



چالش های پیش روی خواص مطلوب پوشش های حرارتی نانو ساختار

ایمان مباشرپور^۱، محمد رضا رحیمی پور^۲، مهرداد نجاتی^۳

^۱. استادیار، پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، البرز

^۲. استاد، پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، البرز

^۳. کارشناس ارشد، پژوهشگاه سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، البرز

چکیده

امروزه مهندسی سطح برای بسیاری از مشکلات صنعتی راه حل های بسیار کاربردی ارائه کرده است. یکی از مشکلات اصلی قطعات صنعتی کاربرد آن ها در دماهای بالا می باشد. در واقع پر کاربردترین و گسترده ترین روش جلوگیری از تخریب مواد در دماهای بالا، پوشش دهی آلیاژهای مورد استفاده می باشد. هدف از اعمال پوشش ها و عملیات حرارتی آلیاژها، بر اساس نوع پوشش اعمالی، ایجاد اکسید سطحی پایدار و توانایی برقراری یک مانع بین آلیاژ و محیط خورنده می باشد. اعمال این نوع پوشش ها مانند پوشش های سد حرارتی موجب بهبود خواص شیمیایی، مکانیکی و حتی حرارتی سطح آلیاژها می شود. پوشش های سد حرارتی با هدایت حرارتی کمتر، عایق حرارتی در سطوح فلزی ایجاد می کنند که دمای سطح فلز و شارش گرما به داخل فلز را کاهش می دهند. به منظور اعمال پوشش های سد حرارتی روش های متعددی به کار گرفته شده اند که از مهمترین آن ها می توان به پاشش پلاسمایی و فرایند رسوب دهی از فاز بخار توسط پرتو الکترونی اشاره کرد. اغلب پوشش های سد حرارتی از جنس مواد سرامیکی می باشند که یکی از مهم ترین مواد سرامیکی که در تولید پوشش های سد حرارتی خصوصاً به روش پاشش پلاسمایی پر کاربرد است، زیرکونیا است. خواص پوشش ها وابسته به خواص ذرات است که شامل نوع، شکل و سایز ذرات می شود. بیشتر مطالعات انجام شده روی این پوشش های سد حرارتی با کاربرد ذرات میکروسایز همراه بوده است. با این وجود به دلیل خواص مطلوب و منحصر به فرد ذرات نانو سایز کاربرد این ذرات در پوشش ها به تازگی مورد توجه قرار گرفته است

واژه های کلیدی: پوشش سد حرارتی، نانو ساختار، خواص پوشش.

^۱. iman.mobasherpour@gmail.com & i_mobasherpour@merc.ac.ir

مقدمه

معرفی پوشش‌های سد حرارتی

با توجه به دمای بالای توربین‌ها برای جلوگیری از ذوب مواد سازنده توربین و محافظت از آن‌ها در برابر پدیده‌های مخربی مانند اکسیداسیون و خوردگی داغ، سیستم‌های خنک کننده پیچیده و پوشش‌های سد حرارتی به کار گرفته می‌شوند. راندمان حرارتی^۱ (η) یک توربین گازی می‌تواند توسط به کارگیری دمای بالاتر کاری، افزایش یابد. راندمان کارنو یا راندمان حرارتی، همان‌طور که با معادله (۱) نمایش داده شده است، نشان می‌دهد که با افزایش دمای فرایند (T_p) نسبت به دمای محیط (T_a)، راندمان حرارتی افزایش خواهد یافت.

(۱)

اما افزایش نامحدود دمای گاز یک توربین به دلیل ذوب سطحی اجزای سوپرآلیاژ استفاده شده در ساختمان توربین، امکان پذیر نیست. سوپرآلیاژها دمای ذوب سطحی بین ۱۳۱۵-۱۲۳۰ درجه سانتی‌گراد دارند، برای جلوگیری از خرابی اجزا توسط خزش، اکسیداسیون، خستگی حرارتی و یا حتی ذوب، اجزا با یک کمپرسور هوا خنک می‌شوند گرچه خنک کاری زیاد راندمان توربین گازی را کاهش می‌دهد. به منظور افزایش راندمان حرارتی یک توربین گازی از طریق افزایش دما یا محدود کردن مقدار هوای خنک کننده، اجزای توربین با لایه‌های عایق حرارتی پوشش داده می‌شوند. همان‌طور که در شکل ۱ مشخص می‌باشد این پوشش‌ها باعث نگهداری اجزا در سطوح دمای پایین‌تر می‌شوند. این لایه‌های عایق حرارتی، پوشش‌های سد حرارتی نامیده می‌شوند [۱].

