فصلنامه مواد و فناوریهای پیشرفته دوره ۴، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۴، صفحات ۱۰-۱

بهینه‌سازی پارامترهای پاشش پلاسمایی نانوذرات NiCrAlY برای دستیابی به پوشش TBC با ساختار نانو

علیرضا فرزانه*[۱]، ضیاء والفی[۱]، کریم زنگنه مدار[۱]، امیرحسین شیخعلی[۱]

[۱] دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده مهندسی مواد، تهران، ایران.

تاریخ ثبت اولیه: ۱۳۹۳/۱۱/۱، تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح شده: ۱۳۹۴/۶/۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۱۳۹۴/۸/۱۷

چکیده در این تحقیق برای دستیابی به لایه اتصال فلزی نانوساختار در پوشش‌های TBC، ابتدا پودر NiCrAlY میکرونی با فرآیند آسیاکاری به ذرات بسیار ریز در مقیاس نانو تبدیل شد و پس از آگلومره نمودن نانوذرات NiCrAlY، با فرآیند پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS) بر روی زیرلایه فولاد زنگ نزن ۴۲۰ لایه‌نشانی گردید. فاصله تزریق پودر، نرخ تزریق هیدروژن و استفاده از دوش آرگون پارامترهایی بودند که برای لایه‌نشانی مناسب نانوذرات NiCrAlY آگلومره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از دوش آرگون، میزان اکسیداسیون در پوشش‌های نانو NiCrAlY را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. به‌علاوه افزایش نرخ تزریق هیدروژن و افزایش فاصله تزریق پودر، میزان اکسیداسیون در پوشش حاصل را افزایش می‌دهد.همچنین نانوذرات NiCrAlY در مقایسه با ذرات میکرونی نسبت به اکسیداسیون بسیار حساس‌تر هستند.

واژگان کلیدی: NiCrAlY، نانوذرات، پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS)، لایه اتصال فلزی، پوشش سد حرارتی (TBC).

Modification of Plasma Spray Parameters of NiCrAlY Nano Particles for Achievement of Nano Structure TBC

Alireza Farzaneh*[1], Zia Valefi[1], Karim Zangene Madar[1], Amir Hosein Sheikhali[1]

[1] University of MalekAshtar, Department of Material Engineering, Tehran, Iran.

Abstract In this research to rich nano structure bond coat uses in TBC, firstly with ball milling process the micron size NiCrAlY convert to nano particle size NiCrAlY, and after agglomeration nano particle NiCrAlY, powder were deposited upon stainless steel 420 substrate with atmospheric plasma spray (APS) process. Injection distance of powder, hydrogen rate, and utilizationof argon shroud parameters were investigated for suitable deposition agglomeration nano NiCrAlY particles. The result shown, utilization of argon shroud in nano NiCrAlY bond coat was decreased oxidation salient. Also increase of injection distance of powder and hydrogen rate cause to oxidation enhancement. Moreover the nano particle NiCrAlY in comparison micron NiCrAlY toward oxidation was very tender.

Keywords: NiCrAlY, Nano Particles, Atmosphere Plasma Spray (APS), Bond Coat, Thermal Barrier Coating (TBC).

*عهده‌دار مکاتبات

نشانی: تهران، لویزان، بزرگراه شهید بابایی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، **تلفن:** ۰۹۱۲۴۰۸۰۹۵۵، **پیام‌نگار:** Alirezafarzane@gmail.com

۱– مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی یا پوشش‌های سپر حرارتی (TBC)[۱] به‌طور گسترده در صنایع مختلف نظیر: هوافضا، خودروسازی، پزشکی و دندانپزشکی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رایج‌ترین کاربرد پوشش‌های سد حرارتی، ایجاد یک لایه محافظ برای حفاظت از زیرلایه[۲] و یا اجزای سازنده آن، از اتمسفر خورنده و فرساینده است [۱]. همچنین محافظت از اجزای زیرلایه در دمای بالای محیط کاری و به دنبال آن افزایش عمر قطعات، از وظایف اصلی این پوشش‌ها است [۲].

در دماهای بالاتر از $۹۰۰^\circ C$ اغلب سوپرآلیاژها اکسیداسیون سریع دارند. از آنجایی که ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژها در مراحل اولیه اکسیداسیون اجازه تشکیل لایه محافظ در برابر اکسیژن را نمی‌دهند، اغلب از پوشش‌های نفوذی آلومینایدی که مبتنی بر تشکیل فاز β (NiAl) و یا از پوشش‌های MCrAlY که مبتنی بر تشکیل فازهای β، γ (محلول جامد نیکل) و γ′ (Ni_3Al) است، استفاده می‌شود [۳].

پوشش‌های سد حرارتی از سه لایه مجزا تشکیل شده‌اند که هر کدام وظیفه‌ای را در محافظت از زیر لایه بر عهده دارند. لایه رویی[۳] یا اولین لایه، یک لایه سرامیکی با هدایت حرارتی تا حد امکان پایین و ضریب انبساط حرارتی بالاست [۴]. لایه دوم، لایه اتصال فلزی یا لایه پیوندی[۴] است که معمولاً از یک پوشش نفوذی[۵] آلومینایدی (AlNi, Al_2Ni_3) و یا یک پوشش روکشی[۶] MCrAlY که در آن M بیانگر نیکل، کبالت و یا هر دو آن‌هاست، تشکیل می‌شود [۳]. نهایتاً یک لایه اکسید سرامیکی رشد یافته در اثر حرارت (TGO)[۷] با ترکیب $\alpha-Al_2O_3$ (آلومینا) در بین دو لایه اصلی تشکیل می‌شود [۵]. تحقیقات نشان می‌دهد که لایه اکسیدی یکنواخت و نازک از جنس Al_2O_3، در محافظت از زیرلایه بسیار موثرتر از یک لایه اکسیدی ضخیم و غیر یکنواخت است [۶].

پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار[۸] خواص و مورفولوژی متفاوتی نسبت به پوشش‌های سد حرارتی معمولی دارند. مهم‌ترین ویژگی نانو TBCها ساختار دوگانه‌ای[۹] است که بعد از پاشش از خود نشان می‌دهند. در این ساختار برخی از آگلومره‌ها به طور کامل ذوب شده، برخی دیگر به طور جزیی ذوب شده و برخی دیگر اصلاً ذوب نمی‌شوند. محققین معتقدند این ساختار باعث کاهش تنش‌های مخربی می‌شود که مسئول تخریب لایه سرامیکی هستند [۷, ۸].

پس از پاشش یک نانو آگلومره در شعله پلاسما، جداره خارجی آن ذوب شده و هسته درونی آن کماکان به صورت نانو باقی می‌ماند. البته میزان ذوب شدن و ابعاد نانوذرات، به میزان آگلومره و محل عبور آن از شعله پلاسما بستگی دارد [۷, ۹–۱۱].

توسعه پوشش‌های سد حرارتی نانوساختار مختص پوشش‌هایی است که لایه سرامیکی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ)[۱۰]، در آن‌ها دارای ساختار نانو است. در این میان برخی از محققین نگاهی به نانوساختار نمودن پودر اولیه MCrAlY داشته و نتایج مطلوبی را نیز به‌دست آورده‌اند [۱۲]. اما آنچه که در میان تحقیقات به چشم نمی‌خورد، ایجاد لایه پیوندی از طریق پودر نانو MCrAlY است. دلیل این امر نیز تا حدی نمایان بوده و آن هم بستگی به تولید نانو پودر MCrAlY آگلومره‌ای که قابل پاشش به روش‌های مرسوم اعمال لایه پیوندی باشد و بتواند در برابر اکسیداسیون حین پاشش از خود مقاومت نشان دهد.

نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که استفاده از پودر آسیاب تبریدی شده MCrAlY برای بهبود خواص لایه پیوندی موثر بوده و طول عمر حرارتی آن را افزایش می‌دهد. گزارش شده یکی از ویژگی‌های ممتاز در ساختار لایه‌های پیوندی آسیاب تبریدی شده توزیع بسیار ریز و یکنواخت اکسیدها و نیتریدهای غنی از آلومینیوم درون پوشش و همچنین اکسیداسیون میان‌پاسی کمتر این پوشش‌ها است، که چنین ویژگی در پوشش با پودرهای معمولی مشاهده نمی‌شود [۱۳]. همچنین تحقیقات نشان می‌دهد انجام عملیات مکانیکی بر

[1]. Thermal Barrier Coating
[2]. Substrate
[3]. Top Coat
[4]. Bond Coat
[5]. Diffusion Coating
[6]. Overlay Coating
[7]. Thermally Grown Oxide
[8]. Nano Structure TBC
[9]. Bimodal
[10]. Yttria-Stabilized Zirconia

روی پودرهای MCrAlY می‌تواند موجب بهبود مقاومت در برابر شوک حرارتی TBC گردد [۱۴].

مکانیزم اصلی پوشش‌های MCrAlY، از دست دادن عناصر حفاظتی از طریق نفوذ دوجانبه (دوجهتی) است. نفوذی که با افزایش دما، به صورت نمایی افزایش می‌یابد. به طور مثال در هنگام کار، آلومینیوم برای محافظت از سطح به صورت پیوسته به سمت گازهای داغ و همچنین برای نفوذ به مناطق خالی شده از آلومینیوم به منظور حفظ تعادل ترمودینامیکی، به سمت زیرلایه نفوذ می‌کند. به هر حال رفتار دراز مدت پوشش در طول کارکرد توربین کاملاً به ترکیب اولیه پوشش بستگی دارد [۳].

یکی از روش‌های تولید پوشش‌های نانوساختار، استفاده از روش پاشش حرارتی است که در آن ذرات نانو به مقیاس میکرومتر درآمده و پس از ذوب شدن برروی زمینه نشانده می‌شوند. برای لایه‌نشانی پودرهای نانو اغلب از فرآیند پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS)[۱] که در آن پودرها با ابعادی در محدوده صفر تا ۱۰۰ میکرون سیالیت‌پذیر می‌شوند، استفاده می‌گردد [۱۰, ۱۵] اما پاشش نانوذرات NiCrAlY با روش‌های معمول پاشش پلاسمایی اتمسفری امکان‌پذیر نیست بلکه باید از روش‌هایی استفاده کرد که در آن‌ها حفاظت از پودر در برابر اکسیداسیون بیشتر باشد [۱۶]. روش‌هایی نظیر پاشش پلاسمایی در فشار پایین (LPPS)[۲] و پاشش پلاسمایی در خلاء (VPS)[۳] از چنین مزیتی برخوردار هستند. روش‌های LPPS و VPS میکروساختارهای فشرده و همگنی ایجاد می کنند که در آنها اثری از اکسیداسیون نیست اما هزینه تولید در این روش‌ها بسیار بالا است. هزینه تولید یک پوشش به روش LPPS در حدود ۱۰ برابر هزینه تولید APS است [۱۷]. همچنین اندازه قطعه‌ای که تحت پوشش قرار می‌گیرد، بسته به گنجایش محفظه محدود می‌شود [۱۶] به همین دلیل کماکان سعی بر توسعه روش‌هایی است که در آن‌ها نیاز به کنترل اتمسفر پاشش وجود نداشته باشد. از این‌رو در این مقاله استفاده از حفاظت دوش آرگون جهت ارتقای خواص پوشش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق ابتدا پودر NiCrAlY را آسیاکاری نموده، سپس برای افزایش قابلیت پاشش نانوذرات NiCrAlY اقدام به آگلومره کردن آن نموده و پارامترهای پاشش پلاسمایی چنین پودری مورد بررسی قرار گرفته است. در میان تلاش‌های صورت گرفته برای اعمال چنین پودری روش پاشش پلاسمایی تحت محافظت دوش آرگون به دلایل مطروحه بیشتر مورد توجه بوده و با این روش پودرهای نانو NiCrAlY آگلومره شده پاشش گردید.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد اولیه

پودر NiCrAlY مورد استفاده در این تحقیق از نوع AMDRY962 محصول شرکت SULZER، با ترکیب شیمیایی Ni-21Cr-10Al-1Y است. همچنین از فولاد زنگ‌نزن ۴۲۰ به عنوان زیرلایه استفاده شد.

