

## فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

رفتار شوک حرارتی پوشش‌های سد حرارتی YSZ، YSZ/Mullite و پوشش گرادبانی YSZ/Mullite بر روی سوپر آلیاژ پایه نیکل تهیه شده با روش اسپری پلاسمایی (APS)

### مقاله پژوهشی

نادر سلطانی<sup>۱</sup>، ایمان مباحشپور<sup>۲\*</sup>، اسماعیل صلاحی<sup>۳</sup>، علی صداقت آهانگری<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

۲- استادیار، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

۳- استاد، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

۴- استادیار، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی، کرج، ایران.

\*mobasherpour@gmail.com

چکیده	اطلاعات مقاله
در این پژوهش رفتار شوک حرارتی، سه نوع پوشش سد حرارتی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ)، پوشش لایه‌ای زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و پوشش مولایت (YSZ/Mullite) و پوشش گرادبانی از زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و مولایت (YSZ/Mullite) بر روی سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ کم کربن به همراه لایه میانی پوشش داده شده با روش اسپری پلاسمایی مقایسه شد. با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و پراش اشعه ایکس (XRD)، بررسی ریزساختار و آنالیز فازی انجام شد. درصد تخلخل و شوک پذیری پوشش‌ها در دمای ۱۱۰۰°C مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش مولایت به‌صورت لایه‌ای و گرادبانی بر روی پوشش YSZ از میزان حفرات و تخلخل‌ها کاسته می‌شود که این پدیده به علت افزایش مقادیر ذرات ذوب شده مولایت می‌باشد. درصد تخلخل مربوط به پوشش لایه‌ای و گرادبانی از مولایت به ترتیب برابر با ۸ و ۳/۵ درصد به دست آمد. با استفاده از نتایج آزمون شوک حرارتی مشخص شد طول عمر پوشش لایه‌ای از مولایت از پوشش گرادبانی مولایت و پوشش YSZ بیشتر است. بیشینه طول عمر پوشش لایه‌ای از مولایت هفتاد سیکل ده دقیقه‌ای در کوره با دمای ۱۱۰۰°C ثبت شد. در شرایط آزمون شوک حرارتی طول عمر پوشش‌های گرادبانی و YSZ به ترتیب ۶۰ و ۲۵ سیکل اندازه‌گیری شد. پوشش‌های گرادبانی از مولایت در شوک حرارتی درصد انقباض بیشتری را نسبت به پوشش لایه‌ای مولایت از خود نشان دادند.	دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۱۵ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۷/۱۸ کلید واژگان: پوشش‌های سد حرارتی سوپر آلیاژ پایه نیکل اسپری پلاسمایی مولایت زیرکونیای پایدار شده با ایتریا

### Thermal Shock Behavior of Thermal Barrier Coatings YSZ, YSZ/Mullite and Gradient Coating YSZ/Mullite on Nickel Base Super Alloy Prepared by Plasma Spray (APS) Method

Nader Soltani<sup>۱</sup>, Iman Mobasherpour<sup>۲\*</sup>, Esmail Salahi<sup>۳</sup>, Ali Sedaghat Ahangary<sup>۴</sup>

۱- MA, Department of Ceramic, Materials & Energy Research Center, Karaj, Alboorz, Iran.

۲- Assistant Professor, Department of Ceramic, Materials & Energy Research Center, Karaj, Alboorz, Iran.

۳- Professor, Department of Ceramic, Materials & Energy Research Center, Karaj, Alboorz, Iran.

۴- Assistant Professor, Department of Ceramic, Materials & Energy Research Center, Karaj, Alboorz, Iran.

\* mobasherpour@gmail.com

#### Article Information

#### Abstract

Original Research Paper

Dor:

۲۰.۱۰۰۱.۱.۲۴۲۳۳۲۲۶.۱۴۰۲.۱۷.۳.۱.۹

In this research, thermal shock behavior, three types of yttria-stabilized zirconia (YSZ), yttria-stabilized zirconia and mullite coating (YSZ/Mullite) and gradient coating of yttria-stabilized zirconia and mullite (YSZ/Mullite) thermal barrier coatings on Inconel ۷۳۸ low carbon nickel base superalloy along with bond coated by plasma spray method was compared. Using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), microstructure and phase analysis were done. The percentage of porosity and thermal shock of coatings at ۱۱۰۰°C temperature was investigated and compared. The results showed that with the increase of mullite in layer and gradient on YSZ coatings, the

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Nader Soltani, Iman Mobasherpour, Esmail Salahi, Ali Sedaghat Ahangary, Thermal Shock Behavior of Thermal Barrier Coatings YSZ, YSZ/Mullite and Gradient Coating YSZ/Mullite on Nickel Base Super Alloy Prepared by Plasma Spray (APS) Method, New Process in Material Engineering, ۲۰۲۳, ۱۷(۳), ۱-۱۱.

number of holes and porosity decreases, which is due to the increase in the amount of melted mullite particles. The percentage of porosity related to layer and gradient coating of mullite was obtained as  $\lambda$  and  $3.5\%$  respectively. Using the results of the thermal shock test, it was determined that the lifetime of the mullite layer coating is longer than the mullite gradient coating and the YSZ coating. The maximum lifespan of the layered coating of mullite was recorded as  $70$  cycles of  $10$  minutes in a furnace with a temperature of  $1100^{\circ}\text{C}$ . The gradient coatings of mullite showed a higher percentage of shrinkage in thermal shock than the layered mullite coating.

**Keywords:**

Thermal Barrier Coatings  
Nickel-Based Super Alloy  
Plasma Spray  
Mullite  
YSZ

## ۱- مقدمه

یکی از مشکلات اصلی قطعات صنعتی کاربرد آنها در دماهای بالا می‌باشد. پرکاربردترین روش جلوگیری از تخریب مواد در دماهای بالا، پوشش دهی آلیاژهای مورد استفاده می‌باشد. اعمال این نوع پوشش‌ها مانند پوشش‌های سد حرارتی موجب بهبود خواص شیمیایی، مکانیکی و حتی حرارتی سطح آلیاژها می‌شود. امروزه استفاده از پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا ( $Y_2O_3$ - $ZrO_2$ ) در بسیاری از قطعاتی که نیازمند تحمل دمایی بالا می‌باشند کاربرد دارند. پوشش‌های سد حرارتی با هدایت حرارتی کمتر، عایق حرارتی در سطوح فلزی ایجاد می‌کنند که دمای سطح فلز و شارش گرما به داخل فلز را کاهش می‌دهند با استفاده از این پوشش‌ها امکان افزایش دمای فرایند به میزان  $100^{\circ}C$ - $150^{\circ}C$  بدون افزایش دمای زیرلایه، وجود دارد [۱-۳]. در دماهای بالاتر از  $1200^{\circ}C$  پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا دچار تغییرات فازی نامطلوب می‌شوند. این تغییر فازها سبب ایجاد ترک در لایه بالایی پوشش می‌شود تحقیقات اخیر برای یافتن جایگزین زیرکونیای پایدار شده با ایتریا موجب شناسایی بسیاری از سرامیک‌های جدید شده است [۴].

