

ارزیابی میکروساختاری پوشش‌های YSZ پاشش پلاسمایی

سید علی صادقی فدکی*^۱، ضیاء والفی^۲، کریم زنگنه مدار^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد فلزی، تهران، ایران

۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع مواد فلزی، تهران، ایران

*Fadakia@yahoo.com

(تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۲۳، تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۶/۱۰)

چکیده

در این تحقیق، پوشش‌های زیرکونیای پایدار شده با ایتریا توسط روش پاشش پلاسمای اتمسفری بر روی زیرلایه‌ای از جنس فولاد کربنی اعمال گردید. مشخصه‌های میکروساختاری پوشش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رومی و نیز پردازش تصویر به کمک میکروسکوپ نوری تعیین گردید. همچنین ارتباط میان مشخصه‌های کمی میکروساختار پوشش YSZ با پارامترهای پاشش پلاسمایی (فاصله پاشش و نرخ تزریق پودر) مشخص گردید. نتایج حاکی از این است که با تغییر فاصله پاشش و نرخ تزریق پودر، میزان تخلخل، مورفولوژی تخلخل و درصد ذرات پودری ذوب نشده در میکروساختار تغییر می‌یابد. بعلاوه، نتایج نشان داد تاثیر نرخ تزریق پودر بر مشخصه‌های میکروساختاری نسبت به فاصله پاشش بیشتر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی:

میکروساختار، تخلخل، ذرات پودری ذوب نشده، پاشش پلاسمایی، پوشش زیرکونیای.

۱- مقدمه

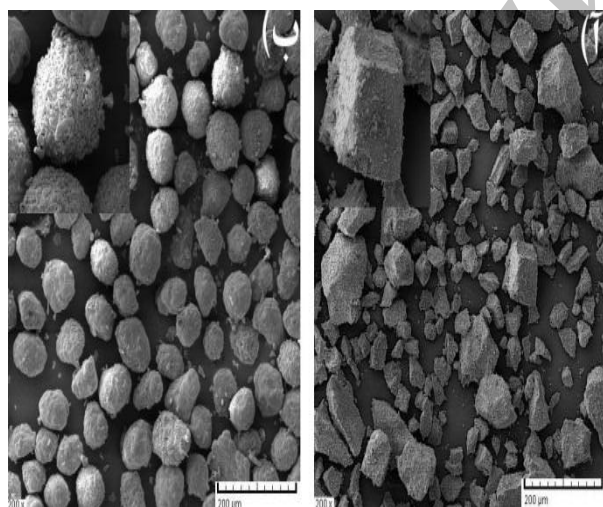
بنابراین به منظور کاهش اثرات ناشی از دمای بالا و محیط، از پوشش‌های سپر حرارتی استفاده می‌شود. سیستم محافظ عایق حرارتی شامل یک لایه میانی مقاوم به اکسیداسیون و یک لایه سرامیکی عایق حرارتی با هدایت حرارتی پایین می‌باشد [۱-۳]. مرسوم‌ترین روش مورد استفاده برای ایجاد پوشش‌های سپر حرارتی، روش پوشش‌دهی پاشش پلاسمایی می‌باشد. به منظور دستیابی به پوشش‌های مهندسی قابل اطمینان با خواص فیزیکی و مکانیکی ویژه، پارامترهای بحرانی کنترل فرایند پاشش پلاسمایی می‌بایستی مشخص گردد. اولین رویکرد جهت شناسایی این

پوشش‌های سپر حرارتی (TBC) که جزء پوشش‌های روکشی محسوب می‌شوند، بطور وسیع برای قطعاتی که در شرایط بحرانی دمای بالا کار می‌کنند، استفاده می‌شود. با توجه به اینکه امروزه در اجزای موتور هواپیما و اجزای توربین‌های گازی صنعتی مثل پره‌های متحرک، محفظه احتراق و نازلها، حرارت ناشی از سوخت به بیش از 1200°C می‌رسد و دمای گاز داغ حدوداً 250°C از نقاط ذوب سوپر آلیاژ بالاتر است، بنابراین تنها راه فعالیت پایدار قطعات، خنک شدن داخلی یا خارجی است که روی هم رفته راندمان کاری موتور را کاهش می‌دهد.

شدند. قبل از پاشش، سطح نمونه‌ها توسط عملیات ساچمه‌زنی با ذرات اکسید آلومینیوم مش ۳۶، تحت فشار ۴ bar و با فاصله ۲۰ cm خشن گردید. جهت پاشش پلاسمایی از دستگاه پلاسمای اسپری اتمسفری A-3000S با تفنگ پلاسمای F4 ساخت شرکت Plasma Technik استفاده شد. پودرها توسط یک سیستم دوتایی تغذیه می‌گردد. در جدول ۲ پارامترهای پاشش پلاسمایی برای پوشش‌های زیرکونیا آورده شده است.

جدول (۱): اندازه ذره و ترکیب شیمیایی پودر اولیه YSZ (Amdry 142)

مش	-۲۰۰	-۱۴۰	+۱۴۰
اندازه (μm)	۳۲۵-	۲۰۰ تا +	۱۰۵
توزیع (%)	۳۲	۳۷/۸	۴/۸
ترکیب (%wt)	7.08% Y2O3, 1.37% HfO2, 0.084% TiO2, 0.066% Al2O3, 0.043% SiO2, 0.043% Fe2O3		



شکل (۱): تصاویر میکروسکوپ الکترونی از: (آ): پودر اولیه YSZ و (ب):

پودر Ni-5wt%Al جهت پوشش میانی

پارامترها این است که چگونگی عملکرد پارامترهای فرایند بر روی خواص پوشش مورد مطالعه قرار گیرد [۴-۷]. راه دوم توسعه سیستم‌های نمایش لحظه‌ای ذره است که دما و سرعت ذرات را در حین پرواز اندازه‌گیری می‌کند [۸-۱۴]. بدلیل کاربرد وسیع پوشش‌های زیرکونیای پایدار شده در صنعت هوافضا، بیشتر مطالعات بر روی آن انجام گرفته است. ترکیب فازی پوشش‌های زیرکونیا تحت تاثیر پارامترهای پاشش قرار دارد و ساختار فازی، بر روی خواص حرارتی و تنش‌های پوشش تاثیرگذار می‌باشد [۱۵-۱۷]. همچنین نشان داده شده است که حضور ترک‌ها در پوشش‌ها تاثیر قابل توجهی بر توزیع تنش‌های پسماند دارد [۱۸-۱۹]. به نوبه خود ترک‌ها نیز به عنوان تابعی از دمای پوشش [۲۰] مورد مطالعه قرار گرفته است و تاثیر ترک‌ها بر روی نفوذ پذیری گرمایی مطالعه شده است [۲۱].

