

# بررسی اتلاف حرارتی پوشش سد حرارتی نانو ساختار ساخته شده به روش EPD

حسین ملکی قلعه<sup>۱</sup>، حسین آفاجانی<sup>۲</sup>، محمود محمودی<sup>۳\*</sup>، محمد مهدی برجسته<sup>۴</sup>، حسین زمانی<sup>۴</sup>

۱- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران

۲- استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، گروه مهندسی مواد، دانشگاه تبریز، ایران

۳- کارشناس ارشد دانشگاه آزاد اسلامی، واحد شهر مجلسی، گروه مواد، اصفهان، ایران

۴- کارشناس ارشد، صنعت موتورهای توربینی، تهران، ایران

\* m.mahmoudi@iaumajlesi.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۶/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۹/۲۷)

## چکیده

امروزه پوشش‌های نانو ساختار مزیت‌های خود را بر پوشش‌های میکروساختار دیکته کرده‌اند. بعلاوه، موتورهای توربینی در کاربردهای مختلفی مانند صنایع انرژی مورد استفاده قرار گرفتند. به علت دمای کاری بالای موتورهای توربینی، میزان طول عمر پره‌های توربین کاهش می‌یابد که مهمترین عیب موتورهای توربینی محسوب می‌گردد. پوشش‌های سد حرارتی به عنوان یک تکنیک برای کاهش دمای پره‌های توربین مورد استفاده قرار می‌گیرد. در پژوهش حاضر پودر YSZ در ابعاد نانومتری و میکرومتری بعنوان لایه‌ی سد حرارتی به روش الکتروفوریتیک بر روی سوپر آلیاژ اینکونل LC-۷۱۳ پوشش داده‌شد. ارزیابی فازی و مورفولوژیکی مواد به ترتیب توسط پراش اشعه X، میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکوپ نوری انجام گردید. نتایج بیانگر برتری پوشش نانو از نظر مورفولوژیکی، سختی سطح و اتلاف حرارتی نسبت به پوشش با ساختار میکرون می‌باشد.

## واژه‌های کلیدی:

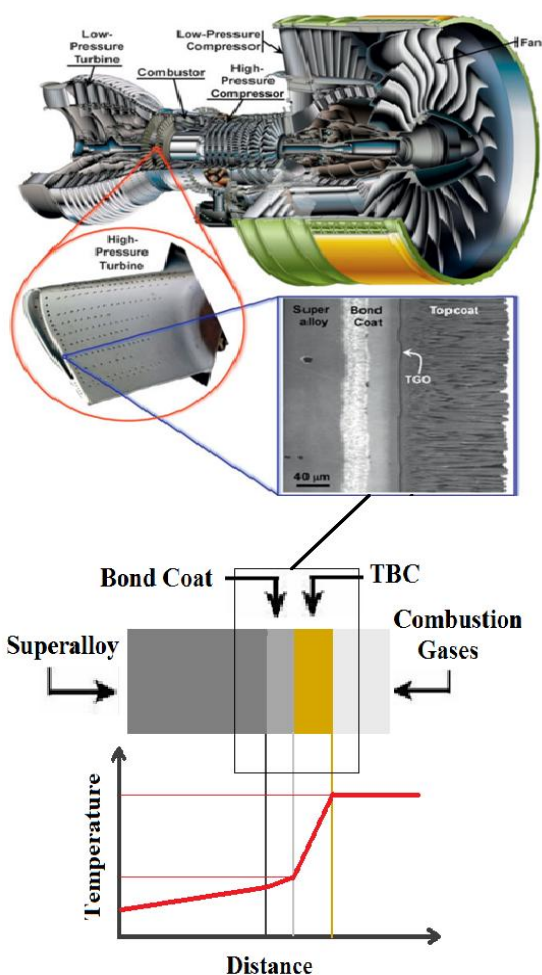
پره توربین، پوشش‌های سد حرارتی، ساختار نانو، اتلاف حرارتی.

