitic Stainless Steel, Mat. Res. 22 (5) (2019)



شکل ۵: الف- تصویر SEM از سطح نانو پوشش الف- در صورتی که دارای زبری نایکناخت و کندگی در سطح باشد^{۳۰} و ب- عیب ایجاد ناخالصی‌های ذره‌ای یا رشته‌های در سطح

۲-۱۲- عیوب احتمالی در پوشش در شرایط سرویس

عیوب احتمالی در پوشش در شرایط سرویس شامل مواردی چون تخلخل، ترک، ایجاد کندگی موضعی یا کلی و افزایش زبری سطح می‌باشد. تصویر میکروسکوپی در شکل ۶، وجود حفره و ترک‌ها در پوشش به هنگام شرایط سرویس را در یک پوشش نانو ساختار تک لایه و شکل ۷، حضور ترک‌ها در پوشش‌های چندلایه با ابعاد نانومتری در ضخامت، به هنگام اعمال بار در شرایط سرویس را نشان می‌دهد. بازرسی به موقع نانو پوشش‌ها و سنگ‌زنی سطح در موقع مناسب موجب کاهش این عیب در طول سرویس می‌شود.

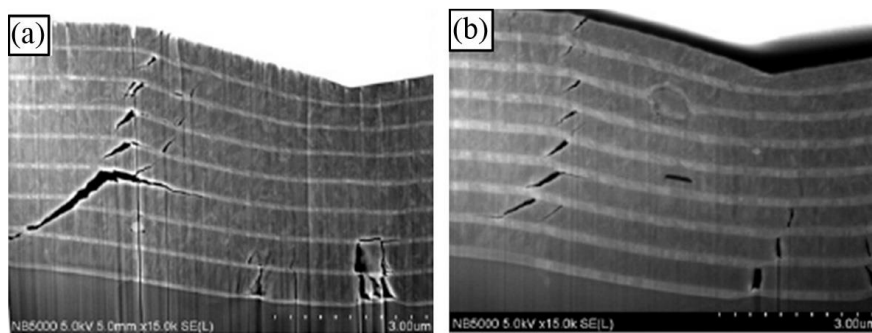


شکل ۶: وجود حفره و ترک‌ها در پوشش به هنگام شرایط سرویس^{۳۱}

حضور ترک‌ها در پوشش‌های چندلایه نیز بسیار شایع است. قابل ذکر است در پوشش‌های تک لایه مسیر ترک‌ها در کل پوشش گسترش پیدا کرده و باعث جدایش پوشش از زیرلایه می‌شود ولیکن گسترش ترک در پوشش چندلایه در فصل مشترک‌ها است و به همین دلیل طول عمر نانو پوشش را افزایش می‌دهد. لذا استفاده از نانو پوشش‌های چندلایه به جای پوشش‌های تک لایه برای کاهش ترک‌ها توصیه می‌شود.

³⁰ M. Cekadaa, P. Panjana, D. Kek-Merla, M. Panjana, G. Kapun, SEM study of defects in PVD hard coatings, Vacuum 82 (2008) 252-256

³¹ Y. Gu, K. Xia, D. Wu, J. Mou, S. Zheng, Technical Characteristics and Wear-Resistant Mechanism of Nano Coatings: A Review, Coatings 10 (2020) 233



شکل ۷: حضور ترک‌ها در پوشش‌های چندلایه به هنگام اعمال بار^{۳۲}

³² Alicja K. Krella, Degradation of protective PVD coatings, Chapter 16, (2016)

پیوست الف - استانداردهای مربوط به تعاریف و ارزیابی کلی نانوپوشش‌ها

نام استانداردها	توضیحات
ISO/TR 11811:2012	فناوری‌های نانو - راهنمایی در مورد روش‌های اندازه‌گیری نانو و میکروتربولوژی
ISO/TR 13121:2011	فناوری‌های نانو - ارزیابی ریسک نانومواد
ISO/TR 13329:2012	نانومواد - تهیه برگه اطلاعات ایمنی مواد (MSDS)
ISO/TR 16196:2016	فناوری‌های نانو - گردآوری و شرح روش‌های تهیه و روش‌های دوزینگ برای نانومواد مهندسی و تولید شده
ISO/TS 18110:2015	فناوری‌های نانو - واژگان شاخص‌های علم، فناوری و نوآوری
ISO 19749	فناوری‌های نانو - اندازه‌گیری اندازه ذرات و توزیع شکل توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی
ISO 21363:2020	فناوری‌های نانو - اندازه‌گیری اندازه ذرات و توزیع شکل توسط میکروسکوپ الکترونی عبوری
IEC/TR 63258:2021	فناوری‌های نانو - راهنمایی برای کاربرد بیضوی سنجی برای ارزیابی ضخامت فیلم‌های در مقیاس نانو
ISO/TS 80004-4:2011	فناوری‌های نانو - واژگان - قسمت ۴: مواد نانو ساختار
ISO/TS 80004-6:2021	فناوری‌های نانو - واژگان - قسمت ۶: خصوصیات شی-نانو
ISO/TS 80004-8:2020	فناوری‌های نانو - واژگان - قسمت ۸: فرایندهای تولید نانو
ISO/TS 80004-11:2017	فناوری‌های نانو - واژگان - قسمت ۱۱: لایه‌های نانو، پوشش نانو، نانو فیلم و اصطلاحات مرتبط