در این مطالعه دو هدف دنبال گردید. اول اینکه مشخصه‌های عمومی میکروساختار پوشش‌های زیرکونیای پاشش پلاسمایی مورد بررسی قرار گرفت و دوم آنکه تاثیر پارامترهای پاشش پلاسمایی بر میکروساختار این پوشش‌ها (به ویژه میزان تخلخل و ترک‌ها، اندازه حفرات و ذرات پودری ذوب نشده) مورد مطالعه قرار گرفت.

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- آماده سازی پوشش‌های پاشش پلاسمایی

نمونه‌های آزمون، قطعات استوانه‌ای شکل به قطر ۲۵ mm و ارتفاع ۵۰ mm از جنس فولاد ساده کربنی در نظر گرفته شد. برای پوشش میانی از پودر Metco 450 NS و برای پوشش زیرکونیا از پودر Amdry 142 استفاده گردید. در شکل ۱ مورفولوژی این پودرها نشان داده شده است و در جدول ۱ آنالیز شیمیایی و اندازه ذره پودر YSZ آورده شده است. نمونه‌ها جهت پوشش دهی بر روی نگهدارنده‌ای قرار داده شده و محکم

جدول (۲): شرایط پاشش پلاسمای برای پوشش‌های YSZ

پارامترها	D9/F34	D12/F34	D15/F34	D12/F30	D12/F39
جریان (A)	600	600	600	600	600
ولتاژ (V)	60	60	60	60	60
جریان گاز آرگون (l/min)	35	35	35	35	35
جریان گاز هلیوم (l/min)	12	12	12	12	12
نرخ تزریق (g/min)	34	34	34	30	39
فاصله پاشش (cm)	9	12	15	12	12
جریان گاز حامل (l/min)	2/6	2/6	2/6	2/6	2/6
سرعت مشعل (cm/s)	3	3	3	3	3
سرعت زیرلایه (rpm)	100	100	100	100	100

۲-۲- مطالعات میکروساختاری

بعد از سرد شدن نمونه‌ها تا دمای اتاق، نمونه‌ها به صورت عرضی برش خورده و مانت شدند. در این مرحله از فرایند آماده‌سازی متالوگرافی، عملیات سنگ زنی، سنباده زنی و پولیش مکانیکی ضرورت می‌یابد. زائده‌های ایجاد شده در خلال عملیات برشکاری، توسط سنگ زنی حذف شد و از کاغذ سنباده‌های شماره ۶۰، ۲۰۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۲۰۰ به ترتیب برای صیقل کاری سطح پوشش استفاده گردید و در نهایت پولیش مکانیکی با محلول آلومینای سه میکرونی انجام گرفت. اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌های زیرکونیا و پوشش میانی، اندازه و کسر تخلخل‌های موجود در میکروساختار، بررسی نوع تخلخل، شکل و میزان کروی بودن تخلخل‌ها به کمک میکروسکوپ نوری unimet مدل 8799 union و میکروسکوپ الکترونی روبشی از نوع Tescon مدل VEGA-II Xmu میسر گردید. اندازه‌گیری درصد تخلخل، شکل تخلخل، اندازه‌گیری ضخامت پوشش‌های زیرکونیا با بکارگیری نرم افزار آنالیز تصویر انجام گرفت.