سرامیک‌های جدید دارای عملکرد مناسب در دمای بالای  $1200^{\circ}C$  و چقرمگی پایین نسبت به زیرکونیای پایدار شده با ایتریا هستند؛ اما مشکل اصلی این سرامیک‌ها این است که این مواد دارای غلظت بالایی از یون اکسیژن می‌باشند که موجب لایه‌لایه شدن پوشش می‌شود که نیاز است در این گونه پوشش‌ها از ضد اکسایش‌ها استفاده گردد. در شرایط کاری پوشش‌های سد حرارتی در توربین‌ها، شوک‌های حرارتی، اکسیداسیون و خوردگی داغ ناشی از روشن و خاموش شدن توربین، دمای بالا و ناخالصی‌های خورنده مانند وانادیوم و سدیم که در سوخت وجود دارد می‌تواند بسیار مخرب نیز باشد همچنین به علت نابرابری ضریب انبساط حرارتی بین لایه فلزی و لایه سرامیکی ایجاد تنش‌های باقی‌مانده می‌تواند منجر به تقلیل خواص مکانیکی و تسریع خوردگی داغ شود [۵-۷]. به‌منظور کاهش تنش‌های

باقی‌مانده محققان روش‌هایی را به‌منظور کاهش اختلاف ضریب انبساط حرارتی لایه فلزی و لایه سرامیکی را مطرح کردند که یکی از راه‌کارها اعمال پوشش‌های گرادینانی می‌باشد [۵].

یکی از مهم‌ترین مواد مورد استفاده در پوشش‌های سد حرارتی مولایت می‌باشد. مولایت ترکیبی از آلومینیوم و سیلیکات با فرمول  $3Al_2O_3-2SiO_2$  است که در دسته دیرگدازهای آلومینیوم-سیلیکاتی قرار می‌گیرد. چگالی کم همراه با خواص مکانیکی از قبیل پایداری حرارتی بالا، ضریب هدایت گرمایی کم و مقاومت در برابر اکسایش و خوردگی و رفتار خزشی مطلوب باعث کاربرد این مواد در دماهای بالا شده است [۸-۹]. یکی از مهم‌ترین مشکلات استفاده از مولایت این است که این مواد دچار تبلور و انقباض حجم در دمای بالای  $800^{\circ}C$  می‌شود که موجب ایجاد ترک و لایه‌لایه شدن نیز می‌گردد [۱۰]. روش‌هایی که توانایی اعمال انرژی کافی برای ذوب یا تبخیر ماده اولیه را داشته باشند عموماً به‌منظور ایجاد پوشش‌های سد حرارتی استفاده می‌شوند. از جمله روش‌هایی که توانایی تولید این انرژی بالا را دارند می‌توان پاشش پلاسمایی در اتمسفر هوا<sup>۱</sup> (APS)، رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتوی الکترونی<sup>۲</sup> (EB-PVD)، پاشش حرارتی با سوخت اکسیژن و سرعت بالا<sup>۳</sup> (HVOF)، سل-ژل و رسوب شیمیایی از فاز بخار به کمک لیزر<sup>۴</sup> (CVD) را نام برد. از میان این روش‌ها، پاشش پلاسمایی و رسوب فیزیکی از فاز بخار به کمک پرتوی الکترونی متداول‌تر می‌باشند [۱۱].

با توجه به اهمیت سوپر آلیاژهای پایه نیکل و پزوهش‌های انجام شده در مورد پوشش‌های سد حرارتی بر روی آنها، خلا تحقیقاتی در زمینه بهره‌گیری از مولایت بر روی زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و اعمال پوشش گرادینانی به‌عنوان نوآوری این کار مشخص شد. لذا هدف از اجرای این تحقیق استفاده از پوشش مولایت روی زیرکونیا پایدار شده با ایتریا و پوشش‌های گرادینانی مولایت به همراه زیرکونیای پایدار شده با ایتریا بر روی سوپر آلیاژ پایه نیکل و مقایسه رفتار شوک حرارتی این نوع از پوشش‌ها می‌باشد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

مورفولوژی نامنظم استفاده شد. آنالیز فازی و تصاویر میکروسکوپی هر یک از پودرهای اولیه استفاده شده در شکل ۱ آورده شده است.

از سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ کم کربن (-۷۳۸ IN LC) نیز به‌عنوان زیرلایه استفاده شد در جدول ۱ ترکیب شیمیایی مربوط به سوپر آلیاژ پایه نیکل نشان داده شده است. نمونه‌ها زیر لایه به‌صورت مکعب مستطیل با ابعاد ۲۰×۲۰×۵ میلی‌متر آماده‌سازی شدند.

به‌منظور تهیه پوشش‌ها، از پودر NiCrAlY با کد تجاری FST M-۳۲۱ و اندازه ذرات ۴۰ تا ۱۲۵ میکرومتر و مورفولوژی کروی استفاده شده است. همچنین به‌منظور ایجاد پوشش سرامیکی از پودر زیرکونیای پایدار شده با ایتریا با کد تجاری METCO ۲۰۴NS و اندازه ذرات ۱۱ تا ۱۲۵ میکرومتر و مورفولوژی کروی و پودر مولایت با ترکیب  $Al_{1.8}O_{0.6}Si_{1.2}$  و اندازه ذرات ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و

جدول (۱): درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده سوپر آلیاژ پایه نیکل اینکونل ۷۳۸ کم کربن استفاده شده به‌عنوان زیرلایه.

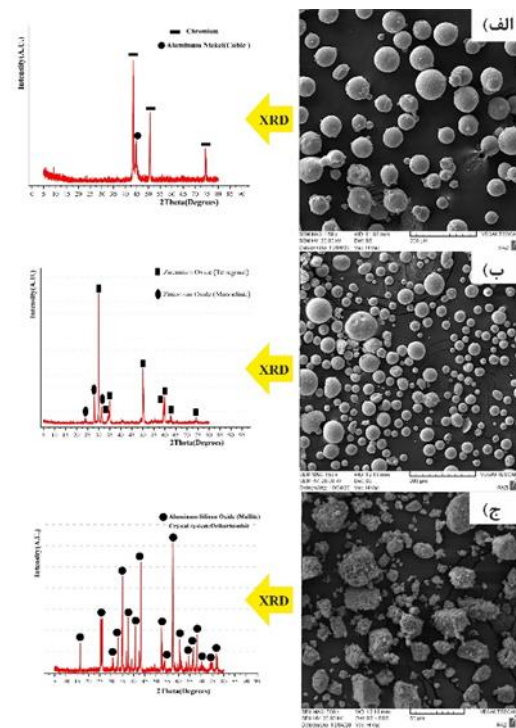
عنصر	Ni	Cr	Co	Ti	Al	w	Mo	Ta	Nb	Fe
درصد وزنی	۶۳/۲۰	۱۵/۴۸	۸/۵۷	۳/۱۷	۲/۹۹	۲/۲۹	۲/۱۲	۱/۰۹	۰/۸۰	≤۰/۰۰۵

در این پژوهش برای ایجاد پوشش‌ها از دستگاه پاشش پلاسما در اتمسفر هوا با تفنگ Metco ۳MB استفاده شد از گاز آرگون (Ar) به‌عنوان گاز اولیه پلاسما و گاز حامل پودر و از هیدروژن ( $H_2$ ) به‌عنوان گاز ثانویه استفاده شد. در جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده برای پوشش دهی نمونه‌ها آورده شده است.