پیوست ب- شرکتهای پیشنهادی داخلی و خارجی در ارتباط با نانوپوششها

جدول ۱- شرکتهای داخلی و خارجی ایجادکننده نانوپوششها

ردیف	شرکت	کشور
۱	شرکت فناوران سخت آرا	ایران
۲	مهندسی سطح سوین پلاسما	ایران
۳	شرکت فرانگر زرفام	ایران
۴	شرکت پلاسما تک	ایران
۵	شرکت صنعت آذرخش	ایران
۶	گروه سخت کاری پلی تکنیک	ایران
۷	شرکت سیلنک	ایران
۸	شرکت آراین توربین	ایران
۹	شرکت نانومیت تکنولوژی	امریکا
۱۰	شرکت ریسیدن	امریکا
۱۱	شرکت کوانتیتام تکنولوژی	کانادا
۱۲	شرکت کوتک	آلمان
۱۳	شرکت کرومالوی	امریکا
۱۴	شرکت بازدهی توربین	انگلیس
۱۵	شرکت ارلیکن بلیزر	امریکا
۱۶	شرکت گوانگدونگ	چین
۱۷	شرکت سولزر	سوئیس
۱۸	شرکت ان سی تی تکنولوژی سطوح	امریکا

جدول ۲- شرکتهای داخلی و خارجی تجهیزات ایجاد و تعمیرات نانو پوششها

ردیف	شرکت	کشور	سازنده	تعمیرات
۱	شرکت پلاسما فناور امین	ایران	■	
۲	شرکت پلاسما پژوه پارس	ایران	■	
۳	شرکت یار نیکان صالح	ایران	■	
۴	شرکت تکوین پژوه مهمام	ایران	■	
۵	مهندسی سطح سوین پلاسما	ایران	■	
۶	شرکت خلاپوشان فلز	ایران	■	
۷	شرکت پودرافشان	ایران	■	■
۸	شرکت اچ سی واک	چین	■	
۹	تکنولوژی پلاسما آجی سی	آلمان/بلژیک	■	
۱۰	شرکت نتوکوت	سوئیس	■	
۱۱	شرکت پلاتیت	سوئیس	■	
۱۲	شرکت پی بی اس	هند	■	■
۱۳	شرکت پاور تکنولوژی	انگلیس	■	■
۱۴	شرکت خدمات صبا پوشش یاسا	ایران	■	■

پیوست ج- توضیحات مربوط به استانداردهای ارزیابی خصوصیات نانوپوشش‌های مقاوم به فرسایش

نام استاندارد	توضیحات استاندارد
ASTM E384 – 17	روش آزمون استاندارد برای میکروسختی- ایندنتیشن مواد
ISO 14577	استاندارد برای نانوایندنتیشن
ISO 20267	تعیین چقرمگی سطحی پوشش‌های سرامیکی با روش ایندنتیشن
ASTM E 399-99	روش آزمون استاندارد برای مقاومت در برابر شکست کرنش صفحه‌ای برای مواد فلزی
ASTM G99 – 17	روش آزمون استاندارد برای تست سایش با دستگاه پین روی دیسک
ASTM C633 - 13(2017)	روش آزمون استاندارد برای چسبندگی یا انسجام پوشش‌های اسپری حرارتی
ASTM C1624 - 05(2015)	روش آزمون استاندارد برای مقاومت در برابر چسبندگی و حالت‌های خرابی مکانیکی پوشش‌های سرامیکی با استفاده از آزمون کمی خراش تک نقطه‌ای
ASTM F1864 - 16	روش آزمون استاندارد برای مقاومت در برابر فرسایش گرد و غبار مواد شفاف نوری و مادون قرمز و پوشش‌ها
ASTM G32 – 16	روش آزمون استاندارد فرسایش کاویتاسیون با استفاده از دستگاه ارتعاشی
ASTM G134 - 17	روش آزمون استاندارد برای فرسایش مواد جامد توسط جت مایع کاویتاسیون
ASTM G76 - 18	روش آزمون استاندارد برای انجام آزمایش‌های فرسایش توسط برخورد ذرات جامد با استفاده از جت‌های گازی
ASTM G40 – 17	اصطلاحات استاندارد مربوط به سایش و فرسایش
ASTM G76-07	روش آزمون استاندارد برای انجام آزمایش‌های فرسایش توسط برخورد ذرات جامد با استفاده از جت‌های گازی
ASTM B117	روش استاندارد برای استفاده از دستگاه نمک پاش (مه)
NACE standard 2004	تست خوردگی آسان انجام: فرسایش- خوردگی
STP 0474	مقایسه مقاومت در برابر فرسایش تیغه استاندارد توربین بخار و مواد محافظ در چهار دکل آزمایشی
NACE standard SP0188	آزمایش ناپیوستگی (نقص ۳) پوشش‌های محافظ جدید روی لایه‌های رسانا
ISO/TC 201	آنالیز شیمیایی سطحی
ISO/TC 164/SC3	آزمون سختی مانند نانوفروردنگی
ISO/TC 202	آنالیز شیمیایی میکروبیوم
ASTM D3359-08	روش‌های استاندارد آزمون اندازه‌گیری چسبندگی با استفاده از تست نواری
ASTM E3-01(2007)	راهنمای استاندارد برای تهیه نمونه‌های متالوگرافی
ASTM B487-85(2007)	روش استاندارد آزمایش اندازه‌گیری ضخامت پوشش فلز و اکسید با بررسی میکروسکوپی سطح مقطع
ASTM G44-99(2005)	روش استاندارد برای قرار گرفتن در معرض قرار گرفتن متناوب فلزات و آلیاژها توسط غوطه‌وری در محلول ۳.۵ درصد کلرید سدیم
ASTM G65-04	روش آزمون استاندارد برای اندازه‌گیری سایش با استفاده از دستگاه ماسه خشک / چرخ لاستیکی
ISO 1463	پوشش‌های فلزی و اکسیدی - اندازه‌گیری ضخامت پوشش - روش میکروسکوپی
ISO 4288	مشخصات محصول هندسی (GPS) - بافت سطح: روش پروفیل - قوانین و روش‌های ارزیابی بافت سطح
ISO 10289	روش‌های آزمایش خوردگی پوشش‌های فلزی و غیرآلی روی زیرلایه‌های فلزی - رتبه بندی نمونه‌های آزمایشی و مقالات تولید شده تحت آزمایش خوردگی
ISO 9220	پوشش‌های فلزی - اندازه‌گیری ضخامت پوشش - روش میکروسکوپ الکترونی روبشی

