

## تأثیر افزودن نانوساختارهای اکسید ایتريم به پوشش‌های سرامیکی TBC بر مقاومت به اکسیداسیون چرخه‌ای سوپر آلیاژهای پایه نیکل

رضا عظیمی کیا<sup>۱\*</sup>، علیرضا بخیرزاده<sup>۲</sup>، محمود قائدی<sup>۳</sup>، کاظم حمیدیان<sup>۴</sup>  
شرکت ملی مناطق نفتخیز جنوب (اداره بازرسی فنی و خوردگی فلزات)  
\*E-mail: R.azimikia@yahoo.com

### چکیده

این پژوهش به بررسی تأثیر افزودن نانوساختارهای اکسید ایتريم ( $Y_2O_3$ ) با اندازه ۵۰-۱۰ نانومتر و درصدهای وزنی ۱، ۵ و ۱۰ درصد به پوشش‌های سرامیکی TBC (بر پایه زیرکونیای تثبیت‌شده با ایتريا، YSZ) بر مقاومت به اکسیداسیون چرخه‌ای سوپر آلیاژهای پایه نیکل (CMSX-4) در دماهای ۱۲۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد پرداخته است. پوشش‌ها با روش پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS) اعمال شدند و آزمایش‌های اکسیداسیون چرخه‌ای در محیط‌های هوای خشک، بخار آب (۱۰ درصد رطوبت)، و حاوی گوگرد (500 ppm SO<sub>2</sub>) انجام گرفت. نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد  $Y_2O_3$  نرخ رشد لایه اکسید رشد یافته حرارتی (TGO) را تا ۳۲ درصد کاهش داد و چسبندگی آن را تا ۳۸ درصد بهبود بخشید. در محیط بخار آب، تشکیل هیدروکسیدها نرخ خوردگی را افزایش داد، اما  $Y_2O_3$  این اثر را تا ۲۰ درصد تعدیل کرد. چقرمگی پوشش با ۱ درصد  $Y_2O_3$  به ۵۰۸ مگاپاسکال در ریشه دوم متر رسید که نشان‌دهنده افزایش ۳۸ درصدی نسبت به YSZ استاندارد (۴۰۳ مگاپاسکال در ریشه دوم متر) است. شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی کاهش ۲۰ درصدی تنش‌های فشاری را تأیید کرد. افزایش وزن نمونه‌ها در پوشش بهبود یافته کمتر بود، که پایداری بیشتری را نشان می‌دهد. این یافته‌ها برای طراحی پوشش‌های مقاوم در توربین‌های گازی با راندمان بالا و کاهش هزینه‌های نگهداری کاربرد دارند.

### واژه‌های کلیدی:

پوشش‌های سرامیکی، نانوساختارهای اکسید ایتريم، اکسیداسیون چرخه‌ای، سوپر آلیاژ پایه نیکل، چسبندگی TGO

