

## بررسی تنش‌های حرارتی در پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار و میکرونی

امین مجیدی<sup>۱</sup>، مسعود علیزاده<sup>\*۱</sup> و محمدرضا رحیمی پور<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>کرج، مشکین دشت، پژوهشکده سرامیک، پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ ثبت اولیه: ۹۳/۱/۱۹، تاریخ دریافت نسخه اصلاح شده: ۹۳/۶/۱۷، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۳/۶/۱۹

### چکیده

در این پژوهش تنش‌های حرارتی ایجاد شده در حین کاهش ناگهانی دما از ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به ۲۰ درجه سانتی‌گراد به کمک روش اجزاء محدود برای پوشش‌های زیرکونیایی نانو ساختار و میکرونی، مدل‌سازی شد. توزیع تنش حرارتی در پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی زیرکونیایی محاسبه گردید. به کمک مدل‌سازی نشان داده شد که تنش حرارتی در جهت محور X در کنار هر دو نمونه نانو ساختار و میکرونی صفر است و همینطور مشخص شد که تنش برشی حرارتی ایجاد شده در پوشش نانو ساختار ۳۳ درصد کمتر از پوشش میکرونی است. بعلاوه، تنش برشی در لایه اکسیدی نیز محاسبه گردید که میزان آن برای پوشش نانو ساختار ۳۵ درصد کمتر از پوشش میکرونی بدست آمد. نتایج مدل‌سازی عمر بیشتر پوشش‌های نانو ساختار را تایید می‌نماید. اکسید تیتانیوم بعنوان افزودنی به روغن موتور می‌تواند نقش موثری در افزایش توان موتور و کاهش آلاینده‌های خروجی از موتور و مصرف سوخت ایفا کند.

**کلمات کلیدی:** پوشش، سد حرارتی، نانو ساختار، مدل‌سازی.

## Investigation of Thermal Stresses in Micro and Nano-Structured Thermal Barrier Coatings

Amin Majidi<sup>1</sup>, Masoud Alizadeh<sup>\*1</sup> and Mohammad Reza Rahimpour<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Ceramic, Material and Energy Research Center, Meshkin Dasht, Iran

### Abstract

Induced thermal stresses during quenching of micro and nano-structured ZrO<sub>2</sub> coatings from 1250<sup>o</sup>C to 20<sup>o</sup>C has been modeled using finite element method. Thermal stresses distribution of coatings has been also calculated. Results show that thermal stress in x-direction is zero at the edges of both micro and nano-structured samples. It is also concluded that shear thermal stress of nano-structured coatings is 33% lower than its value in micro ones. In addition, shear stresses in TGO layer were also calculated and the results show these stresses are 35% lower than micro ones. Modeling results validates long life time of nano-structured coatings.

**Keywords** coating, thermal barrier, nano-structured, modeling.

## ۱- مقدمه

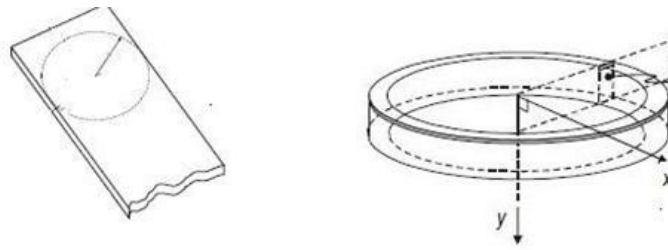
## ۲- روش انجام مدل‌سازی:

در این پژوهش متد استفاده شده برای مدل‌سازی دقیق تنش‌های حرارتی پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی، روش اجزاء محدود می‌باشد. روش اجزاء محدود در سال‌های اخیر به عنوان یکی از موثرترین روش‌ها برای تحلیل تنش‌های حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۱،۱۰]. سیکل گرم و سرد شدن پوشش‌ها از دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بدون تنش تا دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