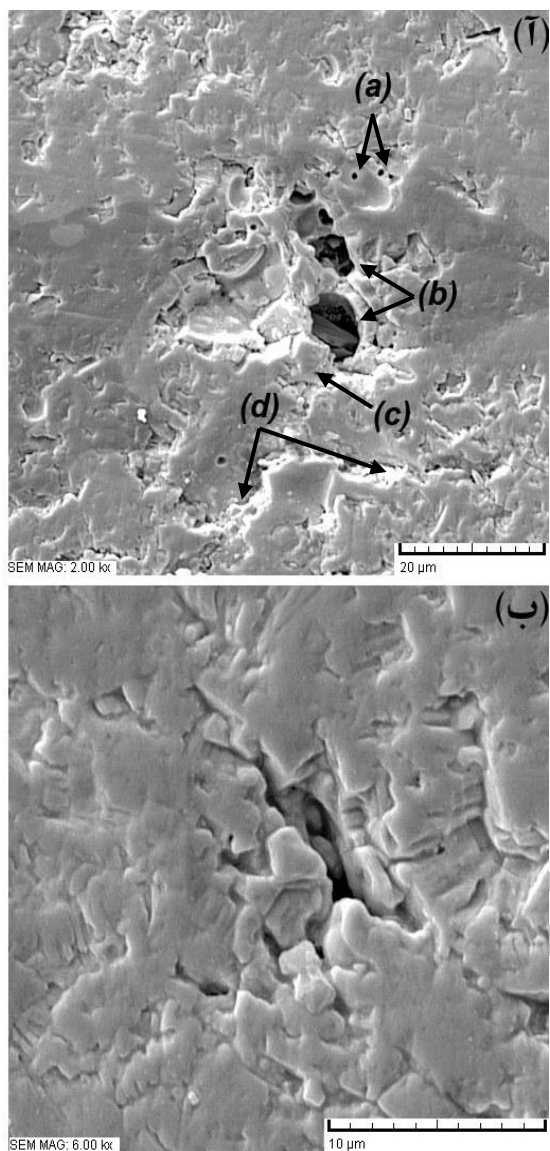
۳- نتایج و بحث

۳-۱- بررسی میکروساختاری پوشش‌های زیرکونیا

۳-۱-۱- تخلخل و ذرات پودری ذوب نشده

میکروساختار پوشش‌های زیرکونیا دارای سه عیب اصلی می‌باشد که عبارتند از: ترک‌های بین لایه‌ای، تخلخل‌های بین لایه‌ای و تخلخل‌های کروی. تخلخل شدیداً خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش حرارتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بطوریکه با افزایش تخلخل، خواص کاهش پیدا می‌کند [۲۲-۲۴]. در شکل ۲ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از عیوب میکروساختاری پوشش‌های YSZ پاشش پلاسمایی نشان داده شده است. حفرات موجود در پوشش‌ها که غالباً دارای توزیع حفره با اندازه ۱۰ تا ۳۰ میکرومتر می‌باشند، ماکروتخلخل نامیده می‌شود و حفرات در حدود ۰/۱ میکرومتر، میکروتخلخل نامیده می‌شود [۲۵].

ماکروتخلخل به حفرات میان لایه‌ای نسبت داده می‌شود و زمانی که قطرات با ویسکوزیته بالا نمی‌توانند نامنظمی‌های سطحی را پر کنند، ایجاد می‌گردد. در مقابل، میکروتخلخل در اثر خیس شونده‌گی ناقص سطح پوشش موجود توسط قطرات تازه پخش شده، ایجاد می‌گردد. میزان خیس شونده‌گی به



شکل (۲): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش‌های YSZ پوشش پلاسمایی: (a): میکروتخلخل‌ها، b: ماکروتخلخل، c: ذرات ذوب نشده/ ذوب ناقص، d: مرز بین اسپلت‌ها، (ب): عیوب بین اسپلت‌ها در بزرگنمایی بالا

۳-۱-۲- میکروتُرک‌ها

به طور کلی لایه میان پوشش‌های سرامیکی اسپری حرارتی ترک‌دار می‌باشد. فرایند تشکیل ترک سریعاً بعد از برخورد قطرات مذاب با سطح شروع می‌شود. به محض اینکه ماده درون قطره به طرف خارج جریان می‌یابد، بین سطح و قطره پیوندهایی برقرار می‌شود. قطره سپس منجمد می‌گردد و انقباض می‌یابد و

پارامترهای رسوب‌دهی و ترمودینامک برخورد وابسته بوده و کنترل آن توسط شرایط پاشش به تنهایی مشکل است. توزیع حفرات و تخلخل‌ها نیز حائز اهمیت می‌باشد.

جهت، اندازه و تعداد میکروتخلخل‌ها، از مهمترین فاکتورهایی هستند که خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش حرارتی را تحت تاثیر قرار می‌دهند. در یک حجم $۱\text{ cm} \times ۱\text{ cm} \times ۵۰۰\text{ }\mu\text{m}$ از پوشش و با فرض اینکه بعضی قسمت‌های هر لایه از لایه مجاورش جدا باشد، تقریباً ۱۰۷-۱۰۵ لایه و میکروتخلخل وجود دارد. بعلاوه نوک این میکروتخلخل‌ها تیز می‌باشد و به طور واضح تمرکز تنش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد.

در مرز بین لایه‌ها، نسبت تخلخل‌ها بیشتر است و این تخلخل‌ها در جهت پاشش جهت‌گیری کرده‌اند. تخلخل‌های کروی شکل، درون لایه‌های منفرد قرار گرفته‌اند. این تخلخل‌های کروی و بین لایه‌ای از محبوس شدن گاز در خلال فرایند پاشش پلاسمایی ناشی می‌شود. تخلخل بین لایه‌ای، ناشی از حبس گاز در بین لایه‌ها می‌باشد و در تخلخل‌های کروی، ناشی از حبس گاز در ذره ذوب شده می‌باشد. تخلخل نیز می‌تواند در اثر برخورد نامناسب قطرات مذاب در هنگام پاشش ایجاد گردد.

در اغلب فرایندهای پاشش در هنگام برخورد ماده پوشش با زیر لایه، حداقل مقداری از آن به صورت کامل ذوب نمی‌شود. این ذرات یا ذوب نشده‌اند و یا ذوب شده‌اند و قبل از برخورد با زیرلایه سرد شده‌اند. بعضی از این ذرات ذوب نشده بدلیل ویسکوزیته بالا پخش نمی‌شوند و سطح تماس بسیار ناچیزی با مواد نزدیک خود دارند که افزایش تخلخل را به همراه دارند. برای رسیدن به میکروساختاری یکنواخت، کاهش ذرات پودری ذوب نشده در میکروساختار اهمیت زیادی دارد.

ترک‌ها می‌گردد، هر چند عملکرد پوشش به شدت کاهش نمی‌یابد [۲۷-۲۹].

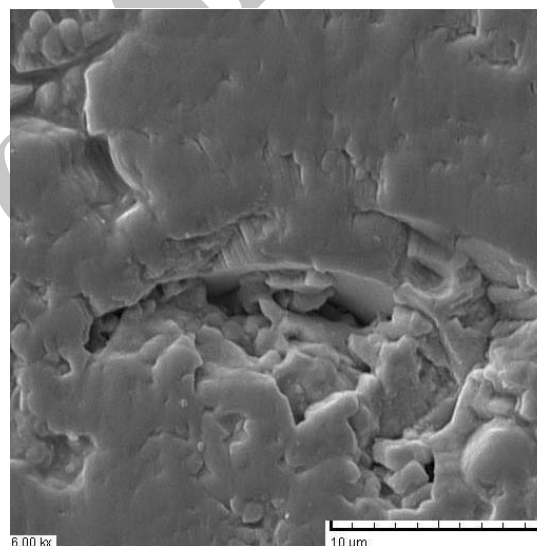
از دیگر معایب این پوشش‌ها، ترک‌دار شدن پوشش به صورت موازی با زیرلایه می‌باشد (شکل ۴-ب). میکروترک‌دار شدن موازی با زیرلایه و در سطح پوشش به شدت عمر پوشش را کاهش می‌دهد. چون این میکروترک‌ها در حین بارگذاری پیشرفت می‌کنند و باعث ایجاد ورقه‌ای شدن می‌گردند. این میکروترک‌ها باعث در معرض قرار داده شدن مستقیم زیرلایه و یا کاهش ضخامت پوشش می‌گردند. یک میکروترک موازی از تنش‌های برشی ایجاد شده در فصل مشترک میان لایه تازه فشرده شده و سطح از قبل رسوب داده شده، حاصل می‌گردد. این تنش برشی در لبه‌های آزاد، مانند محیط یک لایه مجزا و محل‌های تمرکز دهنده تنش (مانند ذرات ذوب نشده، میکروتخلخل‌ها و اکسیدهای موجود در بین لایه‌ها) بیشترین مقدار را دارد [۲۷-۲۹].