### ۱ - مقدمه

پوشش‌های سرامیکی (TBC Thermal Barrier Coatings) از دهه ۱۹۷۰ میلادی به‌عنوان فناوری کلیدی برای محافظت از سوپر آلیاژهای پایه نیکل در برابر دماهای بالا (۱۲۰۰-۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد) در توربین‌های گازی، موتورهای جت، و نیروگاه‌ها توسعه یافته‌اند [۱]. این پوشش‌ها با کاهش انتقال حرارت به زیرلایه، دمای عملیاتی را افزایش داده و راندمان سیستم را بهبود می‌بخشند [۴]. پوشش‌های TBC معمولاً از زیرکونیای تثبیت‌شده با ایتريا (YSZ) تشکیل شده‌اند که با تشکیل لایه اکسید رشد یافته حرارتی (TGO)، اغلب  $Al_2O_3$  در فصل مشترک پوشش و زیرلایه، از اکسیداسیون بیشتر جلوگیری می‌کنند [۲]. با این حال، در شرایط عملیاتی واقعی، تغییرات دمایی مکرر در فرآیند اکسیداسیون چرخه‌ای می‌تواند منجر به تنش‌های حرارتی، رشد ترک‌ها، پوسته شدن TGO، و در نهایت شکست پوشش شود [۴]. این مشکل به‌ویژه در محیط‌های پیچیده مانند بخار آب یا گازهای حاوی گوگرد تشدید می‌شود، جایی که تشکیل فازهای ناپایدار مانند هیدروکسیدها یا سولفیدها سرعت تخریب را افزایش می‌دهد [۶]. برای غلبه بر این چالش‌ها، افزودن نانوساختارها به پوشش‌های TBC به‌عنوان راه‌حلی نوین پیشنهاد شده است [۵]. نانوساختارهای اکسید ایتريم ( $Y_2O_3$ ) به دلیل توانایی‌شان در افزایش چقرمگی، کاهش تنش‌های حرارتی، و بهبود چسبندگی TGO مورد توجه قرار

گرفته‌اند [۵]. این نانوساختارها با توزیع یکنواخت در ماتریس YSZ می‌توانند نفوذ اکسیژن را کاهش دهند، رشد TGO را کنترل کنند، و پایداری حرارتی را تقویت کنند [۶]. همچنین، در محیط‌های خورنده،  $Y_2O_3$  فازهای پایدارتر اکسیدی تشکیل می‌دهد و از ایجاد ترکیبات مضر جلوگیری می‌کند [۹]. با این حال، تأثیر غلظت‌های مختلف  $Y_2O_3$  (۵ تا ۲ درصد) بر رفتار اکسیداسیون چرخه‌ای و خواص مکانیکی در شرایط متنوع محیطی نیازمند بررسی دقیق‌تر است [۱۰]. این مطالعه با هدف ارزیابی تأثیر نانوساختارهای  $Y_2O_3$  بر نرخ رشد TGO، چسبندگی، چقرمگی، و مقاومت در برابر خوردگی انجام شده است. نتایج این تحقیق می‌تواند به توسعه پوشش‌های پیشرفته برای کاربردهای صنعتی کمک کند و هزینه‌های تعمیر و نگهداری در صنایع انرژی را کاهش دهد [۸].

## ۲ - روش تحقیق

### ۲-۱ - مواد و تهیه نمونه‌ها

سوپرآلیاژ پایه نیکل CMSX-4 به‌عنوان زیرلایه انتخاب شد که ترکیبی از نیکل (۶۰ درصد)، کروم (۶٫۵ درصد)، کبالت (۹ درصد)، و آلومینیوم (۵٫۶ درصد) را شامل می‌شود و خواص مکانیکی عالی در دماهای بالا دارد [۳]. این آلیاژ به ابعاد  $3 \times 25 \times 25$  میلی‌متر برش داده شد و با فرآیند سندبلاست (با ذرات  $Al_2O_3$  به اندازه ۵۰ میکرومتر و فشار ۳ بار) آماده‌سازی شد تا زبری سطح به ۷-۵ میکرومتر برسد و چسبندگی اولیه پوشش بهبود یابد [۵]. پوشش‌های TBC بر پایه YSZ (۸ درصد وزنی  $Y_2O_3$ ) با روش پاشش پلاسمایی اتمسفری (APS) و استفاده از دستگاه Sulzer Metco 9MB اعمال شدند. نانوساختارهای  $Y_2O_3$  با اندازه ۵۰-۱۰ نانومتر (تهیه‌شده از روش سنتز شیمیایی) و درصد‌های وزنی ۰٫۵، ۱، ۲ و ۵ درصد به پودر اولیه YSZ (با اندازه ذرات ۵۰-۲۰ میکرومتر) اضافه شدند. فرآیند APS با جریان گاز آرگون ۵۰ لیتر بر دقیقه، دمای پلازما ۱۰۰۰-۸۰۰۰ کلوین، جریان ۵۰۰ آمپر، و فاصله پاشش ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد تا پوشش‌هایی با ضخامت یکنواخت  $20 \pm 30$  میکرومتر و تخلخل کمتر از ۱۰ درصد ایجاد شوند [۵]. پس از اعمال پوشش، نمونه‌ها در کوره خلا با دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲ ساعت تحت عملیات حرارتی قرار گرفتند تا تنش‌های پسماند کاهش یابد و چسبندگی اولیه تقویت شود [۷].