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده به‌منظور پوشش دهی با استفاده از دستگاه اسپری پلاسمایی.

نوع پوشش	جریان (A)	نسبت Ar/ $H_2$	نرخ تغذیه (g/min)	فاصله پاشش (mm)
NiCrAlY	۴۵۰	۸۵/۱۵	۲۰	۱۵۰
YSZ	۵۰۰	۸۵/۱۵	۲۰	۱۰۰
Mullite	۵۰۰	۸۵/۱۵	۲۰	۸۰
YSZ+Mullite گرادیانی	۵۰۰	۸۵/۱۵	۲۰	۸۰

در این پژوهش سه نوع پوشش برای لایه نشانی و ارزیابی شوک حرارتی انتخاب شدند. در شکل ۲ شماتیک این سه پوشش آورده شده است همان‌طور که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود پوشش گرادیانی متشکل از یک لایه میانی فلزی (NiCrAlY)، یک لایه پوشش YSZ، یک لایه پوشش ۷۵٪ Mullite - ۲۵٪ YSZ (درصد وزنی)، یک لایه پوشش ۷۵٪ Mullite - ۵۰٪ YSZ، یک لایه پوشش ۷۵٪ Mullite - ۲۵٪ YSZ و یک لایه مولایت به‌عنوان پوشش رویی می‌باشد ضخامت مربوط به هر یک از لایه‌ها در شکل ۲ آورده شده



شکل (۱): آنالیز فازی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مواد اولیه استفاده شده در این تحقیق: الف) پودر NiCrAlY، ب) پودر زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و ج) پودر مولایت.

در ابتدا نمونه‌های تهیه شده توسط فرایند التراسونیک در محیط استون تمیز شدند. سپس نمونه‌ها با استفاده از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم گریت بلاست شده و بعد از آن نیز توسط فرایند التراسونیک در محیط استون تمیز شدند. در مرحله بعد نمونه‌ها قبل از پوشش دهی تا دمای حدود  $200^{\circ}C$  پیش گرم شدند و بلافاصله عملیات پوشش دهی آغاز شد.

است.

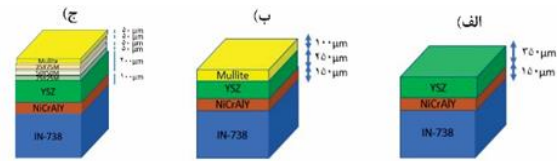
چرخه گرمایی شامل حرارت دادن نمونه‌ها در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  به مدت ۱۰ دقیقه و سرد کردن سریع در آب مقطر بود. دمای آب مقطر در طول آزمون بین  $20^{\circ}\text{C}$  تا  $25^{\circ}\text{C}$  نگه‌داشته شد. پس از اینکه نمونه‌ها در داخل آب مقطر تا دمای محیط سرد شدند، از داخل آب مقطر بیرون آورده شدند و تحت عملیات خشک کردن قرار گرفتند و دوباره داخل کوره قرار داده شدند. همین چرخه‌های حرارتی به صورت تکراری انجام شد، زمانی که حدود ۵ درصد از کل پوشش تخریب شد، ادامه آزمون در مورد نمونه مرتبط متوقف و مدت زمان آزمون ثبت گردید. تکرارپذیری نتایج آزمون با در نظرگیری دو نمونه برای هر پوشش تایید گردید. این نوع از آزمون شوک حرارتی نیز توسط سایر محققین انجام شده است [۱۲-۱۴].

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- بررسی ریزساختاری و آنالیز عنصری و آنالیز فازی

شکل ۳ تصاویر مربوط به سطح پوشش‌های سد حرارتی مختلف را نشان می‌دهد همان طور که ملاحظه می‌شود برای پوشش‌های سد حرارتی دو لایه NiCrAlY/YSZ (شکل ۳ الف) حضور ریز ترک‌ها و حفرات با اندازه‌های مختلف در این تصویر نشان داده شده است. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های پوشش‌های سد حرارتی، مقدار، شکل و مورفولوژی تخلخل‌های موجود می‌باشند. پوشش‌های سد حرارتی که با روش APS اعمال می‌شوند عموماً تخلخل دارند که به این دلیل باعث رهاسازی تنش‌های باقی‌مانده شده و مقاومت حرارتی بالایی را نیز فراهم می‌کنند [۱۵].

در شکل (۳ ب) تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح پوشش سد حرارتی (سه لایه) آورده شده است همان طور که ملاحظه می‌شود پوشش‌های سه لایه پاشیده شده با روش اسپری پلاسمایی نسبتاً خشن و زبر می‌باشند، همچنین وجود حفرات در این نوع از پوشش‌ها به وضوح دیده می‌شود این نوع از پوشش‌ها حاوی ذرات مسطح همراه با برخی ذرات نیمه مذاب مولایت نیز می‌باشند. گزارش شده که در فرایند پاشش پلاسمای، پوشش ترکیبی از ذرات به طور کامل ذوب

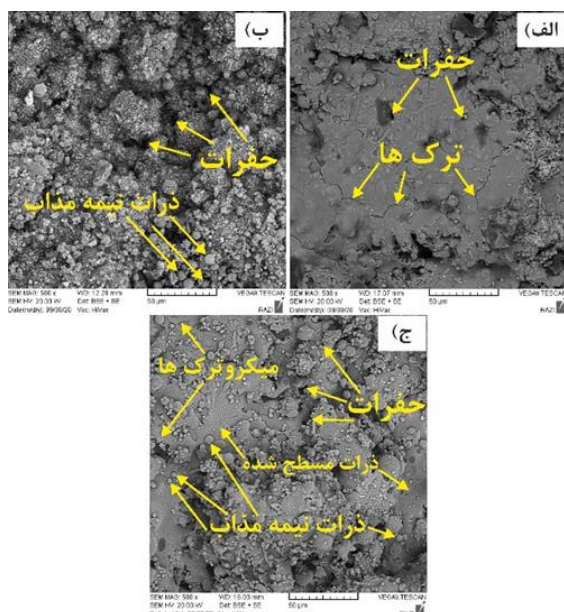


شکل (۲): شماتیک سه نوع پوشش استفاده شده در این تحقیق به همراه ضخامت هر لایه: الف) پوشش دولایه نیکرالی + زیرکونیای پایدار شده با ایتریا، ب) پوشش سه لایه نیکرالی + زیرکونیای پایدار شده با ایتریا + مولایت و ج) پوشش گرادیانی از نیکرالی + زیرکونیای پایدار شده با ایتریا + پوشش گرادیانی از زیرکونیای پایدار شده با ایتریا و مولایت.

بررسی و آنالیز فازی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه پراش اشعه ایکس<sup>۵</sup> (XRD) ساخت کارخانه Unisantis کشور آلمان مدل MD۳۰۰ با تارگت Cu و دکتور Ni، با ولتاژ ۴۵-۵۰ کیلوولت و ماکزیمم جریان ۱ میلی آمپر انجام شد. به منظور بررسی ریزساختار و مورفولوژی نمونه‌ها از میکروسکوپ الکترونی روبشی<sup>۶</sup> (SEM) مدل VEGA/TESCAN-XMU مجهز به طیف‌سنج پراش انرژی اشعه ایکس<sup>۷</sup> (EDS) ساخت کشور روسیه با ولتاژ ۱۵ کیلوولت استفاده شد. به منظور بررسی نمونه‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی از پوشش هادی طلا استفاده شد.

