

ریزساختار و خواص پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده حاوی SiO_2 پاشش پلاسمائی در محیط اکسیداسیون دمای بالا

علیرضا خزایی^۱، سیدمحمد مهدی هادوی^۲، نسیم نایب پاشایی^{۳*}

^۱ کارشناسی ارشد مهندسی خوردگی و حفاظت از مواد، گروه خوردگی و حفاظت از مواد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

^۲ دکتری مهندسی مواد و متالورژی، گروه خوردگی و حفاظت از مواد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس
^{۳*} پسادکتری مهندسی مواد و متالورژی، گروه خوردگی و حفاظت از مواد، دانشکده مهندسی معدن و مواد، دانشگاه تربیت مدرس

* نویسنده مسئول: n.nayebpashae@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۹

چکیده

پوشش‌های سد حرارتی به طور گسترده برای محافظت از پره‌های فلزی در موتورهای توربین گازی استفاده می‌شوند که در آن شرایط کار شامل یک محیط تهاجمی در دمای بالا است. مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده دوام پوشش‌های سد حرارتی، رشد یک لایه اکسید حرارتی روی لایه واسط است که طی اکسیداسیون در دمای بالا تشکیل می‌شود. یکی از علل تخریب این پوشش‌ها رشد و بهم پیوستن ترک‌ها است که در نهایت منجر به شکست پوشش می‌شود. انجام این پژوهش به منظور دستیابی به افزایش دوام پوشش سد حرارتی و به تاخیر انداختن خرابی آن با استفاده از عامل خودترمیم‌کننده سیلیسیم است. در این پژوهش دو گروه نمونه شامل پوشش سد حرارتی معمولی و پوشش سد حرارتی خودترمیم‌شونده حاوی پودر سیلیسیم به روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال گردید و مشخصه‌یابی پوشش‌ها با استفاده از مطالعات متالوگرافی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. همچنین، مقاومت شوک حرارتی نمونه‌ها بررسی و مقایسه شد. مشاهدات حاصل از آزمایش‌ها نشان داد پوشش دولایه ترمیمی ترکیب مناسب‌تری برای اعمال به عنوان پوشش خودترمیم‌شونده بر روی زیرلایه بود. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌ها و بررسی منابع مطالعاتی موجود می‌توان استفاده از این پوشش‌ها را برای بهبود عایق حرارتی و مقاومت به اکسیداسیون و خوردگی داغ تیغه‌ها مطلوب دانست.

کلیدواژه: پوشش سد حرارتی، پوشش خودترمیم‌شونده، مقاومت شوک حرارتی، اکسیداسیون دمای بالا، خوردگی داغ

Microstructure and Properties of Self-Healing Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Containing SiO₂ in High Temperature Oxidation Environment

A. Khazaei¹, S. M. Hadavi², N. Nayeb Pashae^{*3}

¹Master of Science (M.S.c.) in Corrosion and Material protection Engineering, Department of Corrosion and Material protection, Faculty of Mining and Material Engineering, Tarbiat Modares University.

² Ph.D in Material and Metallurgy Engineering, Department of Corrosion and Material protection, Faculty of Mining and Material Engineering, Tarbiat Modares University.

^{*3}Posdocoral Reasearcher in Material and metallurgical Engineering, Department of Corrosion and Material protection, Faculty of Mining and Material Engineering, Tarbiat Modares University.

* Corresponding Author: n.nayebpashae@modares.ac.ir

Submission: 2024, 09, 11 Acceptance: 2025, 03, 19

Abstract

Thermal barrier coatings are often used to protect metal blades in gas turbine engines operating in an aggressive high-temperature environment. The most important factor determining the durability of thermal barrier coatings is the growth of a thermal oxide layer on the boundary layer that forms during oxidation at high temperatures. One of the reasons for the degradation of these coatings is the growth and connection of cracks, which ultimately leads to the failure of the coating. The aim of this research is to increase the durability of the thermal barrier coating and delay its failure by using a self-healing silicon agent. In this study, two groups of samples, a conventional thermal barrier coating and a self-healing thermal barrier coating with silicon powder, were applied by atmospheric plasma spraying. The coatings were characterized by metallographic examinations using a scanning electron microscope (SEM). The thermal shock resistance of the samples was also tested and compared. The observations from the experiments showed that the repair bilayer coating is a more suitable combination for use as a self-healing coating on the substrate. According to the results of the experiments and the review of available research sources, using these coatings to improve the thermal insulation and resistance to oxidation and hot corrosion of the blades can be considered desirable.

Keywords: Thermal barrier coating, self-healing coating, thermal shock resistance, high-temperature oxidation, hot corrosion

۱- مقدمه

امروزه سوپرآلیاژهای پایه نیکل با ساختارهای پلی کریستالی و تک کریستالی حاصل از انجماد جهت دار برای تولید قطعات موتور توربین های گازی که قادر به کارکرد در دماهای بالا هستند مورد استفاده قرار می گیرند. پوشش های سد حرارتی (TBC)^۱ که معمولاً از زیرکونیای تثبیت شده با ایتریا (YSZ)^۲ ساخته می شوند، به طور گسترده در بخش های داغ مثل تیغه های ردیف اول و دوم موتورهای توربین گازی برای محافظت از اجزای سوپرآلیاژی مبتنی بر نیکل در برابر دماهای عملیاتی شدید (۱۱۰۰-۱۳۰۰ درجه سانتیگراد) در هواپیماها و کاربردهای صنعتی استفاده می شوند. یک سیستم TBC معمولی از سه لایه متمایز ساخته شده است، یک لایه پوشش روئی (TC) ساخته شده از مواد سرامیکی (معمولاً ساخته شده از زیرکونیای تثبیت شده با ۷-۸ درصد وزنی ایتریا (YSZ))، یک لایه واسط (BC) فلزی (MCrAlY (M=Ni, Co, Ni/Co, ...)) و یک لایه اکسید رشد یافته حرارتی (TGO)^۳ که حین کار در نتیجه اکسیداسیون تشکیل شده است. معمولاً سه روش برای ساخت پوشش بالایی TBCها وجود دارد: پاشش پلاسمای اتمسفری (APS)^۴، رسوب فیزیکی بخار پرتو الکترونی (EB-PVD)^۵ و پاشش پلاسمای - رسوب فیزیکی بخار (PS-PVD)^۶. لایه واسط را می توان با پاشش پلاسمای اتمسفری (APS)، پاشش پلاسمای فشار پایین (LPSP)^۷، پاشش پلاسمای خلاء (VPS)^۸ و پاشش شعله اکسیژن با سرعت بالا (HVOF)^۹ تهیه کرد. وجود منافذ یکی از ویژگی های معمول پوشش های سد حرارتی است و ترک ها از عیوب متداول آنها هستند. منافذ معمولاً نقش مهمی در کنترل رسانایی حرارتی موثر پوشش های سد حرارتی ایفا می کنند. وقتی یک ترک تا مرز یک منفذ رشد می کند، به دام می افتد. گسترش ترک به طور مستقیم بر طول عمر

