



تحلیل میکروساختاری و ارزیابی خواص مکانیکی پوشش‌های سد حرارتی حاصل از پودرهای میکرو و نانو CeYSZ در شرایط اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C

ساجده بین‌آبادی^۱، میلاد بهامیریان^{*۱}

۱. گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

پژوهش حاضر با هدف مقایسه خواص پوشش‌های سد حرارتی حاصل از پودرهای میکرو و نانو اندازه ۲۴ wt% CeYSZ: ZrO₂ - 2.5 wt% Y₂O₃ انجام شده است. بر این اساس دو پوشش سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ به روش پاشش پلاسما روی زیرلایه‌های IN738LC و با لایه فلزی CoNiCrAlY ایجاد شدند. از نانو پودر CeYSZ تولید شده به روش سل-زل و از پودر میکرونی تجاری CeYSZ به ترتیب برای ایجاد پوشش‌های سد حرارتی نانو و میکرو CeYSZ استفاده شد. اکسیداسیون ایزوترم به مدت ۵۰ ساعت برای بررسی رفتار دما بالای پوشش‌های سد حرارتی نانو و میکرو CeYSZ در نظر گرفته شد. قبل و بعد از آزمون اکسیداسیون، خواص پوشش‌های سد حرارتی نانو و میکرو CeYSZ به کمک آنالیز پراش پرتو ایکس، میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدانی و آزمون‌های نانو فرورفتگی و دیلاتومتری بررسی شدند. وجود ذرات نانو اندازه در پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ منجر به افزایش مقاومت به اکسیداسیون آن نسبت به پوشش سد حرارتی دیگر شد. معیار $\eta = W_p / W_t$ (۰/۸۰۳)، پارامتر ضریب انبساط حرارتی ($12 \times 10^{-6} K^{-1}$) و درصد تخلخل (۱۰-۸ درصد) محاسبه شده، تاییدی بر بهبود خواص پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ نسبت به پوشش سد حرارتی میکرونی CeYSZ ($\eta = 0.689$, $10 \times 10^{-6} K^{-1}$, and 15-17% porosity) در نظر گرفته شد. همچنین از نظر پایداری فازی پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ شرایط بهتری حین اکسیداسیون تجربه کرد.

واژگان کلیدی:

پوشش‌های سد حرارتی
CeYSZ
اکسیداسیون ایزوترم
آزمون نانو فرورفتگی
خواص مکانیکی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۹/۶

DOI: 10.22034/ISSST.2024.719089

Microstructural analysis and evaluation of the mechanical properties of thermal barrier coatings derived from micro- and nano- CeYSZ powders under oxidation conditions at 1100 °C

Abstract

The present research aims to compare the properties of micro- and nano thermal barrier coatings (TBCs) made of CeYSZ: ZrO₂ - 24 wt% CeO₂ - 2.5 wt% Y₂O₃ powders. Accordingly, two types of TBCs, micro- and nano CeYSZ, were created using atmospheric plasma spraying technique on IN738LC substrates containing a CoNiCrAlY metallic bond coat. The nanopowder of CeYSZ was produced via the sol-gel method, while commercial micron-sized CeYSZ powder was used to fabricate the microstructured coatings. Isothermal oxidation was conducted for 50 hours to investigate the high-temperature behavior of both nano- and micro CeYSZ TBCs. The properties of the coatings were analyzed before and after the oxidation tests using X-ray diffraction, field emission scanning electron microscopy, nanoindentation tests, and dilatometry. The presence of nano-sized particles in the nano- CeYSZ coating resulted in enhanced oxidation resistance compared to the micro- CeYSZ coating. The calculated parameters, including the ratio $\eta = W_p / W_t$ (0.803), thermal expansion coefficient ($12 \times 10^{-6} K^{-1}$), and porosity percentage (8-10%), confirmed the improved properties of the nano- CeYSZ coating over the micro- CeYSZ ($\eta = 0.689$, $10 \times 10^{-6} K^{-1}$, and 15-17% porosity). Additionally, in terms of phase stability, the nano- CeYSZ TBC exhibited better performance during oxidation compared to the micro- CeYSZ TBC.

Keywords: Thermal barrier coatings, CeYSZ, Isothermal oxidation, Nanoindentation test, Mechanical properties.

* Corresponding author E-mail: m.bahamirian@yazd.ac.ir

۱- مقدمه

پوشش‌های سد حرارتی در حال حاضر برای افزایش عمر مفید اجزای بخش داغ که در محیط‌های سخت عملکردی از نظر دما و انواع تنش‌های حرارتی-مکانیکی در موتورهای توربینی و دیزلی (زمینی و هوایی) کار می‌کنند، استفاده می‌شوند. مشهورترین ماده مورد استفاده به عنوان پوشش سد حرارتی در این سیستم‌ها، زیرکونیای پایدار شده با ایتریا (YSZ: $ZrO_2-8wt.\% Y_2O_3$) است [۱].

شرایط سخت عملیاتی بخش داغ موتورهای توربینی می‌تواند باعث افت عملکرد پوشش‌های سد حرارتی مرسوم YSZ شود. به همین دلیل ارتقاء عملکرد پوشش‌های سد حرارتی یکی از مهمترین زمینه‌های تحقیقاتی محققین این حوزه است [۲].

از میان ترکیب‌های مختلفی که در سال‌های اخیر برای جایگزینی پوشش‌های سد حرارتی مرسوم YSZ مورد بررسی قرار گرفته‌اند، زیرکونیای پایدار شده با سریا و ایتریا با ترکیب $(CeYSZ: ZrO_2 - 24 wt\% CeO_2 - 2.5 wt\% Y_2O_3)$ به دلیل ایجاد شرایط عملکردی دما بالای مناسب، توجه ویژه‌ای به خود جلب کرده است. مشخص شده است که پوشش‌های سد حرارتی CeYSZ دارای پایداری فازی و مقاومت به شوک حرارتی بالاتری نسبت به YSZ هستند. همچنین، مقاومت به خوردگی داغ بهتر نسبت به پوشش YSZ از جمله ویژگی‌های بارز این ماده است [۳-۶].

پوشش‌های سد حرارتی CeYSZ اگرچه دارای شرایط مناسبی از نظر عملکردی در دمای بالا هستند ولی نقاط ضعفی همچون زینرینگ تشدید شده در دماهای بالا به همراه افت خواص مکانیکی گریبان گیر این ترکیب است [۷].

استفاده از مواد نانو ساختار یک رویکرد امیدوارکننده برای ساخت پوشش‌های سد حرارتی مدرن برای بهبود کارایی موتورهای توربینی است. در سال‌های اخیر، پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار مبتنی بر زیرکونیاهای پایدار شده به دلیل برخی از خواص بهبود یافته‌ای که دارند و در

نمونه‌های مرسوم یافت نمی‌شوند، مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. رابطه تجربی هال-پیچ نشان می‌دهد که استحکام مکانیکی مواد زمانی که اندازه دانه از حالت معمولی به مقیاس نانو اندازه کاهش یابد می‌تواند به طور قابل توجهی افزایش پیدا کند [۸]. برای مثال، از نظر عملکرد سایش، محققین [۹] دریافتند که میزان سایش پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیایی نانو ساختار تحت بارهای بین ۲۰ تا ۵۰ نیوتن تا ۴/۵ برابر کمتر از پوشش‌های زیرکونیایی معمولی (میکرونی) است. نرخ سایش کمتر پوشش‌های نانو ساختار احتمالاً به بهبود میکروسختی و ساختار پیوسته تر آن‌ها نسبت داده می‌شود. به طور همزمان، مقاومت در برابر سایش با سختی ماده افزایش می‌یابد. از نظر سختی و استحکام، میکروسختی پوشش زیرکونیایی نانو ساختار با ترکیب YSZ، ۸/۶ گیگا پاسکال است که حدود ۱/۶ برابر پوشش‌های مرسوم (میکرونی) YSZ است. اشاره شده است که پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار با خلوص بالا، تخلخل کمتر (و با توزیع یکنواخت تری) از خود نشان می‌دهند و بنابراین خواص مکانیکی بهتری دارند [۱۰].

از نظر عملکرد حرارتی، میزان نفوذ حرارتی پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار YSZ $(0.3-0.5 mm^2/s)$ تا ۶۰٪ از پوشش‌های میکرونی $(0.5-0.7 mm^2/s)$ کمتر است [۱۱].

مشخصات ریزساختاری و خواص عایق‌کنندگی حرارتی دو پوشش سد حرارتی با ترکیب یکسان در یک پژوهش مقایسه شد. نتایج این پژوهش [۹] نشان داد که ساختار پوشش‌های سد حرارتی سرامیکی میکرونی به صورت انباشته شدن ذرات روی یکدیگر به صورت لایه-لایه است، این در حالی است که پوشش نانو ساختار، ریزساختاری دو مدلی متشکل از نواحی کاملاً ذوب شده، نیمه ذوب و کاملاً ذوب نشده (نانوذرات باقی مانده در بسر پوشش) را نشان می‌دهد. وجود ذرات کاملاً ذوب نشده نانو اندازه منجر به ایجاد ویژگی‌های نانو تکنولوژیکی سودمند در پوشش‌های سد حرارتی می‌شود.