به طور معمول پوشش‌های سد حرارتی سیستم‌های چند لایه‌ای هستند که شامل یک لایه رویی سرامیکی^۲ و لایه میانی فلزی^۳ که بین لایه رویی سرامیکی و سوپرآلیاژ قرار دارد، می‌باشند. لایه اکسیدی تشکیل شده نازکی (TGO) در فصل مشترک پوشش میانی و سرامیکی تشکیل می‌شود. زیر لایه‌ها سوپرآلیاژ پایه نیکل و کبالت می‌باشند که شامل عناصر آلیاژی زیادی هستند. این عناصر جهت افزایش خواصی همچون استحکام در دمای بالا، نرمی، مقاومت به اکسیداسیون و نیز پایداری فازی افزوده می‌شوند. در **Error! Reference source not found.** نمایشی از یک سیستم پوشش سد حرارتی آورده شده است. امروزه از سرامیک‌ها به عنوان پوشش‌های سد حرارتی استفاده می‌شود و ساختار شبکه سرامیک از عوامل تاثیر گذار در میزان هدایت حرارتی آن می‌باشد **[Error! Bookmark not defined.]**

روش‌های اعمال پوشش‌های سد حرارتی

پوشش‌های سد حرارتی با روش‌هایی ایجاد می‌شوند که توانایی اعمال انرژی کافی برای ذوب یا تبخیر ماده اولیه را داشته باشند. از جمله روش‌هایی که توانایی تولید این انرژی بالا را دارند می‌توان پاشش پلاسمای در اتمسفر

^۱ Thermal Efficiency

^۲ Top Coat

^۳ Bond Coat

هوا^۱ (APS)، رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتوی الکترونی^۲ (EB-PVD)، پاشش حرارتی با سوخت اکسیژن و سرعت بالا^۳ (HVOF)، سل-ژل^۴ و رسوب شیمیایی از فاز بخار^۵ (CVD) را نام برد. از میان این روش-ها، پاشش پلاسمایی و رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتوی الکترونی متداول تر می باشند. پاشش پلاسمایی بر اساس پدیده پلازما و رسوب بر اساس قدرت و سرعت پرتوی الکترونی این انرژی را تولید می-کنند. در روش پاشش پلاسمایی پیوندهای ایجاد شده، مکانیکی و در روش EB-PVD این پیوندها نفوذی می-باشند. هر دو روش قابلیت لایه نشانی مواد فلزی و سرامیکی را دارند [Error! Bookmark not defined]. شکل ساختار پوشش های سد حرارتی اعمال شده با این دو روش را نشان می دهد [Error! Bookmark not defined].

مواد و روش تحقیق

معرفی پوشش های نانو ساختار

پوشش های نانو ساختار^۶ از ذراتی تشکیل می شوند که حداقل در یکی از ابعاد کمتر از ۱۰۰ نانومتر هستند [۳]. روابط تجربی موجود در زمینه خواص مکانیکی حاکی از پتانسیل بالای بهبود این خواص با کاهش اندازه ذرات است. پوشش های سرامیکی پاشش حرارتی متداول به طور معمول با استفاده از مواد پودری شکلی ایجاد می-شوند که توزیع اندازه ذرات آن در گستره ۵ تا ۱۰۰ میکرون است یا به عبارتی ذرات میکروسکوپی هستند. پاشش پودرهای نانو با اندازه کمتر از ۱۰۰ نانومتر با استفاده از سیستم های تغذیه پودر متداول به دلیل مسدود شدن قسمت های مختلف سیستم با ذرات ریز، امکان پذیر نیست. از طرفی تزریق این نانو ذرات در شعله پلازما نیازمند استفاده از جریان بالای گاز حامل است که این امر موجب ناپایداری شعله می شود و علاوه بر این، ذرات ریز به دلیل جرم پایین، انرژی لازم برای برخورد با سطح زیر لایه که لازمه دستیابی به چسبندگی مناسب است را کسب نمی نمایند. به منظور پاشش نانو ذرات با استفاده از سیستم های تغذیه پودر متداول، باید این نانو ذرات قبل از پاشش با استفاده از اسپری درایر^۷ به ذرات میکروسکوپی تبدیل شوند. هنگامی که ریز ساختار پوشش حاصل از این نانو ذرات در بزرگنمایی های بالا با میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار می گیرد، نانو ساختار زیتر شده به وضوح قابل مشاهده است [۴].

تولید نانو پودرهای سرامیکی آگلومره شده برای پوشش های پاشش حرارتی از اواخر سال ۱۹۹۰ آغاز شده است با این وجود، هنوز تعداد شرکت های محدودی در این زمینه فعال هستند. در فرآیند پاشش پلاسمایی، دستیابی به پوششی با چسبندگی و استحکام مناسب، مستلزم ذوب شدن ذرات پودر مصرفی است. از طرفی چنانچه نانو