پوشش های سد حرارتی زمانی که شرایطی مانند شوک حرارتی، اکسیداسیون در دمای بالا، آسیب جسم خارجی (FOD)^{۱۰} و... را متحمل می شوند موثر است. شکست نهایی پوشش به جوانه زنی و اشاعه ترک در این شرایط نسبت داده می شود [۱-۲]. طول عمر پوشش های سد حرارتی وابسته به پارامترهای متعدد داخلی و خارجی است. عوامل داخلی به ریزساختار پوشش های سد حرارتی مانند تعداد لایه، ضخامت هر لایه، مورفولوژی سطح مشترک، ترکیب هر لایه، عیوب (ریز منافذ و ریز ترک ها) و... بستگی دارد. عوامل بیرونی مربوط به محیط های کارکردی مانند شیب دما، شار گرما، آسیب جسم خارجی (FOD) و... می باشد. رشد لایه TGO یکی از عوامل موثر و مهم در شکست پوشش سد حرارتی است [۱۲]. افزایش طول عمر پوشش های سد حرارتی بسیار مهم است تا موتور هوایی یا توربین گازی بتواند برای مدت های طولانی تری کار کند. زمانی که طول عمر پوشش شد حرارتی طولانی شود، در مصرف انرژی صرفه جویی می شود و آسیب آن برای محیط زیست نیز بسیار کم تر خواهد بود. [۲-۴]

در سال های اخیر، محققان روش های مختلفی برای بهبود مقاومت اکسیداسیون و خوردگی داغ و مقاومت در برابر پوسته شدن سیستم های پوشش شد حرارتی پیشنهاد کرده اند. به عنوان نمونه، نانو ساختار سازی MCrAlY به منظور دستیابی به مقاومت و پایداری بالاتر در برابر اکسیداسیون هم دما و سیکلی نسبت به پوشش های متداول که بر همین اساس افزایش مقاومت به اکسیداسیون در پوشش نانو ساختار MCrAlY به دلیل کنترل رشد لایه اکسیدی و با مورفولوژی ریزتر و افزایش چسبندگی آن به زیر لایه نسبت داده می شود [۱۳]. در میان چندین روش که برای بهبود طول عمر پوشش های سد حرارتی بررسی شده است،

¹Thermal Barrier Coating

²Yttria-Stabilized Zirconia

³Thermally Grown Oxide

⁴Atmospheric Plasma Spraying

⁵Electron Beam-Physical Vapor Deposition

⁶Plasma Spray-Physical Vapor Deposition

⁷Low Pressure Plasma Spray

⁸Vacuum Plasma Spray

⁹High Velocity Oxygen Fuel

¹⁰Foreign Object Damage

۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق هدف ایجاد و بررسی پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده با عنصر سیلیسیم است. در این پژوهش دو گروه نمونه شامل پوشش سد حرارتی معمولی و پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده حاوی پودر سیلیسیم به روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال گردید. پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده به صورت دولایه درجه بندی شده طراحی و مطالعه شد. سیستم پوشش تک لایه معمولی متشکل از لایه واسط NiCoCrAlY و لایه روئی سرامیکی زیرکونیای تقویت شده با ایتریا (YSZ) است. پوشش دولایه ترمیمی شامل لایه واسط NiCoCrAlY و لایه روئی سرامیکی (YSZ) به ترتیب با ۷٪ وزنی Si و ۱۳٪ وزنی Si است. طراحی نمونه ها و لایه های مختلف پوشش به گونه ای انجام شد تا ضخامت پوشش در همه نمونه ها یکسان باشد. جنس زیر لایه Inconel 617 است. تصویر شماتیک نمونه ها در شکل ۱ نشان داده شده است.

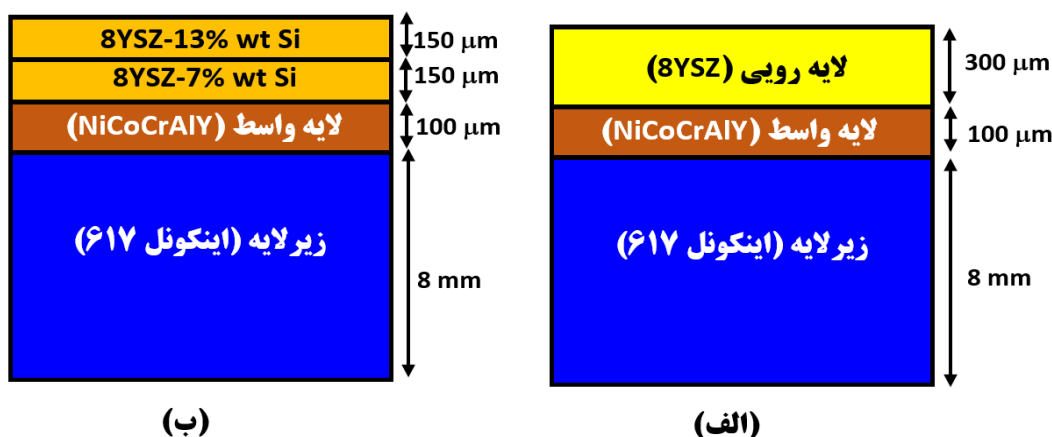
به منظور آماده سازی پودرهای کامپوزیتی $\text{YSZ-7wt\% Si}$ و $\text{YSZ-13wt\% Si}$ ، پودرهای YSZ و Si با نسبت های مورد نظر در محفظه ریخته شدند و به مدت نیم ساعت و با سرعت ۱۸۰ دور بر دقیقه مخلوط گردیدند. قطعه ای از جنس سوپرآلیاژ Inconel 617 به صورت ورق با ابعاد 200×200 میلی متر تهیه گردید.