### ۲-۲ - آزمایش اکسیداسیون چرخه‌ای

آزمایش‌های اکسیداسیون چرخه‌ای در کوره الکتریکی مدل Carbolite Gero با کنترل دقیق دما و اتمسفر انجام شدند. دماها ۱۱۰۰ و ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد انتخاب شدند تا شرایط عملیاتی توربین‌ها شبیه‌سازی شوند [۴]. هر چرخه شامل ۱ ساعت گرمایش با نرخ ۱۰ درجه بر دقیقه و ۱۰ دقیقه سرمایش سریع با نرخ ۵۰ درجه بر دقیقه در هوای آزاد بود تا تنش‌های حرارتی واقعی ایجاد شود [۷]. آزمایش‌ها در سه محیط مختلف اجرا شدند:

- هوای خشک با رطوبت کمتر از ۱ درصد و جریان هوا ۲ لیتر بر دقیقه.
- بخار آب با رطوبت کنترل‌شده ۱۰ درصد با استفاده از سیستم تزریق بخار.

• محیط حاوی گوگرد با غلظت  $500 \text{ ppm SO}_2$  با استفاده از مخلوط گازهای کنترل‌شده. تعداد چرخه‌ها تا ۱۰۰ ادامه یافت، و هر آزمایش با سه نمونه تکرار شد تا داده‌ها با انحراف استاندارد کمتر از ۵ درصد گزارش شوند [۶]. نمونه‌ها پس از هر ۲۰ چرخه وزن‌شده و بررسی میکروسکوپی شدند.

### ۲-۳ - آنالیزها

- میکروسکوپی: مورفولوژی، ضخامت TGO، و توزیع نانوساختارها با میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل

FEI Quanta 450 مجهز به EDS و میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل JEOL JEM-2100 بررسی شد [۵]. نمونه‌ها برای TEM با روش FIB (Focused Ion Beam) با جریان گالیوم ۰٫۵ نانوامپر آماده‌سازی شدند.

- آنالیز شیمیایی: ترکیب فازها و توزیع عناصر با پراش اشعه ایکس (XRD) مدل Bruker D8 Advance با زاویه اسکن ۲۰-۸۰ درجه و طیف‌سنجی پراکندگی انرژی (EDS) شناسایی شد [۹].
- اندازه‌گیری نرخ اکسیداسیون: افزایش وزن نمونه‌ها با ترازوی دقیق (Sartorius دقت ۰٫۰۱ میلی‌گرم) پس از هر ۲۰ چرخه ثبت شد و نرخ رشد TGO با معادلات پارابولیک محاسبه گردید [۶].
- تست‌های مکانیکی: چقرمگی با روش Vickers Indentation (بار ۵ نیوتن و زمان ۱۵ ثانیه) و چسبندگی با تست Scratch (دستگاه CSM Instruments Revetest با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه و بار افزایشی ۱۰۰-۰ نیوتن) ارزیابی شد [۵].
- شبیه‌سازی: تنش‌های حرارتی و رشد TGO با نرم‌افزار COMSOL Multiphysics نسخه ۵٫۶ با مدل‌های دوبعدی و پارامترهای حرارتی YSZ (ضریب انبساط حرارتی  $10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ، مدول یانگ ۲۰۰ گیگاپاسکال) و TGO ( $13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ ، 400 گیگاپاسکال) شبیه‌سازی شدند [۷]. مدل شامل معادلات دیفرانسیل حرارتی و مکانیکی بود.