۲-۲- تجهیزات

دستگاه شن‌پاشی[۴] برای از بین بردن آلودگی‌های سطحی زیرلایه‌ها نظیر پوشش‌های احتمالی قبلی برجای مانده و ایجاد یک سطح ناهموار برای چسبندگی بهتر پوشش با زیرلایه مورد استفاده قرار گرفت. عملیات شن‌پاشی با ذرات آلومینا (مش ۳۶)، تحت فشار ۴/۵ bar و از فاصله ۲۰cm صورت گرفت. سطح نمونه‌ها پس از شن‌پاشی برای از بین رفتن سایر آلودگی‌ها با استون شستشو گردید.

به منظور کاهش ابعاد ذرات پودر NiCrAlY، از دستگاه آسیاب سیاره‌ای Fritsch استفاده شد. حجم محفظه آسیاب ۲۲۵ میلی‌لیتر و حداکثر دور آن در هر دقیقه به ۶۵۰ می‌رسد. در این تحقیق از ظرف فولاد زنگ‌نزن و از گلوله‌های نیکلی استفاده شد. دلیل استفاده از گلوله‌های نیکلی کاهش ورود ناخالصی‌ها به پودر است. گلوله‌ها دارای قطر ۷ و ۱۲ میلی‌متر و نسبت بارگیری گلوله‌ها یکسان بود. ظرف و گلوله‌ها قبل از هر بارگیری بایستی به طور کامل شستشو و خشک گردد. همچنین از دستگاه پاشش پلاسمایی اتمسفری پلاسما تکنیک[۵]

[۱]. Atmosphere Plasma Spray

[۲]. Low Pressure Plasma Spray

[۳]. Vacuum Plasma Spray

[۴]. Sand Blast

[۵]. Plasma Technique

مدل A-3000S، مجهز به تفنگ[۱] F4-MB برای ایجاد پوشش استفاده شد.

۲-۳- آماده سازی پودر NiCrAlY

برای کاهش اندازه ذرات پودر با استفاده از آسیاب سیاره‌ای، ابتدا مقداری پودر NiCrAlY و الکل بارگیری شد. هرچه مقدار گلوله‌ها بیشتر و حجم پودر کمتر باشد، بازدهی فرآیند آسیاکاری بیشتر خواهد بود و در زمان‌های کوتاه‌تری به نتیجه خواهد رسید. این مقادیر به حجم محفظه آسیاب بستگی دارد و در تحقیق حاضر عبارت است از:

۵۰۰ گرم گلوله، ۵۰ گرم پودر NiCrAlY و ۱۰ گرم الکل.

۲-۴- آگلومره کردن نانو پودر

به منظور آگلومره کردن نانو پودر، ۵۰ گرم از چسب پلی وینیل الکل (PVA) با ۱۰ برابر وزن آن یعنی ۵۰۰ گرم آب مقطر مخلوط و داخل بشر ریخته و بر روی هم‌زن مغناطیسی در دمای حدود $80^{\circ}C$ قرار داده شد، تا چسب PVA مایع تولید گردد. چسب PVA مایع به پودرهای نانو اضافه شد، تا پودرها حالت خمیری به خود گیرند، سپس بر روی حرارت حدود $150^{\circ}C$ به صورت دستی هم زده می‌شود.

بهتر است چسب و پودر در چند مرحله باهم مخلوط شوند تا چسب به خوبی به همه پودرها برسد و آنها را به هم بچسباند. اگر عمل هم‌زدن دستی به درستی انجام شود، در نهایت پس از تبخیر آب چسب، کلوخه‌هایی از پودرهای نانو خواهیم داشت که بایستی آگلومره‌های مناسب آن جهت پاشش جدا گردند. بدین منظور از دو الک با مش ۱۰۰ و ۳۲۵ استفاده شد در نتیجه آنچه که از الک با مش ۱۰۰ عبور می‌کند و بر روی الک مش ۳۲۵ باقی می‌ماند، آگلومره‌هایی با اندازه بین ۴۵ تا ۱۵۰ میکرون است. این اندازه آگلومره‌ها برای پاشش پلاسما مناسب خواهد بود. آنچه که برروی الک مش ۱۰۰ باقی‌مانده بایستی مجدداً آسیاب شده و از الک عبور داده شود و آنچه که از الک مش ۳۲۵ عبور می‌کند، بایستی دوباره فرآیند اختلاط با چسب روی آن انجام شود.

۲-۵- طراحی قطعات مورد نیاز

لایه‌نشانی‌های اولیه جهت دست‌یابی به پیوند اتصال فلزی، با استفاده از پارامترهای ذیل انجام شد:

ولتاژ (KV)	۵۰
شدت جریان (A)	۶۰۰
فاصله پاشش پلاسمایی (cm)	۱۵
نرخ تزریق پودر (g/min)	۲۰
نرخ گاز پلاسما (L/min)	۴۵
نرخ گاز حامل پودر (L/min)	۲/۵

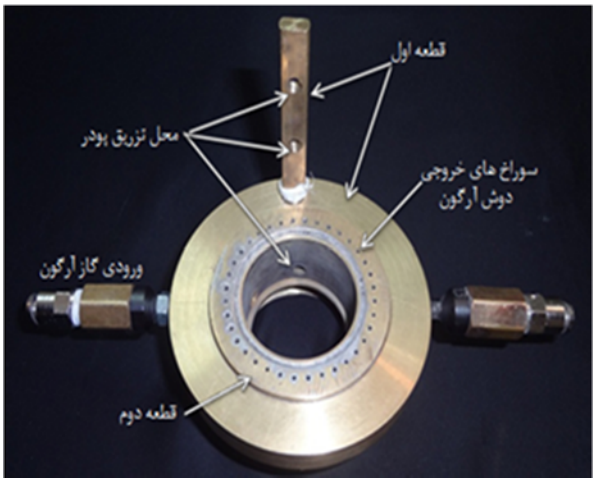
نتایج حاکی از آن بود که پارامترهای مورد استفاده در پودرهای NiCrAlY میکرونی نمی‌تواند برای نانو پودرهای NiCrAlY به کار برده شود لذا برای برطرف کردن این مشکل اقدام به بررسی سه موضوع شد: اول تأثیر فاصله تزریق پودر، دوم تأثیر نرخ گاز هیدروژن و سوم تأثیر حفاظت از پودر نانو NiCrAlY. بدین منظور دو قطعه طراحی شد که بر روی یکدیگر سوار شده و به دستگاه پاشش متصل می‌شدند. قطعه اول برای بررسی اثر فاصله تزریق پودر و قطعه دوم (دوش آرگون) برای بررسی اثر حفاظت از شعله پلاسما طراحی گردید.