برای اعمال پوشش از دستگاه پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) مجهز به تفنگ مدل 3MB Metco استفاده شد. گاز آرگون به عنوان گاز اولیه و گاز هیدروژن به عنوان گاز ثانویه مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور افزایش زبری سطح و بهبود چسبندگی پوشش، سطح زیرلایه قبل از انجام فرایند پوشش دهی توسط ذرات آلومینا ذره پاشی شد. در مرحله بعد سطح زیرلایه با استفاده از محلول آلی (استون) شستشو داده شد تا هرگونه چربی زدوده شود و زیرلایه قبل از فرآیند پوشش دهی تا دمای ۱۰۰ درجه سانتی گراد پیش گرم شد.

یک رویکرد، ترکیب مکانیزم خودترمیمی با پوشش است که به موجب آن، پوشش شد حرارتی خودترمیم شونده، دارای قابلیت بهبود ریزترک ها و در نتیجه به تأخیر انداختن شکست نهایی است. [۳-۵ و ۶]

مواد خودترمیم شونده عبارتند از فلزات، پلیمرها، سرامیک ها و مواد مرکب که وقتی از طریق اعمال حرارتی، مکانیکی یا علل دیگر آسیب ببینند، توانایی التیام و بازیابی خواص اولیه خود را دارند. در اکثر مواد خودترمیم شونده (پلیمرها، مواد مرکب، فلزات، بتن و...) عامل خودترمیم کننده عمدتاً به شکل ذرات، میکروکپسول ها و... معرفی می شود [۷].

استفاده از مواد خودترمیم شونده یک راه حل بالقوه جذاب برای کاهش تخلخل ناخواسته در پوشش های سرامیکی ساخته شده توسط پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) است. ساختار متخلخل پوشش های سرامیکی تهیه شده توسط APS اجتناب ناپذیر است. پیش بینی می شود که وقتی ریزترک هایی که در پوشش های سد حرارتی در طی قرار گرفتن در معرض هوای بادامی بالا رشد می کنند، به ذرات ترمیم کننده برخورد می کنند، این ذرات ترمیم کننده شکسته و اکسید می شوند و منجر به تشکیل SiO_2 شیشه ای می شوند. به دلیل ماهیت آمورف و انبساط حجمی مرتبط با اکسیداسیون، SiO_2 قادر است به داخل ریزترک ها جریان یابد و به بخش قابل توجهی از طول ترک نفوذ کند. متعاقباً، SiO_2 داخل ترک با لایه روئی YSZ اطراف خود واکنش نشان می دهد تا زیرکن کریستالی (ZrSiO_4) را تشکیل دهد که چسبندگی سطوح ترک خورده را دوباره برقرار می کند و یک پارچگی ساختار پوشش بالایی را بازیابی می کند [۷-۱۱]. در این پژوهش پوشش های سد حرارتی خودترمیم شونده حاوی SiO_2 بعنوان عامل خودترمیم کننده سنتز و مطالعه شده اند که توانایی بهبود ریزترک های تشکیل شده در طول عمر پوشش سد حرارتی را دارند و توانایی افزایش دوام سیستم و به تأخیر انداختن شکست پوشش سد حرارتی را دارند.

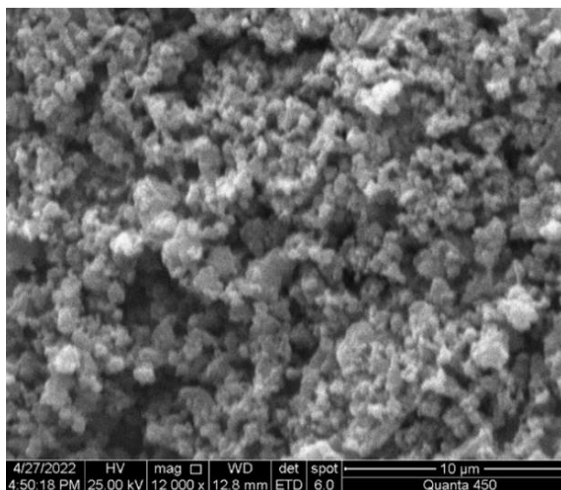


شکل ۱. تصویر شماتیک مجموعه پوشش سد حرارتی شامل زیرلایه و لایه‌های تشکیل دهنده پوشش (الف) پوشش معمولی، (ب) پوشش ترمیمی درجه‌بندی‌شده.

گردید. تصاویر در ولتاژهای ۲۰ و ۲۵ کیلوولت و بزرگنمایی‌های مختلف گرفته شد. با توجه به تصاویر به دست آمده لایه‌های تشکیل‌شده مشخص شد. همچنین، تصاویر دیگری نیز از سطح مقطع نمونه‌های پوشش‌دهی شده تهیه گردید و نقشه توزیع عناصر (MAP) به وسیله آشکار ساز EDS از آن‌ها استخراج گردید.

۳- نتایج و بحث

شکل ۲ تصویر میکروسکوپی الکترون روبشی از پودر اولیه Si را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل ذرات پودر Si مورفولوژی کروی دارند و به نظر می‌رسد که ذرات آگلومره شده و دارای سطح ناصافی باشند.