مناسب برای پاشش پودرها به کمک دستگاه‌های پاشش حرارتی می‌شوند [۱۵].
در پژوهش حاضر بررسی ویژگی‌های دو پوشش سد حرارتی حاصل از پودرهای میکرونی و نانو اندازه زیرکونیایی پایدار شده با سریا و ایتریا با ترکیب CeYSZ مد نظر قرار گرفته است. پودر تجاری Metco 205 NS با ترکیب CeYSZ و پودر سنتز (به روش سل - ژل) و گرانول شده (به کمک خشک‌کن پاششی) با ترکیب مشابه برای تولید پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ استفاده شدند. از اکسیداسیون ایزوترم در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۵۰ ساعت برای بررسی و مقایسه خواص دما بالای آن‌ها استفاده شد. در نهایت دو گروه پوشش سد حرارتی از نظر خواص میکروساختاری، فازی و مکانیکی مقایسه شدند.

۲- روش تحقیق

در پژوهش حاضر از دو پودر میکرونی تجاری Amdry 9951 (با ترکیب Co 32Ni 21Cr 8Al 0.5Y) و Metco 205 NS (با ترکیب CeYSZ) به همراه نانو پودر سنتزی (سنتز شده به روش سل - ژل) با ترکیب CeYSZ برای تولید پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ استفاده شد. فرایند سنتز سل - ژل بر مبنای پژوهش قبلی انجام شد [۱۴]. گرانول سازی نانو پودر سنتزی برای ایجاد شرایط لازم برای فرایند پاشش پلاسماای اتمسفری توسط دستگاه خشک‌کن پاششی و با پارامترهای عملیاتی اصلی نظیر دمای هوای درون محفظه، نرخ جریان ورودی هوا و سوسپانسیون و همچنین سرعت چرخش اتمایزر به ترتیب برابر با ۱۴۰ °C، ۴/۵ lit/h، ۱ Kg/h و ۱۰۰۰۰ rpm انجام شد.

پوشش‌های مورد نظر در این پژوهش (میکرو و نانو CeYSZ) توسط فرآیند پاشش پلاسماای اتمسفری و با استفاده از دستگاه Sulzer-Metco F4 Plasma Spray Gun روی زیرلایه‌های دیسکی-شکل IN738LC (با مشخصات

پوشش‌های سد حرارتی زیرکونیایی نانو ساختار با ترکیب YSZ با افزایش ۵۳ درصدی عایق کنندگی حرارتی در دمای ۱۱۰۰ °C نسبت به پوشش‌های سد حرارتی میکرونی، اثر عایق کنندگی بهتری دارند. پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار از نظر تحمل سیکل‌های حرارتی نیز شرایط مناسبی ارائه می‌کنند. نانو ذرات و ریزترک‌های توزیع شده به طور یکنواخت در پوشش‌های نانو ساختار نه تنها منجر به رسانایی حرارتی کم می‌شوند، بلکه افزایش طول عمر سیکل‌های حرارتی را نیز ایجاد می‌کنند [۸، ۹، ۱۲، ۱۳].

پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار امروزه به دو روش ایجاد می‌شوند. استفاده از (۱) روش‌های پوشش دهی جدید و (۲) بکارگیری پودرهای نانو اندازه به کمک روش‌های مرسوم پوشش دهی دو فرایند متنوع در ساخت پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار است. دو دیدگاه مختلف به عنوان رقیب یکدیگر مزایا و معایبی نسبت به یکدیگر دارند. اگرچه بررسی فراوانی مقاله‌های چاپ شده در این زمینه نشان می‌دهد که روش دوم یعنی بکارگیری پودرهای نانو اندازه به کمک روش‌های مرسوم مانند روش‌های پاشش حرارتی، روشی کاربردی تر در تولید پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار است. در این فرایند با تغییر و بهینه سازی برخی از پارامترهای روش‌های پاشش حرارتی امکان پوشش دهی پودرهای نانو سایز را فراهم می‌کنند [۸].

امروزه روش‌های متنوعی برای دست یابی به پودرهای سرامیکی نانو اندازه وجود دارد. روش‌های مکانیکی (آسیاب کاری مکانیکی)، شیمی تر (همرسوبی، سل-ژل و ...)، سنتز خود احتراقی و ... از جمله مهمترین این روش‌ها هستند. در بین روش‌های مذکور روش سل-ژل روشی موثر و مقرون به صرفه در تولید نانو ذرات سرامیکی با خلوص بالا و توانایی کنترل ترکیب‌های پیچیده است [۱۴].
در همه روش‌های مذکور نانو پودرهای تولیدی با یک فرایند ثانویه به کمک خشک‌کن‌های پاششی گرانول سازی می‌شوند. این فرایند منجر به ایجاد مورفولوژی و سیالیت

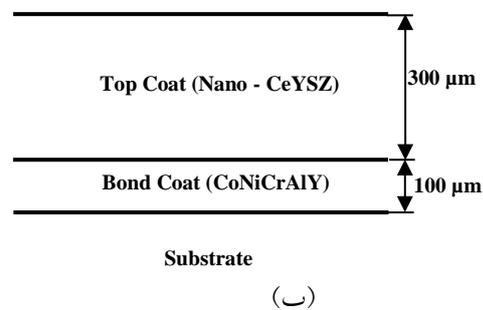
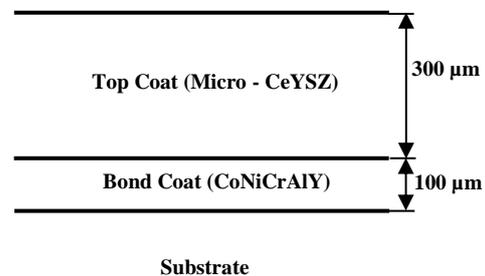
جدول ۱) به ترتیب به قطر و ضخامت ۲/۵ و ۰/۵ سانتیمتر (شکل ۱) با لایه CoNiCrAlY ایجاد شدند.

جدول ۲. پارامترهای مورد استفاده در فرایند پاشش پلاسمای اتمسفری در پژوهش حاضر

پارامتر	لایه‌های سرامیکی CeYSZ	لایه فلزی CoNiCrAlY
Current (A)	۶۲۰	۶۰۰
Voltage (V)	۶۳	۶۰
Primary gas, Ar (l/min)	۳۰	۵۵
Secondary gas, H ₂ (l/min)	۹	۹/۵
Carrier gas, Ar (l/min)	۳	۴/۲
Spray distance (mm)	۱۱۰	۱۴۰
Powder feed rate (g/min)	۱۸	۵۰
Wheel rotation speed (rpm)	۱۰۰	۱۰۰
Traverse speed (rpm)	۱	۱

جدول ۱. مشخصات سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC مورد استفاده در پژوهش حاضر

ترکیب	Wt.%	ترکیب	Wt.%
Ni	۷۴	Ti	۰/۸
Cr	۱۴/۵	C	۰/۰۵
Mo	۴/۲	B	۰/۰۱۲
Al	۶/۳	Zr	۰/۱



شکل ۱. شماتیک لایه نشانی در پوشش‌های سد حرارتی (الف) میکرو و (ب) نانو CeYSZ.

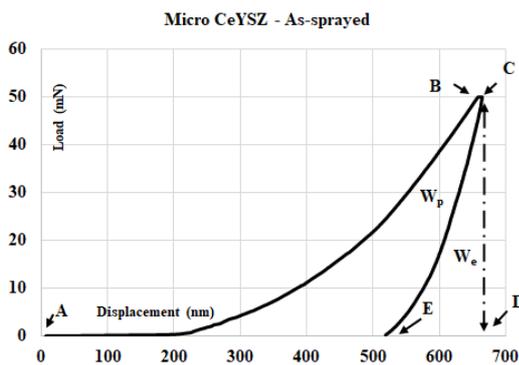
رفتار اکسیداسیون ایزوترم در دمای ۱۱۰۰ °C به مدت ۵۰ ساعت و سرد کردن درون کوره مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت.

برای مشخصه یابی پوشش‌های سد حرارتی (قبل و بعد از اعمال سیکل اکسیداسیون) از آنالیزهای ارائه شده در جدول ۳ استفاده شد.