هدف از طراحی این قطعات ممانعت از اکسیداسیون در حین پاشش، چه از طریق دور کردن پودرها از مکانی که حداکثر دما را در شعله پلاسما دارد (افزایش فاصله تزریق) و چه از طریق کاهش دمای شعله پلاسما با کاهش نرخ تزریق هیدروژن (بررسی نرخ هیدروژن) است. قطعه دوم (یعنی همان دوش آرگون) به صورت استوانه‌ای که دو سوراخ روی بدنه آن برای تزریق گاز آرگون تعبیه شده و در سطحی که در راستای پاشش قرار دارد نیز سوراخ‌های بسیار ریز برای خروج گاز آرگون تعبیه شده است (شکل ۱).

سوراخ اصلی برای تزریق پودر بر روی قطعه دوم تعبیه گردید. علاوه بر آن به منظور بررسی اثر فاصله تزریق پودر، دو سوراخ دیگر بر روی قطعه اول به ترتیب در فواصل 17mm و 27mm از سوراخ اصلی تعبیه گردید (شکل ۱). جدول (۱) نشان دهنده تغییر پارامترهای مربوط به قطعه اول است. تغییرات نرخ هیدروژن و فاصله پاشش در جدول (۱) در دو حالت بدون دوش آرگون و با دوش آرگون بر روی پودرهای

[۱]. Gun

NiCrAlY آسیاب شده انجام شد. نتایج با متالوگرافی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱. تصویر قطعات طراحی شده و اجزای آن‌ها.

جدول ۱. تغییر پارامترهای فاصله تزریق و نرخ هیدروژن.

کد نمونه	فاصله تزریق (mm)	نرخ هیدروژن (L/min)
H ۰/۶	۰	۶
H ۶/۱۷	۱۷	۶
H ۶/۲۷	۲۷	۶
H ۰/۸	۰	۸
H ۸/۱۷	۱۷	۸
H ۸/۲۷	۲۷	۸

پس از تعیین مقادیر بهینه فاصله تزریق پودر و نرخ هیدروژن، لایه‌نشانی سایر لایه‌ها با استفاده از پارامترهای زیر انجام شد:

فاصله پاشش پلاسمایی (cm)	۱۵
نرخ تزریق پودر (g/min)	۲۰
نرخ گاز پلاسما (L/min)	۴۵
نرخ گاز حامل هیدروژن (L/min)	۶
نرخ گاز حامل پودر (L/min)	۲/۳

لازم به ذکر است که در تمام مواردی که از دوش آرگون استفاده شده، فشار دوش آرگون ۳bar می‌باشد. برای بررسی‌های اولیه و مشاهده ضخامت و ساختار پوشش‌های لایه‌نشانی شده از میکروسکوپ نوری صا ایران و HITACHI استفاده شد. نرم افزار Clemex Vision برای پردازش تصویر مورد استفاده قرار گرفت.

۳- نتایج و بحث

با توجه به ماهیت فلزی پودر، حساسیت فراوان پودر به اکسیداسیون و شناختی که در طول تحقیق و از تجربیات قبلی به دست آمده بود، دو پارامتر فاصله تزریق پودر و نرخ گاز هیدروژن از اولویت بیشتری برخوردار بودند.

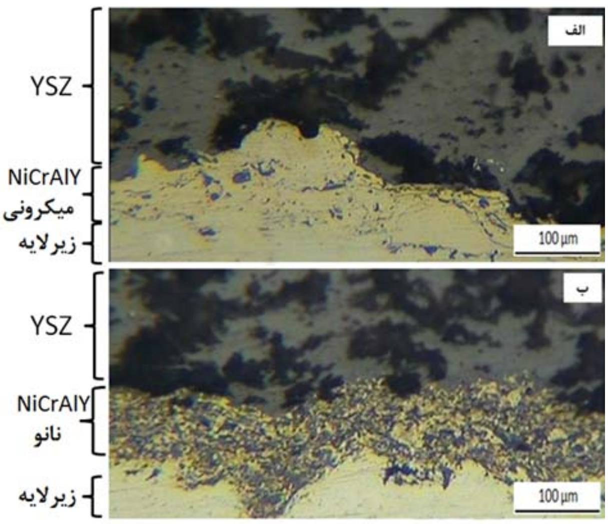
۳-۱- پوشش اتصال فلزی لایه‌نشانی شده با استفاده از نانوذرات NiCrAlY بدون دوش آرگون

شکل (۲) با کمک میکروسکوپ نوری از پوشش لایه نشانی شده با پودرهای NiCrAlY نانو و میکرونی گرفته شده است. مناطق تیره در این تصویر، ناشی از اکسیداسیون ذرات NiCrAlY بوده و همان‌طورکه در تصویر مشخص می‌باشد تقریباً تمام پوشش نانو NiCrAlY لایه‌نشانی شده دچار اکسیداسیون شدید شده است. اما در عوض پوشش NiCrAlY میکرونی تنها در مرز اسپلت‌ها و به طور بسیار جزیی در داخل بعضی از اسپلت‌ها دچار اکسیداسیون شده، که نشان می‌دهد نانو آگلومره‌های NiCrAlY نسبت به ذرات NiCrAlY میکرونی به اکسیداسیون بسیار حساس‌تر هستند. این امر به علت افزایش نسبت سطح به حجم ذرات NiCrAlY رخ می‌دهد. از آنجایی که نانوذرات NiCrAlY با چسب به صورت آگلومره به‌هم متصل شده‌اند، این امکان وجود دارد که برخی از آن‌ها در جت پلاسما که دارای سرعت و دمای بسیار بالایی است، پس از بخار شدن PVA آن‌ها از هم متلاشی شده و ذرات به صورت پراکنده از هم درآمده‌اند.