خواص ذاتی لایه‌های مجزا و روابط پیچیده میان آنها تحت تأثیر خواص ذرات در حین پاشش (مانند دمای آنها، سرعت، اندازه، درجه ذوب و میزان برهم‌کنش ذره-ذره) و همچنین خواص زیرلایه (مثل درجه خیس شونده‌گی، مقاومت تماسی گرمایی، پروفیل زبری، برهم‌کنش‌های شیمیایی و محدوده اصلاح شده توسط لایه‌های از قبل رسوب داده شده) قرار دارد.

۳-۱-۴- ساختار فازی

اختلاف دمای میان قطرات برخورد کننده و زیرلایه، کوانچ شدید گرمایی لایه را به همراه دارد که نرخ سرماییش آن تا 10^7 Ks^{-1} می‌رسد [۳۰]. آگاهی از فازهای غیرتعادلی و خواص آنها برای پیش بینی خواص پوشش مورد نیاز می‌باشد. ساختار فازی بر خلاف عیوب میکروساختاری، مانند میکروترک‌ها و میکروتخلخل‌ها، که تعیین کننده خواص مکانیکی پوشش‌های پاشش پلاسمایی‌اند، فقط فاکتور ثانویه می‌باشد. فازهای تعادلی متداول برای پوشش‌های YSZ، مونوکلینیک (m) با مقادیر کم ایتریا، مکعبی (c) با مقادیر بالای ایتریا می‌باشد. با این حال،

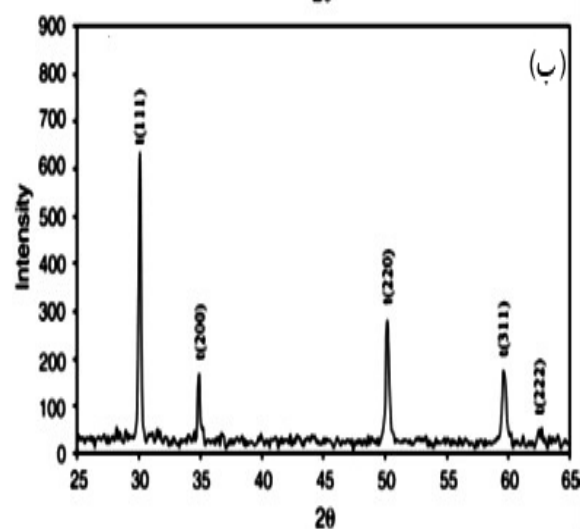
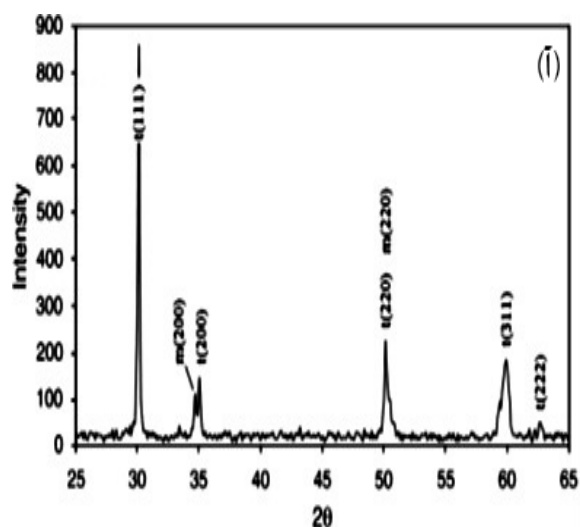
حال آنکه در زمان مشابه، سطحی که قطرات با آن برخورد کرده است، بدون تغییر باقی می‌ماند. هر چند که اثر عمل ترکیبی ماده پوشش ورودی داغ و مسیر پیوسته پاشش حرارتی باعث بالا رفتن دمای زیرلایه تا حدود ۶۰۰ درجه سانتیگراد می‌شود، اما انقباض لایه نسبت به زیرلایه به طور کلی بسیار متفاوت می‌باشد که این امر تنش‌های پسماند درون لایه‌ای را به همراه دارد. هنگامی که این تنش‌ها از میزان کرنش شکست ماده پوشش بیشتر شود، با ایجاد و تولید ترک‌ها در سطح مقطع لایه‌های پوشش، این تنش‌ها آزاد می‌گردد [۲۶]. در شکل ۳ نواقص بین لایه‌ای در بزرگنمایی بالا نشان داده شده است.



