

# بررسی خواص حرارتی و مکانیکی پوشش‌های سرامیکی ایجاد شده روی ابرآلیاژ پایه نیکل با روش افشانه پلاسما

پرویز نورپور<sup>۱</sup>، سید محمد واعظی<sup>۲</sup>

## چکیده

در این تحقیق خواص پوشش‌های سرامیکی<sup>۱</sup> متشکل از پوشش میانی<sup>۲</sup> و پوشش رویی از جنس پوشش‌های سرامیکی<sup>۳</sup> بر روی زیرلایه‌ای از جنس ابرآلیاژ IN713 بررسی گردید. از آزمون‌های شوک حرارتی، پایداری حرارتی پوشش در دمای ثابت، چسبندگی و اندازه‌گیری میکروسختی به منظور بررسی پوشش ایجاد شده، استفاده شد و میکروساختار توسط میکروسکوپ نوری بررسی گردید. مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهد بعد از آزمایش شوک حرارتی و آزمایش پایداری هم‌دمای ناحیه جدید نفوذی در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد در فصل مشترک بین پوشش میانی و زیرلایه ایجاد شده است. همچنین لایه‌های باریک مربوط به اکسیدهای فلزی شامل  $Cr_2O_3$  و  $Al_2O_3$  در لایه میانی ایجاد شد. مکانیزم تشکیل این لایه‌ها، فعال شونده با دما هستند. با بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از آزمایش شوک حرارتی و آزمایش پایداری هم‌دمای مشاهده شد که فصل مشترک زیرلایه و پوشش میانی و فصل مشترک لایه میانی و پوشش رویی عاری از هرگونه ترک و گسستگی است. این مشاهدات بیان می‌کنند که پوشش تحت سیکل‌های حرارتی (شوک حرارتی) و شرایط هم‌دمای مقاومت خوبی برخوردار بوده و عوامل ایجاد کننده تخریب که شامل ترک و گسستگی فصل مشترک است مشاهده نگردید.

**واژه‌های کلیدی:** پوشش‌های سرامیکی-افشانه پلاسما-استحکام چسبندگی- شوک حرارتی

## مقدمه

افزایش عمر، بالا بردن اطمینان‌پذیری، ملاحظات اقتصادی و غیره همواره از عوامل ترغیب کننده برای ساخت موتورهای توربینی با کارایی بالاتر بوده است. روش‌های مختلفی برای رسیدن به این هدف وجود دارد. افزایش دمای ورودی توربین باعث افزایش راندمان موتور در سیکل برایتون می‌شود. این امر از ابتدا مورد توجه طراحان بوده و طی سال‌های متمادی از شکل‌گیری تا توسعه موتورهای توربینی نرخ فزاینده‌ای داشته تا جائیکه در دهه‌های اخیر این دما از دمای ذوب مواد توربین هم فراتر رفته است. چالشی که همواره پیش روی طراحان و سازندگان موتورهای توربینی بوده استفاده از مواد پوشش‌ها و سامانه‌های خنک‌کاری مناسب برای تحمل دماهای بالاتر بوده است. توجه به این نکته ضروری است که مواد به کار گرفته شده باید از مقاومت در برابر تغییر شکل ناشی از حرارت، اکسیداسیون و خوردگی در دمای بالا، فرسایش، سایش و موارد دیگر برخوردار باشند. اما کاربرد این مواد به تنهایی چاره ساز نیست و برای برآورده کردن نیازهای فوق نیازمند

استفاده از پوشش‌های محافظ در این مواد [۱]. از سال ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۵ با توسعه تک‌کریستال‌های پایه نیکل، به دلیل افزایش مقاومت به خزش و استحکام خستگی، حد تحمل دما بالا در پره‌ها حدود ۸۰ درجه سلسیوس افزایش یافت [۲ و ۳]. اما پس از آن تغییر آلیاژ، دیگر تاثیری در افزایش حداکثر دمای قابل تحمل نداشت. با معرفی پوشش‌های سد حرارتی در سال ۱۹۸۰ روی پره توربین موتور جت‌های غول‌آسا، توانایی تحمل دمای سامانه، حدود ۲۰۰ درجه سانتیگراد افزایش یافت. اثر مستقیم کاهش دمای سطح زیرلایه توسط پوشش‌های سد حرارتی، کاهش اکسیداسیون است. برای قطعات چرخان، خسارت ناشی از خزش نیز به شدت کاهش می‌یابد. پوشش‌های سد حرارتی با کاهش اختلاف دمای موضعی، موجب کاهش اعوجاج و بهبود عمر خستگی حرارتی نیز خواهند شد. به علاوه، روی عکس‌العمل قطعات در برابر ناپایداری دمایی اثر گذار هستند. این ناپایداری‌ها از تغییرات ناگهانی انرژی ورودی به قطعات دما بالا در رژیم‌های پروازی برخاست، صعود و فرود هواپیماها سرچشمه می‌گیرند. ناپایداری‌ها تاثیر مضری روی عمر خستگی حرارتی اجزای فلزی دارند. به دلیل هدایت حرارتی کمتر پوشش‌های سرامیکی، عکس‌العمل آن در برابر تغییرات ناگهانی دما، بسیار آرام‌تر از فلزات است. در نتیجه، پوشش سد حرارتی با آرام کردن ناپایداری‌ها، عمر خستگی حرارتی را بهبود می‌دهد.