ASTM G31	راهنمای آزمایش خوردگی غوطه‌وری فلزات در آزمایشگاه
BS 5411-part 6	روشهای آزمون برای پوشش‌های فلزی و مربوطه، آزمون سختی میکرو-ویکرز و کنوپ
ASTM G76-83	فرسایش توسط برخورد ذرات جامد: به روز رسانی آزمایش
ASTM D 4541	روش آزمون استاندارد برای استحکام پول-اف پوششها با استفاده از دستگاه‌های چسبندگی قابل حمل
ASTM STP-421	مشکلات خوردگی داغ مرتبط با توربین‌های گازی
ISO 19252:2008	تعیین خواص خراش
ASTM C1624	استحکام چسبندگی و حالت‌های شکست مکانیکی پوشش‌های سرامیکی با آزمایش خراش کمی
ASTM G171 - 03(2017)	روش آزمون استاندارد برای سختی خراش مواد با استفاده از قلم الماس
ASTM D4170 - 16	روش آزمایشی استاندارد برای محافظت از فرتینگ سایشی با استفاده از گریس روان کننده
ASTM D7594 - 19	روش آزمایشی استاندارد برای تعیین مقاومت فرتینگ سایشی با استفاده از گریس‌های روان کننده تحت فشارهای تماس هرتزیایی بالا با استفاده از دستگاه تست فرکانس بالا، نوسان خطی
ISO 4287-1:1984	زبری سطح- اصطلاحات - قسمت ۱: سطح و پارامترهای آن
ISO 4518:2021	پوشش‌های فلزی - اندازه گیری ضخامت پوشش - روش پروفیلومتری
ASTM E1274	روش آزمون استاندارد برای اندازه‌گیری زبری با استفاده از پروفیلوگراف
ISO 10308:2006	پوشش‌های فلزی - بررسی آزمایشات تخلخل
ASTM E2109 - 01	روشهای استاندارد آزمون برای تعیین درصد تخلخل سطحی در پوشش‌های اسپری حرارتی
ASTM E1920 - 03(2014)	راهنمای استاندارد برای تهیه متالوگرافی پوششهای اسپری حرارتی
ASTM E2245 - 11(2018)	روش آزمون استاندارد برای اندازه گیری تنش پسماند فیلم نازک با استفاده از تداخل سنج نوری
ASTM B636 / B636M - 15	روش آزمایشی استاندارد برای اندازه گیری تنش داخلی پوشش‌های فلزی آبکاری با دستگاه اندازه گیری مارپیچ
ASTM C1259 - 08	روش آزمون استاندارد برای مدول یانگ دینامیک، مدول برشی و نسبت پواسون برای سرامیک‌های پیشرفته با تحریک ضربه‌ای ارتعاش
ASTM E1876 - 15	روش آزمون استاندارد برای مدول یانگ دینامیک ، مدول برشی و نسبت پواسون با تحریک ضربه ای ارتعاش
ASTM B611 - 13(2018)	روش آزمون استاندارد برای تعیین مقاومت در برابر سایش برای مواد سخت
ASTM G65 - 16e1	روش آزمون استاندارد برای اندازه‌گیری سایش با استفاده از دستگاه چرخ ماسه خشک/لاستیک
ASTM G132- 96(2018)	روش آزمون استاندارد برای سایش با استفاده از پین ساینده
ASTM G91 - 11(2018)	روش استاندارد برای نظارت بر میزان نرخ رسوب SO_2 اتمسفر برای ارزیابی خوردگی اتمسفری
ASTM G33 - 99(2020)	روش استاندارد برای ضبط داده ها از آزمایشات خوردگی اتمسفری برای نمونه‌های فولادی با پوشش فلزی
ASTM G106 - 89(2015)	تمرین استاندارد برای تأیید الگوریتم و تجهیزات اندازه گیری امپدانس الکتروشیمیایی
ASTM G5 - 14e1	روش آزمون مرجع استاندارد برای اندازه‌گیری‌های پلاریزاسیون آندی پتانسیودینامیکی
ASTM G96 - 90(2018)	راهنمای استاندارد برای نظارت آنلاین بر خوردگی در تجهیزات کارخانه (روشهای الکتریکی و الکتروشیمیایی)
ASTM G102 - 89(2015)e1	روش استاندارد برای محاسبه نرخ خوردگی و اطلاعات مربوط به اندازه گیری های الکتروشیمیایی
ASTM G40-21	اصطلاحات استاندارد مربوط به سایش و فرسایش
ASTM E2550 - 17	روش آزمون استاندارد پایداری حرارتی توسط ترموگراویمتری
ASTM E1582 - 21	روش آزمون استاندارد برای کالیبراسیون دمای آنالیزورهای ترموگراویمتری