شکل (۳): نواقص درون لایه‌ای موجود در پوشش زیرکونیا D9/F34

۳-۱-۳- ترک‌های موازی و عمود بر زیرلایه

از دیگر عیوب پوشش‌های پاشش حرارتی زیرکونیا، ترک‌دار شدن در پوشش و عمود بر زیرلایه می‌باشد (شکل ۴-آ). مکانیزم تشکیل ترک از میان ضخامت پوشش، مشابه با ترک‌های ایجاد شده از میان یک لایه منفرد می‌باشد، اما در واحد پوشش رخ می‌دهد. اگر انقباض پوشش از میزان انقباض زیرلایه بیشتر گردد، ترک‌ها می‌توانند در جهت ضخامت پوشش پیشرفت کنند. از ویژگی‌های این ترک‌ها، بخش‌بخش بودن آنهاست که باعث در معرض دید قرار گرفتن زیرلایه در ریشه این



شکل (۵): طرح XRD از: (ت): پودر اولیه YSZ، (ب): پوشش YSZ پاشش

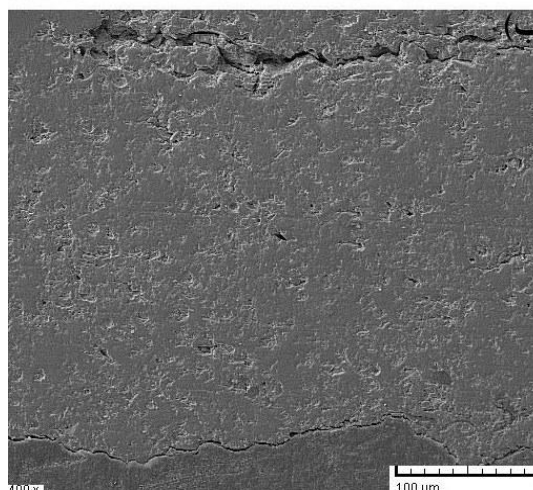
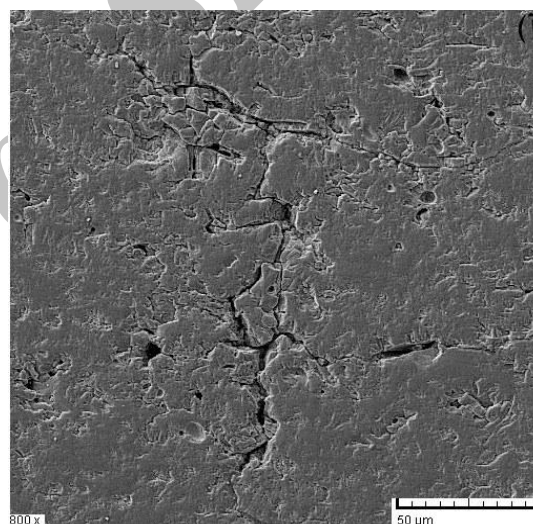
پلاسمایی

۳-۲- تاثیر پارامترهای پاشش بر میکروساختار پوشش

با تغییر نرخ تزریق پودر یا فاصله پاشش، تغییرات شدیدی در میکروساختار و خواص فیزیکی پوشش‌های پاشش پلاسمایی زیرکونیا مشاهده گردید که آن را می‌توان با تغییرات حاصل در تخلخل، ذرات پودری ذوب نشده و شکل حفرات بین‌لایه‌ای توضیح داد. در جدول ۳ نتایج حاصل از آنالیز تصویر و در شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش‌های زیرکونیا با نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش مختلف آورده شده است.

فاصله پاشش بطور واضح میکروساختار پوشش‌های زیرکونیا را تحت تاثیر قرار می‌دهد. میکروساختار پوشش‌های سرامیکی

سرمایش سریع ماده پوشش در خلال فرایند پاشش پلاسمایی منجر به ایجاد فاز غیر تعادلی تتراگونال (t) می‌گردد [۳۱-۳۲]. نتایج XRD این تحقیق حاکی از این است که پودر اولیه شامل هردو فاز تتراگونال و مکعبی زیرکونیا است، حال آنکه در پوشش‌های پاشش پلاسمایی تنها فاز تتراگونال زیرکونیا قابل مشاهده است (شکل ۵). پیک $t\text{-ZrO}_2$ منطبق بر صفحات (۱۱۱)، (۲۰۰)، (۲۲۰)، (۳۱۱) و (۲۲۲) بعلاوه پیک $m\text{-ZrO}_2$ که بر صفحات (۲۰۰) و (۲۲۰) منطبق است به روشنی شناسایی می‌گردد [۳۳]. طرح XRD پوشش‌های YSZ (شکل ۵-ب) با یافته‌های دیگر محققان همخوانی دارد [۳۴-۳۵].



شکل (۴): ترک‌دار شدن در پوشش زیرکونیا: (ت): عمود بر زیرلایه

(ب): موازی با زیرلایه (D9/F34)، (D15/F34)

پاشش، سرعت برخورد ذرات با زیرلایه افزایش می‌یابد و ویسکوزیته کاهش پیدا می‌کند. این افزایش سرعت بالا می‌تواند منجر به ایجاد تنش‌های پسماند در پوشش گردد. نتایج پردازش تصویر حاکی از این است که در فاصله پاشش کم (D9/F34) متوسط درصد تخلخل بیشترین مقدار است و اندازه متوسط حفره و میزان متوسط کرویت حفرات در میکروساختار این پوشش بیشترین مقدار است (فاکتور شکل حفره بیانگر میزان کرویت حفرات می‌باشد، هر چه فاکتور شکل حفره به یک نزدیکتر باشد، حفرات از کرویت بالاتری برخوردار می‌باشند). برای پوشش با فاصله پاشش ۱۲۰ میلی‌متر، D12/F34، درصد تخلخل در پوشش و فاکتور شکل حفره کمترین مقدار می‌باشد. سرعت تزریق پودر نیز یکی از پارامترهای مهم فرایند پاشش پلاسمایی می‌باشد. هنگامی که نرخ تزریق پودر پایین است (D12/F30)، تخلخل بالا و میزان ذرات ذوب نشده در پوشش کم و اندازه حفرات نسبتاً بزرگ است. در این حالت، میزان ذرات ذوب شده برای پر کردن نامنظمی‌های سطحی ناکافیست که منجر به ایجاد حفرات در میان لایه‌ها می‌گردد. در نمونه D12/F39 که نرخ تزریق پودر بالا می‌باشد، میزان تخلخل نمونه بسیار کمتر از نمونه D12/F30 است. با افزایش نرخ تزریق پودر نیز میزان ذرات ذوب نشده افزایش یافته و منجر به ایجاد ذرات مذاب با ویسکوزیته بالا می‌گردد که این قطرات با ویسکوزیته بالا قدرت پهن‌شوندگی کمی دارند و نمی‌توانند نامنظمی‌های سطحی را پر کنند. میزان ذرات پودری ذوب نشده در این پوشش بیشترین مقدار می‌باشد که این ذرات ذوب نشده بر روی چسبندگی پوشش تأثیر به‌سزایی دارد. با افزایش نرخ تزریق پودر، تلفات پودر نیز افزایش می‌یابد.