پوشش سد حرارتی مد نظر در این بررسی شامل پوشش رویی از جنس سرامیکی و لایه میانی است. معمولاً، این پوشش‌ها ترکیبی از چند لایه پوششی هستند که هر لایه وظیفه خاصی دارد. وظیفه پوشش رویی، ایجاد سد حرارتی بوده و منظور از موادی با هدایت حرارتی کم (زیرکونیا)، تشکیل شده است. فاز سرامیکی موجب بهبود خواص مکانیکی مانند مقاومت به سایش، خزش و خوردگی می‌شود [۴]. بین زیرلایه و لایه سرامیکی، باید پوشش میانی فلزی مقاوم به اکسیداسیون ایجاد شود تا بتوان اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین سرامیک و زیرلایه را کاهش داد [۵]. پوشش میانی، بسته به جنس زیرلایه موجود، ترکیبی از  $NiCoCrAlY$  انتخاب شده است. حین رسوب‌دهی پوشش سرامیکی، یک لایه اکسیدرشد یافته تحت حرارت<sup>۴</sup>، از جنس  $Al_2O_3$ ، روی سطح پوشش میانی و در فصل مشترک پوشش رویی و پوشش میانی، ایجاد می‌شود. در حقیقت، این لایه اتصال‌دهنده لایه سرامیکی و پوشش میانی است. بنابراین سامانه‌ی سد حرارتی شامل پوشش سرامیکی، لایه اکسید آلومینیوم و یک پوشش میان‌فلزی روی زیرلایه است [۴]. در این تحقیق پوشش سد حرارتی متشکل از پوشش میانی و پوشش رویی سرامیکی بر روی زیرلایه‌ای از جنس IN713 اعمال و نتایج آزمایشات حرارتی و مکانیکی بررسی گردید. از آزمون‌های شوک حرارتی، پایداری حرارتی پوشش در دمای ثابت،

<sup>1</sup> Thermal Barrier Coating (TBC)

<sup>2</sup> MCrAlY

<sup>3</sup> Yttrium Stabilizer Zirconia (YSZ)

<sup>4</sup> Thermal Growth Oxide (TGO)

چسبندگی، اندازه‌گیری میکروسختی به منظور بررسی پوشش ایجاد شده استفاده شد.

### مواد و روش تحقیق

در این تحقیق پوشش سدحرارتی متشکل از لایه میانی با کد-PWA 1365 2 به ضخامت ۱۲۵ میکرومتر و لایه رویی سرامیکی با کد Metco 204 NS به ضخامت ۲۰۰ میکرومتر ایجاد گردید. پارامترهای مربوط به پوشش در جدول-۱ ذکر گردیده است. دمای پیش‌گرم در حدود بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد بود. در شکل‌های-۳،۲،۱ نمونه‌ها انتخاب شده، به صورت نمونه اولیه، نمونه‌ها پس از لایه‌برداری و نمونه‌های پوشش داده شده، نشان داده شده‌اند. با مقایسه شکل ۱ و ۲ ملاحظه می‌گردد که پوشش اولیه که به رنگ تیره است، بعد از عملیات لایه‌برداری به صورت کامل برداشته شده است و سطح فلز نمایان گردیده است. همچنین در شکل-۳ مشاهده می‌گردد، که پوشش سدحرارتی به صورت همگن بر روی نمونه‌های اولیه اعمال شده است.