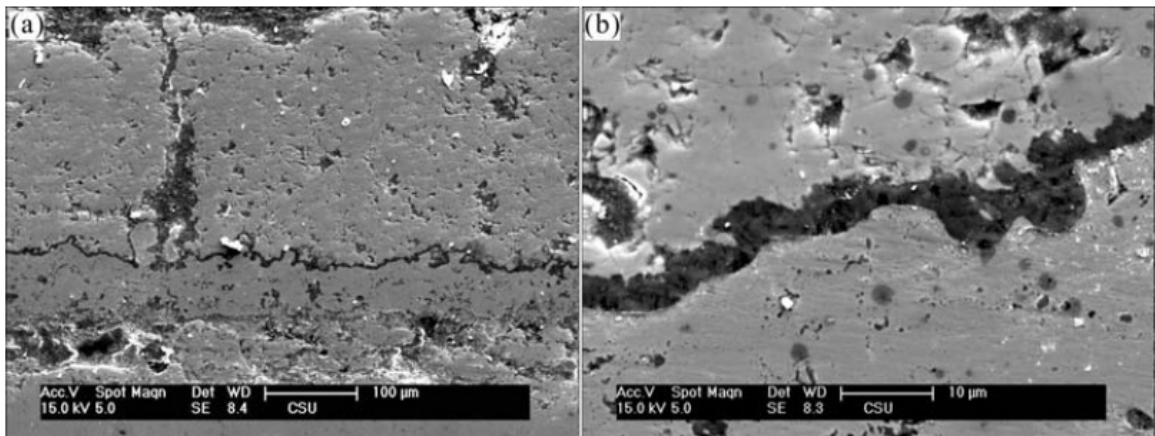
## ۲-۱- اندازه نمونه‌ها و مش‌بندی:

مدل‌سازی از یک قطاع استوانه از کنار نمونه، مطابق شکل انجام پذیرفت. شعاع مدل ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ضخامت لایه‌ها مطابق نمونه‌های آزمون عملی ۲۰۰ میکرون برای نمونه نانو ساختار و ۲۲۰ میکرون برای نمونه میکرونی مدل شد. ضخامت لایه TGO مطابق تصاویر شماره ۲ و ۳ برای نمونه‌ها ۴ میکرون در نظر گرفته شد. به منظور افزایش دقت نتایج مدل‌سازی، مش‌بندی به صورت ۸ نقطه ایجاد گردید.

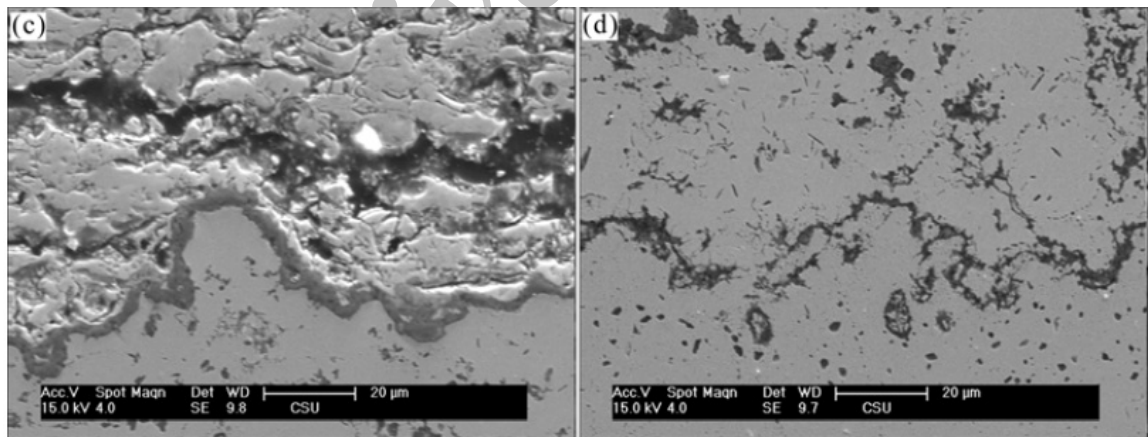
پوشش‌های سد حرارتی تاثیر بسزایی در افزایش عمر، بازده و کاهش میزان خنک‌کاری توربین‌های گازی زمینی دارند [۱]. پوشش‌های سد حرارتی عموماً از دو لایه تشکیل شده‌اند. یک لایه فلزی وظیفه حفاظت در برابر اکسیداسیون و یک لایه سرامیکی وظیفه کاهش انتقال حرارت را دارد [۲]. هر دو لایه عموماً به روش پاشش پلاسما اعمال می‌شوند. به دلیل اینکه پوشش‌های سد حرارتی تحت سیکل‌های حرارتی شدیدی قرار می‌گیرند بررسی مقاومت به شوک حرارتی این پوشش‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار مقاومت به شوک حرارتی بهتری را نسبت به پوشش‌های میکرونی نشان می‌دهند [۳،۴]. مقاومت به شوک حرارتی به ضخامت پوشش، دمای پوشش‌دهی، زبری سطح و پوشش و اصل و محیط کاری پوشش بستگی دارد [۵،۶]. تنش‌های حرارتی در حین سیکل‌های کاری به دلیل اختلاف ضریب انبساط حرارتی لایه‌های پوشش و اختلاف توزیع دما در پوشش بوجود می‌آیند [۷]. در سال‌های اخیر مدل‌های اجزاء محدود مختلفی برای پیش‌بینی عمر پوشش‌های سد حرارتی توسعه داده شده‌اند [۸]. با توجه به اهمیت بررسی میزان و توزیع تنش‌های حرارتی، در این مقاله پژوهش‌چان با و همکارانش [۹] در خصوص عمر پوشش‌های سد حرارتی نانو ساختار و میکرونی، مدل‌سازی گردید. تمام نتایج عملی و ساخت نمونه توسط چان با و همکارانش به کمک روش پاشش پلاسما صورت گرفته است. در خصوص نانو ساختار بودن نمونه‌ها به نتایج و مطالب پژوهش فوق استناد شده است. در پژوهش چان با و همکاران عمر پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی در حین سیکل‌های حرارتی بررسی شده‌اند. نمونه‌های نانو ساختار عمر بیشتری از نمونه‌های میکرونی داشتند. در پژوهش حاضر دلیل تفاوت طول عمر پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی به کمک روش اجزاء محدود مشخص گردید.