^۱ Plasma Spray

^۲ Electron Beam-Physically Vapor Deposition

^۳ High Velocity Oxy Fuel

^۴ Sol-Gel

^۵ Chemical Vapor Deposition

^۶ Nanostructured

^۷ Spray Dryer

ذرات آگلومره شده به طور کامل ذوب شوند، نانو ساختار مورد انتظار در پوشش به طور کلی ناپدید شده و ساختار صرفاً متشکل از اسپلت‌های^۱ میکرونی خواهد بود. برای فائق آمدن بر این مشکل، دمای شعله پلاسما باید علاوه بر ثابت ماندن، به نحوی کنترل شود که به میزان قابل ملاحظه‌ای بالاتر از دمای ذوب ذرات نباشد. این شرایط کنترل شده سبب می‌شود تا در حین پاشش، درصدی از ذرات نانو بدون ذوب کامل و تنها در حالت ذوب سطحی شده به سطح زیرلایه برسند و به همین صورت در ساختار پوشش قرار گیرند. بنابراین تشکیل نانو ساختار کاملاً وابسته و حساس به پارامترهای فرایند پاشش است. دستیابی به پارامترهای بهینه و کنترل آنها مستلزم صرف زمان زیادی خواهد بود. استفاده از ابزارهایی نظیر سیستم‌های ثبت دما و سرعت ذرات پودر در مسیر تفنگ تا سطح زیرلایه، بهینه‌سازی پارامترهای فرایند پاشش را تسهیل می‌نماید. به طور کلی می‌توان گفت که شرایط پاشش این نانو ذرات آگلومره شده باید به گونه‌ای باشد که این ذرات به طور کامل ذوب نشوند و بخشی از آنها در ساختار پوشش قرار گیرند. در این حالت ریز ساختار پوشش متشکل از نانو ذرات ذوب جزئی شده در زمینه‌ای از ذرات کاملاً ذوب شده است. بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که با کنترل اندازه، شکل و مورفولوژی توزیع نانو ذرات، می‌توان به پوشش‌های مهندسی با تفاوت بسیار چشمگیر در مشخصات ریزساختاری و عملکرد مکانیکی دست یافت. در پوشش‌های نانو ساختار، ریزساختار پوشش شامل ذرات نیمه ذوب شده‌ای است که در سرتاسر ساختار پخش شده است و توسط ذرات کاملاً ذوب شده که به عنوان چسب عمل می‌کنند احاطه گردیده‌اند، بنابراین یکپارچگی پوشش حفظ می‌شود.

شکل، نمای شماتیک سطح مقطع یک پوشش نانو ساختار که دارای ریزساختار دونمایی^۲ است، را نمایش می‌دهد. چگالی ناحیه نانو^۳ در ساختار پوشش، یکی از پارامترهای اساسی در دستیابی به این خواص متفاوت است. بسته به مشخصات حرارتی شعله پلاسمایی، شرایط پاشش و مشخصات پودر، ناحیه نانو تخلخلی مشابه یا کمتر از پودر آگلومره شده دارد که این میزان تخلخل می‌تواند عامل بروز عملکردهای متفاوت پوشش در شرایط مختلف باشد [۵].

نتایج و بحث

ویژگی‌های پوشش‌های نانو ساختار

^۱ Splats

^۲ Bimodal Microstructure

^۳ Nanozone

سختی و چقرمگی

نتایج بدست آمده در مورد این ویژگی‌ها بسیار پراکنده و در مواردی مغایر با یکدیگر است. در مورد بعضی از نانو پوشش‌های اکسیدی ایجاد شده با پاشش پلاسما مشاهده شده است هر چند که پوشش‌های نانو سختی کمتری داشته‌اند اما مقاومت سایشی آن‌ها به مراتب بیشتر از پوشش‌های متداول بوده است [۶، ۷ و ۸]. نتایج بررسی‌های بعضی دیگر از محققین نشان می‌دهد که نانو پوشش‌های اکسیدی و متداولی نظیر YSZ که با یک سیستم پاششی ایجاد شده‌اند، مقادیر سختی مشابهی دارند ولی پوشش‌های نانو مقاومت سایشی بسیار بهتری دارند. این در حالی است که در موارد دیگری مشخص شده که نانو پوشش‌های YSZ نسبت به پوشش‌های متداول سختی بالاتر و مقاومت سایشی بهتری دارند. نتایج این بررسی‌ها همچنین نشان می‌دهد که نانو پوشش‌های پاشش حرارتی شده در مقایسه با پوشش‌های متداول، مقاومت در برابر اشاعه ترک یا چقرمگی نسبی بالاتری دارند [۸ و ۹]. با توجه به چقرمگی نسبی بالاتر پوشش‌های نانو ساختار، مقاومت سایشی بالاتر پوشش‌های نانو ساختار سرامیکی پاشش حرارتی شده نسبت به پوشش‌های متداول حتی در حالتی که سختی پایین‌تر یا یکسان است، به مقاومت بالاتر آن‌ها در برابر اشاعه ترک نسبت داده شده است [۸]. نظریه‌های متعددی در مورد دلایل افزایش چقرمگی نسبی در ساختار نانو پوشش‌ها مطرح است. برای مثال یکی از این نظریه‌ها بیان می‌دارد که نواحی نانو در درون ریزساختار پوشش موجب توقف ترک و به عبارتی افزایش چقرمگی پوشش می‌شوند. بنابراین کسر حجمی این نواحی نانو و یا به عبارتی درصد ذرات نیمه ذوب شده در ریزساختار پوشش، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر چقرمگی و در نتیجه خواص تریبولوژیکی پوشش می‌گذارد. اثر حجمی نواحی نانو در هر پوشش حد بهینه مشخصی دارد و افزایش یا کاهش آن نسبت به حالت بهینه، خواص مکانیکی نانو پوشش را از حالت بهینه دور می‌سازد [۸ و ۱۰]. یکی دیگر از نظریه‌های مطرح در مورد دلایل افزایش چقرمگی نسبی در ساختار نانو پوشش‌ها، پیوستگی بهتر اسپلت‌ها در این پوشش‌ها است. مطابق این نظریه، نانو پوشش‌ها باید سختی بالاتری نسبت به پوشش‌های متداول داشته باشند، هر چند نتایج بررسی‌های انجام شده بیانگر سختی پایین‌تر در بسیاری از نانو پوشش‌های مقاوم به سایش است. علاوه بر این، مقاومت سایشی برخی از نانو پوشش‌ها نیز با این نظریه قابل توجیه نیست. اگرچه بررسی‌های بیشتری برای شناسایی سازکارهای موثر در بهبود عملکرد این نانو پوشش‌ها لازم است ولی نتایج بررسی‌های صورت گرفته در این زمینه حاکی از بهبود مقاومت سایشی نانو پوشش‌های YSZ نسبت به پوشش - های متداول به میزان ۱۲ تا ۵۷ درصد است [۸].