### جدول ۱- پارامترهای مربوط به فرآیند پوشش دهی توسط افشانه پلاسما [۹-۶]

پوشش سرامیکی	NiCrAlY	پارامترها
۴۰	۴۰	سرعت فلوی گاز آرگون (l/min)
۱۱	۸	سرعت فلوی گاز هیدروژن (l/min)
۹۰	۱۳۰	فاصله پاشش (mm)
۲۵	۲۵	سرعت تغذیه پودر
۶۰۰	۵۰۰	آمپر (A)
۷۰	۷۰	ولتاژ (V)



شکل ۲- قطعات پس از فرایند استریپ



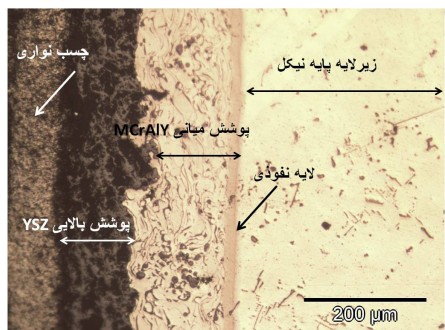
شکل ۳- قطعات پوشش داده شده با سد حرارتی

آزمایش سیکل حرارتی به منظور تعیین عمر سیکلی در یک کوره با اتمسفر هوا انجام شد. در این آزمایش دمای کوره تا ۹۵۰ °C افزایش یافت. پس از رسیدن به دمای مورد نظر نمونه‌های مشابه در بوته قرار گرفت و سپس بوته به مدت ۵ دقیقه در این دما قرار داده شد. سپس بوته از کوره خارج گردید و نمونه‌های پوشش داده شده توسط هوای فشرده تا دمای محیط خنک گردید. تعداد ۱۰۰ سیکل در دمای ۹۵۰ °C برای نمونه‌ها انجام گرفت [۱۰-۱۲]. همچنین پوشش ایجاد شده در دمای ثابت ۹۵۰ °C به مدت ۱۰۰ ساعت قرار داده شد تا پایداری پوشش در شرایط هم دما و در مدت زمان طولانی بررسی گردد. سطح نمونه پوشش داده شده به منظور بررسی میکروسکوپی طبق استاندارد ASTM E1920 سمپاده زنی شده است [۱۳]. نوار آلومینیوم در فرآیند متالوگرافی بر روی پوشش قرار داده شد. این نوار به دو دلیل پیش از متالوگرافی بر روی نمونه اعمال گردید. دلیل اول ممانعت از ریزش پوشش در هنگام فرآیند متالوگرافی و دلیل دوم جدا کردن پوشش رویس از مانت است. به علت هم‌رنگ بودن مانت و پوشش رویی که در تصویر میکروسکوپ نوری به رنگ مشکی می‌باشند تفکیک آنها مشکل است. به منظور بررسی میکروساختار پوشش سدحرارتی، ایجاد میکرو ترک‌ها در فصل مشترک هر یک از لایه‌ها، ایجاد فازهای جدید و میزان تخلخل پوشش از میکروسکوپ نوری استفاده شد. آزمایش چسبندگی توسط استاندارد ASTM C633 انجام شد [۱۴]. برای پوشش سرامیکی سه آزمایش چسبندگی انجام گرفت. برای هر آزمایش دو استوانه به قطر ۱ اینچ و طول ۳ اینچ توسط تراشکاری ایجاد شد. بر روی یک سطح استوانه پوشش مورد نظر توسط فرآیند افشانه پلاسما ایجاد گردید. سپس طرف دیگر استوانه آغشته به چسب اپوکسی (Structure epoxy adhesive) به شماره EC-1386 گردید و بر روی طرف پوشش داده شده قرار گرفت و بمدت ۲ ساعت در دمای ۱۲۰ °C در کوره قرار گرفت. پس از اطمینان از چسبندگی مناسب (گیرش)، استوانه‌ها در فیکسچر ایجاد شده قرار داده شد و آزمایش چسبندگی توسط دستگاه کشش انجام گرفت. در شکل-۴ تصویر مربوط به

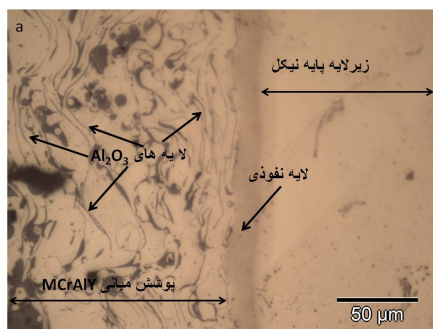


شکل ۴- قطعات پیش از فرآیند استریپ کردن

لایه، لایه نفوذی باشد که در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد در حین سیکل های شوک حرارتی ایجاد شده است [۲۱-۱۹].