پلاسماسپری شامل مناطقی از تماس کامل می‌باشد که توسط مناطق نازک بدون تماس از یکدیگر جدا می‌شود. مناطق با تماس ناقص در خلال تشکیل پوشش و از حبس گاز در زیر قطرات مذاب انتشار یافته ایجاد می‌شود. این مناطق با تماس کم، تخلخل‌های بسیار باریک می‌باشد (تقریباً ۰/۱-۰/۰۱ میکرومتر) [۳۶].

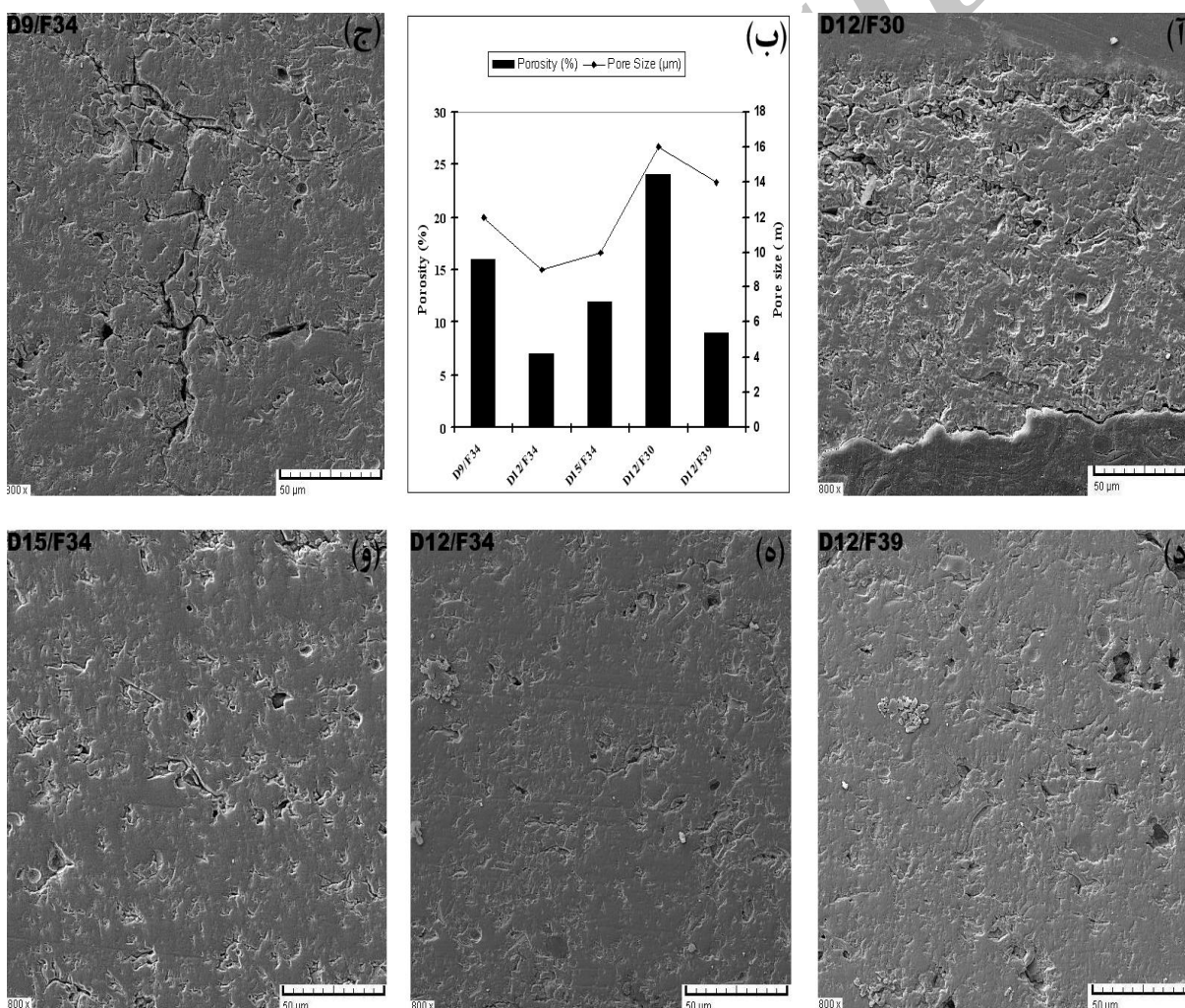
تأثیر فاکتورهای میکروساختاری بر روی خواص مکانیکی پوشش باعث می‌شود که رفتار مکانیکی یک پوشش توسط درجه تماس میان لایه‌های درون پوشش یا میان لایه و زیرلایه، محدود گردد. سرعت و دمای ذرات وابسته به فاصله پاشش می‌باشد. این وابستگی می‌تواند به رفتار پهن‌شوندگی ذره مربوط شود. برای فواصل پاشش کم، مقدار زیادی میکروترک در نمونه مشاهده می‌گردد. برعکس، میکروساختار زیرکونیای پوشش داده شده در فاصله پاشش بالاتر، دارای میکروترک‌های کمتری می‌باشد و تعدادی حفره بزرگ در آن مشاهده می‌شود. سرعت پودر مذاب هنگام برخورد با زیرلایه ارتباط نزدیکی با فاصله پاشش دارد.