نانو فروفتگی یک آزمایش رایج برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی پوشش‌ها است. با این حال، بیشتر مطالعات روی نتایج نانو سختی و مدول الاستیک تمرکز دارند و تحلیل عمیق کمی از منحنی بار-جابجایی پوشش‌ها، به‌ویژه کار فرورفتگی وجود دارد. در منحنی بار - جابجایی، سه فرآیند شامل بارگذاری، نگهداری بار و تخلیه وجود دارد. کل فرآیندها شامل تغییر شکل الاستیک و پلاستیک پوشش است. انرژی انباشته شده پوشش در طول تغییر شکل الاستیک و انرژی تلف شده در طول تغییر شکل پلاستیک را می‌توان توسط منحنی بار-جابجایی ارزیابی کرد. انرژی تلف شده مربوط به تغییر شکل

قبل از پوشش دهی، سطح نمونه‌ها توسط ذرات آلومینا با دانه بندی ۵۰-۸۰ مش و با فشار ۴۰-۵۰ psi تحت عملیات ذره پاشی قرار گرفته و اکسیدهای سطحی حذف شدند. سپس پیش گرم کردن آن‌ها در دمای ۶۰-۱۰۰ °C انجام گرفت. از آرگون (Ar) به عنوان گاز اولیه پلاسمای و از هیدروژن (H₂) به عنوان گاز ثانویه استفاده شد. پارامترهای مورد استفاده برای پوشش دهی هر لایه از پوشش‌های سد حرارتی در جدول ۲ ارائه شده است.

شده + انباشته شده) نشان‌دهنده‌ی کارایی پوشش در مدیریت انرژی ناشی از بارگذاری خارجی است. بنابراین افزایش یا کاهش این نسبت (انرژی تلف شده به کل انرژی) متناسب با مقاومت یا عدم مقاومت ماده نسبت به سایش و فرسایش خواهد بود [۱۶-۱۸]. در شکل ۲ (که تصویر یکی از منحنی‌های بار-جابجایی پژوهش حاضر است) کار الاستیک (W_e) می‌تواند توسط مساحتی که توسط منحنی بار برداری و محور طولی (مساحت لبه‌های منحنی ECDE) بسته شده است نمایان شود. کار پلاستیک (W_p) می‌تواند توسط مساحتی که توسط منحنی بارگذاری-تخلیه (مساحت لبه‌های منحنی ABCEA) بسته شده است، نمایان شود. این روش که برای محاسبه کار الاستیک و پلاستیک حاصل از منحنی بار - جابجایی است در پژوهش‌های دیگر نیز گزارش شده است [۱۷].



شکل ۲. نحوه تعیین پارامترهای کار الاستیک و پلاستیک در منحنی بار-جابجایی.

کل کار ناشی از اثر فرورفتگی فرو رونده توسط معادله (۱) بیان می‌شود.

$$W_t = \int_0^{h_{max}} P(h) dh \quad (1)$$

در معادله (۱)، W_t کل کار فرورفتگی، $P(h)$ تابعی از بار اعمال شده و تغییر آن با تغییر عمق نفوذ و h_{max} حداکثر عمق نفوذ است.

کار الاستیک ناشی از فرورفتگی فرو رونده به کمک معادله (۲) قابل محاسبه است.

$$W_e = \int_{hr}^{h_{max}} P(h) dh \quad (2)$$

پلاستیک پوشش است که نشان‌دهنده‌ی میزان آسیب‌پذیری پوشش در برابر سایش است.

جدول ۳. مشخصات تجهیزات مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام دستگاه	مدل	پارامترهای مورد استفاده
------------	-----	-------------------------

HV = 25.00 kV

Vac mode: High vacuum		
-----------------------	--	--

$2\theta = 10 - 80^\circ$
Step size = 0.01
Time per step = 0.5 s
 $\lambda \text{ Cu}(k\alpha) = 1.540598 \text{ \AA}$
40 kV , 40 mA

پراش پرتو ایکس
Philips X'pert X-ray diffraction

Heating rate: 10 °C/min	BÄHR-Dilatometer DIL80X, GmbH, Germany	دیلاتومتری
-------------------------	--	------------

Max load: 50.00 mN

Loading rate: 25.00 mN/min

Unloading rate: 25.00 mN/min

Pause: 10.0 s

* هر یک از داده‌های گزارش شده میانگینی از نتایج ۵ اثر فرورونده (روی سطح مقطع پولیش شده) برای هر گروه پوشش با خطای ۵ درصد است.

انرژی انباشته شده به تغییر شکل الاستیک مربوط می‌شود و نشان‌دهنده‌ی توانایی پوشش در جذب و توزیع بارهای مکانیکی است. نسبت انرژی تلف شده به کل انرژی (تلف

در معادله (۲)، W_e کار فرورفتگی الاستیک و h_f عمق نفوذ باقی‌مانده در طول فرآیند بار برداری است.

کار پلاستیک (W_p) به کمک معادله (۳) قابل محاسبه است.

$$W_p = W_t - W_e \quad ۳$$

در نهایت پارامتر $\eta = W_p / W_t$ معیاری از مقاومت ماده نسبت به سایش و فرسایش است. هرچه این پارامتر بزرگتر باشد ماده مورد بررسی دارای مقاومت به سایش و فرسایش بالاتری است [۱۸].

۳- نتایج و بحث

بر اساس پارامترهای ارائه شده در پژوهش قبلی [۱۴] از روش سل - ژل برای سنتز نانو پودر CeYSZ و انتخاب دما و زمان عملیات حرارتی 1100°C و ۳ ساعت استفاده شد. در شکل ۳ نتایج آنالیز کیفی و کمی پراش پرتو ایکس آن ارائه شده است. همانطور که از شکل ۳ مشخص است تک فاز زیرکونیای تتراگونال در طیف پراش ترکیب CeYSZ قابل شناسایی است.

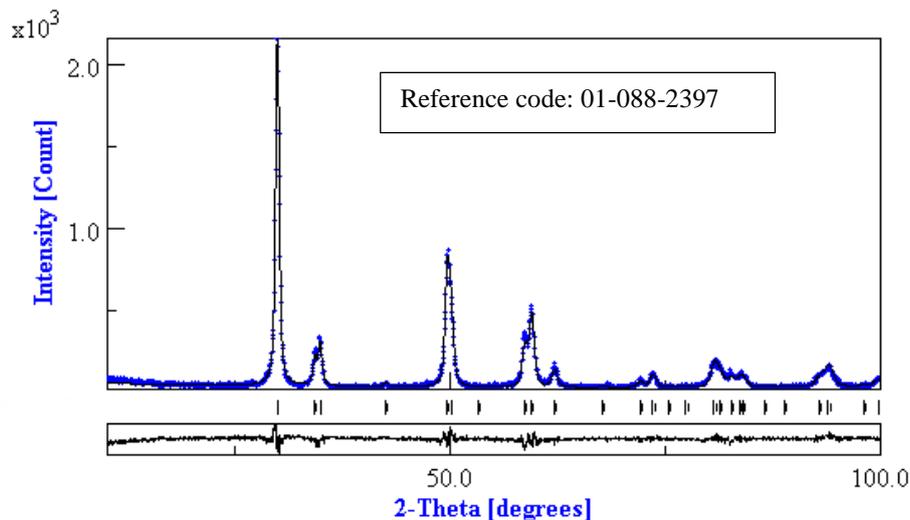
زیرکونیای پایدار شده در فرم ساختاری تتراگونال به دو صورت (۱) زیرکونیای تتراگونال غیر استحالیه پذیر (T)-پرایم) و (۲) زیرکونیای تتراگونال استحالیه پذیر (T) امکان تشکیل دارد. T-پرایم از نظر کریستالوگرافیکی مشابه T بوده با این تفاوت که نسبت پارامترهای شبکه c/a کمتری دارد. از جمله ویژگی‌های چنین ساختاری عدم تبدیل استحالیه فازی زیرکونیای تتراگونال به مونوکلینیک در طی سیکل‌های حرارتی در محدوده دمایی 1100°C است. علاوه بر این، T-پرایم خواص مکانیکی بهتر و هدایت

حرارتی کمتری نسبت به سایر فازهای زیرکونیا از جمله T دارد و به همین دلیل تمرکز و تمایل محققین و شرکت‌های فعال در زمینه پوشش قطعات بخش داغ صنایع توربینی به تشکیل و دست‌یابی به فاز زیرکونیای T-پرایم است [۱۹]. تتراگونالیتیه ($c/a\sqrt{2}$) پارامتری مهم در تشخیص پایداری فازهای T و T-پرایم زیرکونیا است. زیرکونیای T-پرایم و T با در نظر گرفتن مقادیر تتراگونالیتیه از یکدیگر قابل تفکیک هستند. بر اساس گزارش محققین [۱۹] اگر مقدار تتراگونالیتیه از $1/0.1$ کمتر باشد فاز T-پرایم پایدار بوده و در صورتی که مقدار آن از $1/0.1$ بیشتر باشد زیرکونیای با فاز T پایدار خواهد بود. با توجه به اینکه مقدار تتراگونالیتیه محاسبه شده در شکل ۳ برای ترکیب CeYSZ (تقریباً برابر با $1/0.03$) از مقدار $1/0.1$ کمتر محاسبه شد، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که فاز تشکیل شده در این حالت T-پرایم است. در جدول ۴ نیز مقادیر فاکتورهای محاسباتی روش ریتولد گزارش شده از نرم افزار Materials Analysis Using Diffraction (MAUD) ارائه شده است.