شکل ۲. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ذرات پودر Si.

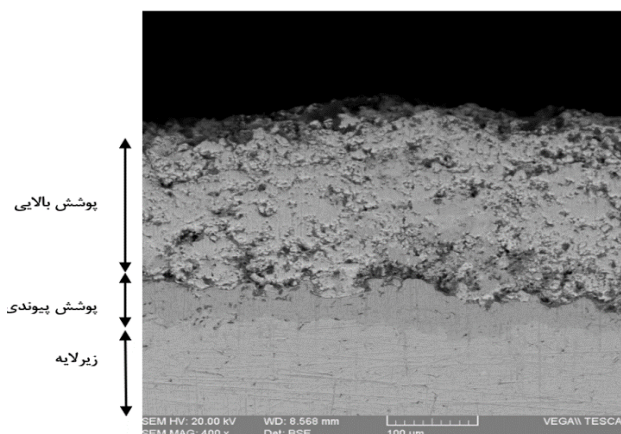
۲-۱- آزمون شوک حرارتی نمونه‌ها

به منظور آزمون شوک حرارتی از کوره جعبه‌ای و دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. انجام شوک با قراردادن نمونه‌ها در دمای ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱۰ دقیقه و سپس سریع سرد کردن نمونه در آب ۲۵ درجه سانتی‌گراد با هدف بررسی انجام شوک حرارتی و ایجاد ریزترک‌ها در پوشش انجام پذیرفت. این عملیات به تعداد ۳۰ چرخه تکرار شد.

۲-۲- مشخصه‌یابی پوشش سد حرارتی

به منظور جلوگیری از کنده شدن و یا تخریب لایه‌ها، نمونه‌ها مانت شدند. سنباده‌زنی نمونه‌های مانت‌شده به وسیله سنباده‌هایی با مش‌های مختلف از ۶۰۰ تا ۲۵۰۰ انجام شد و سپس نمونه‌ها با خمیر الماس ۱ میکرون و پارچه ماهوت پولیش شدند تا سطح آن‌ها کاملاً براق و برای آنالیز مناسب باشد. برای مشاهده دقیق سطح، سطح مقطع و فازهای مختلف در پوشش‌ها از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) با برخورداری از آنالیز عنصری نقطه‌ای به کمک (EDS) استفاده شد. به این منظور از میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی (SEM) مدل Quanta 450، Mira 3 Tescan و Vega II XMU Tescan مجهز به آشکارساز EDS برای بررسی مورفولوژی سطح و آنالیز لایه‌های مختلف پوشش استفاده گردید. سطح مقطع نمونه‌ها پس از آماده‌سازی متالوگرافی مورد بررسی قرار گرفت و تصاویری به وسیله میکروسکوپ الکترونی روبشی از آن‌ها تهیه

شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پولیش شده نمونه پوشش سد حرارتی دو لایه معمولی شامل لایه واسط (NiCrAlY) و لایه روئی سرامیکی (YSZ) را نشان می‌دهد. لایه روئی به عنوان عایق حرارت ایفای نقش می‌کند و لایه واسط یک پوشش با مقاومت خوب در برابر اکسیداسیون است که انطباق لایه روئی سرامیکی و ساختار فلزی زیرلایه را به عنوان واسطه فراهم می‌سازد. همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌گردد، فصل مشترک مابین لایه روئی و لایه واسط به وضوح قابل تشخیص می‌باشد و در فصل مشترک بین دو لایه پوشش روئی و لایه واسط، نشانه‌ای از پوسته پوسته شدن یا لایه لایه شدن مشاهده نمی‌شود. لایه روئی سرامیکی TBC دارای اندازه‌های مختلفی از منافذ است که از ویژگی‌های معمول پوشش‌های اعمال شده به روش پاشش پلاسمائی اتمسفری است. این منافذ می‌توانند رسانایی حرارتی را کاهش داده و مقاومت به شوک حرارتی TBC را افزایش دهند، اما همچنین می‌توانند تحت چرخه‌های حرارتی و بارگذاری مکانیکی، ترک‌ها را ایجاد و منتشر کنند. منافذ موجود در پوشش‌ها مسیرهای نفوذ سریعی را برای انتقال اکسیژن فراهم می‌کنند. اگر بتوان منافذ و ترک‌ها را با عامل خودترمیم کننده پر کرد، نفوذ اکسیژن از نظر تئوری بسیار کندتر اتفاق می‌افتد.



شکل ۳. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش تک‌لایه معمولی (NiCoCrAlY/YSZ) پس از اعمال روی زیرلایه.

شکل ۴ سطح مقطع پوشش ترمیمی دولایه را نشان می‌دهد. در قسمت (الف): لایه اول پوشش بالایی، ۸YSZ حاوی ۷ درصد وزنی Si و لایه دوم ۸YSZ حاوی ۱۳ درصد وزنی Si روی پوشش لایه واسط پاشش شده است.

مطابق با شکل ۴، فصل مشترک بین این دو لایه قابل مشاهده نیست که نشان‌دهنده چسبندگی خوب دو لایه به یکدیگر است. در شکل ۴، لایه دوم پوشش بالایی با ۱۳ درصد وزنی Si دارای سطحی ناصاف و متخلخل با اندازه‌های مختلف ذرات است. زبری و تخلخل این لایه از ویژگی‌های معمول پوشش‌های پاشش پلاسمائی اتمسفری است که می‌تواند هدایت حرارتی را کاهش داده و مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی را افزایش دهد.