با افزایش بیش از حد فاصله پاشش، D15/F34، دمای ذرات و سرعت ذرات در حین برخورد با سطح کاهش یافته که از پهن‌شوندگی قطرات مذاب ممانعت بعمل می‌آید. این تغییرات در اثر تأثیر متقابل سرمایش محیط و فاصله زیاد پرواز می‌باشد که افزایش تخلخل و تعداد ذرات پودری ذوب نشده در پوشش را به همراه دارد [۳۷]. این ذرات یا ذوب نشده‌اند و یا ذوب شده‌اند و قبل از برخورد با زیرلایه سرد شده‌اند. بعضی از این ذرات ذوب نشده بدلیل ویسکوزیته بالا پخش نمی‌شوند و سطح تماس بسیار ناچیزی با مواد نزدیک خود دارند که افزایش تخلخل را به همراه دارند. همچنین دمای ذرات در حین برخورد کاهش پیدا می‌کند که باعث کاهش درجه پهن‌شوندگی می‌گردد. این کاهش درجه پهن‌شوندگی باعث افزایش زبری سطح پوشش می‌گردد.

در نمونه D9/F34 که فاصله پاشش کم است، ۹۰ میلی‌متر، تخلخل بالا و تعداد میکروترک‌ها زیاد می‌باشد. با کاهش فاصله

جدول (۳): نتایج حاصل از آنالیز تصویر برای پوشش‌های YSZ پاشش پلاسمایی

کد نمونه	اندازه حفره μm	فاکتور شکل حفره	درصد	
			تخلخل %	ذرات ذوب نشده %
	متوسط	متوسط	متوسط	متوسط
D9/F34	۱۱/۶	۰/۴۹	۱۶	۷
D12/F34	۹/۶	۰/۴۳	۷	۱۰
D15/F34	۱۰/۲	۰/۴۴	۱۲	۱۳
D12/F30	۱۵/۷	۰/۲۳	۲۴	۵
D12/F39	۱۴/۴	۰/۳۴	۹	۱۶



شکل (۶): (ا)، (ب)، (ج) و (د): تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی پوشش‌های YSZ، (ب): مقدار متوسط تخلخل و اندازه حفره

D12/F34 (که تحت نرخ تزریق پودر و فاصله پاشش بهینه ایجاد

با توجه به مباحث مطرح شده می توان نتیجه گرفت که پوشش

- [3] J. F. Li & H. Liao, "Plasma spraying of nanostructured partiallyyttristabilized zirconia powders", *Thin Solid Films*, Vol. 460, pp. 101–115, 2004.
- [4] M. Vardelle, A. Vardelle & P. Fauchais, "Spray parameters and particle behavior relationships during plasma spraying" *Thermal Spray Technology*, Vol. 2, pp. 79-91, 1993.
- [5] T. C. Nerz, J. E. Nerz, B. A. Kushner, A. J. Rotolico & W. L. Riggs: in *Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology*, C. C. Berndt, ed, ASM International, Materials Park, OH, pp. 405-14, 1992.
- [6] T. J. Steeper, D.J. Varacalle, G.C. Wilson & W.L. Riggs, "A design of experiment study of plasma-sprayed alumina-titania coatings" *Thermal Spray Technology*, Vol. 2, pp. 251-256, 1993.
- [7] M. Dorfman & J. DeBarro: in *Thermal Spray: International Advances in Coatings Technology*, C. C. Berndt, ed., ASM International, Materials Park, OH, pp. 439-46, 1992.
- [8] C. Moreau, P. Gougeon, M. Lamontagne, V. Lacasse & P. Cielo: in *Thermal Spray Industrial Applications*, C. C. Berndt and S. Sampath, eds., ASM International, Materials Park, OH, pp. 431-37, 1994.
- [9] M. Friis, C. Persson & J. Wigren, "Influence of particle in-flight characteristics on the microstructure of atmospheric plasma sprayed yttria stabilized ZrO₂", *Surf. Coat. Technol*, Vol. 141, pp. 115-127, 2001.
- [10] W.D. Swank, J.R. Fincke & D.C. Haggard: in *Thermal Spray Science and Technology*, C.C. Berndt and S. Sampath, eds, ASM International, Materials Park, OH, pp. 111-16, 1995.
- [11] R. A. Neiser & T. J. Roemer: in *Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems*, C.C. Berndt, ed, ASM International, Materials Park, OH, pp. 285-93, 1996.
- [12] R. N. Wright, J. R. Fincke, W. D. Swank, &

گردیده است) بدلیل میکروساختار متراکم‌تر و درصد ذرات ذوب نشده کمتر و لذا چسبندگی بهتر، بهترین پوشش می‌باشد. در این پوشش، حفرات کوچک کروی به طور غیر یکنواخت در میکروساختار توزیع شده است و تعداد حفرات بزرگ در آن کم است. هر چند که درصد ذرات پودری ذوب نشده در پوشش D12/F30 نسبت به پوشش D12/F34 کمتر می‌باشد، اما تأثیر تخلخل و میکروتورک‌ها بیش از تأثیر ذرات ذوب نشده برای این دو پوشش است.

۴- نتیجه‌گیری

ترک‌های بین لایه‌ای، تخلخل‌های بین لایه‌ای و تخلخل‌های کروی از مهمترین عیوب میکروساختاری پوشش‌های پاشش پلاسمایی‌اند. با تغییر فاصله پاشش و نرخ تزریق پودر، دما و سرعت ذرات تغییر می‌یابد که نتایج زیر را به همراه دارد:

۱- در نرخ تزریق پودر پایین، D12/F30، تخلخل بالا و میزان ذرات ذوب نشده در پوشش کم و اندازه حفرات نسبتاً بزرگ است. در نرخ تزریق پودر بالا، D12/F39، میزان ذرات ذوب نشده افزایش یافته و به حدود ۹ درصد می‌رسد. با افزایش نرخ تزریق پودر، تلفات پودر نیز افزایش می‌یابد.

۲- در فاصله پاشش بالا، D15/F34، تخلخل و تعداد ذرات پودری ذوب نشده در پوشش افزایش می‌یابد. در فاصله پاشش کم، D9/F34، متوسط درصد تخلخل بالا و اندازه متوسط حفره و میزان متوسط کروییت حفرات در میکروساختار این پوشش بیشترین مقدار است.

۳- تأثیر نرخ تزریق پودر بر میکروساختار بیش از فاصله پاشش می‌باشد.