شکل ۶- نمونه پوشش سد حرارتی بعد از ۱۰۰ سیکل شوک حرارتی



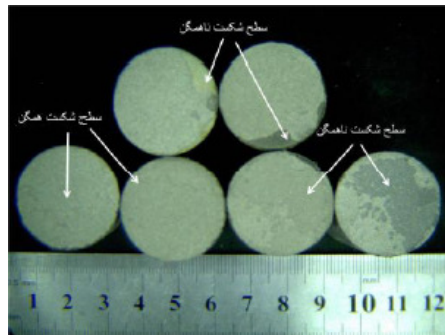
شکل ۷- نمونه پوشش سد حرارتی بعد از ۱۰۰ سیکل شوک حرارتی، (a) فصل مشترک لایه میانی و زیرلایه

شکل ۷ به ترتیب فصل مشترک بین زیرلایه و لایه میانی و همچنین فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش سرامیکی را نشان می‌دهند. با مقایسه شکل‌های ۷ و ۵ ایجاد لایه‌های باریک اکسیدی فلزی که معمولاً از جنس  $Al_2O_3$  یا  $Cr_2O_3$  در لایه میانی مشهود است [۲۵-۲۲]، به این لایه‌ها اصطلاحاً TGO می‌گویند که این لایه‌ها به علت اکسیداسیون MCraAlY در دمای بالا رخ می‌دهند و این فرآیند، فرایند فعال شونده با دما می‌باشد. با بررسی شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که فصل مشترک زیرلایه و پوشش میانی و فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش سرامیکی عاری از هرگونه ترک و گسستگی می‌باشد و فصل مشترک بین لایه‌ها تغییری نسبت به حالت بعد از پوشش و پیش از اعمال آزمایش شوک حرارتی نکرده است (شکل ۵). این مشاهدات بیان می‌کند که پوشش تحت سیکل‌های حرارتی (شوک حرارتی) از مقاومت خوبی برخوردار است.

آزمایش پایداری حرارتی در شرایط هم دما در دمای  $950^{\circ}C$  به مدت ۱۰۰ ساعت به منظور بررسی قابلیت مقاومت پوشش در این دما انجام گرفت. در این آزمایش نیز هیچ گونه تخریبی بر روی پوشش مشاهده نمی‌شود و پوشش بعد از آزمایش همدمای تغییری نسبت به حالت همدمای نکرده است.

تصویر میکروسکوپی پوشش سد حرارتی در شرایط همدمای در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین شکل ۹ به ترتیب فصل مشترک بین زیرلایه و لایه میانی و همچنین فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش سرامیکی را نشان می‌دهد. بررسی‌های فصل‌های مشترک بین زیرلایه و لایه میانی و همچنین فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش

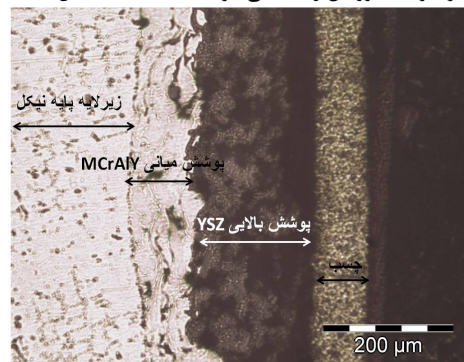
نمونه‌های جهت آزمایش چسبندگی نشان داده شده است. میکروسختی نمونه‌ها با اعمال بار ۵۰ گرم انجام گرفت. میزان میکروسختی برای سه سطح پوشش رویی، زیرلایه و لایه میانی انجام گرفت. برای هر سطح ۵ آزمایش انجام شد و مقادیر میانگین میکروسختی محاسبه گردید. میزان تخلخل پوشش رویی پوشش سرامیکی و پوشش میانی توسط نرم افزار آنالیز عکس اندازه گیری شد.