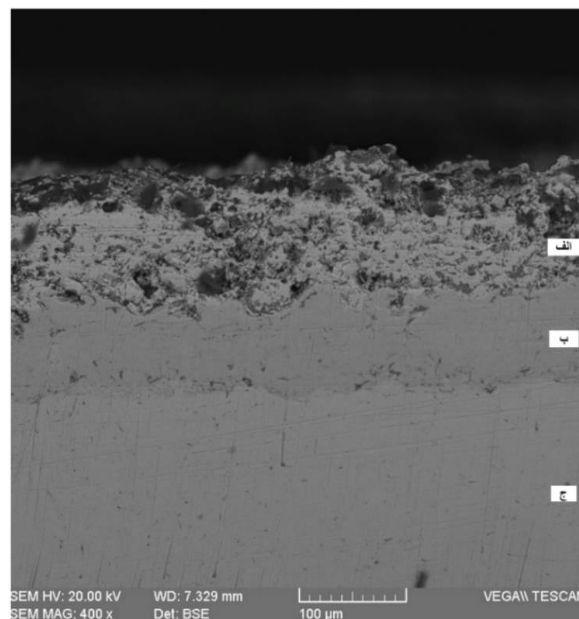
این لایه شامل ذرات پودرهای ۸YSZ و Si است که روی لایه اول پاشش شده‌اند. ذرات Si می‌توانند با اکسیژن واکنش دهند و یک فاز شیشه‌ای تشکیل دهند که شکاف‌ها را پر کرده و آسیب پوشش بالایی را ترمیم می‌کند. در قسمت (الف) شکل ۴ لایه اول پوشش بالایی با ۷ درصد وزنی Si دارای سطحی ناهموار و متخلخل با ذرات کوچک‌تر از لایه دوم است. زبری و تخلخل این لایه نیز از ویژگی‌های معمول پوشش‌های پاشش پلاسمائی اتمسفری است؛ اما، نسبت به لایه دوم کم‌تر مشخص است.

ذرات Si در این لایه همچنین، می‌توانند با اکسیژن واکنش دهند و SiO_2 تشکیل دهند که شکاف‌ها را پر کرده و باعث ترمیم لایه سرامیکی پوشش می‌شود. قسمت (ب) در شکل ۴، لایه واسط است که دارای ساختار یکنواخت‌تر و ذرات ریزتر است که باعث چسبندگی بهتر به زیرلایه می‌شود.

لایه واسط به عنوان یک مانع نفوذی و یک تقویت کننده چسبندگی برای لایه روئی عمل می‌کند. این لایه اکسید می‌شود و یک لایه آلومینای محافظ را تشکیل می‌دهد که از اکسیداسیون و خوردگی بیشتر زیرلایه جلوگیری می‌کند.

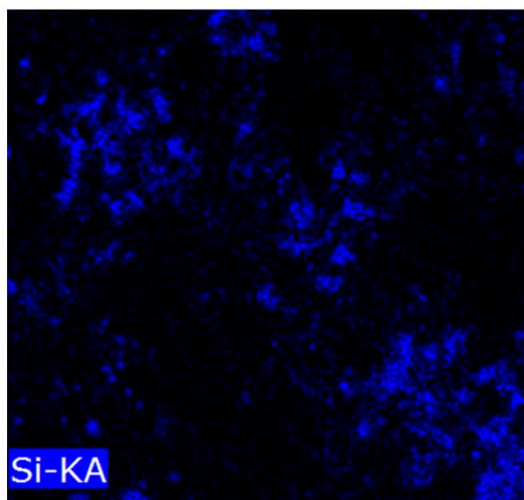
تعادل بین میزان Si و توزیع آن برای دستیابی به بهترین عملکرد TBCهای خودترمیم شونده مورد نیاز است [۸].

گزارش شده است که ساختار دولایه TBCهای خودترمیم شونده می تواند چسبندگی بین پوشش بالایی و پوشش پیوندی را بهبود بخشد، زیرا اولین لایه با محتوای ماده خودترمیمی کم تر می تواند به عنوان یک لایه بافر عمل کند که تنش عدم تطابق حرارتی را کاهش می دهد. سپس لایه دوم با محتوای ماده خودترمیمی بالاتر می تواند اثر ترمیمی و عایق حرارتی بیشتری را ارائه دهد. با این حال، گزارش دیگری عنوان می کند که ساختار دولایه TBCهای خودترمیم شونده می تواند تأثیر منفی بر چسبندگی داشته باشد، زیرا فصل مشترک بین دو لایه می تواند به عنوان منطقه ضعیف در سیستم پوشش سد حرارتی عمل کند و باعث ایجاد ترک یا لایه لایه شدن شود. علاوه بر این، توزیع ناهموار ذرات Si در ساختار دولایه می تواند باعث اختلاف در ضرایب انبساط حرارتی و رفتارهای اکسیداسیون شود که می تواند تنش و کرنش حرارتی را در پوشش افزایش دهد. در گزارش دیگری عنوان شده است که TBCهای خودترمیم شونده دولایه، بسته به محتوای Si و نسبت ضخامت دو لایه، می توانند بین چسبندگی و عملکرد خودترمیم شوندگی، تفاوت داشته باشند [۶]. به این صورت که در ساختار دولایه بهینه می توان با تنظیم مقدار Si و نسبت ضخامت دو لایه، به تعادل بین چسبندگی و عملکرد خودترمیمی دست یافت [۸-۱۰]. بر اساس این نتایج، می توان گفت که ساختار دولایه TBCهای خودترمیم شونده با پودر Si دارای مزایا و معایبی برای چسبندگی هستند و ساختار دولایه بهینه به شرایط و الزامات خاص بستگی دارد.

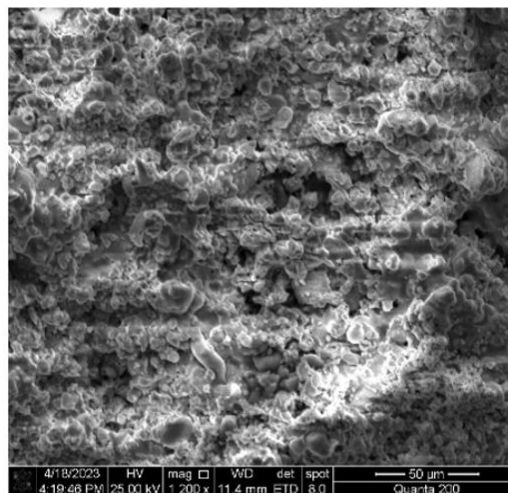


شکل ۴. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح مقطع پوشش دولایه ترمیمی ($\text{NiCoCrAlY/YSZ}+7\%\text{Si/YSZ}+13\%\text{Si}$) پس از اعمال روی زیرلایه.