۵- مراجع

- [1] R. A. Miller, "Current Status of Thermal Barrier Coatings – An Overview" *Surf.Coat. Tech*, Vol. 30, pp. 1 11, 1987.
- [2] D. Ruddell & R. Stoner, "The effect of deposition parameters on the properties of yttria-stabilized zirconia thin films", *Thin Solid Films*, Vol. 445, pp. 14–19, 2003.

- [22] C. J. Li, Y. He & Ohmori, "A. Characterization of the microstructure of thermally sprayed coating", Proceedings of 15th ITSC. Nice, pp. 717-722, 1998.
- [23] S. Kuroda, "Properties and characterization of thermal sprayed coatings-a review of recent research process", Proceedings of 15th ITSC. Nice, pp. 539-550, 1998.
- [24] R. Morrell, Handbook of Properties of Technical and Engineering Ceramics, Part 1, Her Majesty's Stationery Office, London, pp. 151-158, 1989.
- [25] R.W. Trice & K.T. Faber, "Role of lamellae morphology on the microstructure and mechanical properties of plasma sprayed alumina", Am. Ceram. Soc, Vol. 83, pp. 889-894, 2000.
- [26] T. W. Clyne & S. C. Gill, "Residual Stresses in Thermal Spray Coatings and Their Effect on Interfacial Adhesion: A Review of Recent Work" Thermal Spray Technology, Vol. 5, pp. 401-418, 1996.
- [27] R. Vaßen, F. Traeger & D. St. over, "Correlation between spraying conditions and microcrack density and their influence on thermal cycling life of thermal barrier coatings", Journal of Thermal Spray Technology, Vol. 13, pp. 396-404, 2004.
- [28] D. J. Greving, E. F. Rybicki & J. R. Shadley, "Through-Thickness Residual Stress Evaluations for Several Industrial Thermal Spray Coatings Using a Modified Layer-Removal Method", Thermal Spray Technol, Vol. 3, pp. 379-388, 1994.
- [29] T. J. Steeper, D.J. Varacalle, G.C. Wilson & W.L. Riggs, "Atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings with high segmentation crack densities: Spraying process, microstructure and thermal cycling behavior" Surface & Coating Technology, Vol. 206, pp. 16-23, 2011.
- [30] R. McPherson, "The effects of heat treatment on the phase transformation behavior of plasma-sprayed stabilized ZrO₂ coatings", Thin Solid Films, Vol. 39, pp. 173-181, 1989.
- [31] J. Moon, H. Choi, H. Junkim & C. Lee, "The D. C. Haggard: in Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C. Berndt, ed., ASM International, Materials Park, OH, pp. 511-16, 1996.
- [13] A. C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle, P. Fauchais, S. Sampath, C. C. Berndt & H. Herman: in Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C. Berndt, ed, ASM International, Materials Park, OH, pp. 623-28, 1996.
- [14] S. Sampath, J. Matejicek, C. C. Berndt, H. Herman, A. C. Leger, M. Vardelle, A. Vardelle & P. Fauchais: in Thermal Spray: Practical Solutions for Engineering Problems, C.C. Berndt, ed, ASM International, Materials Park, OH, pp. 629-36, 1996.
- [15] P. Gougeon & C. Moreau, "Simultaneous independent measurement of splat diameter and cooling time during impact on a substrate of plasma-sprayed molybdenum particles", Thermal Spray Technology, Vol. 10, pp. 76-82, 2001.
- [16] T. A. Taylor, "Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines", Surf.Coat. Tech, Vol. 54, pp. 53-57, 1992.
- [17] R. McPherson, "Adhesion Measurement of Films and Coatings", Surf.Coat. Tech, Vol. 39, pp. 173-81, 1989.
- [18] H. J. Gross, W. Mallener, D. Strover & R. Vassen: in Thermal Spray Coatings: Research, Design and Applications, C.C. Berndt and T.F. Bernecki, eds, ASM International, Materials Park, OH, pp. 581-85, 1993.
- [19] D. J. Greving, E. F. Rybicki & J.R. Shadley: in Thermal Spray Industrial Applications, C.C. Berndt and S. Sampath, eds., ASM International, Materials Park, OH, pp. 647-53, 1994.
- [20] P. Bengtsson, T. Johannesson, "Characterization of microstructural defects in plasma-sprayed thermal barrier coatings", Therm. Spray Technol, Vol. 4, pp. 245-25, 1995.
- [21] J. R. Fincke, D. C. Haggard & W. D. Swank, "Particle temperature measurement in the thermal spray process", Thermal Spray Technology, Vol. 10, pp. 255-266, 2001.

- effects of heat treatment on the phase transformation behavior of plasma-sprayed stabilized ZrO₂ coatings”, Surf. Coat. Technol, Vol. 155, pp. 1-10, 2002.
- [32] J. Ilavsky & J. K. Stalick, “Phase composition and its changes during annealing of plasma-sprayed YSZ”, Surf. Coat. Technol, Vol. 127, pp. 120-129, 2000.
- [33] JCPDS Data Cards, International Center of Diffraction Data, Swarthmore, PA, 1999.
- [34] Afrasiabi, M. Saremi & A. Kobayashi, “Comparative Study on Hot Corrosion Resistance of Three Types of Thermal Barrier Coatings”, Mater. Sci. Eng, Vol. 478. pp. 264-269, 2008.
- [35] H. Chen, Y. Zhang & Ch. Ding, “Tribological properties of nanostructured zirconia coatings deposited by plasma spraying”, Wear, Vol. 253, pp. 885-893, 2002.
- [36] M. Pasandideh-Fard & V. Pershin, “Splat Shapes in a Thermal Spray Coating Process: Simulations and Experiments”, Thermal Spray Technology, Vol.11, pp. 206-217, 2001.
- [37] M. Prystay & P. Gougeon, “Structure of Plasma-Sprayed Zirconia Coatings Tailored by Controlling the Temperature and Velocity of the Sprayed Particles”, Thermal Spray Technology, Vol. 10, pp. 67-75, 2001.

۶- پی نوشت

- [1] Thermal barrier coating