مطالعه توپولوژی و درصد تخلخل در پوشش‌های YSZ و YSZ/Mullite با استفاده از چندین تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط نرم افزار ImageJ مورد بررسی قرار گرفت. هر تصویر متناسب با اختلاف وضوح بین مواد پوشش و تخلخل‌ها توسط روش ترشهولد<sup>۸</sup> تبدیل به تصویر باینری<sup>۹</sup> شد بدین منظور تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی توسط عملیات باینری کردن مورد بررسی قرار گرفت. برای اندازه‌گیری درصد تخلخل در لایه‌های مختلف از تصاویری با بزرگ‌نمایی‌های مختلف استفاده شد و درصد تخلخل محاسبه شده برای هر لایه میانگین ۱۰ اندازه‌گیری از آن لایه با انحراف معیار حدود ۳ درصد می‌باشد.

برای اندازه‌گیری مقاومت به شوک حرارتی، نمونه‌های ساخته شده در معرض چرخه‌های حرارتی قرار گرفتند. برای اعمال این چرخه‌ها از کوره با دمای بالا استفاده شد. هر

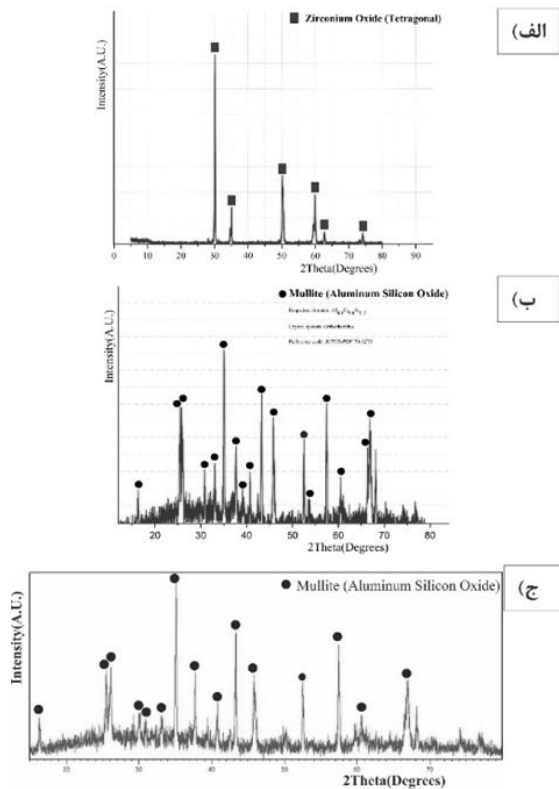


شکل (۳): تصاویر مربوط به سطح پوشش‌های سد حرارتی: الف) پوشش دو لایه NiCrAlY/YSZ، ب) پوشش سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY و ج) پوشش گرادیانی از Mullite/YSZ.

در شکل ۴ نتایج الگوی پراش اشعه ایکس و فازهای موجود در هر یک از پوشش‌های سد حرارتی آماده شده قبل از شوک حرارتی ارائه شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود برای پوشش دو لایه NiCrAlY/YSZ پوشش فقط شامل فاز تتراگونال نیمه پایدار زیر کونیا می‌باشد.

فاز تتراگونال نیمه پایدار، یک فاز غیر تعادلی تشکیل شده به دلیل سریع سرد شدن ذرات مذاب می‌باشد که دارای محور c کوچک‌تر و نسبت c/a کمتر نسبت به فاز تتراگونال می‌باشد [۱۳ و ۱۶] سرعت سرد شدن بسیار بالای ذرات مذاب در فرایند پاشش پلاسما از وقوع استحاله فازی زیرکونیا از تتراگونال به مونوکلینیک جلوگیری می‌کند و باعث تشکیل زیرکونیای تتراگونال نیمه پایدار از فاز مکعبی می‌شود [۱۷]. گزارش شده که حضور زیرکونیا با فاز تتراگونال در این نوع از پوشش‌ها باعث عملکرد بسیار مناسبی در شرایط کاری مختلف می‌شود [۱۷-۱۹]. البته لازم به ذکر است که تمایز بین فازهای تتراگونال و مکعبی در الگوی پراش اشعه ایکس کار بسیار سختی می‌باشد زیرا پهنای پیک و عرض پیک برای این دو فاز به یکدیگر نزدیک می‌باشند [۲۰]. تعیین ساختارهای مکعبی و تتراگونال به دلیل اینکه ساختارهای

شده و ذرات با ذوب سطحی (ناقص) می‌باشد [۱۵] که این مسئله به طور کامل در شکل ۳ دیده می‌شود. همچنین ملاحظه می‌شود که لایه مولایت در سطح رویی پوشش‌های لایه‌ای سه لایه دارای حفرات با اندازه بسیار بزرگ‌تر می‌باشد که به علت خروج گازهای محبوس شده است. تصویر میکروسکوپ الکترونی از سطح پوشش سد حرارتی گرادیانی در شکل (۳ ج) آورده شده است. همان طور که ملاحظه می‌شود ذرات ذوب شده و ذرات نیمه مذاب مولایت در این تصاویر به وضوح دیده می‌شود این ذرات در شکل (۳ ج) نشان داده شده است. همچنین در برخی نواحی نیز حفراتی در این نوع از پوشش‌ها ملاحظه می‌شود. مشاهده می‌شود که با افزایش مقادیر مولایت از میزان حفرات و تخلخل‌ها کاسته می‌شود که به دلیل افزایش مقادیر ذرات ذوب شده مولایت می‌باشد. در واقع ذوب ذرات باعث می‌شود حفرات و تخلخل‌های موجود پر شده و از میزان تخلخل‌ها کاسته شود. لازم به ذکر است که در پوشش‌های سد حرارتی گرادیانی Mullite/YSZ مقادیر ذرات نیمه ذوب شده و ذوب شده نیز نسبت به پوشش NiCrAlY/YSZ/Mullite افزایش یافته است. نقطه ذوب مولایت ۲۱۲۳ درجه کلوین ( $1850^{\circ}\text{C}$ ) و نقطه ذوب زیرکونیا نیز در حدود ۲۹۷۳ درجه کلوین ( $2700^{\circ}\text{C}$ ) می‌باشد در پوشش‌های گرادیانی نیز به علت افزایش مولایت در سطوح، ذوب ذرات افزایش یافته است. در برخی نواحی نیز میکروترک‌هایی در پوشش‌های مولایت دیده می‌شود.



شکل (۴): آنالیز فازی مربوط به پوشش‌های سد حرارتی: الف) پوشش دو لایه NiCrAlY/YSZ، ب) پوشش سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY و ج) پوشش گرادیانی Mullite/YSZ.