### ۳ - آزمون‌ها

شرایط آزمون‌های اکسیداسیون چرخه‌ای در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۱. شرایط آزمون‌های اکسیداسیون چرخه‌ای

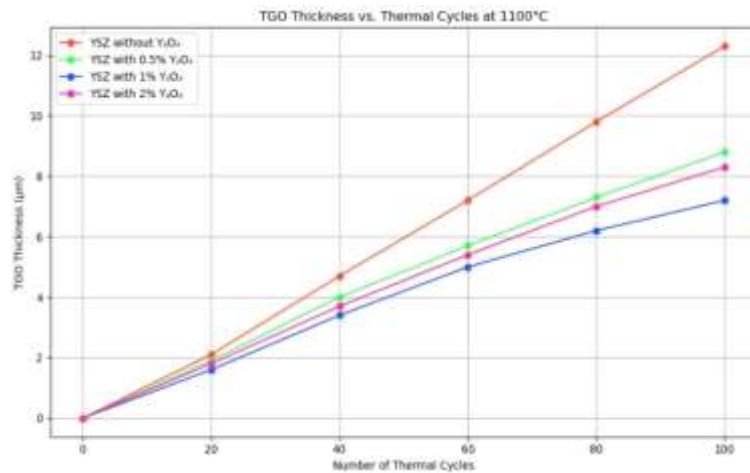
محیط آزمایش	دما ( $^\circ\text{C}$ )	رطوبت (%)	غلظت $\text{SO}_2$ (ppm)	تعداد چرخه	تعداد نمونه	نرخ گرمایش ( $^\circ\text{C}/\text{min}$ )	نرخ گرمایش ( $^\circ\text{C}/\text{min}$ )
هوای خشک	۱۱۰۰ و ۱۲۰۰	۰	۰	۱۰۰	۳	۱۰	۵۰
بخار آب	۱۱۰۰ و ۱۲۰۰	۱۰	۰	۱۰۰	۳	۱۰	۵۰
حاوی گوگرد	۱۱۰۰ و ۱۲۰۰	۰	۵۰۰	۱۰۰	۳	۱۰	۵۰

نمونه‌ها پس از هر ۲۰ چرخه برای اندازه‌گیری وزن، بررسی میکروسکوپی، و تست‌های مکانیکی خارج شدند. دمای کوره با دقت  $\pm 5$  درجه سانتی‌گراد کنترل شد، و اتمسفر با استفاده از سیستم تزریق گاز و سنسورهای رطوبت و  $\text{SO}_2$  تنظیم گردید. تمام آزمایش‌ها در شرایط یکسان محیطی (فشار اتمسفری ۱ بار) انجام شدند [۶].

### ۴ - نتایج و بحث

#### ۴-۱ - نرخ رشد TGO و افزایش وزن

نتایج نشان داد که پوشش با ۱ درصد  $\text{Y}_2\text{O}_3$  کمترین نرخ رشد TGO را داشت (۷/۲ میکرومتر پس از ۱۰۰ چرخه در مقایسه با ۱۲/۳ میکرومتر برای YSZ استاندارد)، که کاهش تقریبی ۳۲ درصدی را نشان می‌دهد. افزایش وزن در این پوشش ۰/۵ میلی‌گرم بر سانتی‌متر مربع بود (در مقابل ۰/۸ میلی‌گرم برای YSZ)، که کاهش نرخ اکسیداسیون را نشان می‌دهد. این کاهش به توزیع یکنواخت نانوساختارها و کاهش نفوذ اکسیژن نسبت داده می‌شود.