جدول ۴. فاکتورهای محاسباتی روش ریتولد گزارش شده از نرم

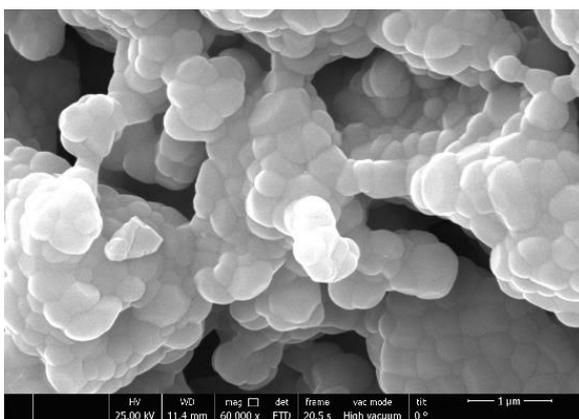
افزار MAUD مرتبط با شکل ۳

فاکتورهای ریفرانس	مشخصات نانو پودر CeYSZ
Sig= 1.4	اندازه بلورک: ۳۱ nm
$R_w (\%) = 10.4$	پارامترهای شبکه تتراگونال:
$R_{wnb} (\%, \text{no bkg}) = 12.3$	$a = 3.64 \text{ \AA}$
$R_b (\%) = 11.4$	$c = 5.16 \text{ \AA}$
$R_{exp} (\%) = 11.9$	

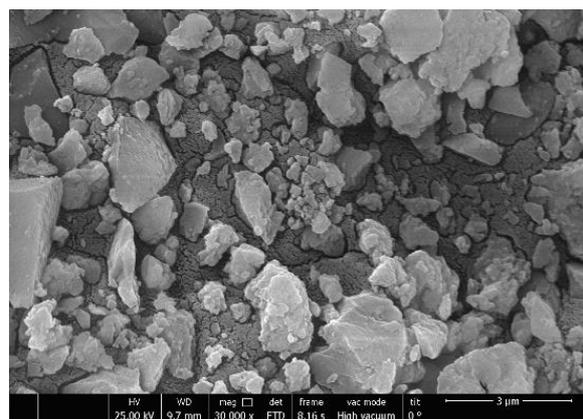


شکل ۳. آنالیز ریترولد پراش پرتو ایکس مربوط به نانو پودر CeYSZ سنتز شده توسط روش سل - ژل پس از کلسیناسیون در دمای ۱۱۰۰ °C و به مدت ۳ ساعت.

نظر به اینکه هدف از سنتز نانو پودر CeYSZ بکارگیری آن به عنوان پوشش سد حرارتی و با استفاده از روش پاشش پلاسمای اتمسفری است بنابراین فراهم کردن ذراتی با مورفولوژی کروی و در محدوده اندازه ۱۰۰-۲۰۰ [۸] میکرومتر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در ریزساختار پوشش‌های سد حرارتی وجود نواحی کاملاً ذوب شده، ناقص ذوب شده و کاملاً ذوب نشده می‌تواند به کاهش هدایت حرارتی و افزایش عمر پوشش‌های سد حرارتی کمک کند. به همین منظور تلاش در بکارگیری ذراتی با محدوده اندازه ۱۰۰-۲۰۰ میکرومتر از این نظریه نشأت می‌گیرد. ذرات ریز حین عبور از قوس پلازما و در برخورد با زیرلایه ساختارهای کاملاً ذوب شده، ذرات متوسط نواحی ناقص ذوب شده و ذرات بزرگ نواحی کاملاً ذوب نشده را ایجاد می‌کنند. وجود چنین ساختاری منجر به ایجاد تخلخل‌ها و میکرو تخلخل‌هایی بهینه در ریزساختار پوشش‌های سد حرارتی می‌شود. حبس هوا در چنین ریزساختاری منجر به کاهش هدایت حرارتی خواهد شد [۸].



(ب)



(الف)

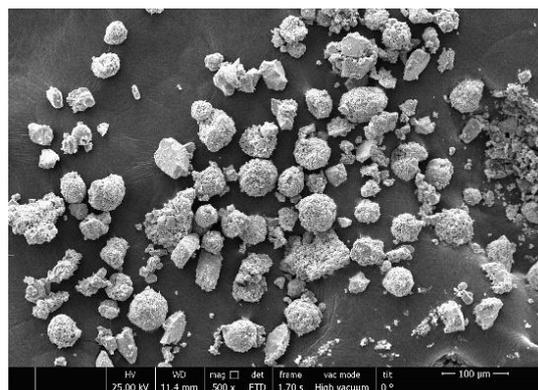
شکل ۴. تصاویر FESEM مربوط به نانو ذرات CeYSZ در دو بزرگنمایی (الف) ۳۰ و (ب) ۶۰ هزار برابر پس از کلسیناسیون در دمای ۱۱۰۰ °C و به مدت ۳ ساعت.

هر دو پوشش میکرو و نانو CeYSZ با تخلخل‌های ایجاد شده ناشی از روش پاشش پلاسمای اتمسفری است. همچنین میکرو ترک‌هایی در بستر پوشش لایه سرامیکی که از جمله ویژگی‌های مرسوم پوشش‌های سد حرارتی تولید شده به روش پاشش پلاسمای اتمسفری است [۷]، دیده می‌شود.

در تکنیک پاشش پلاسمای اتمسفری از انرژی حرارتی یک جت پلاسمای برای ذوب و پرتاب مواد با سرعت بالا روی زیرلایه استفاده می‌شود. ذرات پودر طی گذر از میان جت پلاسمای در سه فرم (۱) کاملاً ذوب شده (معمولاً ذرات با اندازه ریز)، (۲) کاملاً ذوب نشده (معمولاً ذرات با اندازه درشت) و (۳) نیمه مذاب (معمولاً ذرات با اندازه متوسط) با سرعت زیاد و به صورت اتفاقی به سمت زیرلایه پرتاب می‌شوند. این ذرات در برخورد با زیرلایه به شکل اسپلت می‌شوند. با سرعت سرد شدن بسیار زیاد کوئچ می‌شوند. طی فرآیند رسوب دهی، آخرین اسپلت به اسپلت قبلی برخورد کرده و دچار کرنش مومسان می‌شود. از آنجاییکه هر اسپلت با اسپلت مجاور، همپوشانی کامل ندارد، بین اسپلت‌ها تخلخل تشکیل می‌شود [۲۰]. مقدار تخلخل لایه‌های مختلف از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ به طور تقریبی و با کمک نرم افزار ImageJ از سطح مقطع تصاویر FESEM اندازه گیری شد. بر این اساس لایه CoNiCrAlY دارای ۳-۵ درصد، لایه میکرو CeYSZ دارای ۱۷-۱۵ درصد و لایه نانو CeYSZ دارای ۱۰-۸ درصد تخلخل هستند.

تشکیل میکرو ترک‌ها در ریز ساختار لایه‌های سرامیکی به تنش‌های پسماند ایجاد شده طی فرآیند رسوب دهی نسبت داده می‌شوند. ذرات رسوب کرده تنش پسماند بالایی دارند. انقباض ذراتی که از حالت مذاب به حالت اسپلت‌های جامد در دمای اتاق کوئچ شده‌اند و عدم انطباق ضریب انبساط حرارتی لایه‌های سرامیکی و فلزی، دو منبع تولید تنش هستند. به منظور آزاد شدن این تنش‌ها، ترک‌هایی در اسپلت‌های ترد سرامیکی به وجود می‌آید [۲۱-۲۳].

روش سنتز سل - ژل اگرچه روشی سودمند در دست یابی به ترکیب‌های پیچیده با خلوص بالا است اما از طرفی منجر به تشکیل ذرات با مورفولوژی کروی و ایجاد سیالیت بالا نمی‌شود [۱۴]. در شکل ۴ مورفولوژی نانو ذرات CeYSZ سنتز شده به روش سل - ژل (با اندازه بلورک‌های ۳۱ nm، گزارش شده در شکل ۳) توسط تصویر FESEM ارائه شده است. بررسی شکل ۴ بیانگر تشکیل ذراتی با شکل‌های غیر منظم (ماهیت روش سنتز سل-ژل [۱۴]) است. به همین منظور و برای دست یابی به ذراتی با مورفولوژی کروی که قابلیت پاشش توسط دستگاه اسپری درایر استفاده شد. در شکل ۵ مورفولوژی ذرات CeYSZ پس از گرانول سازی به کمک اسپری درایر ارائه شده است.



شکل ۵. تصویر FESEM از نانو ذرات CeYSZ اسپری درایر شده با مورفولوژی کروی.