شکل ۱: شمای مقطع مدل



شکل ۲: مقطع عرضی پوشش میکرونی پس از ۵ سیکل [۹]



شکل ۳: مقطع عرضی پوشش نانو ساختار پس از ۱۳ سیکل [۹]

## ۲-۲- ویژگی‌های پوشش:

پوشش‌ها کاملاً همگن، الاستیک و یکنواخت در نظر گرفته شدند. پارامترهای ساخت پوشش و خواص فیزیکی پوشش‌ها به ترتیب در جداول (۱) تا (۳) آمده است.

## ۳-۲- شرایط مرزی:

دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد به عنوان دمای بدون تنش در نظر گرفته شد. و تنش‌های حرارتی ایجاد شده در حین سرد کردن نمونه تا دمای اتاق محاسبه و مدل‌سازی گردید.

جدول ۱: پارامترهای زیرلایه و پوشش واصل [۹]

| توان دستگاه (kW) | فاصله پاشش (mm) | نرخ تغذیه (g/min) | شار گاز آرگون (L/min) | شار گاز هیدروژن (L/min) |
|------------------|-----------------|-------------------|-----------------------|-------------------------|
| ۴۰               | ۱۰۰             | ۱۰۰-۴۰            | ۴۰                    | ۵                       |

جدول ۲: پارامترهای زیرلایه و پوشش واصل [۱۲ و ۱۳]