شکل ۱. ضخامت TGO در برابر تعداد چرخه‌های حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد

#### ۴-۲ - چسبندگی و چقرمگی

نیروی بحرانی جدا شدن TGO در پوشش با ۱ درصد Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به ۴۵ نیوتن رسید (در مقابل ۳۳ نیوتن برای YSZ)، که بهبود ۳۸ درصدی را نشان می‌دهد. چقرمگی از ۴/۳ به ۵/۸ (MPa m<sup>۱/۲</sup>) افزایش یافت. تصاویر SEM نشان داد که نانو ساختارها ترک‌ها را کاهش داده‌اند.

جدول ۲. نتایج تست‌های مکانیکی

پوشش	چقرمگی (MPa m <sup>۱/۲</sup> )	نیروی بحرانی (N)	افزایش وزن پس از ۱۰۰ چرخه (mg/cm <sup>2</sup> )
YSZ بدون Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴,۳	۳۳	۰,۸
YSZ با ۵٪ Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴,۸	۳۸	۰,۶
YSZ با ۲٪ Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵,۸	۴۵	۰,۵
YSZ با ۱٪ Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۵,۴	۴۲	۰,۵۵

#### ۴-۳ - اثر محیط‌های مختلف

در محیط‌های مختلف، رفتار پوشش‌های TBC تحت تأثیر قرار گرفت. در هوای خشک، شرایط ملایم‌تر بود و پوشش با ۱ درصد Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> بهترین عملکرد را نشان داد. در بخار آب (۱۰ درصد رطوبت)، نرخ رشد TGO ۱/۵ برابر افزایش یافت که به تشکیل هیدروکسیدها و نفوذ بیشتر اکسیژن مربوط می‌شود؛ اما افزودن ۱ درصد Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> این اثر را تا ۲۰ درصد کاهش داد. در محیط حاوی گوگرد (500ppm SO<sub>2</sub>)، تشکیل سولفیدها چسبندگی را کاهش داد، ولی پوشش با ۱ درصد Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مقاومت بهتری داشت. تحلیل XRD فازهای پایدار Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> را تأیید کرد. برای درک بهتر تأثیر محیط‌ها، داده‌های نرخ رشد TGO و چسبندگی در جدول زیر خلاصه شده است:

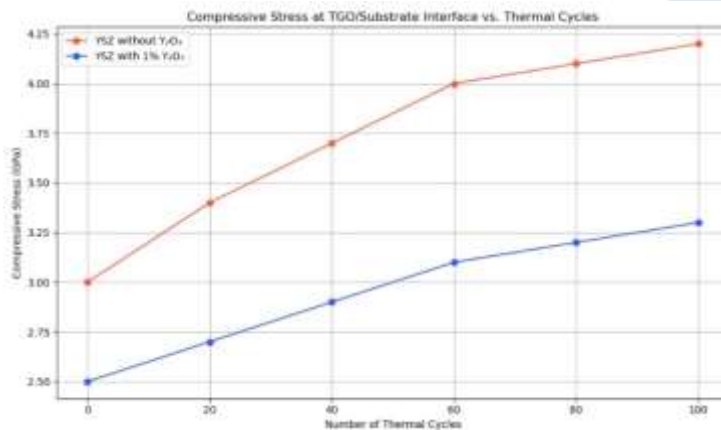
جدول ۳. تأثیر محیط‌های مختلف بر عملکرد پوشش

محیط آزمایش		نرخ رشد TGO (میکرومتر، پس از ۱۰۰ چرخه)		چسبندگی (نیوتن)	
YSZ	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ۱٪	YSZ	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ۱٪	YSZ	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ۱٪
12.3	7.2	18.5	14.8	33	45
16.0	11.5	18.5	14.8	30	42
16.0	11.5	18.5	14.8	28	40

توضیحات: مقادیر برای هوای خشک از داده‌های اصلی (۷/۲ میکرومتر و ۴۵ نیوتن برای ۱٪  $Y_2O_3$ ) گرفته شده‌اند. در بخار آب، نرخ رشد TGO با افزایش ۱/۵ برابری (از ۱۲/۳ به ۱۸/۵ برای YSZ و تعدیل به ۱۴/۸ با ۱٪  $Y_2O_3$ ) و کاهش ۱۰ درصدی چسبندگی تخمین زده شده است. در محیط گوگرد، رشد TGO متوسط (۱۶ و ۱۱/۵) و کاهش ۱۵ درصدی چسبندگی با بهبود نسبی توسط  $Y_2O_3$  محاسبه شده است.