شکل ۵ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و توزیع عنصر سیلیسیم در سطح پوشش دولایه ترمیمی اعمالی را نشان می دهد. مطابق با شکل، لایه اول دارای پودر ۸YSZ مخلوط با ۷ درصد وزنی پودر Si و لایه دوم دارای پودر ۸YSZ مخلوط با ۱۳ درصد وزنی پودر Si است. این پوشش دارای ریزساختار متخلخل و نامنظم است و دارای شکاف هایی بین لایه ها می باشد. گزارش شده است که وجود مقدار Si بیشتر از مقدار بهینه در پوشش می تواند باعث اکسیداسیون زودرس ذرات Si شود که می تواند اثر ترمیم را کاهش دهد و هدایت حرارتی پوشش را افزایش دهد. مقدار Si بسیار کم در پوشش نیز می تواند اثر ترمیم را محدود کرده و سرعت انتشار ترک را افزایش دهد. بنابراین،



(ب)

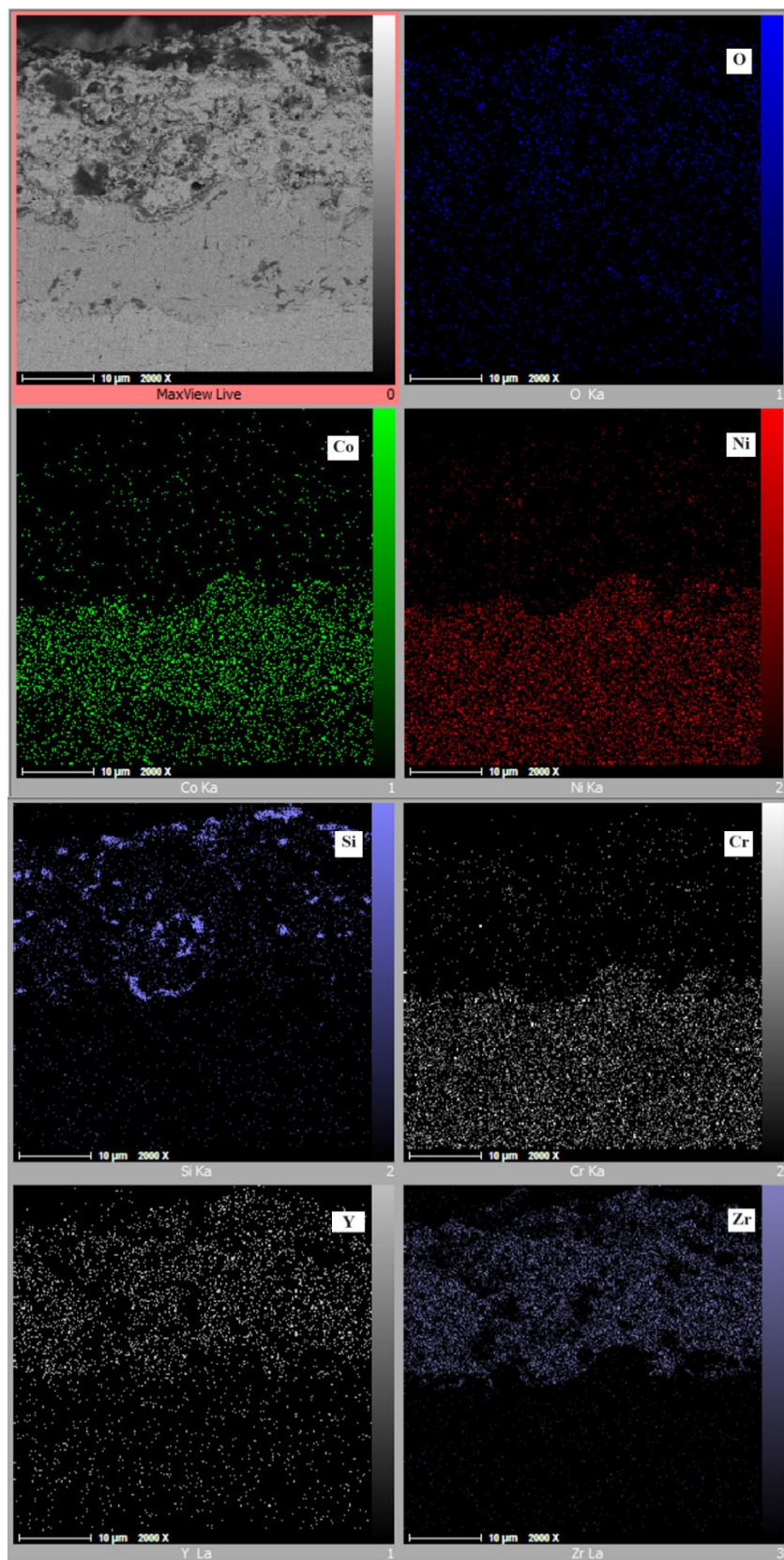


(الف)

شکل ۵. الف) تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح پوشش دولایه ترمیمی ($\text{NiCoCrAlY/YSZ}+7\%\text{Si/YSZ}+13\%\text{Si}$)
ب) توزیع عنصر سیلیسیم در پوشش دولایه ترمیمی ($\text{NiCoCrAlY/YSZ}+7\%\text{Si/YSZ}+13\%\text{Si}$).