|         | Temperature (°C) | Elastic modulus (10 <sup>9</sup> Pa) | Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ) | Density (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) | Thermal conductivity (W/m °C) | Thermal capacity (J/kg °C) | Poisson's ratio |
|---------|------------------|--------------------------------------|---|--|-------------------------------|----------------------------|-----------------|
| DZ125   | 20               | 211                                  | 14.8  | 8.23   | 8                             | 350                        | 0.33            |
|         | 200              | 197                                  | 15.2  | 8.23   | 9.67                          | 385                        | 0.33            |
|         | 400              | 188                                  | 15.6  | 8.23   | 13.44                         | 456                        | 0.33            |
|         | 600              | 176                                  | 16.2  | 8.23   | 16.79                         | 498                        | 0.33            |
|         | 800              | 157                                  | 16.9  | 8.23   | 19.63                         | 506                        | 0.34            |
|         | 1000             | 120                                  | 17.5  | 8.23   | 19.43                         | 473                        | 0.35            |
|         | 1100             | 118                                  | 18  | 8.23   | 19                            | 443                        | 0.35            |
| NiCrAlY | 20               | 200                                  | 13.6  | 8.1  | 5.8                           | 400                        | 0.3             |
|         | 200              | 190                                  | 14.2  | 8.1  | 7.5                           | 400                        | 0.3             |
|         | 400              | 175                                  | 14.6  | 8.1  | 9.5                           | 400                        | 0.31            |
|         | 600              | 160                                  | 15.2  | 8.1  | 12                            | 400                        | 0.31            |
|         | 800              | 145                                  | 16.1  | 8.1  | 14.5                          | 400                        | 0.32            |
|         | 1000             | 120                                  | 17.2  | 8.1  | 16.2                          | 400                        | 0.33            |
|         | 1100             | 110                                  | 17.6  | 8.1  | 17                            | 400                        | 0.33            |

جدول ۳: پارامترهای پوشش سرامیکی نانو ساختار و میکرونی [۱۲ و ۱۳]

|   | Temperature (°C) | Coefficient of thermal expansion (10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> ) | Thermal conductivity (W/m K) | Thermal capacity (J/kg °C) | Elastic modulus (10 <sup>9</sup> Pa) | Density (10 <sup>3</sup> kg/m <sup>3</sup> ) | Poisson's ratio |
|---|------------------|---|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|-----------------|
| Traditional ZrO <sub>2</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>    | 20               | 9   | 1.20                         | 450                        | 48                                   |  | 0.1             |
|   | 200              | 9.2   | 1.19                         | 450                        | 47                                   |  | 0.1             |
|   | 400              | 9.6   | 1.18                         | 450                        | 44                                   |  | 0.1             |
|   | 600              | 10.1  | 1.15                         | 450                        | 40                                   |  | 0.11            |
|   | 800              | 10.8  | 1.16                         | 450                        | 34                                   |  | 0.11            |
|   | 1000             | 11.7  | 1.14                         | 450                        | 26                                   |  | 0.12            |
|   | 1100             | 12.2  | 1.12                         | 450                        | 22                                   |  | 0.12            |
| Nanostructured ZrO <sub>2</sub> + Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 100              | 10.4  | 1.11                         | 405                        | 60                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 300              | 11.4  | 1.06                         | 450                        | 58                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 500              | 11.15   | 1.02                         | 480                        | 44                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 700              | 11.25   | 1.0                          | 510                        | 38                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 900              | 11.35   | 0.99                         | 530                        | 36                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 1000             | 11.4  | 1.01                         | 560                        | 34                                   | 5.6  | 0.26            |
|   | 1100             | 11.5  | 1.12                         | 590                        | 32                                   | 5.6  | 0.26            |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                  | 20               | 8   | 10                           | 1000                       | 400                                  | 3.5  | 0.23            |
|   | 200              | 8.2   | 7.794                        | 1000                       | 390                                  | 3.5  | 0.23            |
|   | 400              | 8.4   | 6.029                        | 1000                       | 380                                  | 3.5  | 0.24            |
|   | 600              | 8.7   | 5.074                        | 1000                       | 370                                  | 3.5  | 0.25            |
|   | 800              | 9   | 4.412                        | 1000                       | 355                                  | 3.5  | 0.25            |
|   | 1000             | 9.3   | 4.412                        | 1000                       | 325                                  | 3.5  | 0.25            |
|   | 1100             | 9.6   | 4                            | 1000                       | 320                                  | 3.5  | 0.25            |

## ۴-۲- نتایج آزمون عملی:

نحوه انجام سیکل‌ها به صورت گرم کردن تا دمای ۱۲۵۰ درجه سانتی‌گراد و سپس سرد کردن در آب می‌باشد.

نتایج عملی پژوهش چنان با و همکارانش در خصوص عمر پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی مطابق جدول (۴) می‌باشد.