## ۱- مقدمه

زمینه‌های علمی، به سمت تولید و توسعه محصولات با هزینه‌کمتر و در مقابل طول عمر بیشتر سوق می‌دهد. توربین‌های گازی و موتورهای دیزل از جمله پرکاربردترین

گسترش جمعیت و به موازات آن تقاضای بیشتر برای استفاده از انرژی از یک طرف و افزایش روز افزون هزینه تولید انرژی، شرایطی را ایجاد کرده است که تلاش محققین را در تمامی

مزایایی همچون سادگی تجهیزات، ارزان بودن، عدم محدودیت برای قطعاتی با اشکال پیچیده و امکان کنترل دقیق و آسان ضخامت مورد توجه قرار گرفته است [۸].

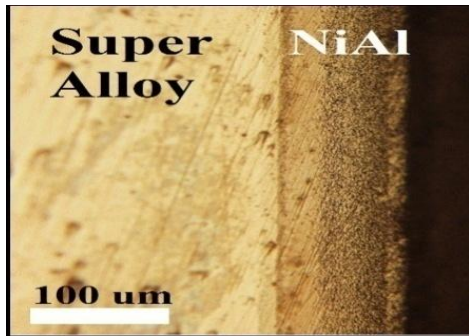


شکل (۱): شماتیکی از محفظه موتور توربینی و کاهش دمای سطح پره توربین با حضور پوشش محافظ حرارتی [۳].

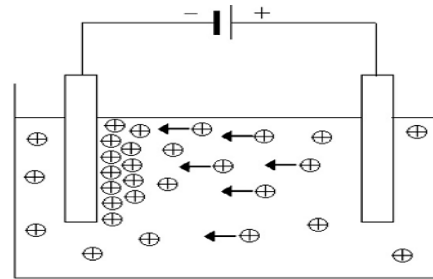
پوشش‌دهی الکتروفوریتیک یک روش کلوئیدی است که در آن پوشش‌های سرامیکی، با اعمال میدان الکتریکی، از سوسپانسیون پایدار کلوئیدی ایجاد می‌شود. میدان الکتریکی موجب می‌شود ذرات باردار الکتریکی به سمت الکترود با بار مخالف حرکت نموده و روی آن رسوب کنند (شکل (۲)) [۹].

تجهیزاتی هستند که به طور گسترده‌ای در تولید برق و موتور هوایما مورد استفاده قرار می‌گیرند. بنابراین هرگونه پیشرفت در بهینه‌سازی که منجر به کاهش مصرف سوخت و افزایش بازده آن‌ها شود، منجر به صرفه‌جویی خواهد شد [۱]. استفاده از پوشش‌های محافظ حرارت (TBC) در توربین‌های مصرفی در صنایع تولید برق و هوافضا باعث افزایش بازدهی آن‌ها به بیش از ۲ درصد می‌شود که این مقدار معادل ده‌ها میلیون دلار صرفه‌جویی در سال می‌باشد [۲]. پوشش‌های سد حرارتی از حدود سال ۱۹۸۰ میلادی مورد بررسی قرار گرفتند. پوشش‌های TBC، پوشش‌های سرامیکی‌اند که بر روی زیرلایه‌های فلزی مقاوم به حرارت مانند سوپر آلیاژها، پوشش‌دهی می‌گردند [۳]. اغلب سیستم‌های TBC شامل یک زیرلایه سوپر آلیاژی هستند که با یک پوشش واسط فلزی و یک لایه سرامیکی پوشش‌دهی می‌گردند [۳]. شکل (۱) شماتیکی از محفظه موتور توربینی و کاهش دمای سطح پره توربین با حضور پوشش واسط فلزی و TBC را نشان می‌دهد. از بین متعدد مواد سرامیکی، زیرکونیای پایدار شده با ۸٪ وزنی ایتریا (۸YSZ) با دارا بودن خواص مطلوب‌تری نسبت به دیگر ترکیبات بعنوان یک انتخاب برتر جهت TBC مطرح است [۴].