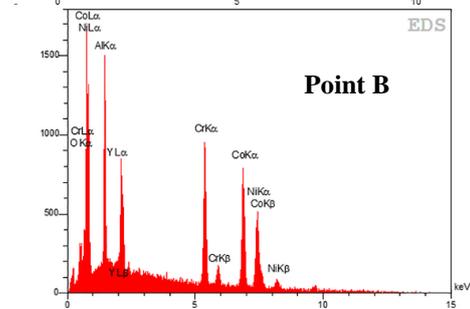
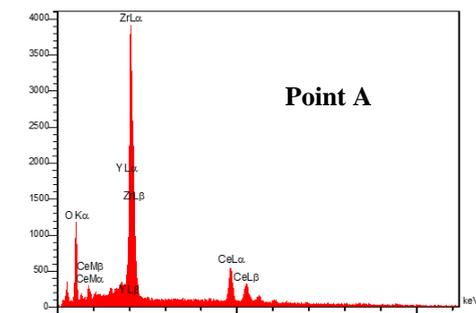
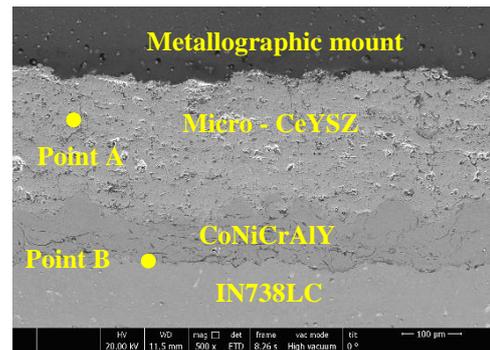
شکل ۶ بیانگر تصاویر FESEM به همراه آنالیز EDS از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ اعمال شده به روش پاشش پلاسمای اتمسفری روی IN738LC/CoNiCrAlY است.

تصاویر سطح مقطع دو پوشش میکرو و نانو CeYSZ بیانگر وجود زیرلایه و لایه فلزی CoNiCrAlY به همراه یک لایه بالایی مشخص است. ضخامت لایه‌های فلزی CoNiCrAlY و سرامیکی CeYSZ به ترتیب در محدوده ۱۰۰ و ۳۰۰ میکرومتر به صورت مشابه در دو پوشش میکرو و نانو CeYSZ هستند. لایه سرامیکی (لایه بالایی)

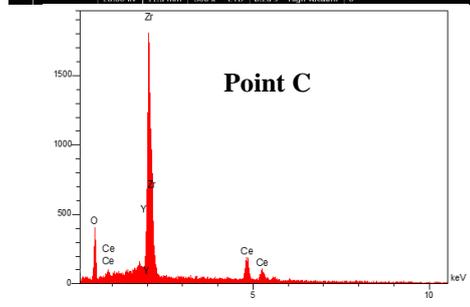
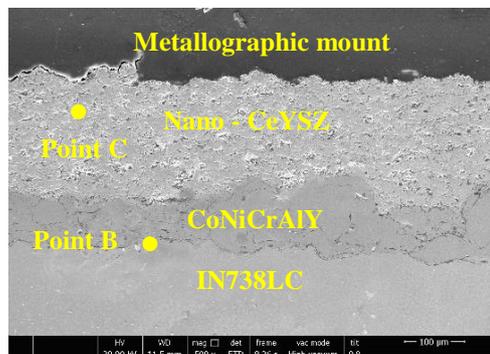
دو دیدگاه کلی در مورد ریزساختار پوشش‌های سد حرارتی ایجاد شده به روش پاشش پلاسمای اتمسفری وجود دارد [۲۴، ۲۵]:

(الف) در دیدگاه اول وجود میکروتُرک‌ها و تخلخل‌هایی با مقدار و توزیع بهینه در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی به عنوان مزیت مطرح هستند. وجود میکروتُرک‌ها و تخلخل‌ها (به دلیل حبس هوا) از یک طرف منجر به کاهش هدایت حرارتی سیستم شده و از طرف دیگر حین سیکل‌های حرارتی منجر به ایجاد شرایط برای انقباض و انقباض هم‌هنگام لایه‌های پوشش می‌شوند. وجود میکروتُرک‌ها و تخلخل‌های بهینه منجر به کاهش تشکیل تنش‌های ایجاد شده در فصل مشترک دو لایه سرامیکی بالایی و فلزی CoNiCrAlY ناشی از انقباض و انقباض ناهم‌هنگام این دو لایه حین سیکل‌های حرارتی می‌شود.

(ب) در دیدگاه دوم وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها در لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی به عنوان چالشی مهم مطرح است. وجود تخلخل‌ها و میکروتُرک‌ها به عنوان مراکز آسان نفوذ اکسیژن به سمت فصل مشترک لایه‌های فلزی CoNiCrAlY و سرامیکی بالایی شده و منجر به رشد نابهنجار لایه اکسیدی مشهور به TGO (Thermally grown oxide) خواهد شد. رشد نابهنجار لایه TGO باعث ایجاد مراکز تمرکز تنش در فصل مشترک لایه‌های فلزی CoNiCrAlY و سرامیکی بالایی شده و در نهایت سبب تخریب زودهنگام پوشش‌های سد حرارتی می‌شود. با تشکیل لایه TGO اگرچه مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ پوشش‌های سد حرارتی افزایش می‌یابد اما رشد افراطی این لایه منجر به تهی شدن عناصری مانند Al و Cr در لایه فلزی CoNiCrAlY شده و در نهایت منجر به تخریب سیستم می‌شود. بنابراین تشکیل لایه TGO با ترکیب Al_2O_3 با ضخامتی بهینه و نرخ رشدی کم می‌تواند به افزایش عمر پوشش‌های سد حرارتی کمک کند و در غیر این صورت منجر به کاهش عمر سیستم خواهد شد [۳]. در شکل ۷ نتایج پراش پرتو ایکس از لایه بالایی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ ارائه شده



(الف)

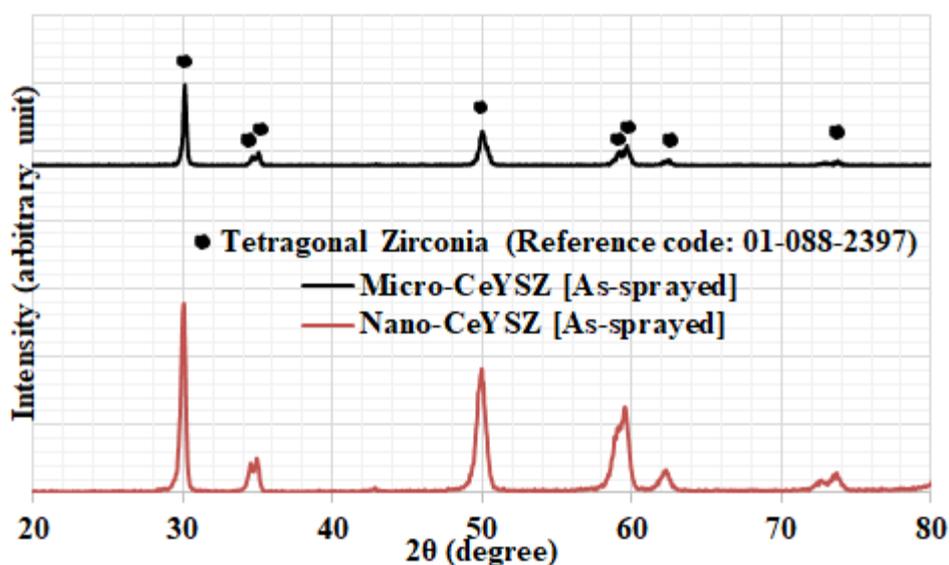


(ب)

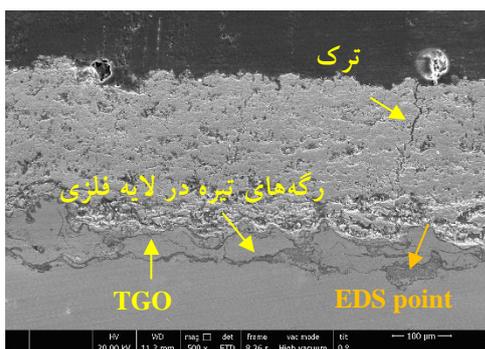
شکل ۶. تصاویر FESEM به همراه آنالیز EDS از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی (الف) میکرو و (ب) نانو CeYSZ.

هستیم که بر اساس نظریه شرر [۲۶] قابل تفسیر است. این نظریه بیان می‌کند که کاهش اندازه بلورک منجر به افزایش پهنای پیک در آنالیز پراش پرتو ایکس خواهد شد. شکل ۸ بیانگر تصاویر FESEM از سطح مقطع پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ پس از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C است.