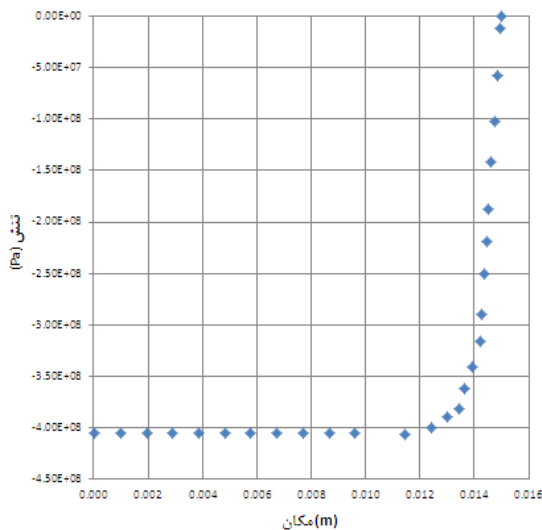
جدول ۴: نتایج آزمون شوک حرارتی نمونه‌های نانو ساختار و میکرونی

| تعداد سیکل | نانو ساختار         | میکرونی                   |
|------------|---------------------|---------------------------|
| ۳          | شروع تخریب از کناره | شروع تخریب از کناره نمونه |
| ۴          | ادامه تخریب         | ادامه تخریب               |
| ۵          | ادامه تخریب         | تخریب کامل                |
| ۱۳         | تخریب کامل          | ---                       |

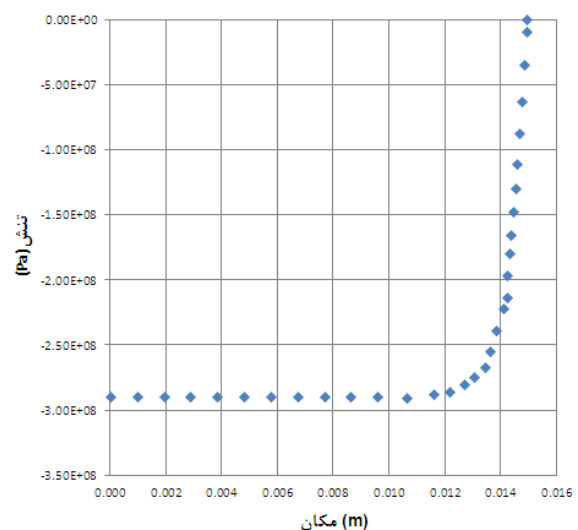
## ۳- نتایج و بحث:

شکل (۴) تنش در جهت محور X را در پوشش‌های نانو ساختار و میکرونی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده

می‌شود تنش در جهت X در کناره نمونه صفر است و دلیل این موضوع عدم وجود تنش در سطوح آزاد می‌باشد.



ب

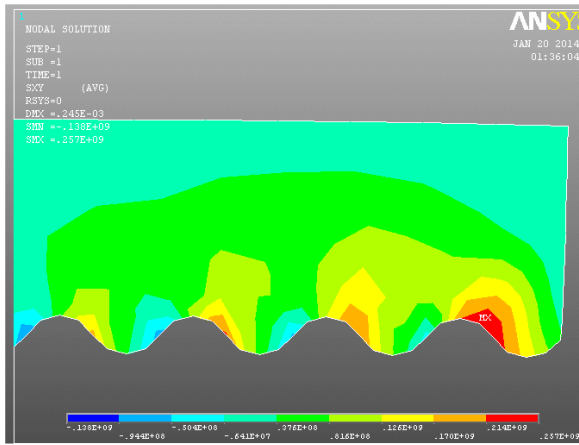


الف

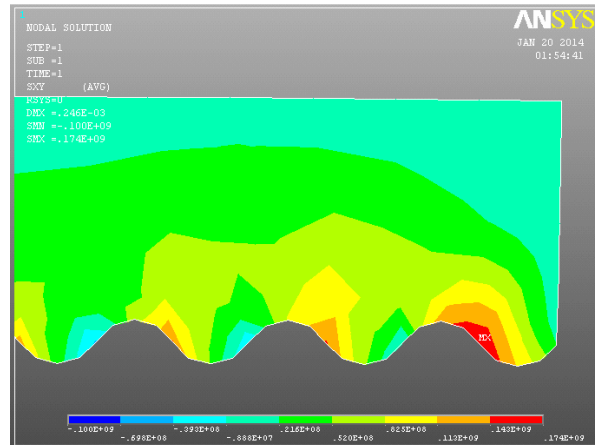
شکل ۴: توزیع تنش در لایه سرامیکی پوشش در جهت محور X: (الف) نانو ساختار زیرکونیایی (ب) زیرکونیایی میکرونی

در تمام مدل‌ها مناطق قرمز رنگ محل تمرکز تنش می‌باشند.