### ۳-۲- بررسی درصد تخلخل پوشش‌ها

جدول ۳ مقادیر درصد تخلخل مربوط به پوشش‌های دو لایه YSZ/NiCrAlY و سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY و گرادیانی از YSZ / Mullite را نشان می‌دهد همان طور که ملاحظه می‌شود درصد تخلخل مربوط به پوشش سه لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY تقریباً ۸ درصد می‌باشد. همچنین برای پوشش‌های سد حرارتی گرادیانی از YSZ / Mullite نیز درصد تخلخل تقریباً در حدود ۳ درصد است. احتمالاً اصلی‌ترین دلیل برای کاهش عدد مربوط به درصد تخلخل برای پوشش‌های گرادیانی YSZ / Mullite حضور فاز مولایت آمورف و ذرات ذوب شده بیشتر مولایت در این پوشش‌ها نسبت به پوشش‌های YSZ/NiCrAlY و پوشش‌های لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY می‌باشد. درصد تخلخل اندازه‌گیری شده در دامنه تخلخل پوشش‌های متداول APS (۵-۱۵٪) می‌باشد [۲۳].

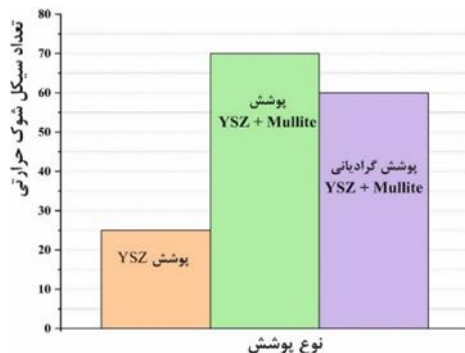
تتراگونال ( $a = 0.509 \text{ \AA}$  و  $c = 0.517 \text{ \AA}$ ) و مکعبی ( $a = 0.5124 \text{ \AA}$ ) بسیار مشابه می‌باشند ممکن است بسیار گمراه کننده باشد [۲۱].

نتایج مربوط به آنالیز فازی پوشش سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY در شکل (۴ ب) آورده شده است همان طور که دیده می‌شود پیک‌های اصلی این پوشش مربوط به فاز مولایت ( $\text{Al}_{4.8}\text{O}_{9.6}\text{Si}_{1.2}$ ) با سیستم کریستالی ارتورومبیک به همراه زمینه مولایت آمورف می‌باشد همچنین هیچ پیک پراش دیگری از سایر ناخالصی‌ها در طیف پراش اشعه ایکس، مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که سرد شدن سریع قطرات مذاب با سرعت سریع روی یک بستر سرد دلیل اصلی تشکیل مولایت آمورف در این نوع از پوشش‌ها می‌باشد. وجود فاز مولایت و مولایت آمورف در پوشش‌های سد حرارتی سه لایه در کارهای سایر محققان نیز گزارش شده است [۲۲].

شکل (۴ ج) آنالیز فازی مربوط به پوشش‌های سد حرارتی گرادیانی Mullite/YSZ را نشان می‌دهد همان طور که ملاحظه می‌شود فاز اصلی موجود در این نوع از پوشش‌های سد حرارتی مولایت می‌باشد. همچنین مولایت آمورف نیز به خوبی در این نمونه دیده می‌شود. گزارش شده که در این نوع از پوشش‌ها سرد شدن سریع قطرات مذاب اصلی‌ترین دلیل برای تشکیل فاز شیشه آمورف از مولایت می‌باشد [۲۲].

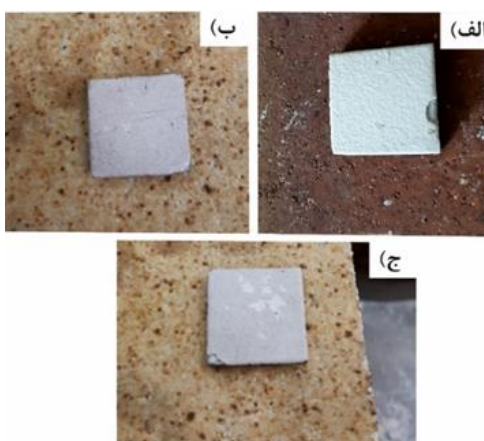


عوامل مختلفی مانند ضریب انبساط حرارتی، مدول الاستیک، استحکام شکست و تغییرات دمایی ناشی از شوک حرارتی می‌توانند در مقاومت یک بدنه در برابر شوک حرارتی موثر باشند.



شکل (۵): طول عمر پوشش‌های ایجاد شده طی سیکل‌های شوک حرارتی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$ .

شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی پوشش‌ها را طی سیکل‌های آزمون شوک حرارتی نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود هر سه پوشش تحت سیکل‌های شوک حرارتی شروع به ریختن از لبه‌ها کرده‌اند. گزارش شده است که در سیکل‌های شوک حرارتی، پوسته شدن و ریزش پوشش در ابتدا از نواحی نزدیک نواقص و به خصوص لبه‌های نمونه‌ها شروع می‌شود که به دلیل شرایط بحرانی سرد و گرم کردن و همچنین تمرکز تنش در لبه‌ها می‌باشد [۱۲].



شکل (۶): تصویر میکروسکوپی از پوشش‌ها بعد از انجام سیکل‌های آزمون شوک حرارتی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$ : الف) پوشش دولایه YSZ/NiCrAlY، ب) پوشش سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY، ج) پوشش گرادانی از Mullite/YSZ.

جدول (۳): مقادیر مربوط به درصد تخلخل هر یک از پوشش‌ها.

پوشش	YSZ	پوشش YSZ/Mullite	پوشش گرادانی YSZ+Mullite
تخلخل (%)	۶/۵	۸/۱	۳/۰

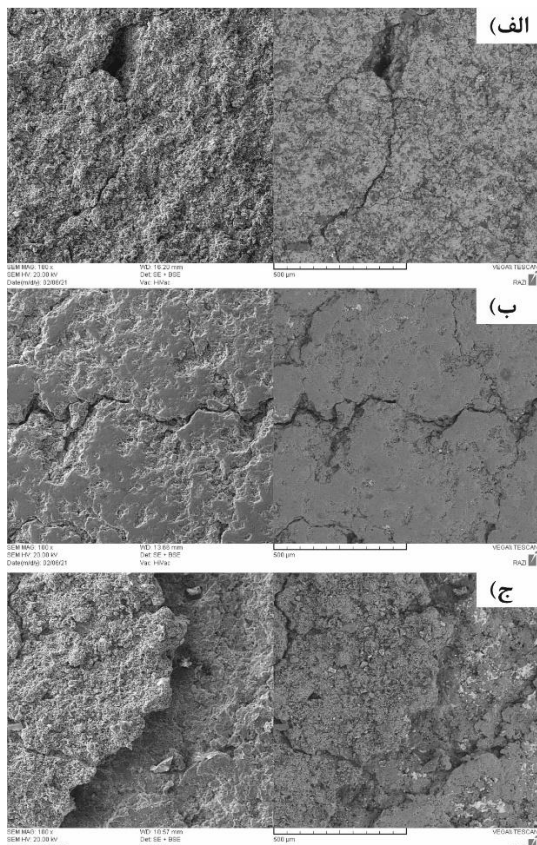
مقدار درصد تخلخل در لایه YSZ نیز نشان دهنده یک تناسب و سازش خوب بین مدول الاستیک پایین، تحمل کرنش بالا، هدایت حرارتی پایین می‌باشد و حفاظت در برابر عوامل خوردنده را تضمین می‌کند. درصد‌های تخلخل مشابه نیز توسط سایر محققین به دست آورده شده است. گزارش شده که میکرو ساختار این نوع از پوشش‌های سد حرارتی می‌تواند به وسیله تخلخل‌ها، تنش‌های باقی مانده، ترک‌های میکرونی تحت تاثیر قرار گیرد و امروزه استفاده از روش‌های عملیات حرارتی (بعد از فرایند پوشش دهی) و یا اعمال لایه لعاب می‌تواند به نوعی کمک کننده باشند [۳].