برای این ذرات با توجه به وزن آن‌ها دو اتفاق می‌تواند رخ دهد، ذرات سبک‌تر اصلاً امکان رسیدن به سطح را پیدا نمی‌کنند و شعله پلاسما آن‌ها را پراکنده می‌کند و ذرات سنگین‌تر یا همان آگلومره‌های درشت با اکسیداسیون سطحی شدید به زیرلایه می‌رسند به طوری‌که یا تمام آن اکسید شده و به سطح می‌رسند و یا آن‌که تنها هسته آن از اکسیداسیون در امان مانده است.

شکل (۲) تفاوت میان یک پوشش اتصال فلزی میکرونی با یک پوشش اتصال فلزی لایه نشانی شده با استفاده

از نانوذرات NiCrAlY را نشان می‌دهد. ماهیت لایه اتصال فلزی، همان‌طورکه از ترکیب آن انتظار می‌رود مشابه زیرلایه فلزی است و در زیر میکروسکوپ هم لایه اتصال فلزی به خاطر شباهت‌های ترکیبی با زیرلایه، تقریباً به رنگ زیرلایه دیده می‌شود. در این میان، مناطق سیاه رنگ درون لایه اتصال فلزی نشان‌دهنده ترکیبات اکسیدی درون لایه اتصال فلزی است.



شکل ۲. لایه پیوندی ایجاد شده از: الف) پودر میکرونی NiCrAlY ب) پودر نانو NiCrAlY آگلومره شده.

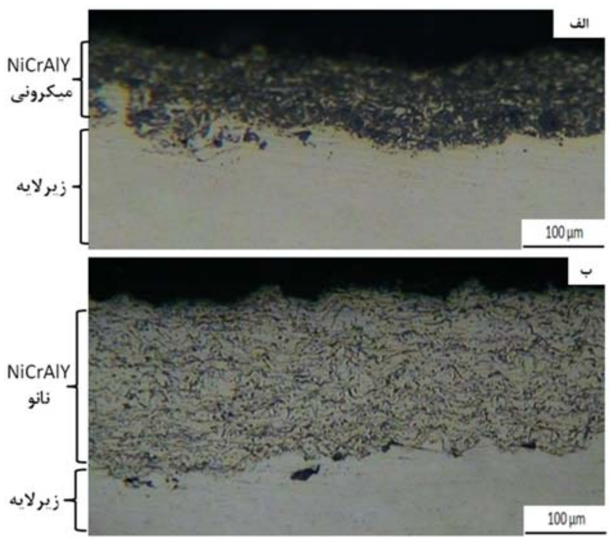
همان‌طورکه از شکل (۲) مشخص است میزان اکسیداسیون در پوشش اتصال فلزی ناشی از پودرهای نانوذرات آگلومره بسیار بیشتر از پوشش ناشی از پودرهای میکرونی می‌باشد. براساس نتایج آنالیز تصویری، میزان اکسیداسیون در شکل ۲–الف، در حدود ۷٪ و برای شکل ۲–ب در حدود ۹۰٪ است. نتایج آزمون اکسیداسیون برای پوشش نانو نشان داد که تنها بعد از ۲۵ ساعت اکسیداسیون در دمای $950^{\circ}C$، دچار جدایش کامل از زیرلایه می‌شود.

تغییر پارامترهای پاشش نظیر نرخ هیدروژن، نرخ تزریق و همچنین تغییر در مکان تزریق پودرها برای پودرهای نانو NiCrAlY آگلومره نیز نتوانست به بهبود شرایط پوشش حاصل کمکی نماید و همه پوشش‌ها تقریبا میزان اکسیداسیونی که در شکل ۲–ب نشان داده شده را به همراه داشتند.

۳-۲- پوشش اتصال فلزی لایه‌نشانی شده با استفاده از نانوذرات NiCrAlY آگلومره به همراه دوش آرگون

لایه‌نشانی نانوذرات NiCrAlY با کمک قطعه طراحی شده و در حضور دوش آرگون با پارامترهای نرخ هیدروژن ۸ لیتر بر دقیقه و فاصله تزریق اصلی انجام شد. در اثر استفاده از دوش آرگون میزان اکسیداسیون به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کرد. شکل (۳) اثر استفاده از دوش آرگون را نشان می‌دهد. از این شکل به وضوح می‌توان دریافت که با استفاده از دوش آرگون میزان اکسیداسیون به طور قابل توجهی کاهش یافته است.

در فرآیند پاشش، تعداد پاس‌های لایه‌نشانی برای ایجاد یک ضخامت خاص تقریباً برابر در نظر گرفته می‌شود، بر این اساس بایستی انتظار داشت برای تعداد پاس‌های لایه‌نشانی مشخص، ضخامت تقریباً یکسانی به دست آید، اما همان‌طورکه از شکل (۳) می‌توان مشاهده کرد، ضخامت پوشش به‌دست آمده از پودرهای با دوش آرگون بیشتر از ضخامت پوشش بدون استفاده از دوش آرگون می‌باشد. این امر نشان می‌دهد استفاده از دوش آرگون بازدهی پوشش‌دهی را افزایش داده است.



شکل ۳. پوشش اتصال فلزی لایه نشانی شده از نانوذرات آگلومره NiCrAlY: الف) بدون استفاده از دوش آرگون ب) با استفاده از دوش آرگون.

۳-۳- بررسی اثر نرخ هیدروژن و فاصله تزریق به همراه استفاده از دوش آرگون

پس از مشخص شدن اثر مثبت استفاده از دوش آرگون به منظور تکمیل بهینه‌سازی پارامترها، فواصل مختلف تزریق

پودر و نرخ‌های مختلف هیدروژن تحت حفاظت دوش آرگون مورد بررسی قرار گرفت. مشخصات نمونه‌ها در جدول (۱) بیان شده است.