شکل (۵) توزیع تنش‌های برشی در پوشش سرامیکی نمونه‌های نانو ساختار و میکرونی را نشان می‌دهد.



ب



الف

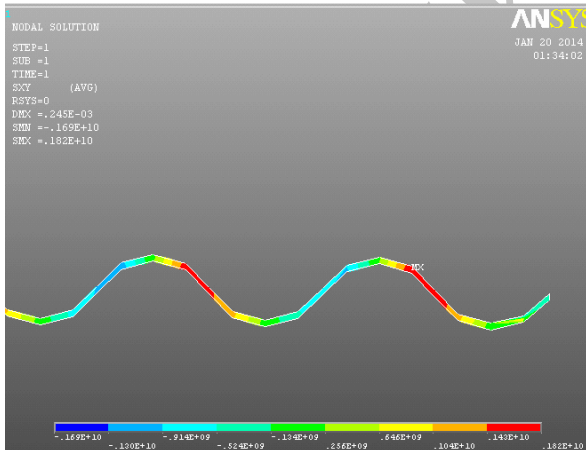
شکل ۵: توزیع تنش و مناطق تمرکز تنش در لایه سرامیکی پوشش: (الف) نانو ساختار زیرکونیایی (ب) زیرکونیایی میکرونی

جدول ۵: اندازه تنش برشی بیشینه در نواحی تمرکز تنش در لایه سرامیکی (MPa)

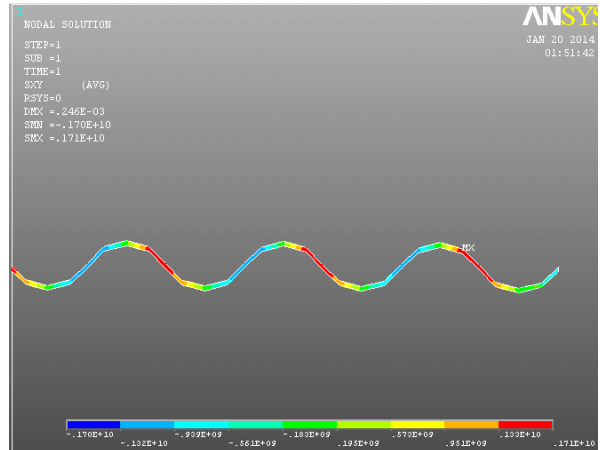
| پوشش میکرونی | پوشش نانو ساختار |
|--------------|------------------|
| ۲۱۴          | ۱۴۳              |

TGO تشکیل شده در پوشش نانو ساختار و میکرونی در شکل (۶) و میزان تنش برشی بدست آمده برای هر دو پوشش در جدول (۶) آمده است.

همانطور در جدول (۵) آمده است ماکزیمم تنش برشی در نمونه نانو ساختار ۱۴۳ مگاپاسکال و در نمونه میکرونی ۲۱۴ مگاپاسکال است. توزیع تنش برشی لایه



ب



الف

شکل ۶: توزیع تنش و مناطق تمرکز تنش در لایه اکسیدی: (الف) نانو ساختار زیرکونیایی (ب) زیرکونیایی میکرونی

جدول ۶: اندازه تنش برشی بیشینه در نواحی تمرکز تنش در لایه اکسیدی (MPa)

| پوشش میکرونی | پوشش نانو ساختار |
|--------------|------------------|
| ۱۸۲۰         | ۱۱۷۰             |

of EB-PVD TBC systems, Surface and Coatings Technology, Volumes 146-147, September-October 2001, Pages 117-123.