چسبندگی

بررسی‌های انجام شده در این زمینه حاکی از برتری استحکام پیوندی یا چسبندگی نانو پوشش‌های پاشش حرارتی شده نسبت به پوشش‌های متداول است. برای مثال این برتری در مورد یک پوشش اکسیدی ایجاد شده با پاشش پلاسمایی به ۱/۸ برابر می‌رسد. چسبندگی بهتر نانو پوشش‌ها، ناشی از چقرمگی بالاتر پوشش در فصل مشترک پوشش و زیرلایه است [۱۱].

پلاستیسیته

نتایج بررسی ها صورت گرفته در حین آزمایش سایش، حاکی از صاف تر بودن اثر سایش^۱ در نانو پوشش ها نسبت به پوشش های متداول است. این پلاستیسیته بالاتر در نانو پوشش ها پدیده ای است که در پوشش های YSZ ایجاد شده با پاشش پلاسمایی نیز مشاهده شده است [۱۲]. با توجه به ظاهر اثر سایشی در نانو پوشش ها، به نظر می رسد که تغییر شکل پلاستیکی مکانیزم اصلی سایش در این پوشش ها باشد. ولی در پوشش های متداول، با توجه به وجود ترک ها، ورقه ای شدن و شکست های ریز در اثر سایشی، به نظر می رسد که مکانیزم اصلی سایش، شکست ترد است. عمق بحرانی تبدیل شکست نرم به شکست ترد یک ماده سرامیکی در طول آزمایش سایش، نسبت مستقیم با نسبت چقرمگی به سختی آن دارد و از آنجایی که پوشش های نانو در مقایسه با پوشش های متداول سختی مشابه و چقرمگی بالاتری دارند، پوشش های نانو عمق بحرانی بیشتری دارند. این عمق بحرانی بیشتر برش همان صافی بیشتر اثر سایشی است. پلاستیسیته بالاتر نانو پوشش ها در مراحل سنگ زنی یا پولیش معمول پوشش های پاشش حرارتی استفاده شده در کاربردهای سایشی، مفید واقع می گردد [۱۳].

درزندهای سایش پذیر

پوشش های سایش پذیر^۲ ایجاد شده با فرایندهای پاشش حرارتی، دسته ای خاصی از پوشش ها هستند که برای کاهش حد مجاز^۳ مسیر گاز در توربین های گازی طراحی شده و به کار گرفته می شوند. در توربین های گازی زمینی و هوایی، حد جابجایی بین پره های روتور و پوسته باید تا حد امکان اندک باشد تا علاوه بر افزایش راندمان، مصرف سوخت نیز کاهش یابد. پوشش های سایش پذیر ساختاری ترد و شکننده دارند. که با انتخاب ترکیب دقیقی از مواد به دست می آیند. دستیابی به خواص بهینه در این پوشش ها بسیار مشکل است زیرا پوشش اعمالی در عین حالی که سایش پذیر است باید پایداری مکانیکی لازم برای تحمل شرایط کاری توربین گازی را نیز داشته باشد. این پوشش ها به طور معمول یک ماده کامپوزیتی شامل یک فاز فلزی، یک فاز غیر فلزی خود روانکار و درصدی تخلخل هستند [۱۴]. در راستای افزایش راندمان توربین های گازی با افزایش دمای کاری، پوشش های سایش پذیر مشروط بر دارا بودن قابلیت تحمل دمای کاری توربین، می توانند نقش موثری را در این خصوص ایفا نمایند. در حال حاضر دو دسته اصلی از پوشش های سایش پذیر برای کاربردهای دمای بالا مورد استفاده قرار می گیرند. دسته اول بر پایه ترکیبی از یک آلیاژ دمای بالای MCrAlY، یک ماده خود روانکار نظیر BN و پلیمری نظیر پلی استر است. در این ترکیب، آلیاژ MCrAlY با فراهم نمودن مقاومت اکسایشی و استحکام مکانیکی مورد نیاز پوشش در دمای بالا، ترکیب BN با کاهش ضریب اصطکاک پوشش و ماده پلیمری با ایجاد درصد بالایی از تخلخل بعد از سوختن و ایجاد یک ساختار ترد و شکننده، ویژگی سایش پذیری را ایجاد می نمایند. نوع دوم پوشش های سایش پذیر دمای بالا که در حال حاضر نیز مورد استفاده قرار می گیرند، بر پایه یک ماده سرامیکی نظیر YSZ، BN و پلی استر استوار است. در این ترکیب، ماده سرامیکی