در شکل (۴) تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع پوشش‌های حاصل، مشاهده می‌شود. چنانچه در این شکل مشهود است دو پوشش H۶/۲۷ و H۸/۲۷ که پودر آن‌ها در فاصله بیشتری تزریق شده از ضخامت مناسب برخوردار نیستند و بازدهی پاشش کم است. این امر را می‌توان به عدم سرعت‌گیری مناسب و نداشتن شتاب لازم پودرها هنگام برخورد با زیرلایه نسبت داد [۱۲]. همچنین کندگی و تخلخل‌های زیاد به وجود آمده در این دو نوع پوشش نشان می‌دهد که اسپلت‌ها[1] بعد از لایه‌نشانی شدن بر روی سطح بستر، از چسبندگی مناسب نسبت به هم برخوردار نیستند زیرا بر اثر اصطکاک ایجاد شده هنگام پولیش‌کاری، ذرات به راحتی کنده شده‌اند.

به نظر می‌رسد با افزایش فاصله تزریق، اگرچه پودرها از بیشینه دمایی فاصله می‌گیرند اما این امر کاهش سرعت آن‌ها در جت پلاسما به علت عدم شتاب‌گیری اولیه لازم و افزایش زمان ماندگاری[2] پودرها در جت پلاسما را به دنبال دارد. با افزایش زمان ماندگاری پودرها در جت پلاسما اکسیداسیون افزایش می‌یابد. افزایش میزان اکسیداسیون کاهش استحکام چسبندگی پوشش را به دنبال خواهد داشت.

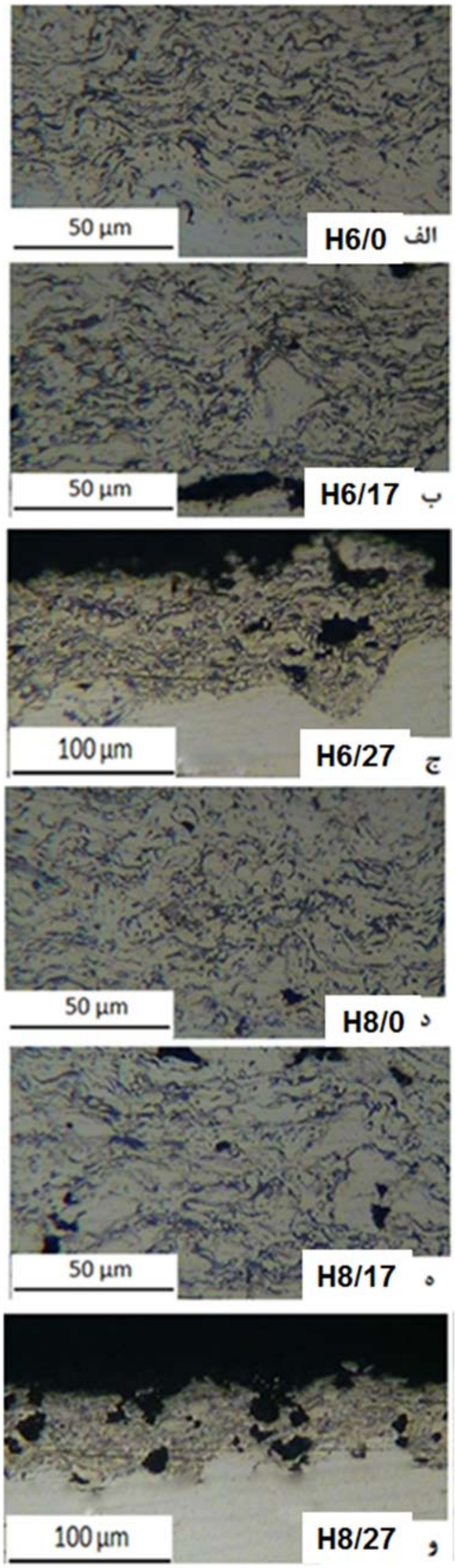
نکته دیگر این‌که با افزایش فاصله تزریق قدرت ذرات برای شتاب یافتن به سمت سطح، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر انرژی جنبشی ذرات هنگام برخورد با سطح کاهش می‌یابد. با کاهش انرژی جنبشی، پودرها توان لازم برای چسبیدن به سطح را از دست داده و پوشش ناقصی تشکیل می‌گردد.

باید توجه داشت که میزان اکسیداسیون در حین پاشش کاملاً وابسته به میزان محافظت از شعله پلاسما است. در روش‌هایی که محافظت بهتری از شعله را فراهم می‌کنند، میزان اکسیداسیون کمتر خواهد بود [۱۶, ۱۸]. این مورد تا حدی

[1]. Splat

[2]. Dwell Time

برای دو پوشش H۶/۱۷ و H۸/۱۷ مشاهده می‌شود. کندگی‌هایی در دو پوشش H۶/۲۷ و H۸/۲۷ قابل رؤیت است.



شکل ۴. پوشش‌های اتصال فلزی ناشی از نمونه‌های تحت محافظت دوش آرگون: الف) هیدوژن ۶ فاصله تزریق اصلی ب) هیدوژن ۶ فاصله تزریق

۱۷mm ج) هیدوژن ۶ فاصله تزریق ۲۷mm د) هیدوژن ۸ فاصله تزریق اصلی ه) هیدوژن ۸ فاصله تزریق ۱۷mm و) هیدوژن ۸ فاصله تزریق ۲۷mm.