می تواند ترک ها یا شکاف های موجود در پوشش را به طور موثر ترمیم کند ولی با توجه به میزان زیاد Si در آن چسبندگی پوشش به طرز قابل توجهی کاهش پیدا می کند. مشخص است که لایه دوم دارای محتوای Si بالاتر از لایه اول است. Si در منافذ لایه های سرامیکی در زمینه YSZ وجود دارد. تصویر نشان می دهد که منافذ لایه های سرامیکی با Si پر شده است، همانطور که با نقاط بنفش رنگ نشان داده شده است. وجود Si می تواند مقاومت به شوک حرارتی پوشش سد حرارتی را بهبود بخشد. وجود مقدار Si بیش تر از مقدار بهینه در پوشش می تواند باعث اکسیداسیون زودرس ذرات Si شود که می تواند اثر ترمیم را کاهش دهد و هدایت حرارتی پوشش را افزایش دهد. مقدار Si بسیار کم در پوشش نیز می تواند اثر ترمیم را محدود کرده و سرعت انتشار ترک را افزایش دهد. بنابراین، تعادل بین میزان Si و توزیع آن برای دستیابی به بهترین عملکرد TBC های خودترمیم شونده مورد نیاز است.

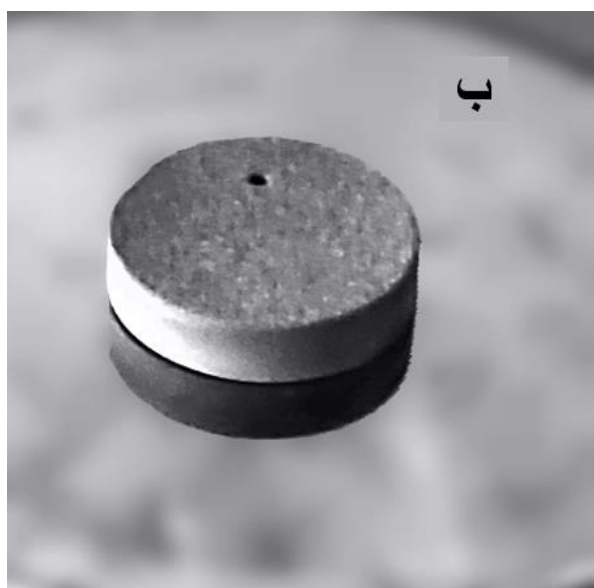
شکل ۶ نقشه توزیع عناصر در سطح مقطع نمونه دولایه ترمیمی ($\text{YSZ}/7\%\text{wt Si}+13\%\text{wt Si}$) می باشد. در شکل ۶، تصویر نشان دهنده رنگ های مختلف است که رنگ بنفش نمایش دهنده توزیع Si و رنگ های دیگر عناصر همچون O آبی، Cr سفید، Co سبز، Ni قرمز، Y طوسی و Zr نیلی در سطح مقطع پوشش دولایه ترمیمی قابل مشاهده می باشد. همان گونه که پیش تر اشاره شد، اولین لایه بعد از لایه واسط، YSZ با ۷ درصد وزنی Si است. در حالی که لایه دوم پوشش بالایی، YSZ با ۱۳ درصد وزنی Si است. همانطور که با رنگ بنفش نشان داده شده است، لایه اول محتوای Si کمتری نسبت به لایه بالایی دارد. بر اساس تصاویر نقشه توزیع عنصری، انتظار می رود که نمونه دولایه ترمیمی دارای مقاومت شوک حرارتی بالا و راندمان مناسب ترمیم ترک باشد؛ زیرا، دارای ریزساختار متراکم و بدون ترک قابل مشاهده است. علاوه بر این، ذرات Si در زمینه YSZ پراکنده می شوند و یک کامپوزیت را تشکیل می دهند که



شکل ۶. نقشه توزیع عنصری سطح مقطع پوشش نمونه دولایه ترمیمی ($\text{YSZ}/7\% \text{wt Si} + 13\% \text{wt Si}$) پس از اعمال روی زیرلایه.

شکل ۷ ظاهر نمونه‌های پوشش سدحرارتی را پس از اعمال شوک حرارتی نشان می‌دهد. شکل ۷-الف سطح نمونه پوشش سدحرارتی معمولی فاقد سیلیسیم را پس از اعمال ۳۰ چرخه حرارتی نشان می‌دهد. شکل ۷-ب ظاهر نمونه پوشش دولایه ترمیمی پس از اعمال ۳۰ چرخه حرارتی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، می‌توان اظهار نمود که نمونه پوشش سد حرارتی دو لایه ترمیمی پس از اعمال ۳۰ چرخه شوک حرارتی تقریباً بدون تغییر باقی مانده است. همان‌گونه که در شکل ۷-الف و ب مشاهده می‌شود، جدایش و لایه‌لایه شدگی در پوشش سدحرارتی معمولی در مناطق وسیع‌تری نسبت به پوشش‌های دولایه ترمیمی ($\text{YSZ}/7\%\text{wt Si}+13\%\text{wt Si}$) اتفاق افتاده است. لایه بالایی پوشش می‌تواند زیرلایه را از اکسیداسیون بیش‌تر محافظت کند؛ اما، همچنین می‌تواند به دلیل ضریب انبساط حرارتی متفاوت، تنش‌ها و کرنش‌هایی را در سیستم پوشش سد حرارتی ایجاد کند.

پوشش سد حرارتی دولایه ترمیمی نسبت به پوشش معمولی مقاومت خوبی در مقابل پوسته‌شدن دارد. TBCهای دولایه با در نظر گرفتن نسبت ضخامت بهینه شده بین لایه‌های مختلف می‌توانند طول عمر بیشتری نسبت به نمونه‌های معمولی داشته‌باشند. همچنین، اعمال پوشش با ضخامت نازک‌تر و بهینه می‌تواند باعث طول عمر بیش‌تر پوشش سد حرارتی شود [۱۲]. پوشش نمونه دولایه ترمیمی ($\text{YSZ}/7\%\text{wt Si}+13\%\text{wt Si}$) از دولایه زیرکونیای تثبیت شده با ایتریا (YSZ) تشکیل شده است. افزودن پودر Si به پودر YSZ می‌تواند مقاومت در برابر شوک حرارتی و بازدهی ترمیم ترک‌های TBC را بهبود بخشد. به این علت که پودر Si می‌تواند یک فاز سیلیکات مایع تشکیل دهد که ترک‌ها و شکاف‌های پوشش را پر می‌کند و پس از سرد شدن جامد می‌شود. همچنین، فاز مایع می‌تواند با اکسیژن موجود در هوا یا زیرلایه واکنش داده و یک لایه اکسید محافظ ایجاد کند که از اکسیداسیون و خوردگی بیش‌تر جلوگیری می‌کند.