^۱ Wear Scars

^۲ Abradable Seal

^۳ Tolerance

استحکام مکانیکی و شیمیایی مورد نیاز پوشش در دمای بالا را فراهم می‌نماید و مانند پوشش‌های سایش پذیر فلزی، BN ضریب اصطکاک پوشش را کاهش داده و پلی استر بعد از سوختن، شبکه‌ای از تخلخل‌ها را در ریزساختار پوشش ایجاد می‌نماید که منجر به ترد و شکننده شدن ماده سرامیکی می‌شود [۱۵]. علی‌رغم موفقیت‌های بدست آمده در این زمینه، هنوز مسایل زیادی برای حل وجود دارند. برای مثال در هنگام پاشش حرارتی یک ماده کامپوزیتی تشکیل شده از موادی با خواص فیزیکی متفاوت، داشتن شرایط مناسب برای ذوب مواد مختلف بسیار مشکل است. بنابراین اغلب این پوشش‌ها تمایل به غیر همگن بودن دارند. علاوه بر این، قبل از استفاده، لازم است که فاز پلیمری پوشش با سوزاندن از ساختار آن خارج شود که این فرایند مستلزم صرف زمان اضافی است که هزینه نهایی را افزایش می‌دهد. نتایج بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان می‌دهد که جایگزینی این پوشش‌های کامپوزیتی سایش پذیر با یک پوشش صد در صد سرامیکی می‌تواند راه حل مناسبی برای رهایی از این مشکلات باشد. مشاهده شده که پارامتر اساسی در دستیابی به نانوپوشش‌های ترد و شکننده، استفاده از نانو ذرات سرامیکی آگلومره شده با تخلخل بسیار زیاد است. این احتمال وجود دارد که استحکام مکانیکی این ذرات بسیار پایین باشد، بنابراین با قرار دادن مقدار قابل توجهی از این ذرات متخلخل نیمه ذوب شده در ریزساختار پوشش، ایجاد یک پوشش سایش پذیر سرامیکی با ریزساختار نانو ممکن می‌گردد. البته متخلخل ماندن این نانوذرات در پوشش تابع عواملی نظیر فرایندهای حرارتی در شعله پلاسمایی، شرایط پاشش و مشخصات پودر است. مقایسه رفتار سایشی پوشش سرامیکی سایش پذیر YSZ با پوششی از دسته اول پایه، MCrAlY مشخص نموده که هر دو پوشش در آزمون‌های مشابه، مقدار کاهش حجم یکسانی دارند و علاوه بر این سایش نوک پره نیز برای هر دو حالت یکسان است ولی اثر سایش در نانوپوشش سرامیکی کاملاً تمیز و عاری از پلیسه و یا میکروتکرک بوده و به عبارتی سطح صاف‌تری داشته است که این حالت می‌تواند منجر به بهبود ویژگی درزبندی این نانوپوشش‌ها گردد. به طور کلی این نتایج مشخص نموده که یک ماده سفت و سخت سرامیکی را می‌توان برای ایجاد یک نانوپوشش صد در صد سرامیکی با یک ساختار ترد و شکننده به عنوان یک پوشش سایش پذیر به کار گرفت. بنابراین با مهندسی پارامترهای پاشش و مورفولوژی پودر، ایجاد پوشش‌های سرامیکی با چگالی بالایی از نواحی نرم (نواحی نانوی متخلخل) امکان پذیر است که این شرایط می‌تواند منجر به ایجاد پوشش سرامیکی سایش پذیر گردد [۱۶].

نفوذ حرارتی

مقادیر اندازه گیری شده برای نفوذ حرارتی پوشش‌های سرامیکی YSZ ایجاد شده با روش پاشش پلاσμα تا دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، در حالت نانو نسبت به حالت متداول پایین تر است. علت نفوذ حرارتی پایین تر نانوپوشش‌های YSZ دقیقاً مشخص نیست هر چند این ویژگی ممکن است ناشی از شبکه‌های متخلخل موجود در نواحی نانو باشد. مقایسه ضریب انبساط حرارتی این پوشش‌ها در گستره دمایی ۳۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد مشخص نموده که این ویژگی در پوشش‌های نانو نسبت به پوشش‌های متداول بالاتر است [۱۷ و ۱۸].

مقاومت شوک حرارتی

این ویژگی برای پوشش های نانو و متداول، با قرار دادن نمونه های پوشش داده شده در کوره به مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد و پس از خنک کردن در آب سرد به مدت ۱۰ دقیقه در سیکل های متناوب حرارتی، بررسی شده که برای تست های شوک حرارتی انجام شده در گستره دمایی ۱۰۰۰ تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد، تعداد سیکل هایی که منجر به معیوب شدن پوشش های نانو شده، ۲ تا ۳ برابر پوشش های متداول است. بررسی ریزساختار این پوشش ها با میکروسکوپ الکترونی عبوری مشخص نموده که نوع شکست در نانو پوشش بین دانه ای و در پوشش های متداول بین دانه ای و درون دانه ای است. مشخص شده که شکست بین دانه ای بدلیل افزایش مقاومت شوک حرارتی، آسیب کمتری را در پی خواهد داشت [۱۹].