6. NUSAIR KHAN A, LU J. Behavior of air plasma sprayed thermal barrier coatings subject to intense thermal cycling [J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 37-43
7. V.K. Tolpygo, J.R. Dryden, D.R. Clarke, Determination of the growth stress and strain in  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> scales during the oxidation of Fe-22Cr4.8Al0.3Y alloy, ActaMaterialia, Volume 46, Issue 3, 23 January 1998, Pages 927-937
8. Hsueh, C.H., and Fuller Jr., E.R., 2000, "Residual Stresses in Thermal Barrier Coatings: Effects of Interface Asperity Curvature/Height and Oxide Thickness," Mat. Science Eng., Vol.A283, pp. 46-55
9. Chun-bo LIU, Zhi-min ZHANG, Xian-liang JIANG, Min LIU, Zhao-hui ZHU, Comparison of thermal shock behaviors between plasma-sprayed nanostructured and conventional zirconia thermal barrier coatings, Transactions of Nonferrous Metals Society of China, Volume 19, Issue 1, February 2009, Pages 99-107
10. Si Kyaw, Arthur Jones, Tom 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, Volume 27, January 2013, Pages 150-164.
11. Meng Han, Guodong Zhou, Jihua Huang, ShuHai Chen, A parametric study of the double-ceramic-layer thermal barrier coatings part I: Optimization design of the ceramic layer thickness ratio based on the finite element analysis of thermal insulation (take LZ7C3/8YSZ/NiCoAlY DCL-TBC for an example), Surface and Coatings Technology, Volume 236, 15 December 2013, Pages 500-509.
12. I. zaplatynsky, Thermal Expansion of Some Nickel and Cobalt Spinels and Their Solid Solutions [Z] Lewis Research Center Cleveland, 1971 (NASATN D-6174:11).
13. Chungen Zhou, Na Wang, Huibin Xu, Comparison of thermal cycling behavior of plasma-sprayed nanostructured and traditional thermal barrier coatings, Materials Science and Engineering: A, Volumes 452-453, 15 April 2007, Pages 569-574.

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تنش حرارتی وارد شده به لایه TGO نمونه نانو ساختار ۱۱۷۰ مگاپاسکال و در نمونه میکرونی ۱۸۲۰ مگاپاسکال می‌باشد. در هر دو نوع پوشش منطقه تمرکز تنش به کناره نمونه نزدیک می‌باشد. در پژوهشی که پیشتر توسط چونگن زو انجام شده بود نیز تنش حرارتی پوشش نانو ساختار ۷۳٪ پوشش میکرونی محاسبه گردیده بود که با نتایج موجود در این پژوهش هم‌خوانی دارد [۱۱].

#### ۴- نتیجه گیری:

تنش‌های برشی وارد بر پوشش نانو ساختار ۶۷ درصد پوشش میکرونی است. تنش وارد شده به لایه TGO نمونه نانو ساختار ۶۴ درصد پوشش میکرونی است. منطقه تمرکز تنش‌های برشی به کناره نمونه‌ها نزدیک می‌باشد. نتایج بدست آمده از این مدل نتایج طول عمر بیشتر نمونه‌های نانو ساختار پژوهش چان با و همکارانش را به دلیل کمتر بودن تنش بیشینه در لایه سرامیکی و اکسیدی تایید می‌کند و نشان می‌دهد که کناره‌های نمونه‌ها مراکز تمرکز تنش هستند و مکان شروع خرابی نمونه‌های آزمایش را نیز تایید می‌کند.

#### مراجع

1. Hupmann H et al. Gas Turbines-Continuous Trend towards Higher Performance the Insurance Aspects. IMIA, 98 (1998) 70-160
2. Dongming Zhu, Robert A. Miller, Ben A. Nagaraj, Robert W. Bruce, Thermal conductivity of EB-PVD thermal barrier coatings evaluated by a steady-state laser heat flux technique, Surface and Coatings Technology, Volume 138, Issue 1, 2 April 2001, Pages 1-8
3. Nusairkhan A and Lu J. Thermal Cyclic Behavior of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings Sprayed On Stainless Steel Substrates, Surf. And Coat. Tech. 201 (2007) 4653 4658.
4. M.J. Pomeroy. Coatings for Gas Turbine Materials and Long Term Stability Issues. Mat. And Des. 26 (2005) 223-231.
5. U Schulz, M Menzebach, C Leyens, Y.Q Yang, Influence of substrate material on oxidation behavior and cyclic lifetime