ASTM E1131 - 20	روش آزمون استاندارد برای تجزیه و تحلیل ترکیب شیمیایی با ترموگراویمتری
ISO 27307:2015	پاشش حرارتی - ارزیابی چسبندگی/انسجام پوشش های سرامیکی اسپری حرارتی با آزمایش خراش عرضی
ASTM C1326-08	روش آزمون استاندارد برای سختی تورفتگی کنوپ سرامیک های پیشرفته
ASTM C1327-08	روش آزمون استاندارد برای سختی تورفتگی ویکرز سرامیک های پیشرفته
ASTM D2485 - 18	روش آزمون استاندارد برای ارزیابی پوشش ها برای کاربرد با دمای بالا
ASTM B765 - 03(2018)	راهنمای استاندارد برای انتخاب آزمایش تخلخل و نقوص بزرگ برای الکتروپوزیت ها و پوشش های فلزی مرتبط
ASTM B975 - 18e1	روش آزمون استاندارد برای اندازه گیری تنش داخلی پوشش های فلزی با ارزیابی نوار تقسیم (روش تجزیه و تحلیل تنش ایجاد)
ASTM D 5162-B	تمرین استاندارد برای آزمایش ناپیوستگی (نقوص) پوشش محافظ غیر رسانا روی بسترهای فلزی
ISO 22581	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - اطلاعات نزدیک به زمان واقعی از اسکن طیف سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس - قوانین شناسایی و اصلاح آلودگی سطح توسط ترکیبات حاوی کربن
ASTM E837	روش آزمون استاندارد برای تعیین تنش های باقیمانده به روش ایجاد کرنش حفره ای
ISO TR 14187	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - ویژگی های مواد نانو ساختار
ISO 22415	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - طیف سنجی جرمی یون ثانویه
DIN ISO 11505	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - روشهای کلی برای کمی سازی عمق ترکیب با طیف سنجی انتشار نوری تخلیه تابشی
DIN EN ISO 10309	پوشش های فلزی - آزمایش تخلخل - تست فروکسی
ISO 18550	سرامیک نرم (سرامیک پیشرفته، سرامیک فنی پیشرفته) - روش آزمایش ناهمگنی ماکروسکوپی در ریزساختار
ISO 18535	فیلم های کربنی شبیه الماس - تعیین ویژگی های اصطکاک و سایش فیلم های کربنی الماس مانند با روش توپ روی دیسک
ISO 13424	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - طیف سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس - گزارش نتایج تجزیه فیلم نازک
ISO 17109	تجزیه و تحلیل شیمیایی سطح - نمای عمق - روش تعیین نرخ کندوپاش در طیف سنجی فوتوالکترون اشعه ایکس، طیف سنجی الکترونی اوزه و طیف سنجی جرمی یونی ثانویه نمای عمقی کندوپاش با استفاده از فیلم های نازک تک و چند لایه
ASTM D2809	روش تست استاندارد برای خوردگی کاویتاسیون و فرسایش - خوردگی مشخصات پمپ های آلومینیومی با خنک کننده موتور
ASME STP-PT-066	دستورالعمل های طراحی برای خوردگی، فرسایش و اکسیداسیون بخار لوله های بویلر در دیگ های بخار ذغال سنگ
ASTM STP946	فرسایش ناگهانی: موارد استفاده، برنامه ها و روش های آزمایش
ASTM MNL20	آزمایشات و استانداردهای خوردگی: کاربرد و تفسیر
ISO 22278	سرامیک های ظریف (سرامیک پیشرفته، سرامیک های فنی پیشرفته) - روش آزمایش کیفیت کریستالی فیلم نازک تک کریستالی (ویفر) با استفاده از روش XRD با پرتوی اشعه ایکس موازی
BS ISO 16413	ارزیابی ضخامت، چگالی و عرض سطح لایه های نازک با بازتاب سنجی اشعه ایکس - الزامات ابزار، تراز و موقعیت یابی، جمع آوری داده ها، تجزیه و تحلیل داده ها و گزارش دهی
ISO 21874:2019	پوشش های سخت چند لایه PVD - ترکیب، ساختار و خواص
ASTM G3 - 14(2019)	روش استاندارد در اندازه گیری های الکتروشیمیایی در آزمایش خوردگی
ASTM G32 - 10	روش استاندارد آزمایش فرسایش کاویتاسیون با استفاده از دستگاه ارتعاشی
ASTM G73 - 10	روش تست استاندارد برای فرسایش برخورد مایع با استفاده از دستگاه دوار
BS EN 13925	آزمایش غیرمخرب پراش اشعه ایکس از مواد پلی کریستالی و آمورف