### ۳-۳- بررسی میکروسکوپی و میکروسکوپی و طول عمر پوشش‌ها بعد از آزمون شوک حرارتی

در شکل ۵ طول عمر سه نوع پوشش ایجاد شده در طی سیکل‌های شوک حرارتی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$  نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج، میانگین تعداد سیکل‌های پوسته شدن برای دو نمونه از هر پوشش می‌باشد. در این آزمون هنگامی که ترک و جدایش در لایه YSZ رخ داد ادامه آزمون در مورد نمونه مرتبط متوقف و مدت زمان آزمون و تصاویر میکروسکوپی توسط دوربین دیجیتال ثبت گردید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای نمونه با پوشش YSZ در سیکل ۲۵ لایه زیرکونیای پایدار شده با ایتریا از لایه میانی فلزی NiCrAlY جدایش یافت. همچنین برای نمونه با پوشش سه لایه Mullite/YSZ/NiCrAlY در سیکل ۷۰ لایه مربوط به مولایت و زیرکونیای پایدار شده هم‌زمان از لایه میانی NiCrAlY جدایش یافتند. برای نمونه‌های با پوشش گرادانی Mullite/YSZ نیز همان‌طور که ملاحظه می‌شود در سیکل ۶۰ ام هم‌زمان پوشش‌ها از لایه میانی فلزی NiCrAlY جدایش یافتند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود طول عمر پوشش لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY بعد از آزمون شوک حرارتی از دو نمونه دیگر بیشتر می‌باشد.



در شکل ۷ تصاویر میکروسکوپ الکترونی بعد از انجام آزمون شوک حرارتی از هر سه نوع پوشش ارائه شده است. همان طور که دیده می‌شود به دلیل عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی در زیر لایه و پوشش سرامیکی و رشد لایه اکسیدی در فصل مشترک لایه فلزی و سرامیکی ترک‌هایی در این نوع از پوشش‌های سد حرارتی دیده می‌شود. پوشش‌های کامپوزیتی و گرادایانی از مولایت، درصد انقباض بیشتری را نسبت به پوشش‌های به‌تنهایی مولایت از خود نشان می‌دهند. این دیدگاه در کارهای سایر محققان نیز گزارش شده است [۲۲]، بنابراین همان طور که آزمون شوک حرارتی نشان داد مقاومت به شوک حرارتی پوشش سه لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY بیشتر از پوشش‌های گرادایانی Mullite/YSZ می‌باشد.



شکل (۷): تصویر میکروسکوپ الکترونی از پوشش‌ها بعد از انجام سیکل‌های آزمون شوک حرارتی در دمای  $1100^{\circ}\text{C}$ : (الف) پوشش دو لایه YSZ/NiCrAlY، (ب) پوشش سه لایه

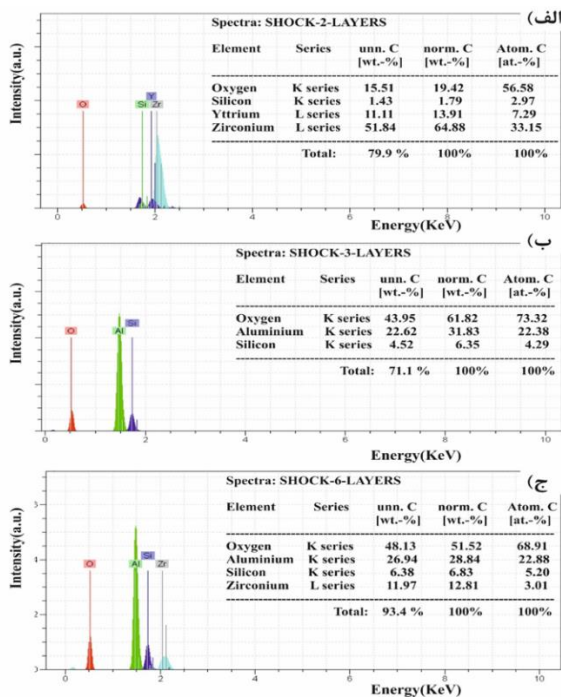
Mullite/YSZ/NiCrAlY، (ج) پوشش گرادایانی از Mullite/YSZ.

ضرایب انبساط حرارتی معمولی آلیاژهای پایه نیکل، لایه میانی فلزی، زیرکونیا و مولایت به ترتیب حدود  $17 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ،  $15 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ،  $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  و  $4.75 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  می‌باشد [۲۲] و [۲۴]؛ بنابراین اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه میانی فلزی و لایه YSZ و لایه YSZ با مولایت در سیکل‌های گرم و سرد کردن باعث ایجاد تنش و جوانه‌زنی و رشد ترک در فصل مشترک بین لایه‌ها شده و در نهایت می‌تواند به پوسته شدن لایه‌ها کمک نماید. زیرکونیا توسط دو مکانیزم کمک به انتقال اکسیژن از خارج به لایه میانی می‌نماید و باعث تشکیل و رشد لایه TGO و ایجاد تنش در پوشش سد حرارتی می‌شود مکانیزم اول انتقال یونی از طریق شبکه با حرکت معکوس جاهای خالی یون‌های اکسیژن و مکانیزم دوم نفوذ گازها در سرتاسر شبکه زیرکونیا از طریق ترک‌ها و تخلخل‌های به هم پیوسته می‌باشد [۲۵-۲۶].

به طور کلی عدم تطابق انبساط حرارتی در زیر لایه فلزی و لایه پوشش سرامیکی بعلاوه رشد لایه TGO در فصل مشترک لایه میانی فلزی و لایه سرامیکی منجر به ایجاد ترک‌های افقی، رشد این ترک‌ها، لایه‌لایه شدن و پوسته شدن پوشش در سیکل‌های حرارتی می‌شود. در آزمون شوک حرارتی وقتی نمونه پوشش داده شده در دماهای بالا از کوره خارج می‌گردد و به سرعت در آب سرد می‌شود یک تنش بسیار زیاد به دلیل اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه سرامیکی و لایه میانی فلزی در پوشش ایجاد می‌شود [۱۳].