شکل ۴- تصویر سطح شکست نمونه‌ها جهت آزمایش چسبندگی

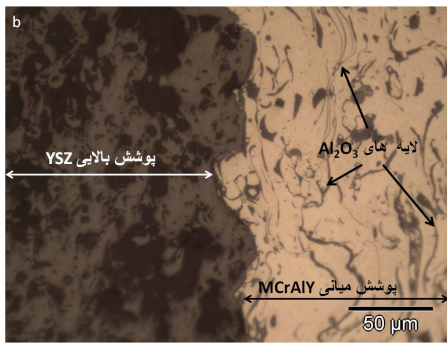
### نتیجه گیری

شکل ۵ تصویر نمونه شاهد سد حرارتی (نمونه بعد از پوشش) را نشان می‌دهد. در این تصویر ۴ بخش زیرلایه، لایه میانی MCraAlY و لایه بالایی پوشش سرامیکی و لایه مربوط به ی نواری آلومینیوم نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌گردد ضخامت لایه سرامیکی پوشش سرامیکی در حدود ۲۰۰ میکرومتر و ضخامت لایه میانی در حدود ۱۲۵ تا ۱۵۰ میکرومتر است. با بررسی فصل مشترک زیرلایه و پوشش میانی و فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش سرامیکی مشخص می‌گردد که این فصل مشترک‌ها عاری از هرگونه ترک و گسستگی می‌باشد. این مشاهدات بیان می‌کند که پوشش به صورت مناسبی تحت فرایند پلازما افشانه ایجاد گردیده است و عاری از هر گونه عیب می‌باشد. وجود ترک و گسستگی در فصل مشترک لایه‌ها می‌تواند این مناطق را مستعد به تخریب در شرایط سرویس و عملیاتی گرداند [۱۸-۱۵] (شکل ۵).



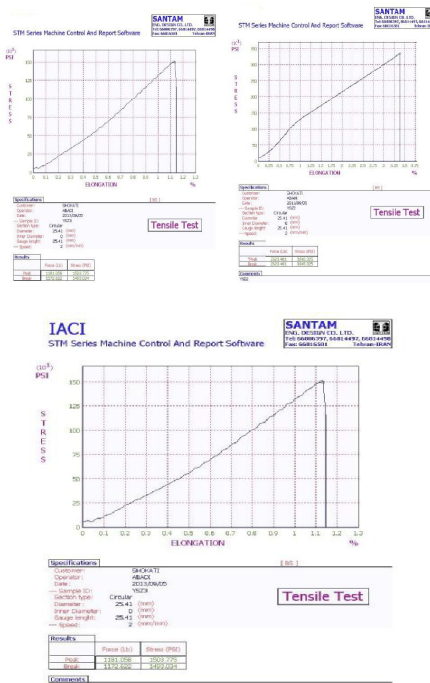
شکل ۵- تصویر نمونه شاهد سد حرارتی ( بعد از پوشش)

شکل‌های ۶ و ۷ نمونه پوشش سد حرارتی بعد از ۱۰۰ سیکل شوک حرارتی را نشان می‌دهند. با مقایسه شکل‌های ۵ تا ۷ مشاهده می‌گردد که در شکل‌های ۶ و ۷ علاوه بر قسمت‌هایی که در شکل ۵ دیده می‌شود ناحیه جدید در نمونه سد حرارتی بعد از ۱۰۰ سیکل دیده می‌شود که در فصل مشترک پوشش میانی و زیرلایه تشکیل شده است. به نظر میرسد که این



شکل ۹- نمونه آزمایش پایداری حرارتی پس انجام آزمایش همدمای در دمای ۹۵۰°C به مدت ۱۰۰ ساعت

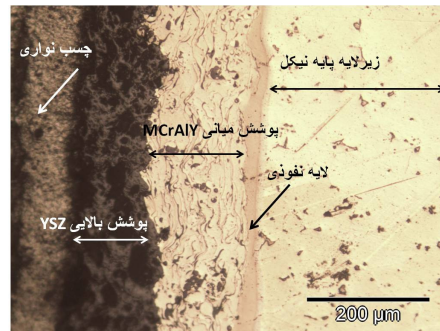
چسبندگی از پارامترهای مهم برای پوشش می‌باشد که تضمین کننده استحکام، پایداری، پیوستگی و چسبندگی پوشش به سطح زیرلایه است. هر چند ماده سد حرارتی عایق حرارتی خوبی باشد بدون چسبندگی لازم به زیرلایه نمی‌توان آنرا در شرایط سرویس به کار برد. این آزمایش توسط استاندارد ASTM C633 انجام گرفت. نمودارهای تنش-کرنش مربوط به استحکام چسبندگی پوشش سد حرارتی برای سه نمونه اندازه-گیری شد و مقادیر استحکام چسبندگی در جدول ۲ ذکر گردیده است. همچنین یکی از نمودارهای تنش کرنش مربوط به استحکام چسبندگی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار میانگین استحکام چسبندگی در نمونه‌های پوشش سد حرارتی ۱۴/۲ Mpa است که مقدار قابل قبول و قابل مقایسه با مقادیر گزارش شده در منابع است [۹، ۲۶-۴۲].