پوشش ۸YSZ نانو ساختار به دلیل ارتقا خواص فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی نسبت به پوشش با ساختار میکرون از جایگاه بالاتری برخوردار می‌باشد [۵]. با استفاده از پوشش نانو ساختار ۸YSZ دمای سطح پره توربین کاهش یافته و در نهایت طول عمر کاری پره افزایش می‌یابد [۵]. بمنظور اعمال پوشش TBC روش‌های متعددی به کار گرفته شده است که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به پاشش پلاسما و فرآیند رسوب‌نشانی از فاز بخار توسط پرتو الکترونی اشاره نمود [۶]. روش‌های پوشش‌دهی برای پوشش‌های سد حرارتی همچون روش تجاری پلاسما اسپری مشکلاتی اعم از هزینه بالای تجهیزات اولیه و کیفیت پایین پوشش سرامیکی حاصل (به دلیل لایه لایه شدن پوشش)، مراکز تحقیقاتی را در دنیا به دنبال ارزیابی روش‌های نوین و جایگزین واداشته است [۷]. در سال‌های اخیر روش EPD<sup>2</sup> به دلیل دارا بودن



شکل (۴): پوشش واسط آلومینایدی بر روی زیرلایه سوپرآلیاژ.



شکل (۲): شماتیکی از روش پوشش دهی EPD [۸].

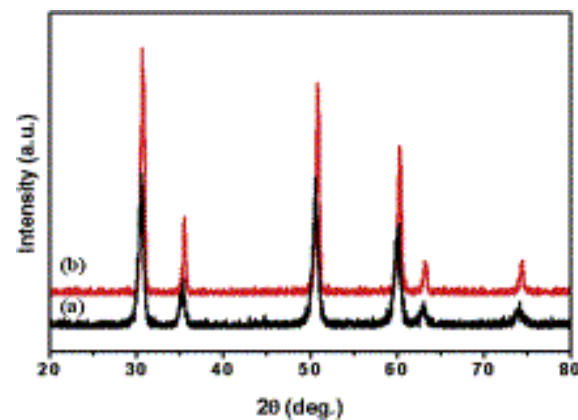
سوسپانسیون جهت پوشش دهی ذرات 8YSZ از حلال اتانول، استون و ترکیبی از هر دو انتخاب شد. پراکنده ساز بکار رفته ید، به میزان ۰/۶ گرم بر لیتر و تری اتانول آمین (TEA) به میزان ۱۰ ml/L می باشد. بمنظور پراکنده سازی ذرات جامد در سوسپانسیون، سوسپانسون به مدت ۲۴ ساعت بر روی همزن مغناطیسی و ۴ ساعت در پراکنده ساز اولتراسونیک قرار گرفت. سلول الکتروفوریتیک، از یک بشر ۱۵۰ mL مجهز به نگهدارنده (برای ثابت نگه داشتن موقعیت الکترودها)، فولاد زنگ نزن بعنوان آند با ابعاد  $۳ \times ۲ \times ۰/۲ \text{ cm}^3$  و نمونه اینکونل به قطر ۲ cm می باشد.

عملیات پوشش دهی الکتروفوریتیک در ولتاژ ۶۰ ولت با استفاده از منبع تغذیه و زمان ۱۲۰ ثانیه انجام گرفت. پس از پوشش دهی، نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت در هوا خشک شدند. عملیات تفجوشی در دمای  $۱۰۰۰^\circ\text{C}$  به مدت ۴ ساعت در اتمسفر هوا انجام گرفت. جهت بررسی مورفولوژی سطحی پوشش ها از میکروسکوپ نوری مدل olympus و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس از کشور هلند و آنالیز فازی پودر 8YSZ از  $\text{CuK}\alpha = 1.54\text{\AA}$  XRD ساخت شرکت فیلیپس استفاده شد. سختی نمونه ها توسط آزمون میکروسختی سنجی انجام گرفت. افت دما در طول سیستم پوشش سد حرارتی بعنوان معیاری از ظرفیت عایق سازی حرارتی پوشش با استفاده از روش کار جمالی و همکارانش انجام شد [۱۰].

در کار حاضر به بررسی تأثیر پارامتر شیمیایی (محیط پوشش دهی) بر کنترل کیفیت پوشش و همچنین مقایسه پوشش نانو ساختار و میکروساختار از نظر مورفولوژی، سختی و رفتار اتلاف حرارتی پرداخته می شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این پژوهش نانو پودر 8YSZ با متوسط اندازه ذرات ۴۰ نانومتر و پودر میکرون با متوسط اندازه ذرات یک میکرون انتخاب شد. شکل (۳) الگوی پراش اشعه X پودر 8YSZ نانو و میکرون را نشان می دهد.