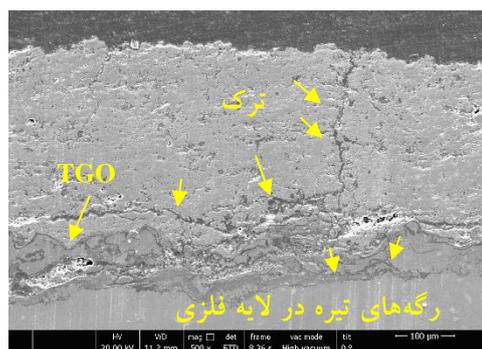
است. بررسی نتایج طیف پراش پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ بیانگر تشکیل پوشش‌هایی با کیفیت و بدون هر گونه فاز ناخالصی است. تشکیل زیرکونیای تتراگونال تنها فاز شناسایی شده در دو طیف پراش پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ است. در طیف پراش ارائه شده در شکل ۷ برای نمونه میکرو CeYSZ شاهد پهنای کمتر عرض پیک‌ها نسبت به نمونه نانو CeYSZ



شکل ۷. نتایج پراش پرتو ایکس از لایه بالایی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ



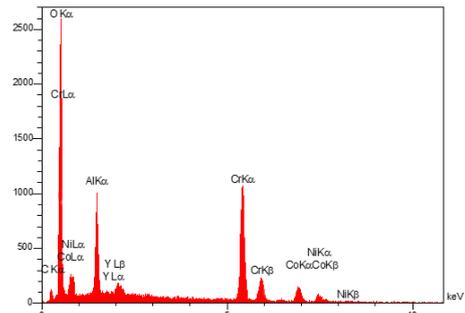
(ب)



(الف)

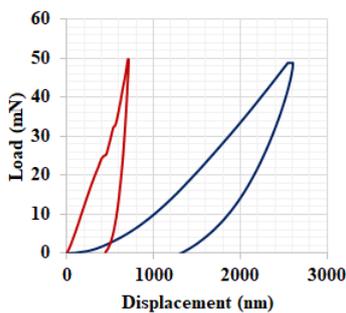
شکل ۸. تصاویر FESEM از سطح مقطع پوشش سد حرارتی (الف) میکرو و (ب) نانو CeYSZ پس از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C.

افزایش یافته است. این پدیده می‌تواند ناشی از تشکیل اکسیدهای مخرب اسپینلی (Ni/Cr)-O و لایه TGO با ترکیب آلومینا باشد که با افزایش حجم نیز همراه هستند [۲۷-۲۹]. افزایش حجم اکسیدهای مذکور سبب ایجاد تنش‌های فشاری شده و مدول الاستیک را افزایش می‌دهد، به علاوه فازهای اکسیدی (به ویژه آلومینا) خود از مدول الاستیک بالاتری برخوردارند [۲۸]. در پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ نیز شرایط به همین ترتیب (البته با شیب تغییرات کمتر از ۲۲ GPa به ۵۱۰ GPa) است. این پدیده احتمالاً ناشی از نفوذ کمتر اکسیژن و در نتیجه تشکیل مقادیر کمتر اسپینل‌های (Ni/Cr)-O است. همچنین تشکیل لایه TGO با ضخامت کمتر می‌تواند منجر به کاهش رشد مدول الاستیک لایه CoNiCrAlY شده باشد.

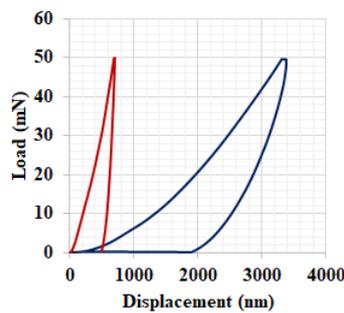


شکل ۹. آنالیز EDS از نقطه مشخص شده در شکل ۸ (ب).

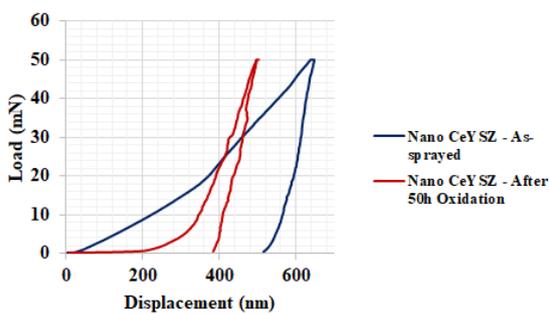
در شکل ۱۰ منحنی‌های بار - جابجایی لایه‌های مختلف پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ قبل و بعد از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C به کمک روش نانو فرورفتگی ارائه شده است. مدول الاستیک لایه CoNiCrAlY در پوشش میکرو CeYSZ بعد از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C از ۲۰ GPa به ۵۱۶ GPa



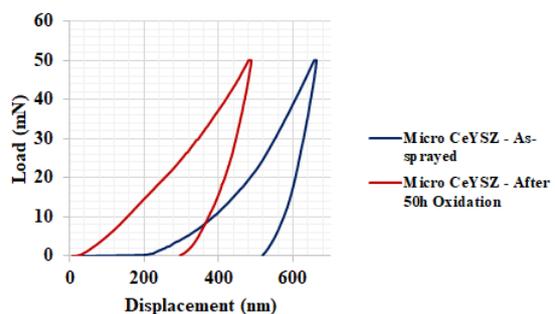
(ب)



(الف)



(ت)



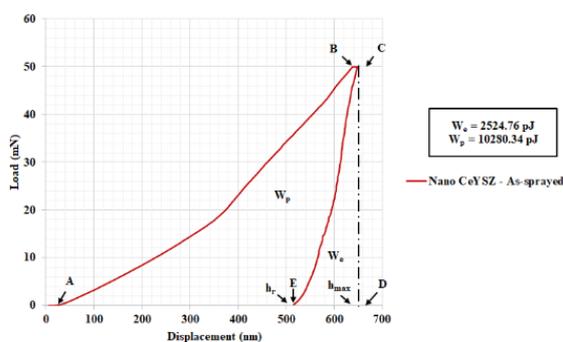
(پ)

شکل ۱۰. منحنی بار - جابجایی لایه‌های (الف و ب) فلزی CoNiCrAlY و (پ و ت) سرامیکی CeYSZ پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ قبل و بعد از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای ۱۱۰۰ °C.

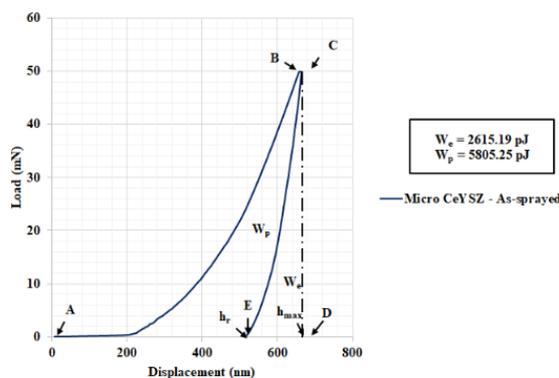
در دمای ۱۱۰۰ °C به ترتیب از ۷۶۴ GPa به ۸۵۰ GPa و از ۶۹۵ GPa به ۹۳۰ GPa افزایش یافته است.

مدول الاستیک لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ قبل و بعد از ۵۰ ساعت اکسیداسیون

به طور دقیق تر بررسی شده است. سختی لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ به ترتیب ۴۱ GPa و ۴۴ GPa پس از پوشش دهی (قبل از اعمال سیکل اکسیداسیون) گزارش شده است. همچنین پارامتر η $= W_p / W_t$ که معیاری از مقاومت ماده نسبت به سایش است به ترتیب برای پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ برابر با ۰/۶۸۹ و ۰/۸۰۳ محاسبه شد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱. منحنی بار - جابجایی لایه CeYSZ در پوشش‌های سد حرارتی (الف) میکرو و (ب) نانو CeYSZ.

W_e منعکس کننده انباشت انرژی است، در حالی که W_p منعکس کننده اتلاف انرژی است. اگرچه پارامتر W_e به ریزساختار پوشش وابسته نیست اما پارامتر W_p به ریزساختار هر یک از پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ وابسته است [۱۶، ۱۷].

از یک طرف، نانو ذرات می‌توانند چقرمگی پوشش نانو CeYSZ را بهبود بخشند. از طرف دیگر، تحت شرایط سایش یکسان، اتلاف انرژی پوشش حاصل از پودر نانو اندازه بیشتر از پوشش حاصل از پودر میکرونی است. بنابراین، کار تورفتگی پلاستیک پوشش نانو CeYSZ بزرگتر از پوشش میکرو CeYSZ است.

بسیاری از مطالعات [۱۷] نشان داده‌اند که دانه‌های ریزتر، به‌ویژه نانو ذرات، چه در اثر سایش لغزشی و چه در اثر فرسایش، مقاومت بهتری از خود نشان می‌دهند.

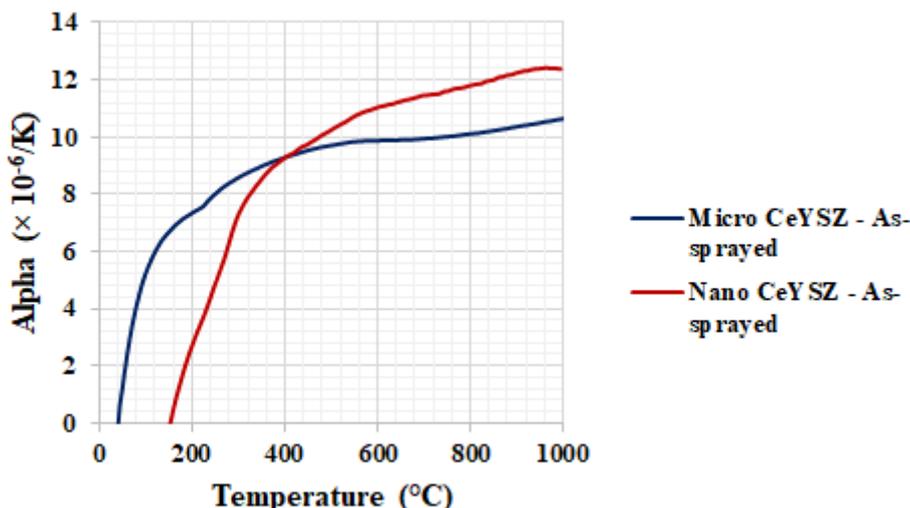
مدول الاستیک پوشش‌های سرامیکی سد حرارتی بعد از اکسیداسیون می‌تواند متأثر از رشد دانه و زیتترینگ لایه سرامیکی باشد. به نظر می‌رسد که علت افزایش مدول الاستیک، ایجاد گلوئی‌هایی به هم پیوسته در دانه‌ها و در نهایت ایجاد پیوند قوی‌تر بین اسپلت‌ها باشد. این نظریه در نتایج سایر محققین [۱۷، ۳۰] نیز اشاره شده است.