شکل ۱۰- نمودارهای تنش کرنش مربوط به پوشش سد حرارتی

میکروسختی نمونه‌ها با اعمال بار ۵۰ گرم انجام گرفت. برای هر سطح ۵ آزمایش انجام شد و مقادیر میانگین میکروسختی محاسبه گردید. میزان میکروسختی برای سه سطح پوشش بالایی، زیرلایه و لایه میانی انجام

سرامیکی بر این دلالت دارد که هیچ اثری از ترک و گسستگی در این فصل مشترک‌ها وجود ندارد که نشان از این دارد که نمونه‌های پوشش مقاومت خوبی در این دما داشته‌اند و شرایط آزمایش موجب تخریب و یا پیدایش عوامل تخریب (ایجاد ترک) نشده است. مشاهدات میکروسکوپی پوشش اعمال شده بعد از ۱۰۰ ساعت قرارگیری در دمای ۹۵۰ °C نشان می‌دهد که همانند آزمایش شوک حرارتی لایه نفوذی در فصل مشترک لایه میانی و زیرلایه تشکیل شده است. این لایه فعال شونده با دما است و در اثر قرارگیری طولانی مدت پوشش در دمای ۹۵۰ °C ایجاد شده است (شکل ۸ و ۹) [۱۹-۲۱]. همچنین لایه‌های اکسیدی ایجاد شده (شامل اکسیدهای  $Al_2O_3$  و  $Cr_2O_3$ ) در اثر اکسید شدن فلزات موجود در MCrAlY در شکل ۹ نشان داده شده است. این لایه TGO نیز فعال شونده با دما است و موجب می‌شود که زیرلایه از اکسیداسیون در امان بماند و از سرایت اکسیژن به زیرلایه ممانعت می‌شود. از طرفی دیگر موجب بهبود اتصال لایه میانی و پوشش سرامیکی می‌شود [۹، ۲۲-۲۵].



شکل ۸- نمونه آزمایش پایداری حرارتی پس انجام آزمایش همدمای در دمای ۹۵۰°C به مدت ۱۰۰ ساعت

جدول ۲- مقادیر استحکام چسبندگی و درصد ازدیاد طول پوشش سد حرارتی

پوشش سد حرارتی			نمونه
پوشش ۱	پوشش ۲	پوشش ۳	شماره نمونه
سرامیکی ۱	سرامیکی ۲	سرامیکی ۳	استحکام چسبندگی (MPa)
۱.۳ ± ۰.۴	۲.۳ ± ۰.۳	۱.۵ ± ۰.۳	استحکام چسبندگی (MPa)
۱.۳ ± ۰.۳	۲.۵ ± ۰.۴	۱.۴ ± ۰.۳	میانگین استحکام چسبندگی (MPa)
۱.۳ ± ۰.۳	۲.۳ ± ۰.۳	۱.۴ ± ۰.۳	میانگین استحکام چسبندگی (MPa)
۲	۳	۱/۱۵	درصد ازدیاد طول (elongation)
T/1 A	T/1 A	T/1 A	میانگین درصد ازدیاد طول

جدول ۳- میکروسختی و درصد تخلخل پوشش سد حرارتی

نمونه	زیرلایه MCrAlY	پوشش سد حرارتی
میانگین میکروسختی $AV_{500}$	۴۲۶*	۳۱۶*
درصد تخلخل	-	۱.۹

*Materials Science and Engineering A*, v.478, 2008, pp 264–269.

2. DeMasi-Marcin J.T., Gupta D.K., Protective coatings in the gas turbine engine. *Surface and Coatings Technology*, v. 68-69, 1994, pp 1-9.

3. DeMasi, J.T., D.M. Sheffler, and M. Ortiz, Thermal barrier coating life prediction model development, in NASA Contractor Report. 1989. pp 47.

4. Bai Y., Han Z.H., Li H.Q., Xu C., Xu Y.L., Wang Z., Ding C.H., Yang J.F., High performance nanostructured ZrO<sub>2</sub> based thermal barrier coatings deposited by high efficiency supersonic plasma spraying, *Applied Surface Science*, v. 257, 2011, pp. 7210–7216

5. Karaoglanli A.C., Altuncu E., Ozdemir I., Turk A., Ustel F., Structure and durability evaluation of YSZ +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite TBC with APS and HVOF bond coats under thermal cycling conditions, *Surf. Coat. Technol.*, v.205 2011 pp. S369–S373.