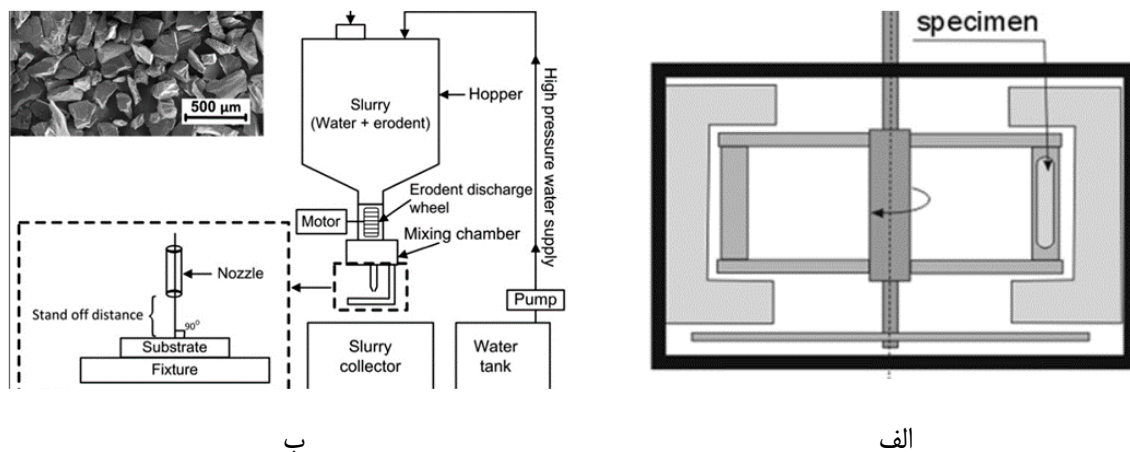
ASTM E2859 - 11(2017)	راهنمای استاندارد برای اندازه‌گیری اندازه نانوذرات با استفاده از میکروسکوپ نیروی اتمی
ASTM B 287	روش اسید استیک - نمک پاشی (مه)
ASTM B733 - 15	مشخصات استاندارد برای پوشش های نیکل-فسفر اتوکاتالیزتی (الکترولس) روی فلز
ASRM E290 - 14	روش های تست استاندارد برای تست خمشی مواد برای شکل پذیری

پیوست د- آزمایشگاه‌های مرجع پیشنهادی جهت ارزیابی خصوصیات نانو پوشش‌ها

خصوصیات پوشش	نام آزمایشگاه مرجع
سختی	حامیران
چقرمگی شکست	آزمونه فولاد
مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک	دانشگاه سمنان، دانشگاه تهران
مقاومت به فرسایش	دانشگاه تهران، البرز تدبیرکاران
چسبندگی	متالورژی رازی
مقاومت به خراش	دانشگاه علم و صنعت
زبری سنجی	نانو اپتو الکترونیک (تربیت مدرس)، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
ضخامت سنجی	حامیران، دانشگاه علم و صنعت
یکنواختی ضخامت پوشش	علوم کاربردی رازی، متالورژی رازی، علوم کاربردی رازی، آریا الکترون اپتیک
مرفولوژی پوشش	علوم کاربردی رازی، متالورژی رازی، علوم کاربردی رازی، آریا الکترون اپتیک
ترکیب پوشش	جهاد دانشگاهی شریف
مقاومت به خوردگی	حامیران، دانشگاه سمنان، مرکز پژوهش متالورژی رازی، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران
پایداری حرارتی	رستاک، بیم گستر تابان، دانشگاه تهران، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، پژوهشگاه صنعت نفت
مقاومت در برابر فرتینگ	دانشگاه تهران
مقاومت در برابر کاویتاسیون	دانشگاه سمنان، فناوری التراسوند
چگالی سنجی / تخلخل پوشش	بیم گستر تابان، پوپان، پژوهشگاه شیمی و مهندسی شیمی ایران، دانشگاه علم و صنعت
نقوص در پوشش	بیم گستر تابان، جهاد دانشگاهی شریف