محققین دیگری مقاومت شوک حرارتی این دو نوع از پوشش ها را در سیکل های حرارتی گرم شدن در دمای ۱۲۰۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ دقیقه و سرد شدن در آبی با دمای محیط، بررسی نموده اند که مشابه نتایج قبلی، تعداد سیکل هایی که منجر به معیوب شدن پوشش های نانو شدند، ۲ تا ۴ برابر پوشش های متداول بوده است [۲۰].

رفتار خزشی

بررسی های انجام شده در این زمینه نشان می دهد که نرخ کرنش خزشی در نانو پوشش های YSZ بیشتر از پوشش های YSZ متداول است. بالاتر بودن این ویژگی در پوشش های نانو به لغزش در مرز دانه ها و آرایش مجدد ذرات نانو در نواحی نانو نسبت داده شده است. بالاتر بودن نرخ خزش در پوشش های سرامیکی YSZ منجر به افزایش رهایی^۱ پوشش در مدت قرارگیری در معرض تنش های حرارتی ناشی از دماهای بالا می شود که بسیار پدیده مطلوبی است. هر چند این پدیده به واسطه توسعه تنش ها در طول سرد شدن، ممکن است بروز عیوب زود هنگام را نیز در پی داشته باشد ولی چقرمگی بهتر نانو پوشش ها در مقایسه با پوشش های متداول می تواند مانع بروز چنین مشکلی گردد. ذکر این نکته لازم است که رفتار خزشی پوشش علاوه بر نانو بودن ساختار، از میزان ناخالصی موجود در پوشش نیز تاثیر می پذیرد و از این نظر، خلوص پوشش همواره باید مد نظر قرار گیرد [۲۱].

راندمان رسوب دهی

نتایج بررسی های برخی از محققین نشان می دهد مقادیر راندمان رسوب دهی^۲ برای نانو پودرهای YSZ آگلومره شده بیشتر از پودرهای YSZ میکرونی است. این افزایش راندمان در یک سیستم پوشش دهی بسته به پارامترهای انتخاب شده برای پوشش ۱/۲ تا ۲ برابر اندازه گیری شده است. مقادیر بالاتر راندمان در حالت نانو را ممکن است بتوان به بالاتر بودن سطح مخصوص نانو پودرهای آگلومره شده در مقایسه با پودرهای متداول، نسبت داد. سطح مخصوص بالاتر این امکان را فراهم می سازد تا در یک زمان ماندگاری مشخص در شعله، نانو پودرها

^۱ Relaxation

^۲ Deposition Efficiency

نسبت به پودرهای متداول انرژی حرارتی بیشتری را کسب کنند. این موارد علاوه بر تسهیل فرآیند ذوب، استحکام چسبندگی و پیوستگی ذرات برخورد کننده به سطح و تشکیل دهنده پوشش را بهبود می بخشد [۲۲].
همگن بودن

به دلیل ماهیت ذاتی فرایندهای پاشش حرارتی، اغلب پوشش‌های ایجاد شده با این فرایندها دارای عیوب زیادی هستند که آن‌ها را غیرهمگن و ناهمسان می سازد و موجب می شود تا تغییرات زیادی در خواص آن‌ها مشاهده گردد. بررسی‌های انجام شده در این زمینه روی پوشش‌های نانو و میکرونی و مقایسه آن‌ها نشان می دهد که پوشش‌های نانو درصد عیوب اساسی کمتر و یکنواختی ساختاری بالاتری دارند [۲۳].

نتیجه گیری

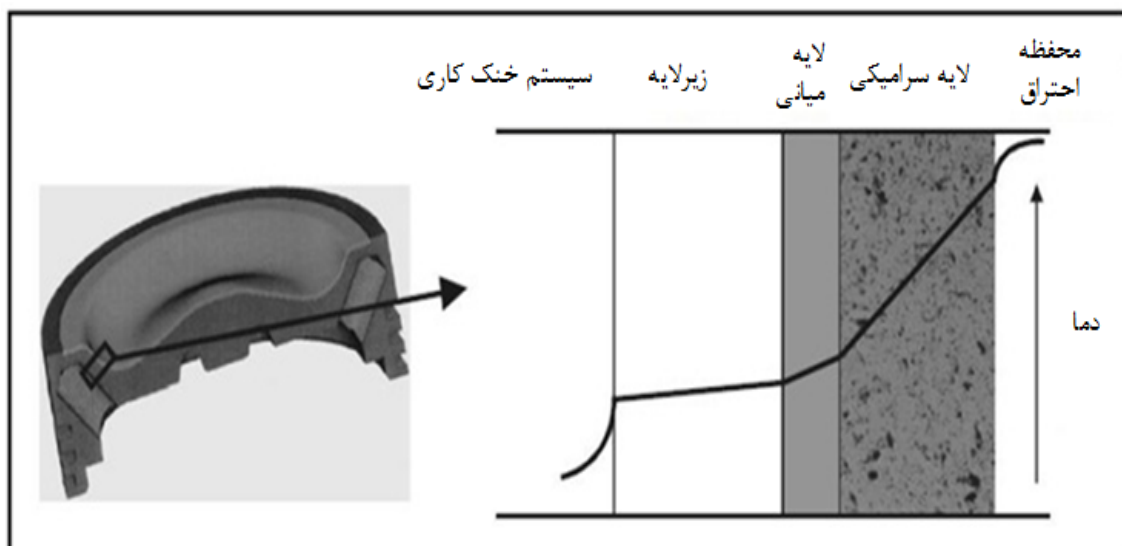
به طور کلی می توان گفت که شرایط پاشش نانو ذرات آگلومره شده باید به گونه ای باشد که این ذرات به طور کامل ذوب نشوند و بخشی از آن‌ها در ساختار پوشش قرار گیرند. در این حالت ریز ساختار پوشش متشکل از نانو ذرات ذوب جزئی شده در زمینه ای از ذرات کاملاً ذوب شده است. بررسی‌های انجام شده در این زمینه نشان می دهد که با کنترل اندازه، شکل و مورفولوژی توزیع نانو ذرات، می توان به پوشش‌های مهندسی با تفاوت بسیار چشمگیر در مشخصات ریزساختاری و عملکرد مکانیکی دست یافت. چگالی ناحیه نانو در ساختار پوشش، یکی از پارامترهای اساسی در دستیابی به این خواص متفاوت است. بسته به مشخصات حرارتی شعله پلاسمایی، شرایط پاشش و مشخصات پودر، ناحیه نانو تخلخلی مشابه یا کمتر از پودر آگلومره شده دارد که این میزان تخلخل می تواند عامل بروز عملکردهای متفاوت پوشش در شرایط مختلف باشد.