در شکل ۱۱ منحنی‌های نانو فرورفتگی مربوط به لایه CeYSZ در پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ

مقاومت به سایش هر ماده، به ویژه پوشش‌ها، عمدتاً به انرژی انباشته شده روی سطح و انرژی تلف شده در هنگام تغییر شکل بستگی دارد [۱۶، ۱۷، ۳۱]. روش نانو فرورفتگی یک آزمایش رایج برای تجزیه و تحلیل خواص مکانیکی پوشش‌های سد حرارتی است. با این حال، بیشتر مطالعات روی نتایج نانو سختی و مدول الاستیک تمرکز دارند و تحلیل عمیق کمی از منحنی‌های بار - جابجایی پوشش‌ها، به‌ویژه کار فرورفتگی وجود دارد. از منحنی‌های بار - جابجایی، سه فرآیند شامل بارگذاری، نگهداری بار و تخلیه وجود دارد. کل فرآیند شامل تغییر شکل الاستیک و پلاستیک پوشش است. انرژی انباشته شده سطح پوشش در طول تغییر شکل الاستیک و انرژی تلف شده در طول تغییر شکل پلاستیک را می‌توان توسط منحنی‌های بار - جابجایی ارزیابی کرد.

سد حرارتی میکرو CeYSZ مقاومت به فرسایش بهتری با توجه به η بیشتر دارند. در شکل ۱۲ تغییرات ضرایب انبساط حرارتی لایه میکرو و نانو CeYSZ محاسبه شده توسط دستگاه دیلاتومتری ارائه شده است.

پوشش‌های نانو سرامیکی می‌تواند زمان لازم برای تغییر مکانیزم از سایش با سرعت پایین به سایش با سرعت بالا را افزایش دهند. تغییر شکل پلاستیک نقش مهمی در فرآیند سایش با سرعت پایین دارد. بنابراین بر اساس نتایج پژوهش حاضر (شکل ۱۱) می‌توان پیش‌بینی کرد که پوشش‌های سد حرارتی نانو CeYSZ نسبت به پوشش‌های



شکل ۱۲. تغییرات ضریب انبساط حرارتی مربوط به لایه‌های میکرو و نانو CeYSZ در محدوده دمایی ۲۵-۱۰۰۰°C.

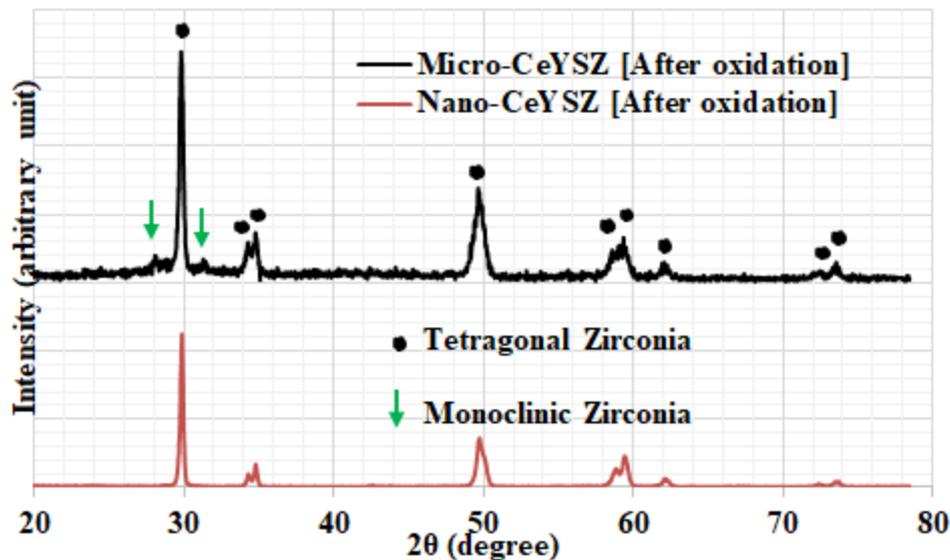
منحنی دیلاتومتری پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ ایجاد شده است. نتایج آزمون دیلاتومتری همراستا با نتایج آنالیز فازی پوشش‌های نانو CeYSZ (شکل ۱۳)، بیانگر عدم انجام هر گونه استحاله مخرب ناشی از تغییرات حجم احتمالی ساختارهای مختلف بلوری زیرکونیا در پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ است. همچنین وجود پیک‌هایی هر چند محدود از زیرکونیای مونوکلینیک در طیف پراش ارائه شده در شکل ۱۳ مربوط به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ می‌تواند همراستا با تغییر شیب رخ داده در منحنی دیلاتومتری ناشی از شروع انجام استحاله مخرب زیرکونیای تتراگونال به مونوکلینیک باشد. بر اساس گزارش سایر محققین این استحاله در سیکل‌های دمایی بالاتر منجر به ایجاد تغییرات حجمی [۱] در پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ شده و در تسریع تخریب این پوشش حین اکسیداسیون موثر است.

افزایش ضریب انبساط حرارتی لایه نانو CeYSZ نسبت به لایه میکرو CeYSZ در دماهای ۴۰۰-۱۰۰۰ °C مشهود است. بالاتر بودن مقدار عددی ضریب انبساط حرارتی و در نتیجه هماهنگی بیشتر این لایه از نظر ضریب انبساط حرارتی با پوشش لایه فلزی CoNiCrAlY و زیرلایه منجر به بهبود عملکرد سیستم در سیکل‌های حرارتی اعمالی خواهد شد. توضیح اینکه ضرایب انبساط حرارتی لایه فلزی CoNiCrAlY و IN738LC به ترتیب برابر با $10^{-6} K^{-1}$ و $13 \times 10^{-6} K^{-1}$ است [۱].

منحنی انبساط حرارتی لایه سرامیکی پوشش‌های سد حرارتی نانو CeYSZ در طی گرمایش و در محدوده دماهای ۴۰۰-۱۰۰۰ °C تقریباً رفتار خطی با شیبی افزایشی از خود نشان می‌دهند، بنابراین به نظر می‌رسد که تغییر فازی در این پوشش حین گرمایش ایجاد نمی‌شود. این در حالی است که در این محدوده دمایی تغییر شیبی اندک در

حرارتی نانو CeYSZ حین اعمال سیکل‌های حرارتی است. اگرچه تغییرات فازی اندک در پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ و تشکیل زیرکونیای منوکلینیک قابل مشاهده است.

در شکل ۱۳ نتایج آنالیز فازی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ پس از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای °C ۱۱۰۰ ارائه شده است. این نتایج بیانگر وجود پایداری فازی بالا (عدم تشکیل هرگونه فاز جدید پس از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای °C ۱۱۰۰) در پوشش سد



شکل ۱۳. نتایج پراش پرتو ایکس از لایه بالایی پوشش‌های سد حرارتی میکرو و نانو CeYSZ پس از ۵۰ ساعت اکسیداسیون در دمای °C ۱۱۰۰.

- نانو پودر CeYSZ سنتز و کلسینه شده به روش سل - ژل در دمای °C ۱۰۰۰ پس از ۳ ساعت از نظر فازی با زیرکونیای تتراگونال غیر استحاله پذیر با اندازه بلورک ۳۱ nm مشخصه یابی شد.
- از نظر میکرو ساختاری پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ دارای تخلخل‌هایی به مراتب کمتر نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ است.
- بر اساس پارامتر $\eta = W_p / W_t$ که معیاری از مقاومت ماده نسبت به سایش و فرسایش ماده حاص از آزمون نانو فرورفتگی است، پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ دارای η بیشتر، و در نتیجه دارای عملکرد بهتری نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ است.
- ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های نانو و میکرو CeYSZ به ترتیب $12 \times 10^{-6} K^{-1}$ و $10 \times 10^{-6} K^{-1}$ به کمک آزمون دیلاتومتری محاسبه شدند. در نتیجه پوشش سد

بنابراین به عنوان جمع بندی می‌توان بیان کرد که پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ تولید شده از پودر سنتز شده به روش سل - ژل نه تنها از نظر خواص مکانیکی و ضریب انبساط حرارتی برتری‌هایی نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ دارد بلکه از نظر پایداری فازی نیز عملکرد قابل دفاعی نسبت به پوشش سد حرارتی تولید شده از پودر تجاری Metco 205NS دارد.