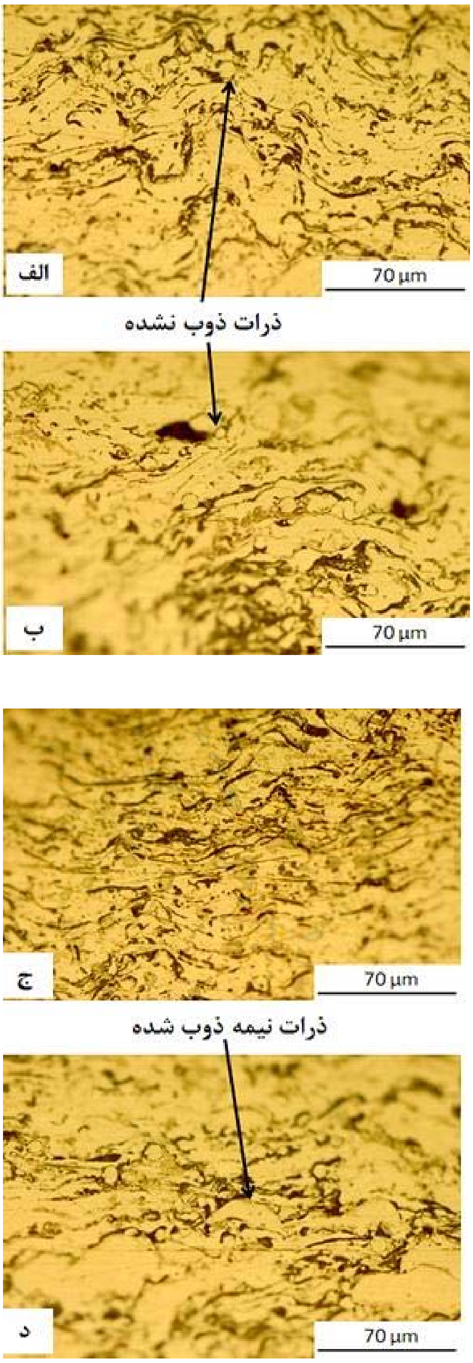
می‌توان گفت با فاصله گرفتن از مکان اصلی تزریق پودرها دو اتفاق افتاده است. اول آن‌که حفاظت دوش آرگون کاهش یافته که این را می‌توان از میزان اکسید شدن بیشتر نمونه‌ها از بالا به پایین در نرخ هیدروژن ثابت دریافت. اتفاق دوم و مهم‌تر آن‌که با افزایش فاصله ذرات پودر که انرژی جنبشی آنها ناشی از سرعت جت پلاسما (در حدود ۳۰۰m/s است، از محل تزریق پودر انرژی آن‌ها به اندازه کافی تامین نمی‌شود و در نتیجه چسبیدن ذرات به زیرلایه (مانند نمونه H۶/۱۷ شکل ۴- ب) و همچنین چسبیدن آنها به یکدیگر (شکل ۴- ج و ۴- و) دچار مشکل خواهند شد و پوشش یکنواخت و سالمی تشکیل نمی‌شود.

به هرحال برای مقایسه کامل چهار نمونه‌ای که میزان اکسیداسیون آنها نزدیک به هم به نظر می‌رسید از روش‌های پردازش تصویر کمک گرفته شد. تصاویر دیگری از این پوشش‌ها تهیه و مورد پردازش قرار داده شد. در شکل (۵) نمونه‌ای از این تصاویر آورده شده است.

برای پردازش بهتر تصاویر قسمت‌های اضافی بریده شده و همچنین نمونه‌های مربوط به سوراخ شماره ۳ با توجه به عدم کیفیت مناسب در مقایسه آورده نشده است. در شکل (۵) برخی ذرات ذوب نشده به صورت دایره‌های کامل به خوبی در تصویر قابل رؤیت می‌باشد، ذرات مشابه توسط محققین دیگر نیز گزارش شده است [۱۹].

نکته قابل توجه اندازه ذرات ذوب نشده است. در حالی که اندازه ذرات ذوب نشده در پودرهای میکرونی حدود ۵۰ میکرون (شکل ۲–الف) و در سایر تحقیقات[۱۹] نیز در حدود ۳۰–۲۰ میکرون است، اندازه ذرات ذوب نشده در پوشش‌های لایه‌نشانی شده با پودرهای نانو NiCrAlY آگلومره اغلب کمتر از ۱۰ میکرون می‌باشد. ریز شدن ساختار و تعداد اسپلت‌های بیشتر با ضخامت کمتر، از ویژگی‌های این پوشش نسبت به پوشش‌های میکرونی است.

ساختار لایه‌ای مرسوم در پوشش‌های APS که به صورت اسپلت‌های پی‌درپی بر روی هم فرود می‌آیند، توسط سایر محققین گزارش شده است [۱۶, ۱۸]. مشابه این ساختار در شکل ۵ نیز قابل مشاهده می‌باشد. در این میان برخی ذرات نیمه ذوب شده هم وجود دارند، حضور این ذرات نیز قبلاً توسط محققین [۱۹] گزارش شده است.



شکل ۵. تصویر میکروسکوپ نوری از مقطع پوشش‌های اتصال فلزی ناشی از پودرهای آگلومره نانو NiCrAlY تحت محافظت دوش آرگون: الف) H۶/۰ ب) H۶/۱۷ ج) H۸/۰ د) H۸/۱۷ .

نکته قابل تامل دیگر، میزان ذرات ذوب نشده در دو نمونه H۶/۱۷ و H۸/۱۷ نسبت به دو نمونه H۶/۰ و H۸/۰ است. در شکل‌های ۵–ب و ۵–د ذرات ذوب نشده بیشتری حضور دارند. به نظر می‌رسد با افزایش فاصله تزریق، ذرات

وارد ناحیه سردتر جت پلاسما می‌شوند و در نتیجه به صورت ذوب نشده و یا به طور جزیی ذوب شده در ساختار یا پوشش مشارکت می‌کنند. از طرف دیگر این ذرات سرعت کمتری دارند و در نتیجه میزان اکسیداسیون آن‌ها بیشتر است. چنان‌که این تصاویر نشان می‌دهند، تغییر نرخ هیدروژن تأثیر چندانی بر ساختار پوشش نداشته یا حداقل تأثیر فاصله تزریق، بسیار بیشتر از آن می‌باشد. درصد اکسیداسیون پوشش‌های مختلف به کمک پردازش تصاویر مختلف اندازه‌گیری شد و مقدار میانگین حاصل برای چهار تصویر به عنوان نتیجه نهایی در جدول (۲) گزارش گردید.

جدول ۲. نتایج حاصل از پردازش تصویر و بررسی میزان اکسیداسیون پوشش‌ها حین پاشش.