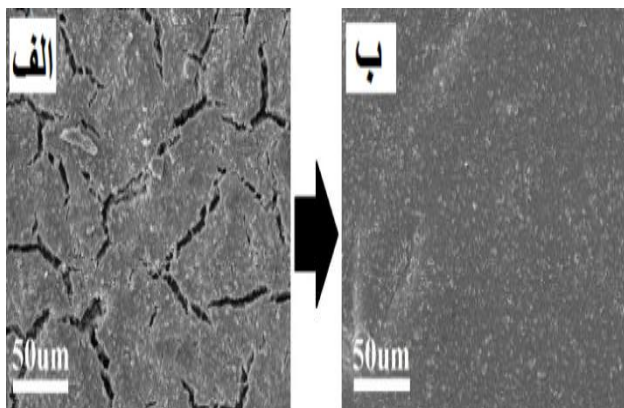


شکل (۳): الگوی پراش اشعه X پودر 8YSZ (a) نانو، 8YSZ میکرون (b).

زیرلایه بکار رفته جهت پوشش دهی، سوپرآلیاژ IN 713LC انتخاب شد. بمنظور ایجاد لایه واسط، نمونه های اینکونل پس از آماده سازی سطح تحت عملیات سماتاسیون جعبه ای در دمای  $۸۵۰^\circ\text{C}$  قرار گرفتند و پوشش NiAl حاصل گردید (شکل (۴)).

### ۳- نتایج و بحث

شکل (۶) تصویر SEM از نمونه پوشش داده شده در محیط استون و اتانول- استون (نسبت ۳-۱) را پس از فرآیند پوشش دهی الکتروفوریتیک نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود پوشش حاصل از محیط استون، حاوی ترک می‌باشد. در حالی که پوشش حاصل از محیط اتانول- استون دارای سطح یکنواخت و بدون ترک می‌باشد.

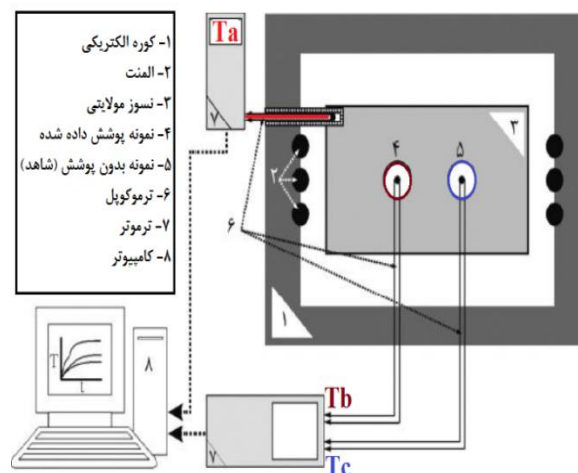
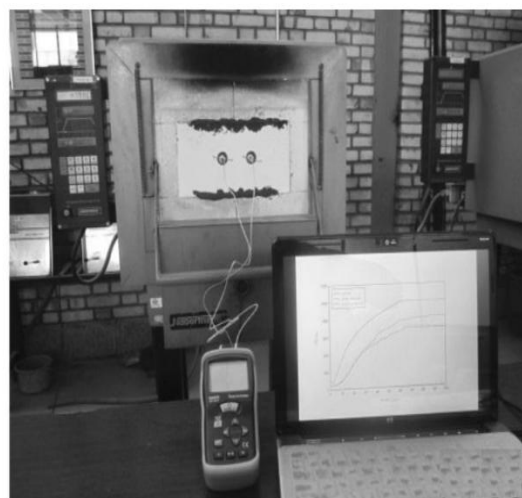


شکل (۶): تصویر SEM از نمونه پوشش داده شده در محیط (الف): استون و (ب): اتانول- استون.