برای بهبود کارایی پوشش‌های سد حرارتی در طی سیکل‌های حرارتی تحقیقات زیادی صورت گرفته است [۲۵] و [۲۷]. برای مثال از طریق کاهش نفوذ اکسیژن در ساختار پوشش سد حرارتی و در نتیجه کاهش سرعت رشد لایه TGO و تنش حاصل از این رشد باعث بهبود کارایی پوشش طی سیکل‌های حرارتی شده‌اند. در تحقیق حاضر نیز از لایه مولایت برای کاهش نفوذ اکسیژن به سمت لایه میانی فلزی و جلوگیری از رشد لایه TGO استفاده شده است؛ زیرا مولایت یک ماده مناسب برای جلوگیری از اکسیداسیون در سیستم پوشش سد حرارتی می‌باشد و مانند یک سد در برابر نفوذ اکسیژن عمل می‌نماید.

که برای پوشش‌های دو لایه مقادیر مربوط به عنصر ایتريوم که به منظور پایدارسازی فاز تتراگونال به زیرکونیا افزوده شده است تقریباً در محدوده مورد نظر باقی مانده است این بدان معناست که در حین آزمون شوک حرارتی هیچ تغییر فازی در زیرکونیا رخ نداده است و زیرکونیا به صورت فاز تتراگونال پایدار می‌باشد. برای نمونه با پوشش سد حرارتی ۳ لایه آنالیز عنصری نشان دهنده وجود عناصر اکسیژن، آلومینیوم و سیلیکون می‌باشد که همان فاز مولایت است. برای پوشش ۶ لایه گرادینانی علاوه بر عناصر مربوط به فاز مولایت، عنصر Zr وجود دارد که به علت گرادینانی بودن این پوشش حضور عنصر زیرکونیوم امکان پذیر است.



شکل (۹): آنالیز عنصری از سطوح پوشش سد حرارتی: الف) پوشش سد حرارتی دو لایه YSZ/NiCrAlY، ب) پوشش سد حرارتی سه لایه‌ای از Mullite/YSZ/NiCrAlY و ج) پوشش سد حرارتی گرادینانی از Mullite/YSZ.

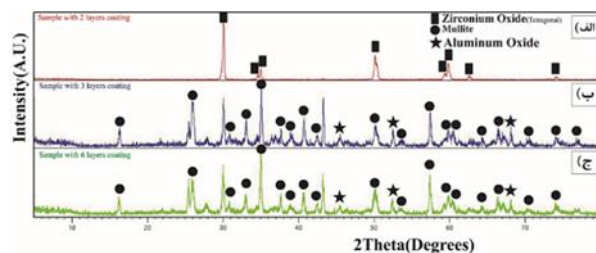
#### ۴- نتیجه‌گیری

اصلی‌ترین دلیل برای کاهش عدد مربوط به درصد تخلخل برای پوشش‌های گرادینانی Mullite/YSZ افزایش ذرات ذوب شده در این پوشش‌ها نسبت به پوشش‌های دو لایه‌ای YSZ/NiCrAlY و پوشش‌های سه لایه‌ای

#### ۳-۴- آنالیز فازی و عنصری پوشش‌ها بعد از آزمون شوک حرارتی

دیده شده که درصد انقباض تأثیر ناچیزی بر مقاومت سیکل‌های حرارتی دارد که به دلیل این است که انقباض فقط در چرخه‌های اولیه سرمایش و گرمایش رخ می‌دهد [۲۸-۲۹]؛ به عبارت دیگر مطابق رابطه گریفیث [۲۸] ترک‌هایی که از انقباض ایجاد می‌شوند بسیار کوچک‌تر از ترک‌هایی هستند که از نقص محدودکننده استحکام<sup>۱</sup> ایجاد می‌شوند.

شکل ۸ الگوهای پراش اشعه ایکس بعد از انجام آزمون شوک حرارتی را نشان می‌دهد همان طور که ملاحظه می‌شود هیچ گونه تغییر فازی در حین آزمون شوک حرارتی در پوشش دولایه YSZ/NiCrAlY رخ نداده است و زیرکونیا به صورت فاز تتراگونال پایدار می‌باشد؛ بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که ایجاد ترک‌ها در این نمونه طی سیکل‌های شوک حرارتی به علت اختلاف ضرایب انبساط حرارتی بین لایه میانی فیزی و لایه YSZ و تنش‌های حاصل از رشد لایه TGO می‌باشد (شکل ۸ الف). همچنین برای پوشش‌های سد حرارتی سه لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY و گرادینانی Mullite/YSZ پیک‌های با شدت بالا از مولایت دیده می‌شود و همچنین پیک‌های با شدت کم از آلومینا پس از آزمون شوک حرارتی مشاهده می‌شود.



شکل (۸): آنالیز فازی مربوط به پوشش سد حرارتی: الف) پوشش سد حرارتی YSZ/NiCrAlY، ب) پوشش سد حرارتی لایه‌ای از Mullite/YSZ/NiCrAlY و ج) پوشش سد حرارتی گرادینانی از Mullite/YSZ.

نتایج آنالیز عنصری از سطوح نمونه‌ها بعد از انجام فرآیند شوک حرارتی در شکل ۹ آورده شده است. مشاهده می‌شود

[۶] J. A. Haynes, E. Douglas Rigney, M. K. Ferber & W. D. Porter, "Oxidation and degradation of a plasma-sprayed thermal barrier coating system", *Surface and Coatings Technology*, vol. ۸۶-۸۷, pp. ۱۰۲-۱۰۸, ۱۹۹۶.

[۷] M. Mayoral, J. Andrés, M. T. Bona, V. Higuera & F. Belzunce, "Yttria stabilized zirconia corrosion destabilization followed by Raman mapping", *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۲, pp. ۵۲۱۰-۵۲۱۶, ۲۰۰۸.

[۸] G. Di Girolamo, C. Blasi, L. Pilloni & M. Schioppa, "Microstructural and thermal properties of plasma sprayed mullite coatings," *Ceramics International*, vol. ۳۶, pp. ۱۳۸۹-۱۳۹۵, ۲۰۱۰.

[۹] S. Seifert, E. Litovsky, J. I. Kleiman & R. B. Heimann, "Thermal resistance and apparent thermal conductivity of thin plasma-sprayed mullite coatings", *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۰, pp. ۳۴۰۴-۳۴۱۰, ۲۰۰۶.

[۱۰] J. Berghaus & B. R. Marple, "High-Velocity Oxy-Fuel (HVOF) Suspension Spraying of Mullite Coatings", *Journal of Thermal Spray Technology - J Therm Spray Technol*, vol. ۱۷, pp. ۶۷۱-۶۷۸, ۲۰۰۸.

[۱۱] A. Samuli, "Modified tick thermal barrier coatings", Ph.D. Dissertation, Institute of Materials Science, ۲۰۰۴.

[۱۲] H. Jamali, R. Mozafarinia, R. Razavi & R. Ahmadi-Pidani, "Comparison of thermal shock resistances of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings", *Ceramics International*, vol. ۳۸, pp. ۶۷۰۵-۶۷۱۲, ۲۰۱۲.

[۱۳] L. Wang, Y. Wang, X. G. Sun, J. Q. He, Z. Y. Pan & C. H. Wang, "Thermal shock behavior of  $\lambda$ YSZ and double-ceramic-layer  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7/\lambda\text{YSZ}$  thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying", *Ceramics International*, vol. ۳۸, pp. ۳۵۹۵-۳۶۰۶, ۲۰۱۲.