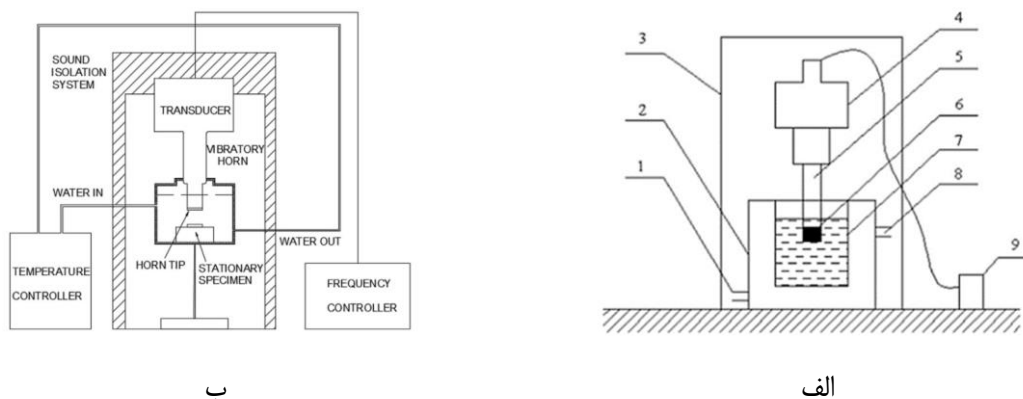
پیوست ۵- شماتیک و توضیحات برخی از روش‌ها/ تجهیزات مورد نیاز

شکل ۱، شماتیک دستگاه اندازه‌گیری مقاومت به فرسایش طبق استاندارد *ASTM G76* برای آزمون فرسایش شن و ماسه-هوا را نمایش می‌دهد.



شکل ۱ - شماتیک الف- نمونه تحت فرسایش و ب- تجهیزات مورد نیاز برای اندازه‌گیری میزان فرسایش^{۳۴}

همچنین شماتیک دستگاه برای آزمون مقاومت در برابر کاپیتاسیون بر اساس استاندارد *ASTM G32* در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

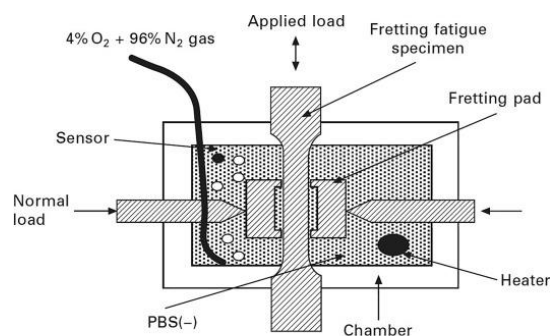


شکل ۲- شماتیک دستگاه‌های آزمایش ارتعاش برای (الف) آزمایش به روش مستقیم، ۱: ورودی آب؛ ۲: حمام خنک کننده؛ ۳: محفظه ضد صدا؛ ۴: مبدل؛ ۵: نوک؛ ۶: نمونه؛ ۷: ظرف؛ ۸: خروجی آب؛ ۹: دستگاه ژنراتور اولتراسونیک (ب) به روش غیر مستقیم^{۳۵}

برای بررسی میزان مقاومت در برابر فرتینگ از استاندارد *ASEM 4170* استفاده می‌شود که شماتیک آن در شکل ۳ مشاهده می‌شود.

³⁴ A. Krella, Resistance of PVD Coatings to Erosive and Wear Processes: A Review, Coatings, 2020, 10, 921

³⁵ A. Krella, Resistance of PVD Coatings to Erosive and Wear Processes: A Review, Coatings, 2020, 10, 921



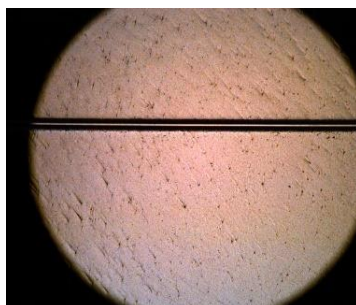
شکل ۳- شماتیک دستگاه فرتینگ (خستگی - سایش)

برای بررسی ضخامت پوشش‌های ایجاد شده از روش *PVD* و پاشش و اطمینان از نتیجه یکنواختی پوشش، آزمایش کالو در سه ناحیه از هر تجهیز پوشش‌یافته انجام می‌شود. این آزمایش می‌تواند ضخامت هر لایه و همچنین ضخامت کل پوشش را اندازه‌گیری کند. در شکل ۴ اثر آزمون کالو که یک آزمون مخرب است مشاهده می‌شود. این آزمون بر اساس استاندارد *VDI 3198* انجام می‌شود.



شکل ۴- اثر آزمون کالو روی سطح پوشش ایجاد شده

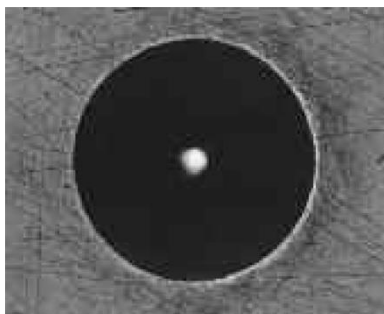
آزمایش‌های چسبندگی خراش نیز روی پوشش‌های ایجاد شده توسط روش *PVD* انجام می‌شود تا از چسبندگی مطلوب نانوپوشش به سطح زیرلایه اطمینان حاصل شود. در شکل ۵، اثر تست خراش بر اساس استاندارد *ASTM C1624* که یک آزمون مخرب محسوب می‌شود، مشاهده می‌شود.