مراجع

- [۱] G. Meetham, "Mechanisms for increasing high temperature capability: Part B of 'requirements for and factors affecting high temperature capability,'" *Materials & Design*, vol. ۹, pp. ۳۰۸-۳۱۷, ۱۹۸۸.
- [۲] A. Samuli, "Modified thick thermal barrier coatings," Ph.D. Dissertation, Institute of Materials Science, Tampere University of Technology, ۲۰۰۴.
- [۳] C. C. Koch, *Nanostructured materials: processing, properties and applications*: William Andrew, ۲۰۰۷.
- [۴] R. Lima and B. Marple, "Superior performance of high-velocity oxyfuel-sprayed nanostructured TiO₂ in comparison to air plasma-sprayed conventional Al₂O₃-۱۳TiO₂," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. ۱۴, pp. ۳۹۷-۴۰۴, ۲۰۰۵
- [۵] R. S. Lima and B. R. Marple, "Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. ۱۶, pp. ۴۰-۶۳, ۲۰۰۷

- [۶] L. L. Shaw, D. Goberman, R. Ren, M. Gell, S. Jiang, Y. Wang, et al., "The dependency of microstructure and properties of nanostructured coatings on plasma spray conditions," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۱۳۰, pp. ۱-۸, ۲۰۰۰.
- [۷] M. Gell, E. Jordan, Y. Sohn, D. Goberman, L. Shaw, and T. Xiao, "Development and implementation of plasma sprayed nanostructured ceramic coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۱۴۶, pp. ۴۸-۵۴, ۲۰۰۱.
- [۸] S. Tao, B. Liang, C. Ding, H. Liao, and C. Coddet, "Wear characteristics of plasma-sprayed nanostructured yttria partially stabilized zirconia coatings," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. ۱۴, pp. ۵۱۸-۵۲۳, ۲۰۰۵.
- [۹] X. Lin, Y. Zeng, X. Zhou, and C. Ding, "Microstructure of alumina-۳wt.% titania coatings by plasma spraying with nanostructured powders," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۳۵۷, pp. ۲۲۸-۲۳۴, ۲۰۰۳.
- [۱۰] R. S. Lima and B. R. Marple, "Enhanced ductility in thermally sprayed titania coating synthesized using a nanostructured feedstock," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۳۹۵, pp. ۲۶۹-۲۸۰, ۲۰۰۵.
- [۱۱] R. Lima, A. Kucuk, and C. Berndt, "Integrity of nanostructured partially stabilized zirconia after plasma spray processing," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۳۱۳, pp. ۷۵-۸۲, ۲۰۰۱.
- [۱۲] H. Chen, Y. Zhang, and C. Ding, "Tribological properties of nanostructured zirconia coatings deposited by plasma spraying," *Wear*, vol. ۲۵۳, pp. ۸۸۵-۸۹۳, ۲۰۰۲.
- [۱۳] X. Liu, B. Zhang, and Z. Deng, "Grinding of nanostructured ceramic coatings: surface observations and material removal mechanisms," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. ۴۲, pp. ۱۶۶۵-۱۶۷۶, ۲۰۰۲.
- [۱۴] M. Borel, A. Nicoll, and R. Schmid, "The wear mechanisms occurring in abradable seals of gas turbines," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۳۹, pp. ۱۱۷-۱۲۶, ۱۹۸۹.
- [۱۵] Y. L. Nava and Z. Z. Mutasim, "Abradable coating and method of production," ed: Google Patents, ۲۰۰۳.
- [۱۶] E. J. Alexander, R. W. Fawley, and J. C. Napier, "Abradable coating in a gas turbine engine," ed: Google Patents, ۱۹۹۵.
- [۱۷] T. A. Taylor, "Thermal properties and microstructure of two thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۵۴, pp. ۵۳-۵۷, ۱۹۹۲.
- [۱۸] H. Guo, R. Vaßen, and D. Stöver, "Thermophysical properties and thermal cycling behavior of plasma sprayed thick thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۱۹۲, pp. ۴۸-۵۶, ۲۰۰۵.
- [۱۹] B. Liang and C. Ding, "Thermal shock resistances of nanostructured and conventional zirconia coatings deposited by atmospheric plasma spraying," *Surface and Coatings Technology*, vol. ۱۹۷, pp. ۱۸۵-۱۹۲, ۲۰۰۵.