کد نمونه	تصویر اول	تصویردوم	تصویرسوم	تصویرچهارم	میانگین
H ۶/۰	۱۷	۲۰	۱۴	۲۲	۱۸
H ۶/۱۷	۲۵	۲۵	۱۹	۲۷	۲۴
H ۶/۲۷	۳۷	۳۵	۳۰	۳۷	۳۵
H ۸/۰	۲۳	۲۴	۲۱	۲۰	۲۲
H ۸/۱۷	۳۰	۲۴	۲۷	۲۲	۲۶
H ۸/۲۷	۳۷	۴۲	۴۴	۳۹	۴۰

همان‌طورکه از داده‌های جدول (۲) برمی‌آید، به طور کلی میزان اکسیداسیون برای نمونه‌های با نرخ هیدروژن ۶ کمتر از نمونه‌های با نرخ هیدروژن ۸ می‌باشد. همچنین میزان اکسیداسیون با افزایش فاصله تزریق چه در نرخ هیدروژن ۶ و چه در نرخ هیدروژن ۸ افزایش یافته است. با توجه به نتایج به‌دست آمده ترتیب اهمیت سه پارامتر را می‌توان این‌گونه بیان نمود: اول دوش آرگون، دوم فاصله تزریق و سوم نرخ هیدروژن.

۴- نتیجه‌گیری

۱- به دلیل اکسیداسیون شدید، پاشش پلاسمایی نانوذرات NiCrAlY آگلومره به روش APS معمولی، عملاً امکان‌پذیر نیست درحالی‌که با محافظت از شعله پلاسما توسط گاز آرگون میزان اکسیداسیون به‌طور چشمگیر کاهش پیدا کرده و راندمان پوشش‌دهی نیز افزایش یافت.

۲- از میان پارامترهای بررسی شده، استفاده از دوش آرگون بیشترین اثر را بر کاهش میزان اکسیداسیون از خود نشان داد.

۳- افزایش فاصله تزریق پودر به‌دلیل افزایش زمان ماندگاری پودر در شعله پلاسما باعث کاهش کیفیت پوشش و افزایش میزان اکسیداسیون شد.

۴- کاهش نرخ هیدروژن به‌دلیل کاهش آنتالپی شعله پلاسما، به‌طور جزیی سبب کاهش اکسیداسیون گردید.

۵- تصاویر استفاده از دوش آرگون، نرخ هیدروژن ۶ لیتر بر دقیقه و فاصله پاشش استاندارد، به عنوان پارامترهای بهینه پاشش پلاسمایی برای لایه‌نشانی پودرهای نانو آگلومره NiCrAlY انتخاب شدند.

مراجع

1. R. B. Heimann, Plasma Spray Coating: Principles and Application, Wiley, 2008.
2. S. Kozerski, L. Latka, L. Pawlowski, F. Cernuschi, Fm Petit , C. Pierlot, H. Podlesak, J. P. Laval, Preliminary Study on Suspension Plasma Sprayed ZrO2 +8wt.% Y2O3 Coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 2011, 31, 2089–2098.
3. C.U. Hardwicke, Y.C. Lau, Advances in Thermal Spray Coatings for Gas Turbines and Energy Generation: A Review, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2013, 22, 564-576.
4. S. Bose, High Temperature Coatings, Butterworth–Heinemann, 2007.
5. L. Wang, Y. Wang, X. G. Sun, J.Q. He, Z.Y. Pan, C.H. Wang, A Novel Structure Design Towards Extremely Low Thermal Conductivity for Thermal Barrier Coatings Experimental and Mathematical Study, *Materials and Design*, 2011, 35, 505–517.
6. W.R. Chen, X. Wu, D. Dudzinski, P. C. Patnaik, Modification of oxide layer in Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200, 5863–5868.
7. L. Wang, Y. Wang, X.G. Sun, J.Q. He, Z.Y. Pan, C.H. Wang, Microstructure and Indentation Mechanical Properties of Plasma Sprayed Nano Bimodal and Conventional ZrO2 8wt%Y2O3 Thermal Barrier Coatings, *Vacuum*, 2011, 1-12.
8. C. Zhou, N. Wang, H. Xu, Comparison of Thermal Cycling Behavior of Plasma Sprayed Nanostructured and Traditional Thermal Barrier Coatings, *Materials Science and Engineering A,* 2007, 452, 569–574.
9. L. Wang, Y. Wang, X.G. Sun, Z.Y. Pan, J.Q Residual Stress of Plasma Sprayed Nanostructured and Conventional ZrO2-8wt%Y2O3 Thermal Barrier Coatings, *SurfaceInterface Anal.*, 2011, 43, 869–880.
10. Y. Xiao-bin, Y. Yue-guang, L. praying Process of Nano Particles Agglomerated YSZ Powder by APS,

Proceedings of Sino-Swedish Structural Materials Symposium, 2007, 152-158.
11. W.B. Gong, C.K. Thermal Insulation Capability of Plasma-Sprayed Nanostructured Ceria Stabilized Zirconia Coatings, *Surface & Coatings Technology*, 2006, 201, 3109–3115.
12. R.S. neered From Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural Thermal Barrier and Biomedical Applications: A Review, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16, 40-63.
13. K. avior of Cryomilled NiCrAlY Bond Coat: Homogeneity and Growth Rate of TGO, *Surface & Coatings Technology*, 2011, 205, 5178–5185.
14. F. Tang, L. Ajdelsztajn, G.E. Kim, V. Provenzano, J.M. Schoenung, Effects of Variations in Coating Materials and Process Conditions on the Thermal Cycle Properties of NiCrAlY/YSZ Thermal Barrier Coatings, *Materials Science and Engineering A*, 2006, 425, 94-106.
15. K. plication of Suspension Plasma Spraying (SPS) for Manufacture of Ceramic Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2008, 17, 115-123.
16. Q. Wei, Z. Yin, H. Li, Oxidation Control in Plasma Spraying NiCrCoAlY Coating, *Applied Surface Science*, 2012, 258, 5094-5099.
17. Q. Yu, A. Rauf, Sprayed Thermal Barrier Coating with Bimodal Structure, *Ceramics International*, 2011, 37, 1093–1099.
18. P. Richer, M. Yandouzi, L. Beauvais, B. Jodoin, Oxidation Behaviour of CoNiCrAlY Bond Coats Produced by Plasma, HVOF and Cold Gas Dynamic Spraying, *Surface & Coatings Technology*, 2010, 204, 3962–3974.
19. S. Saeidi, K.T. Voisey, D.G. McCartney, The Effect of Heat Treatment on the Oxidation Behavior of HVOF and VPS CoNiCrAlY Coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 2009, 18, 209-216.