شکل ۵- اثر آزمون چسبندگی خراش روی سطح پوشش ایجاد شده

برای بررسی میزان چسبندگی پوشش با ضخامت‌های بالای ۵ میکرومتر نیز از آزمون چسبندگی راکول استفاده می‌کنند. در شکل ۶، اثر ایندنتور راکول سی روی پوشش ایجاد شده روی سطح بر اساس استاندارد *DIN 4856* مشاهده می‌شود. بررسی میزان

استحکام چسبندگی در این روش بیشتر کیفی صورت می‌گیرد. در صورتی که میزان ترک‌ها و تغییر شکل در کنار اثر ایندنتور کم باشد، میزان استحکام چسبندگی پوشش به زیرلایه بالا محسوب می‌شود.



Excellent adhesion of BALINIT® coatings

شکل ۶- اثر آزمون چسبندگی راکول سی روی سطح پوشش ایجاد شده

جدول ۳- توضیحات تکمیلی آزمون‌های ارزیابی نانو پوشش‌ها بعد از اعمال روی تجهیز

نام آزمون/روش	اندازه‌گیری پارامتر	دقت	تخریب پوشش	تخریب زیرلایه
SEM در سطح مقطع عرضی	ضخامت پوشش مرفولوژی پوشش	۰.۵-۰.۱ میکرومتر	بله	بله
EDS/SEM روی پوشش	ترکیب شیمیایی پوشش	۰.۰۱	خیر	خیر
نانو/میکرو هاردنس	سختی پوشش	۲۰ درصد	بله	خیر
تست خراش	چسبندگی پوشش	-	بله	بله
تست کالو	چسبندگی پوشش	-	بله	خیر
تریبومتر	ضریب اصطکاک / سایش	-	بله	بله
اسکنر سطح	توپوگرافی سطحی	-	خیر	خیر
EDS/SEM عرضی پوشش	آنالیز عمقی پوشش	۲ درصد	بله	بله
XRD	ساختمان بلوری تنش پسماند	-	خیر	بله
XRF	ضخامت پوشش آنالیز عنصری پوشش	۰.۵-۰.۳ میکرومتر	خیر	خیر
FTIR	ضخامت پوشش آنالیز ترکیب پوشش	۰.۱ میکرومتر	خیر	خیر
راکول تست	چسبندگی پوشش	۵ درصد	بله	بله
پروفایل متر استایلووس	زبری پوشش	-	خیر	بله
گیج مغناطیسی	ضخامت پوشش	۳-۲ درصد	خیر	خیر

پیوست و- جدول اطلاعات مرتبط با پره توربین بخار

جدول ۱: استانداردها و اطلاعات مربوط به ارزیابی خصوصیات نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش بر پره توربین بخار با پوشش نانو ساختار نیتريد تیتانیوم
به روش PVD^{36}

حد پذیرش تقریبی	نوع/نام آزمون	الویت انجام آزمون	اجباری	نام استانداردهای مورد استفاده	خصوصیات نانو پوشش
۲۵۰۰-۱۵۰۰ میکروویکرز ^{۳۷}	سختی سنجی ویکرز	۱	×	ASTM E384	میکروسختی
۱۰-۵ $MPa \cdot m^{1/2}$	روش فرو رفتگی	۱	×	ISO 20267	چقرمگی شکست
۱۷-۱۵ mm^3	فرسایش قطرات مایع	۱	×	ASTM G73 - 10	مقاومت به فرسایش
mm^3/g ۰.۰۰۵ در زاویه برخورد ۳۰ درجه و ۰.۰۲ در زاویه ۹۰ درجه	فرسایش ذرات جامد	۲	×	ASTM G76	
کیفی بدون ترک شروع ترک در نیروی حدود ۲۵ نیوتن	خراش	۱	×	ASTM C1624 - 05(2015)	چسبندگی
۱۰-۵ میکرومتر	SEM	۱	×	ASTM B487-85(2007)	ضخامت سنجی
فاز TiN	XRD	۱	×	BS EN 13925	ترکیب پوشش به صورت سطحی
بیشتر از ۳۰۰ ساعت	روش سالت اسپری	۲	۳۸_	ASTM B117	مقاومت به خوردگی
$\mu A/cm^2$ ۴.۸	روش غوطه وری	۱	×	ASTM G31	

³⁶ Porogram on technology innovation: erosion resistance coating development and vendor coating evaluation for turbine components, 1014277, EPRI Project Manager, D. Gandy

^{۳۷} نیروی اعمالی با توجه به ضخامت پوشش می‌تواند متغیر باشد و عوامل فرایند پوشش‌دهی موثر بر میزان سختی است.

^{۳۸} با توجه به جنس زیرلایه این تست اجباری نیست.