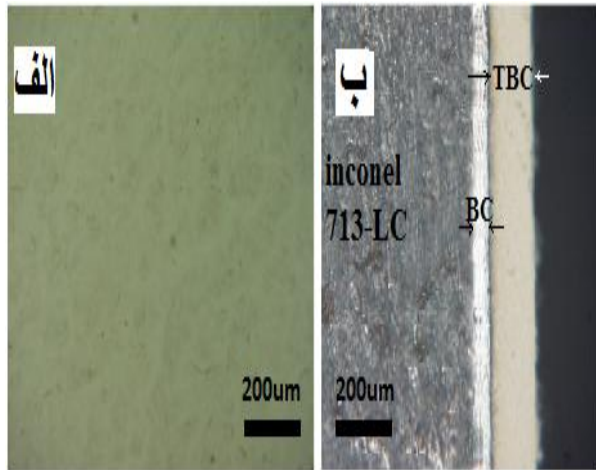
جهت پیش بینی وقوع ترک در زمان خشک شدن، مهم‌ترین پارامتر اصلی یعنی تنش حاصل از خشک شدن پوشش را بایستی در نظر گرفت. میزان تنش ایجاد شده به نرخ خشک شدن، ابعاد پوشش و نفوذپذیری بستگی دارد [۱۰].

فشاربخار استون و اتانول در دمای  $25^{\circ}\text{C}$  به ترتیب برابر با  $200\text{mmHg}$  و  $70\text{mmHg}$  می‌باشد. با توجه با اینکه فشاربخار استون حدود سه برابر بیشتر از اتانول می‌باشد، نرخ خشک شدن و متعاقباً میزان تنش خشک شدن پوشش تر پس از پوشش دهی در محیط استون بالاتر از محیط اتانول خواهد بود. از طرفی محیط اتانول به دلیل کشش سطحی بالاتر تمایل به پوسته شدن پوشش را در پی خواهد داشت. به این ترتیب ترکیب اتانول- استون با نسبت ۳-۱ بعنوان بهترین محیط جهت بدست آوردن پوشش یکنواخت و بدون ترک انتخاب شد. شکل (۷) تصاویر SEM از پوشش TBC نانو ساختار و میکروساختار پس از عملیات

نمای واقعی و تصویر طرح‌واره این آزمون در شکل (۵) نشان داده شده است. بمنظور اجرای آزمون مذکور، درب کوره را با یک نسوز مولایتی جایگزین نموده و نمونه پوشش داده شده به طوری که سطح پوشش داخل کوره و انتهای بدون پوشش در معرض هوای آزاد باشد، درون نسوز مولایتی جایگزین شد. نمونه شاهد، نمونه بدون پوشش می‌باشد. پس از نصب تجهیزات، کوره با نرخ گرمایش  $10\text{min}/^{\circ}\text{C}$  تا دمای  $900^{\circ}\text{C}$  گرم و به مدت ۳۰ دقیقه در این دما نگه داشته شد. دماهای کوره (a)، نمونه بدون پوشش (b) و نمونه حاوی پوشش نانو (d) و میکروساختار (c) در هر دقیقه ثبت شده و نمودار دما بر حسب زمان رسم شد.

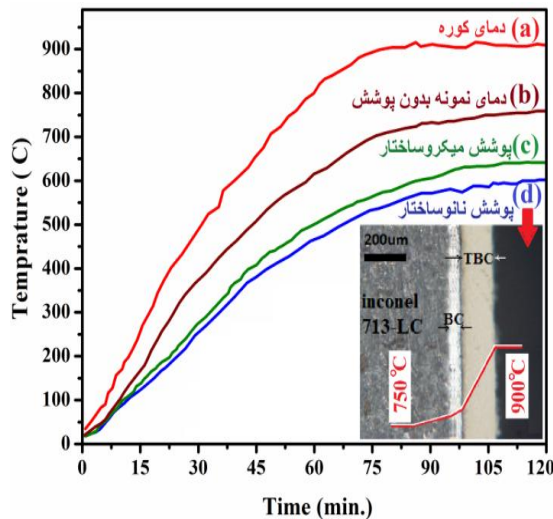


شکل (۵): نمای واقعی و طرح‌وار از آزمون ظرفیت عایق‌سازی الکتریکی [۴].