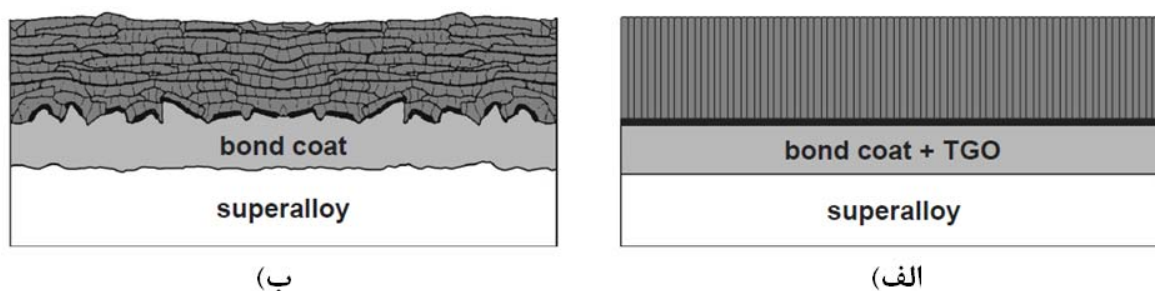
- [۲۰] W. Wang, C. Sha, D. Sun, and X. Gu, "Microstructural feature, thermal shock resistance and isothermal oxidation resistance of nanostructured zirconia coating," *Materials Science and Engineering: A*, vol. ۴۲۴, pp. ۱-۵, ۲۰۰۶.
- [۲۱] R. Soltani, E. Garcia, T. W. Coyle, J. Mostaghimi, R. Lima, B. Marple, et al., "Thermomechanical behavior of nanostructured plasma sprayed zirconia coatings," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. ۱۵, pp. ۶۵۷-۶۶۲, ۲۰۰۶.
- [۲۲] H. Chen, S. W. Lee, H. Du, C. X. Ding, and C. H. Choi, "Influence of feedstock and spraying parameters on the depositing efficiency and microhardness of plasma-sprayed zirconia coatings," *Materials Letters*, vol. ۵۸, pp. ۱۲۴۱-۱۲۴۵, ۲۰۰۴.
- [۲۳] P. Ctibor, P. Boháč, M. Stranyánek, and R. Čtvrtlík, "Structure and mechanical properties of plasma sprayed coatings of titania and alumina," *Journal of The European Ceramic Society*, vol. ۲۶, pp. ۳۵۰۹-۳۵۱۴, ۲۰۰۶.



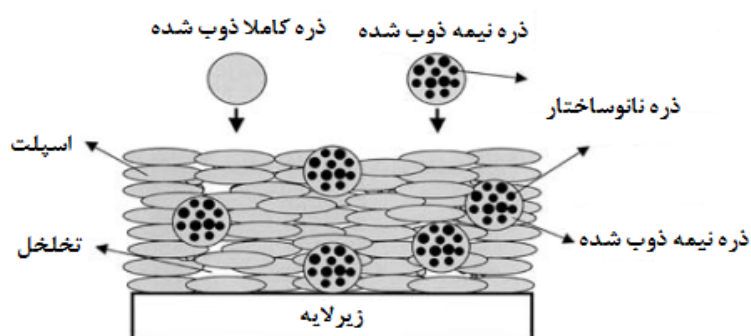
شکل ۱: نمایش کاهش دمای اجزای محافظه احتراق توربین از طریق پوشش سد حرارتی و هم‌زمان سرد شدن درون اجزای توربین گازی توسط هوای سرد. [Error! Bookmark not defined.]

جنس ماده	سیستم پوشش	عملکرد
زیرکونیای پایدار شده	لایه سرامیکی	عایق حرارتی
آلومینا	لایه اکسیدی رشد یافته حرارتی	سد اکسیداسیون
MCrAlY یا آلومینایدها	لایه میانی	پیوند بین لایه سرامیکی و زیرلایه-حفاظت از زیرلایه در برابر اکسیداسیون
سوپرالایز پایه نیکل	زیرلایه	تحمل بارهای مکانیکی حرارتی

شکل ۲: نمایی از یک پوشش سد حرارتی [Error! Bookmark not defined].



شکل ۳: شماتیکی از ساختارهای پوشش‌های سد حرارتی (الف) ساختار رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتو الکترونی (ب) ساختار پاشش پلاسما شده [Error! Bookmark not defined].



شکل ۴: شماتیکی سطح مقطع یک پوشش نانو ساختار پاشش حرارتی شده دارای ریزساختار دونمایی، شامل ذرات کاملاً ذوب شده و نیمه ذوب شده [۵].