6. Kucuk A., Berndt C.C., Senturk U., Lima R.S., Lima C.R.C., Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. I: Four point bend test. *Mater. Sci. Eng. A*, v. 284, 2000, pp. 29–40.

7. Kucuk A., Berndt C.C., Senturk U., Lima R.S., Influence of plasma spray parameters on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings. II: Acoustic emission response, *Mater. Sci. Eng. A*, v. 284, 2000, pp. 41–50.

8. Harry E., Eaton A., Zajchowski P., High temperature particulate erosion of plasma sprayed YSZ versus selected powder characteristics and plasma torch designs. *Surf. Coat. Technol.*, v. 120–121, 1999, pp. 28–33.

9. Keyvani A., Saremi M., Heydarzadeh Sohi M., Oxidation resistance of YSZ -alumina composites compared to normal YSZ TBC coatings at 1100 °C. *J. Alloys Compd.*, v. 509, 2011, pp. 8370– 8377.

10. Gan Z., Ng H.W., Experiments and inelastic finite element analyses of plasma sprayed graded coatings under cyclic thermal shock. *Mater. Sci. Eng. A*, v. 385, 2004, pp. 314–324.

11. Schlichting K.W., Pature N.P., Jordan E.H., Gell M., Failure modes in plasma-sprayed thermal barrier coatings, *Mater. Sci. Eng. A*, v. 342, 2003, pp. 120–130.

12. Khan A.N., Lu J., Manipulation of air plasma spraying parameters for the production of ceramic coatings, *J. Mater. Process. Technol.*, v. 209, 2009, pp. 2508–2514.

13. ASTM E1920 - 03(2008) Standard Guide for Metallographic Preparation of Thermal Sprayed Coatings, 2008.

14. ASTM C633 (01)-2008. Standard test method for adhesion and cohesion strength of thermal spray coatings. 2008.

15. Tan Y., Shyam A., Choi W.B., Lara-Curzio E., Sampath S., Anisotropic elastic properties of thermal spray coatings determined via resonant ultrasound spectroscopy. *Acta Mater*, v. 58 2010, pp. 5305–5315.

16. Tang F., Ajdelsztajn L., Kim G.E., Provenzano V., Schoenung J.M., 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*, v. 425, 2006, pp. 94–106.

17. Habibi M.H., Wang L., Guo S.M., Evolution of hot corrosion resistance of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> + YSZ composite thermal barrier coatings in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at 1050 °C, *J. Eur. Ceram. Soc.*, v. 32, 2012, pp. 1635–1642.

18. Drexler J.M., Shinoda K., Ortiz A.L., Li D., Vasiliev A.L., Gledhill A.D., Sampath S., Pature N., Air-plasma-sprayed thermal barrier coatings that are resistant to high-temperature attack by glassy deposits. *Acta Mater*, v. 58, 2010 pp. 6835–6844.

19. Gu L., Chen X., Fan X., Liu Y., Zou B., Wang Y., Cao X., Improvement of thermal shock resistance for thermal barrier coating on aluminum alloy with various electroless interlayers, *Surf. Coat. Technol.*, v.206, 2011, pp. 29–36.

گرفت و نتایج مربوط به آن در جدول ۳ ذکر گردیده است. همچنین میزان تخلخل پوشش رویی پوشش سرامیکی و پوشش میانی توسط نرم افزار آنالیز عکس اندازه گیری شد و در جدول ۳ ذکر گردید. همانطور که انتظار می‌رود سختی پوشش بالایی به علت سرامیکی بودن از بقیه لایه‌ها بیشتر است. باید توجه نمود که سختی گزارش شده از سطوح پوششی و پوشش سرامیکی به علت وجود تخلخل در پوشش به نسبت کمتر از حالتی است که این پوشش-ها بدون تخلخل هستند. به هر جهت سختی پوشش سرامیکی نسبت به زیرلایه حدوداً ۵۰٪ بیشتر است. درصد تخلخل در جدول ۳ ذکر گردیده است. درصد تخلخل ذکر گردیده در محدوده مجاز برای پوشش‌های پلاسما افشانه می‌باشد.