شکل (۸): پوشش نانو 8YSZ بر روی زیرلایه اینکونل حاوی پوشش واسط (الف): سطح پوشش و (ب): سطح مقطع پوشش.

مشاهده می شود که با افزایش دمای کوره دماهای انتهایی نمونه ها نیز افزایش می یابد. با رسیدن دمای کوره به  $900^{\circ}\text{C}$  و ثابت شدن دما اختلاف دمای نمونه حاوی پوشش میکروساختار با نمونه بدون پوشش حدود  $120^{\circ}\text{C}$  و با نمونه نانوساختار در حدود  $160^{\circ}\text{C}$  می باشد. چنین افت دمایی بالایی به دلیل ساختار زیرکونیای پایدار شده با ایتریا می باشد. مکانیزم هدایت حرارتی در زیرکونیا در دماهای پایین تر از  $1200^{\circ}\text{C}$ ، انتقال فونون می باشد.

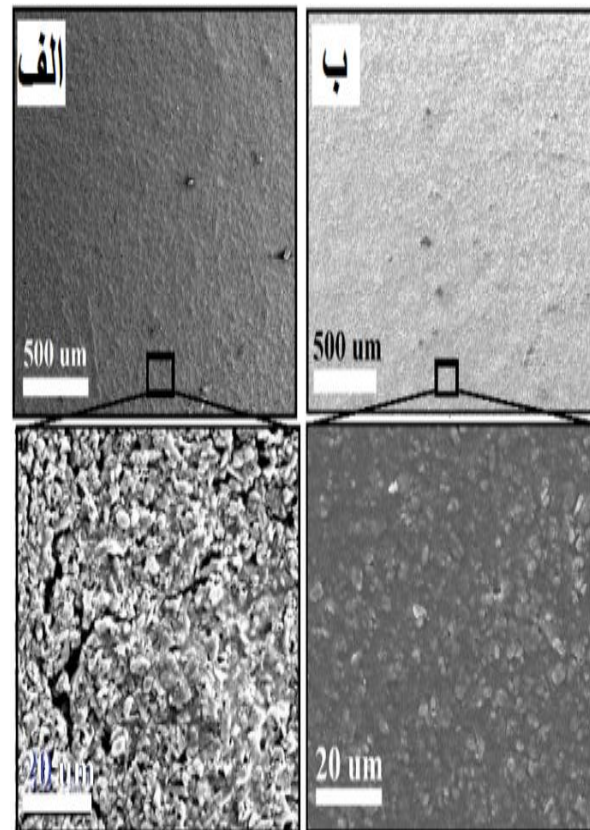


شکل (۹): نمودار گرمایش کوره بر حسب زمان برای نمونه بدون پوشش و نمونه پوشش داده شده به روش EPD.

حرارتی در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  نشان می دهد. در این شکل موفولوژی پوشش با ذرات نانو بیانگر تراکم بالای پوشش نسبت به پوشش با ذرات میکرون می باشد. نتایج سختی سنجی در تأیید تراکم بالاتر پوشش نانو ساختار نسبت به ساختار میکرون می باشد. سختی پوشش با ذرات نانو حدود  $400$  ویکرز و پوشش با ذرات میکرون در حدود  $100$  ویکرز می باشد.

شکل (۸) سطح مقطع پوشش 8YSZ بر روی زیرلایه اینکونل پس از عملیات حرارتی را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود پوشش از یک رافنس خوبی برخوردار می باشد که نسبت به پوشش های پلاسما اسپری در سطح بالاتری از کیفیت پوشش TBC برخوردار می باشد.

شکل (۹) نمودارهای دما- زمان (از انتهای نمونه در فضای آزاد) برای نمونه های بدون پوشش (b)، حاوی پوشش میکروساختار (c) و نمونه نانوساختار همراه با دمای کوره (a) را نشان می دهد.



شکل (۱۰): تصاویر SEM از پوشش TBC پس از عملیات حرارتی در دمای  $1000^{\circ}\text{C}$  (الف): میکروساختار و (ب): نانوساختار.