[۱۴] A. Khan & J. Lu, "Thermal Cyclic Behavior of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings

Mullite/YSZ/NiCrAlY می‌باشد. طول عمر پوشش لایه‌ای Mullite/YSZ/NiCrAlY بعد از آزمون شوک حرارتی از پوشش گرادیانی Mullite/YSZ و پوشش YSZ/NiCrAlY بیشتر می‌باشد. عمر بیشتر پوشش سه لایه‌ای به دلیل کاهش نفوذ اکسیژن و کاهش سرعت رشد لایه TGO در این پوشش نسبت به سایر پوشش‌های معرفی شده می‌باشد.

## سپاسگزاری

نگارندگان مقاله از حمایت‌های معنوی و مالی پژوهشگاه مواد و انرژی و کارشناسان آزمایشگاه مرکزی این پژوهشگاه، جهت کمک فنی، گردآوری داده‌ها و تفسیر نتایج قدردانی و تشکر می‌نمایند.

## ۵- مراجع

[1] G. Meetham, "Mechanisms for increasing high temperature capability", Part B of 'requirements for and Design', vol. ۹, pp. ۳۰۸-۳۱۷, ۱۹۸۸.

[۲] م. م. خرمی راد؛ م. ر. رحیمی پور؛ س. م. م. هادوی و ک. شیروانی جوزانی، "سنتر پودر هگزا آلومینات لانتانیم ( $\text{LaMgAl}_{11}\text{O}_{19}$ ) به منظور پوشش دهی به روش پلاسما اسپری بر روی سوپر آلیاژ پایه نیکل به عنوان پوشش سد حرارتی"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۲، شماره ۳، صفحه ۱۸۳-۱۷۳، آذر ۱۳۹۷.

[۳] س. ت. رمضانی؛ ض. والفی و ن. احسانی، "بررسی خواص اکسیداسیون و شوک حرارتی پوشش سپرحرارتی کامپوزیتی  $\text{YSZ}/\text{Al}_2\text{O}_3$  با آلومینای ایجاد شده با فرایند پاشش حرارتی محلول پیش ماده"، فصلنامه فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، دوره ۱۴، شماره ۴، صفحه ۹۰-۷۷، دی ۱۳۹۹.

[۴] W. Ma, S. Gong, H. Li & H. Xu, "Novel Thermal Barrier Coatings Based on  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7/\lambda\text{YSZ}$  Double-Ceramic-Layer Systems Deposited by Electron Beam Physical Vapor Deposition", *Surface and Coatings Technology*, vol. ۲۰۲, pp. ۲۷۰۴-۲۷۰۸, ۲۰۰۸.

[۵] H. Vakilifard, R. Ghasemi & M. Rahimpour, "Hot corrosion behaviour of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings in the presence of  $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{V}_2\text{O}_5$  molten salt", *Surface and Coatings Technology*, vol. ۳۲۶, ۲۰۱۷.

duty gas turbines", Coatings, vol. 10, pp. 1022-1041, 2020.

[24] R. Ahmadi-Pidani, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia & H. Jamali, "Improving the thermal shock resistance of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings by laser surface modification", Optics and Lasers in Engineering, vol. 50, pp. 78-786, 2012.

[25] Y. Bai, Z. H. Han, H. Q. Li, C. Xu, Y. L. Xu, C. H. Ding & et al, "Structure-property differences between supersonic and conventional atmospheric plasma sprayed zirconia thermal barrier coatings", Surface and Coatings Technology, vol. 205, pp. 3833-3839, 2011.

[26] M. Li, X. Sun, W. Hu & H. Guan, "Thermocyclic behavior of sputtered NiCrAlY/EB-PVD 7 wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> thermal barrier coatings", Surface and Coatings Technology, vol. 200, pp. 3770-3774, 2006.

[27] R. Ahmadi-Pidani, R. Shoja-Razavi, R. Mozafarinia & H. Jamali, "Laser surface modification of plasma sprayed CYSZ thermal barrier coatings", Ceramics International, vol. 39, pp. 2473-2480, 2013.

[28] H. Samadi & E. Garcia, "Thermal conductivity of plasma sprayed forsterite/mullite coatings", Ceramics International, vol. 40, pp. 13995-13999, 2014.

[29] P. Ramaswamy, S. Seetharamu, K. Verma, N. Raman & K. Rao, "Thermomechanical fatigue characterization of zirconia (8%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub>) and mullite thermal barrier coatings on diesel engine components: Effect of coatings on engine performance", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, vol. 214, pp. 729-742, 05/01 2000.

## ۶- پی نوشت

[1] Air Plasma Spray (APS)

[2] Electron-Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD)

Sprayed on Stainless Steel Substrates", Surface and Coatings Technology, vol. 201, pp. 4653-4658, 2007.

[15] H. Xu & H. Guo, "Thermal barrier coatings", Woodhead Publishing, 2011.

[16] S. Bose, "High temperature coatings: Butterworth-Heinemann Ltd," 2007.

[17] H. Jamali, R. Mozafarinia, R. Razavi, R. Ahmadi-Pidani & M. Loghman-Estarki, "Fabrication and Evaluation of Plasma-Sprayed Nanostructured and Conventional YSZ Thermal Barrier Coatings", Current Nanoscience, vol. 8, pp. 402-409, 2012.

[18] X. H. Zhong, Y. M. Wang, Z. H. Xu, Y. F. Zhang, J. F. Zhang & X. Q. Cao, "Hot-corrosion behaviors of overlay-clad yttria-stabilized zirconia coatings in contact with vanadate-sulfate salts", Journal of the European Ceramic Society, vol. 30, pp. 1401-1408, 2010.

[19] D. W. Parker, "Thermal barrier coatings for gas turbines, automotive engines and diesel equipment", Materials & Design, vol. 13, pp. 345-351, 1992.

[20] F. H. Yuan, Z. X. Chen, Z. W. Huang, Z. G. Wang & S. J. Zhu, "Oxidation behavior of thermal barrier coatings with HVOF and detonation-sprayed NiCrAlY bondcoats", Corrosion Science, vol. 50, pp. 1608-1617, 2008.

[21] R. Srinivasan, R. DeAngelis, G. Ice, S. Simpson, J. Harris & B. Davis, "Identification of tetragonal and cubic structures of zirconia", Technical Report, Jun. 1989 - May 1990 Utah Univ, Salt Lake City. Dept. of Chemistry, 1990.

[22] S. Li, X. Zhao, G. Hou, W. Deng, Y. An, H. Zhou & et al, "Thermomechanical properties and thermal cycle resistance of plasma-sprayed mullite coating and mullite/zirconia composite coatings", Ceramics International, vol. 42, pp. 17447-17455, 2016.

[23] F. Xie, D. Li, & W. Zhang, "Long-term failure mechanisms of thermal barrier coatings in heavy-

[۸] Threshold

[۹] Binary

[۱۰] Strength-Limiting Defect

[۳] High-Velocity Oxy Fuel (HVOF)

[۴] Chemical Vapor Deposition (CVD)

[۵] X Ray Diffraction (XRD)

[۶] Scanning Electron Microscope (SEM)

[۷] Energy Dispersion Spectroscopy (EDS)