### نتیجه‌گیری

در این بررسی پوشش سد حرارتی متشکل از لایه میانی و لایه بالایی پوشش سرامیکی به روش پلاسما افشانه ایجاد گردید. نتایج بررسی‌های مربوط به مقاومت به شوک حرارتی، پایداری پوشش در شرایط همدم، بررسی ساختار از نظر میکروسکوپی، میزان استحکام چسبندگی و مقدار میکروسختی به شرح زیر است:

۱- نمونه‌ها بعد از آزمایش شوک حرارتی و آزمایش پایداری حرارتی در شرایط همدم از لحاظ ماکروسکوپی با نمونه‌ها قبل از آزمایش تفاوتی نداشتند و هیچ گونه تخریبی بر روی پوشش مشاهده نگردید. مشاهدات میکروسکوپی نشان می‌دهد ناحیه جدیدی در نمونه‌ها بعد از آزمایش شوک حرارتی و آزمایش پایداری هم دما در فصل مشترک پوشش میانی و زیرلایه ایجاد شده است. این لایه، لایه نفوذی می‌باشد که در دمای ۹۵۰ درجه سانتیگراد ایجاد شده است. همچنین لایه‌های باریک مربوط به اکسیدهای فلزی شامل Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در لایه میانی ایجاد شد که مکانیزم تشکیل این لایه، فعال شونده با دما می‌باشد.

۲- با بررسی میکروسکوپی نمونه‌ها بعد از آزمایش شوک حرارتی و آزمایش پایداری هم دما مشاهده شد که فصل مشترک زیرلایه و پوشش میانی و فصل مشترک لایه میانی و پوشش بالایی پوشش سرامیکی عاری از هرگونه ترک و گسستگی می‌باشد. این مشاهدات بیان می‌کند که پوشش تحت سیکل‌های حرارتی (شوگ حرارتی) و شرایط همدم از مقاومت خوبی برخوردار است و عوامل ایجاد کننده تخریب که شامل ترک و گسستگی فصل مشترک است مشاهده نگردید.

۳- مقدار میانگین استحکام چسبندگی در نمونه‌های پوشش سد حرارتی ۱۴/۲ Mpa است که مقدار قابل قبول و قابل مقایسه با مقادیر گزارش شده در منابع است.

۴- میزان میکروسختی زیرلایه HV<sub>0.05</sub> ۴۲۴/۶ است. این در حالی است که میزان میکروسختی پوشش بالایی HV<sub>0.05</sub> ۶۴۶/۸ است. مقایسه مقادیر ذکر شده نشان می‌دهد که با اعمال پوشش سد حرارتی سختی سطح به میزان ۱/۵ برابر سختی زیرلایه می‌رسد.

### مراجع

1. Afrasiabi A., Saremi M., Kobayashi A., A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ +Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ /Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

20. urgen Muller J., Neuschutz D., Efficiency of a-alumina as diffusion barrier between bond coat and bulkmaterial of gas turbine blades. *Vacuum*, v. 71, 2003, pp. 247–251.
21. Luo L., Liu S., Jian Li., Wu Y., Thermal shock resistance of FeMnCrAl/Cr3C2–Ni9Al coatings deposited by high velocity arc spraying, *Surf. Coat. Technol.*, v. 205, 2011 pp. 3467–3471.
22. Keyvani A., Saremi M., Heydarzadeh Sohi M, Valefi Z., A comparison on thermomechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ TBC coatings in thermal cycling. *J. Alloys Compd.*, v. 541, 2012, pp. 488–494.
23. Keyvani A., Saremi M., Heydarzadeh Sohi M., An investigation on oxidation, hot corrosion and mechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ coatings, *Surf. Coat. Technol.*, v.206, 2011, pp. 208–216.
24. Saremi M., Afrasiabi A., Kobayashi A., Microstructural analysis of YSZ and YSZ /Al2O3 plasma sprayed thermal barrier coatings after high temperature oxidation, *Surf. Coat. Technol.* v. 202, 2008, pp. 3233–3238.
25. Rajendran R., Gas turbine coatings – An overview. *Eng. Fail. Anal.* v. 26, 2012, pp. 355–369.
۲۶. سمانه عرب سرهنگی، علیرضا میرحبیبی، حسین عربی، سعید رستگاری، بررسی خواص ریزساختاری و مکانیکی پوشش چند لایه سیر حرارتی کامپوزیتی زیرکونیا/آلومینا و پوشش دولایه زیرکونیایی اعمال شده به روش پاشش پلاسما، فصل نامه سرامیک ایران، شماره ۳۱ پاییز ۹۱.
26. Liang B., Ding Ch., Thermal shock resistances of nanostructured and conventional zirconia coatings deposited by atmospheric plasma spraying, *Surf. Coat. Technol.* v. 197 2005, pp. 185– 192.