زبری سنجی	ASTM E2859 - 11(2017)	×	۲	AFM	کمتر از ۱۰۰ نانومتر
یکنواختی ضخامت پوشش	ISO 9220	×	۲	SEM	کیفی
مرفولوژی پوشش	ASTM E3-01	×	۲	SEM	کیفی
پایداری حرارتی	ASTM E2550 - 17	×	۲	روش ترموگرویمتری	تا دمای حداقل ۶۰۰ سانتی گراد
نقص در پوشش	ISO 18550	×	۲	SEM	کیفی (پوشش بدون هیچ گونه عیب سطحی)
مدول الاستیک	ISO 14577	×	۲	AFM	۲۵۰-۳۵۰ GPa
مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک	ASTM G99 - 17	-	۳	پین روی دیسک	ضریب اصطکاک کمتر از ۰.۲ و سرعت سایش کمتر از 10^{-5} mm ³ /N.M

پیوست ز- جدول اطلاعات مرتبط با ولو توربین بخار

جدول ۱: استانداردها و اطلاعات مربوط به ارزیابی خصوصیات نانو پوشش‌های مقاوم به فرسایش بر میل سوپاپ^{۳۹} توربین بخار از جنس 422 *Inconel 901* و *stainless steel* با پوشش نانو ساختار کربو نیتريد سیلیسیوم-تیتانیوم (*TiSiCN*) به روش کندوپاش^{۴۰}

حد پذیرش تقریبی	نوع/نام آزمون	الویت انجام آزمون	اجباری	نام استانداردهای مورد استفاده	خصوصیات نانو پوشش
۳۵۰۰-۴۰۰۰ میکروویکرز ^{۴۱}	سختی سنجی ویکرز	۱	×	ASTM E384	میکروسختی
۴۰ GPa	AFM	۱	×	ISO/TC 164/SC3	نانوسختی
۰.۰۰۰۱ mm ³ /g در زاویه برخورد ۳۰ درجه و ۰.۰۰۱۶ در زاویه ۹۰ درجه	فرسایش ذرات جامد	۱	×	ASTM G76	فرسایش
کیفی بدون ترک	راکول سی	۱	×	DIN 4856	چسبندگی
۲-۸۰ میکرومتر	SEM	۱	×	ASTM B487-85(2007)	ضخامت سنجی
ذرات بلوری ۷-۵ نانومتری از $TiC_{0.3}N_{0.7}$ در زمینه آمورف از SiC_xN_y	XRD	۱	×	BS EN 13925	ترکیب پوشش به صورت سطحی
کمتر از ۱ میکرومتر	پروفیلومتر	۲	×	ASTM E1274	زبری سنجی
کیفی	XRR	۲	×	BS ISO 16413	یکنواختی ضخامت پوشش
کیفی	SEM	۲	×	ASTM E3-01	مرفولوژی پوشش
پوشش فشرده و بدون ترک	SEM	۲	×		نقوص در پوشش

³⁹ Valve stem

⁴⁰ Application of nanocoatings for erosion protection of valve stems, 1019796, EPRI Project Manager, J. Shingledecker

^{۴۱} نیروی اعمالی با توجه به ضخامت پوشش می‌تواند متغیر باشد و عوامل فرایند پوشش‌دهی موثر بر میزان سختی است.

مدول الاستیک	ISO 14577	-	۲	AFM	۳۰۰ GPa
مقاومت به سایش و تعیین ضریب اصطکاک	ASTM G99 – 17	-	۳	پین روی دیسک	ضریب اصطکاک کمتر از ۰.۴ و سرعت سایش کمتر از 10^{-6} mm ³ /N.M
چقرمگی شکست	ISO 20267	-	۳	AFM	مقدار H^3 به E^2 در حد ۰.۷

مراجع

- Guideline for Technical Regulation, Volume 2, Design of Thermal Power Facilities, Steam Turbine, Japan International Cooperation Agency (2013)
- O. Jonas, Steam turbine corrosion and deposits problems and solutions, Texas A and M University. Turbomachinery Laboratories (2008)
- https://puc.overheid.nl/nsi/doc/PUC_1987_14/1/
- NP_3944_Erosion_Corrosion in Nuclear Plant Steam Piping_ Causes and Inspection Program Guidelines
- R. O. E. Vijgen, Quality control of protective PVD coatings. Technische Universiteit Eindhoven, (1995).
- T. Swan, The Coating Inspectors Handbook
- M-CR-501-Common Requirments on Surface Preparation and Protective Coatings, Rev. 1, December 1994
- Guidelines for Coating Maintenance and Repairs for Ballast Tanks and Comined Cargo/Ballast Tanks on Oil Tankers
- Guidelines for Repair and Maintenance of Bridge Coatings, C. Farschon, R. Kogler, J. P. Ault, (1997)
- MSC.1-Circ.1330- Guidance Notes on Maintenance and Repair of Protective Coatings (2005)
- Comrehensive Guidelines for the Inspection and Repair of Hot Dip Galvanized Coatings
- STP-PT-066 – 2014- Design Guidelines for Corrosion, Erosion and Steam Oxidation of Boiler Tubes in Pulverized Coal-Fired Boilers
- MSC.1/Circ.1330 Guidelins for Maintenance and Repair of Protective Coatings (2009)
- H. S. Khode, Practical Guidelines for the Inspection and Repair of Hot Dip Galvanized Coatings, International Journal of Engineering Research and Technology, Vol. 8 (3) (2019)
- Maintenance Instructions Powder Coated Façade Claddings
- Guidelines for Corrosion Protection and Coating Systems, Rules for Classification and Construction, Germanischer Lloyd AG (2010)
- Industrial Maintenance Guide- Anticorrosive coatings and coating plans tailored to industrial maintenance.
- H. S Khode Practical Guidelines for the Inspection and Repair of Hot Dip Galvanized Coatings, International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT) 8 (2019)