- [4] D.R. Clarke, C.G. Levi, "Materials Design for the Next Generation Thermal Barrier Coatings", *Annu. Rev. Mater. Res.*, Vol. 33, pp. 383-417, 2003.
- [5] R.S. Lima, 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*, Vol. 16, pp. 40-63, 2007.
- [6] R. Taylor, J.R. Brandon, "Microstructure, composition and property relationships of plasma sprayed thermal barrier coating", *Surface and Coating Technology*, Vol. 50 pp. 141-149, 1992.
- [7] H. Maleki-Ghaleh, M. Rekabeslami, M.S. Shakeri, M.H. Siadati, M. Javidi, S.H. Talebian & H. Aghajani, "Nano-Structured Yttria-Stabilized Zirconia Coating by Electrophoretic Deposition", *Journal of Applied Surface Science*, Vol. 280, pp. 666-673, 2013.
- [8] M.F. De Riccardis, D. Carbone & A. Rizzo, "A novel method for preparing and characterizing alcoholic EPD suspensions", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 307, pp. 109-115, 2007.
- [9] I. Zhitomirsky, "Cathodic Electrodeposition of Ceramic and Organoceramic Materials. Fundamental Aspects", *Adv. Colloid Interface Sci.*, Vol. 97, pp. 279-317, 2002.
- [10] G. W. Scherer, "Theory of Drying", *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 73, pp. 3-14, 1990.
- [11] H. Jamali, R. Mozafarinia, R.Sh. Razavi & R. Ahmadi Pidani, "Evaluation of thermal insulation capability of plasma-sprayed, zirconia based thermal barrier coatings", *Iranian journal of surface science and engineering*, Vol. 14, pp. 77-83, 2012.

#### ۶- پی نوشت

- [1] Thermal Barrier Coating  
[2] Electrophoretic Deposition

هدایت حرارتی در سرامیک‌های زیرکونیایی بستگی به پراکندگی فنونی دارد. در ساختارهای کریستالی پراکندگی فنونی در نتیجه برهم کنش با عیوب شبکه نظیر جاهای خالی و مرزخانه‌ها، افزایش می‌یابد. کاهش اندازه ذرات و عبارتی افزایش مرزها به پراکنده‌سازی فنون‌ها کمک نموده و به همین دلیل کاهش هدایت حرارتی در نمونه نانو ساختار بیشتر است [۱۱].

#### ۴- نتیجه گیری

پوشش‌دهی الکتروفوریتیک بعنوان روش نوین، ارزان و با کیفیت سطحی بالا در پوشش‌دهی TBC در کار حاضر ارایه می‌گردد. پوشش‌دهی سرامیک‌ها به روش EPD بر روی فلزات بستگی زیادی به شرایط محیط پوشش‌دهی دارد. محیط غیرآبی استون و اتانول برای پوشش‌دهی سرامیکی زیرکونیا انتخاب شد. میزان فشاربخار بالای استون در حین خشک شدن پوشش، ترک‌های سطحی را باعث می‌شود. با استفاده از ترکیب محیط پوشش‌دهی با اتانول، پوشش یکنواخت و بدون ترک است. همچنین رفتار سختی پوشش با استفاده از ساختار نانو در پوشش 8YSZ ارتقا یافت. در کار حاضر با پوشش TBC حاصل از EPD، میزان کاهش دما در سطح قطعه استراتژیک موتور توربین به بیش از  $150^{\circ}\text{C}$  کاهش یافت. در این بین پوشش نانو ساختار ظرفیت عایق‌سازی حرارتی TBC را افزایش داد.

#### ۵- منابع

- [1] G. W. Goword, "Progress in coating for gas turbine airfoils", *Surface and Coatings Technology*, Vol. 108, pp. 73-79, 1998.
- [2] U. Schulz, C. Leyens, K. Fritscher & M. Oeter, "Some recent trends in research and technology of advance of thermal barrier coating", *Aerospace science and technology*, Vol. 7, pp. 73-80, 2003.
- [3] J. R. Nicholls, "Advances in coating design for high-performance gas turbines", *MRS bulletin*, Vol. 28, pp. 659-670, 2003.