۴- نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف مقایسه خواص فازی، ساختاری و مکانیکی پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ با پوشش سد حرارتی میکرونی تجاری با ترکیب مشابه حین اکسیداسیون ایزوترم در دمای °C ۱۱۰۰ پس از ۵۰ ساعت است. مهمترین نتایج حاصل از این پژوهش عبارتند از:

مینزیم-آلومینوسیلیکات،" نشریه علوم و مهندسی سطح، ۱۵، (۱۳۹۸)، ۲۵-۱۵.

[7] A. Keyvani, M. Bahamirian, and A. Kobayashi, "Effect of sintering rate on the porous microstructural, mechanical and thermomechanical properties of YSZ and CSZ TBC coatings undergoing thermal cycling," *Journal of Alloys and Compounds*, 727, (2017), 1057-1066.

[8] R. S. Lima and B. R. Marple, "Thermal spray coatings engineered from nanostructured ceramic agglomerated powders for structural, thermal barrier and biomedical applications: a review," *Journal of Thermal Spray Technology*, 16, (2007), 40-63.

[9] R. S. Lima, A. Kucuk, and C. Berndt, "Bimodal distribution of mechanical properties on plasma sprayed nanostructured partially stabilized zirconia," *Materials Science and Engineering: A*, 327, (2002), 224-232.

[10] A. Keyvani, M. Saremi, and M. H. Sohi, "An investigation on oxidation, hot corrosion and mechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ coatings," *Surface and Coatings Technology*, 206, (2011), 208-216.

[11] J. Wu, H.-b. Guo, L. Zhou, L. Wang, and S.-k. Gong, "Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ," *Journal of Thermal Spray Technology*, 19, (2010), 1186-1194.

[12] L. Chen, "Ytria-stabilized zirconia thermal barrier coatings—a review," *Surface Review and Letters*, 13, (2006), 535-544.

[13] G. V. Reddy, N. G. Rasu, M. M. J. Kumar, and T. H. Prasad, "Review on advanced alternative thermal barrier coatings (TBC's) materials in low heat rejection engines," *Int. J. Res. Mech. Eng. Technol*, (2016), 2-6.

[14] A. Keyvani, M. Bahamirian, and B. Esmaeili, "Sol-gel synthesis and characterization of ZrO_2 -25wt.% CeO_2 -2.5 wt.% Y_2O_3 (CYSZ) nanoparticles," *Ceramics International*, 46, (2020), 21284-21291.

[15] M. R. Loghman-Estarki et al., "Preparation of nanostructured YSZ granules by the spray drying method," *Ceramics International*, 40, (2014), 3721-3729.

[16] C. A. Schuh, "Nanoindentation studies of materials," *Materials today*, 9, (2006), 32-40.

[17] F. Zhou, S. Wang, B. Xu, Y. Wang, X. Zhang, and Y. Wang, "Nanomechanical properties of plasma-sprayed nanostructured and conventional 8YSZ thermal barrier coatings," *Ceramics International*, 48, (2022), 37483-37487.

[18] G. Fox-Rabinovich, S. Veldhuis, V. Scvortsov, L. S. Shuster, G. Dosbaeva, and M. Migranov, "Elastic and plastic work of indentation as a characteristic of wear behavior for cutting tools

حرارتی نانو CeYSZ ضریب انبساط حرارتی بهتری نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ از نظر هماهنگی با زیرلایه دارد.

• مقدار تغییر مدول الاستیک (به دلیل تشکیل لایه TGO با ضخامت بیشتر) در لایه فلزی $CoNiCrAlY$ پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ (از ۲۰ GPa به ۵۱۶ GPa) نسبت به پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ (از ۲۲ GPa به ۵۱۰ GPa) پس از ۵۰ ساعت عملیات حرارتی در دمای $1100^\circ C$ بیشتر است. بنابراین مقاومت به اکسیداسیون پوشش سد حرارتی نانو CeYSZ نسبت به پوشش سد حرارتی میکرو CeYSZ در محدوده دما و زمان مذکور بهتر است.

۵- مراجع

[1] X. Cao, R. Vassen, and D. Stöver, "Ceramic materials for thermal barrier coatings," *Journal of the European Ceramic Society*, 24, (2004), 1-10.

[2] R. Vassen, A. Stuke, and D. Stöver, "Recent developments in the field of thermal barrier coatings," *Journal of thermal spray technology*, 18, (2009) 181-186.

[3] M. Bahamirian, A. Keyvani, R. Irankhah, and M. Farvizi, "High-temperature cyclic oxidation of micro- and nano- ZrO_2 -25wt.% CeO_2 -2.5 wt.% Y_2O_3 thermal barrier coatings at $1300^\circ C$," *Surface and Coatings Technology*, 474, (2023), 130076.

[۴] م. رحیمی، ا. کیوانی و بهامیریان، "بررسی رفتار خوردگی پوشش سد حرارتی زیرکونیا - سریا - ایتریا - آلومینا - کاربید سیلیسیم در محیط سولفات سدیم - پنتا اکسید وانادیم (در معرض رسوب نمک $Na_2SO_4 \cdot V_2O_5$ در دمای $950^\circ C$ درجه سانتی‌گراد)،" نشریه علوم و مهندسی سطح، ۱۸، (۱۴۰۱)، ۴۷-۵۸.

[۵] ا. کیوانی، ع. زارعی نژاد، م. بهامیریان و ض. والفی، "بهبود رفتار دما بالای پوشش های سد حرارتی زیرکونیایی مرسوم به کمک پایدار کننده اکسید سریم،" نشریه علوم و مهندسی سطح، ۱۴، (۱۳۹۷)، ۱-۱۴.

[۶] ا. کیوانی، م. کریمی لنجی، م. احمدپور و م. بهامیریان، "بررسی رفتار خوردگی داغ پوشش های سد حرارتی تک لایه و دولایه زیرکونیایی در محیط کلسیم-

Properties, Patterns and Behaviours, 1, (2016), 121-144.

with nitride PVD coatings," *Thin Solid Films*, 469, (2004) 505-512, 2004.

[19] M. Bahamirian, "A Comparative Study on the Phase Stability of ZrO_2 -8 wt. % Y_2O_3 : Nano- and Micro-Particles," *Advanced Ceramics Progress*, 8, (2021), 53-60.

[20] Y. Zhou, H. Nan, Q. Zhang, C. Wang, Y. Qing, and Q. Chen, "Plasma sprayed TBCs with controlled intra-splat spherical pores and enhanced blocking of radiative heat transfer," *Journal of the European Ceramic Society*, 44, (2024), 3099-3111.

[21] S.-y. Qiu, Y.-C. Liu, H.-b. Guo, C.-G. Huang, Y. Ma, and C.-W. Wu, "Effect of splat-interface discontinuity on effective thermal conductivity of plasma sprayed thermal barrier coating," *Ceramics International*, 46, (2020), 4824-4831.

[22] R. Vaßen, M. O. Jarligo, T. Steinke, D. E. Mack, and D. Stöver, "Overview on advanced thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, 205, (2010) 938-942.

[23] M. Ahrens, R. Vaßen, and D. Stöver, "Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness," *Surface and Coatings Technology*, 161, (2002), 26-35.

[24] S. Bose and J. DeMasi-Marcin, "Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney," *Journal of thermal spray technology*, 6, (1997), 99-104.

[25] H. Grünling and W. Mannsmann, "Plasma sprayed thermal barrier coatings for industrial gas turbines: morphology, processing and properties," *Le Journal de Physique IV*, 3, (1993), C7-903-C7-912.

[26] A. Patterson, "The Scherrer formula for X-ray particle size determination," *Physical review*, 56, (1939) 978, 1939.

[27] K. M. Doleker, Y. Ozgurluk, and A. C. Karaoglanli, "TGO growth and kinetic study of single and double layered TBC systems," *Surface and Coatings Technology*, 415, (2021), 127135.

[28] S. Kyaw, A. Jones, and T. Hyde, "Predicting failure within TBC system: Finite element simulation of stress within TBC system as affected by sintering of APS TBC, geometry of substrate and creep of TGO," *Engineering Failure Analysis*, 27, (2013), 150-164.

[29] D. Balint, S.-S. Kim, Y.-F. Liu, R. Kitazawa, Y. Kagawa, and A. Evans, "Anisotropic TGO rumpling in EB-PVD thermal barrier coatings under in-phase thermomechanical loading," *Acta Materialia*, 59, (2011) 2544-2555.

[30] R. Vaßen, G. Kerkhoff, and D. Stöver, "Development of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings," *Materials Science and Engineering: A*, 303, (2001), 100-109.

[31] K. Fu, Y. Tang, and L. Chang, "Toughness assessment and fracture mechanism of brittle thin films under nano-indentation," *Fracture Mechanics-*