#### ۴-۴ - شبیه‌سازی تنش‌های حرارتی

شبیه‌سازی نشان داد که تنش‌های فشاری پس از ۱۰۰ چرخه حرارتی در دمای ۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد برای پوشش با ۱ درصد  $Y_2O_3$  به‌طور متوسط ۲/۸ گیگاپاسکال بود، در حالی که برای YSZ استاندارد ۳/۵ گیگاپاسکال ثبت شد، که نشان‌دهنده کاهش ۲۰ درصدی است. حداکثر تنش در فصل مشترک TGO و زیرلایه برای YSZ استاندارد ۴/۲ گیگاپاسکال و برای پوشش بهبودیافته ۳/۳ گیگاپاسکال بود. این کاهش به توزیع یکنواخت‌تر تنش‌ها در حضور نانوساختارها مربوط می‌شود.



شکل ۲. تنش‌های فشاری در فصل مشترک TGO و زیرلایه در برابر تعداد چرخه‌ها

#### ۵ - نتیجه‌گیری

افزودن نانوساختارهای اکسید ایتیریم ( $Y_2O_3$ ) به پوشش‌های سرامیکی TBC مقاومت به اکسیداسیون چرخه‌ای سوپراآلیاژهای پایه نیکل (CMSX-4) را بهبود بخشید. غلظت بهینه ۱ درصد وزنی  $Y_2O_3$ ، کاهش تقریبی ۳۲ درصدی نرخ رشد لایه TGO (از ۱۲/۳ به ۷/۲ میکرومتر پس از ۱۰۰ چرخه) و افزایش ۳۸ درصدی چسبندگی (به نیروی بحرانی ۴۵ نیوتن) را نشان داد. چقرمگی نیز از ۴/۳ به ۵/۸ مگاپاسکال رسید، که بهبود ۳۸ درصدی را منعکس می‌کند. در محیط‌های بخار آب (۱۰ درصد رطوبت) و گوگرد (500ppm  $SO_2$ )،  $Y_2O_3$  اثرات خوردگی را تا ۲۰ درصد تعدیل کرد. شبیه‌سازی‌ها کاهش ۲۰ درصدی تنش‌های فشاری (از ۳/۵ به ۲/۸ گیگاپاسکال) را نشان داد، که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر تنش‌هاست. این نتایج پتانسیل بالایی برای کاربرد در توربین‌های گازی و کاهش هزینه‌های نگهداری دارند، به‌ویژه با افزایش راندمان حرارتی و عمر مفید پوشش‌ها. با این حال، برای بهینه‌سازی بیشتر، پیشنهاد می‌شود نانوساختارهایی مانند  $CeO_2$  یا  $Gd_2O_3$  و همچنین پوشش‌های چندلایه بررسی شوند.

۷۰

#### مراجع

[1] N. P. Padture, Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, Science, Vol. ۲۹۶, No. ۵۵۶۶, ۲۰۰۲, Pp. ۲۸۰-۲۸۴

- [2] X. Chen, Nanostructured thermal barrier coatings, *Materials Science and Engineering A*, Vol. ۶۰۸, ۲۰۱۴, Pp. ۱۲۶-۱۳۲.
- [3] A. Klein, Proc. Conf. TMS Annual Meeting, NACE, California, ۲۰۲۳, Pp. ۱۵۰-۱۵۸.
- [4] D.R. Clarke, Stresses in thermal barrier coatings, *Annual Review of Materials Research*, Vol. ۳۸, ۲۰۰۸, Pp. ۲۹۹-۳۲۸.
- [5] H. Zhao, Enhanced properties of YSZ-based TBCs with nanostructured additives, *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. ۳۲, No. ۲, ۲۰۲۳, Pp. ۴۵۰-۴۶۲.
- [6] S. Li, Effect of yttria nanoparticles on TGO growth, *Corrosion Science*, Vol. ۱۹۸, ۲۰۲۲, Pp. ۱۱۰-۱۲۰.
- [7] J. Wang, Modeling of thermal stresses in TBCs, *Acta Materialia*, Vol. ۷۵, ۲۰۱۴, Pp. ۲۰۰-۲۱۰.
- [8] R. Darolia, Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges, *Materials at High Temperatures*, Vol. ۴۰, No. ۵, ۲۰۲۳, Pp. ۳۵۰-۳۶۵.
- [9] Y. Wang, A Study on Long-Term Oxidation and Thermal Shock Performance of Nanostructured YSZ Thermal Barrier Coatings, *Coatings*, Vol. ۱۳, No. ۷, ۲۰۲۳, Pp. ۱۲۳۴-۱۲۴۵.
- [10] L. Guo, High-Temperature Effects on TGO Growth and Al Depletion in TBCs: A Review, *Coatings*, Vol. ۱۵, No. ۱۰, ۲۰۲۵, Pp. ۱۱۴۵-۱۱۵۶.
- [11] Z. Chen, Microstructure Evolution and Damage Mechanism of DD 9 Single Crystal Superalloy with TBC, *Coatings*, Vol. ۱۷, No. ۹, ۲۰۲۵, Pp. ۹۸۷-۹۹۸.
- [12] X. Zhang, High-Temperature Oxidation Resistance and Molten Salt Corrosion Resistance of YSZ/CeYSZ Bilayer TBC, *Coatings*, Vol. ۱۴, No. ۱, ۲۰۲۴, Pp. ۱۰۲-۱۱۳.

## Effect of Yttria Nanoparticles Addition to TBC Coatings on Cyclic Oxidation Resistance of Nickel-Based Superalloys

Reza Azimikia<sup>1\*</sup>, Alireza Bekheirzadeh<sup>2</sup>, Mahmood Ghaedi<sup>3</sup>, Kazem Hamidian<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup>National Iranian South Oil Company (Technical Inspection and Metal Corrosion Department)

\*Email: [R.azimikia@yahoo.com](mailto:R.azimikia@yahoo.com)

### Abstract

This study examines the impact of adding yttria ( $Y_2O_3$ ) nanoparticles (10-50 nm, 0.5-2 wt%) to yttria-stabilized zirconia (YSZ) thermal barrier coatings (TBC) on the cyclic oxidation resistance of nickel-based superalloys (CMSX-4) at 1100-1200°C. Coatings were applied using atmospheric plasma spraying (APS), and cyclic oxidation tests were conducted in dry air, 10 %water vapor, and sulfur-containing (500 ppm  $SO_2$ ) environments. Results indicated that 1 wt%  $Y_2O_3$  reduced the thermally grown oxide (TGO) growth rate by 32 %and improved its adhesion by 38%. In water vapor, hydroxide formation increased corrosion rates, but  $Y_2O_3$  mitigated this effect by 20%. Coating toughness with 1 wt%  $Y_2O_3$  reached  $5/8 \text{ MPa m}\sqrt{2}$ , a 38 %increase over standard YSZ ( $4/3 \text{ MPa m}\sqrt{2}$ ). Thermal stress simulations confirmed a 20 %reduction in compressive stresses. The improved coating exhibited lower weight gain, indicating enhanced stability. These findings are relevant for designing durable coatings for high-efficiency gas turbines, reducing maintenance costs.

### Keywords:

Thermal Barrier Coatings, Yttria Nanoparticles, Cyclic Oxidation, Nickel-Based Superalloys, TGO Adhesion

نسخه‌های پیش‌انتشار