شکل ۷. سطح پوشش‌های اعمالی روی زیرلایه الف) نمونه معمولی بدون عامل خودترمیمی ب) نمونه دولایه ترمیمی ($\text{YSZ}/7\%\text{wt Si}+13\%\text{wt Si}$) بعد از ۳۰ چرخه شوک حرارتی.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش سعی شد تا اثر پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده جهت افزایش عمر تیغه‌های موتورهای توربین در محیط اکسیداسیون دمای بالا مطالعه و بررسی شود. در این پژوهش دو گروه نمونه شامل پوشش سدحرارتی معمولی و پوشش سد حرارتی خودترمیم شونده حاوی پودر سیلیسیم به روش پاشش پلاسمای اتمسفری اعمال گردید و مشخصه‌یابی پوشش‌ها با استفاده از مطالعات متالوگرافی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) انجام شد. همچنین، مقاومت شوک حرارتی نمونه‌ها بررسی و مقایسه شد. نتایج حاصل از این مطالعه عبارتند از:

- مطابق با تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، فصل مشترک مابین پوشش لایه روئی و پوشش لایه واسط به وضوح قابل تشخیص بود. مطابق با تصاویر، مشاهده شد که لایه‌ها به خوبی روی هم با زبری معینی قرار گرفته و حد فاصلی بین لایه‌های مختلف نیست و چسبندگی خوبی به هم دارند. لایه NiCoCrAlY نسبت به لایه بالایی پوشش دارای تخلخل کم‌تر و ساختار لایه‌ای و مواج است.
- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی و نتایج نقشه توزیع عنصری نشان دادند که Si در دماهای بالا به صورت فاز شیشه‌ای ترک‌ها و منافذ زمینه YSZ را پر کرده، که این نشان‌دهنده فعالیت خودترمیمی در نواحی مختلف پوشش مورد مطالعه است.
- تصاویر نقاط مورد مطالعه در آنالیز نقطه‌ای نشان دادند در نمونه دولایه، لایه اول YSZ با ۷٪ وزنی Si تخلخل کم‌تر، محتوای Si کم‌تر و مقدار YSZ بالاتری را نسبت به لایه دوم با ۱۳٪ وزنی دارد. این امر نشان می‌دهد که اولین لایه YSZ با ۷٪ وزنی Si ساختاری متراکم‌تر، پایدارتر و قوی‌تر از لایه دوم YSZ با ۱۳٪ وزنی Si دارد که باعث می‌شود اتصال و سازگاری خوبی بین لایه‌های پوشش لایه واسط و پوشش لایه روئی حاوی عامل خودترمیمی بالایی باشد.
- بررسی سطح ظاهری نمونه‌ها پس از اعمال شوک حرارتی نشان داد که جدایش و لایه لایه شدگی در پوشش سد حرارتی معمولی بدون عامل خودترمیمی در مناطق وسیع‌تری نسبت به پوشش خودترمیمی اتفاق افتاده است. پوشش سد حرارتی دولایه ترمیمی پس از اعمال ۳۰ چرخه شوک حرارتی تقریباً بدون تغییر باقی ماند، ولی پوشش معمولی بدون عامل خودترمیمی در همان چرخه‌های اول دچار شکست شد. از این‌رو می‌توان تایید نمود که پوشش سد حرارتی ترمیمی نسبت به پوشش معمولی مقاومت بهتری در مقابل پوسته‌شدن و اکسیداسیون چرخه‌ای حرارتی دارد.
- مطالعات انجام شده روی پوشش‌های سد حرارتی (TBC) دولایه YSZ نشان دادند که افزودن Si به‌عنوان عامل خودترمیم کننده باعث می‌شود در چرخه‌های حرارتی با تشکیل فاز سیلیکات مایع ترک‌ها و شکاف‌های پوشش پر شوند. در نتیجه می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر بهبود خواص خوردگی داغ و اکسیداسیون دمای بالا و دوام این پوشش‌ها داشته باشد.

تشکر و قدردانی

با تشکر از اساتید محترم مهندسی مواد دانشگاه تربیت مدرس و نشریه علوم و مهندسی خوردگی که ما را در نشر این پژوهش یاری کردند.

مراجع

- [1] R. Darolia, Thermal barrier coatings technology: critical review, progress update, remaining challenges and prospects. *International materials reviews*, Vol. 58, No. 6, 2013, pp. 315-348.
- [2] N. Nayeypashae, S. H. Seyedein, M. R. Aboutalebi, H. Sarpoolaky and S. M. M. Hadavi, Finite element simulation of residual stress and failure mechanism in plasma sprayed thermal barrier coatings using actual microstructure as the representative volume. *Surface and Coatings Technology*, Vol. 291, 2016, pp. 103-114.
- [3] B. Liu, J. Zhou, L. Wang, and Y. Wang, Research Progress of Self-Healing Thermal Barrier Coatings: A Review. *Coatings*, Vol. 12, No. 11, 2022, pp. 1724.
- [4] Y. Liu, C. Persson, and J. Wigren, Experimental and Numerical Life Prediction of Thermally Cycled Thermal Barrier Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 13, No. 3, 2004, pp. 415-424.
- [5] W. G. Sloof, Self healing in coatings at high temperatures In *Self healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science*, Dordrecht: Springer Netherlands 2007, pp. 309-321.
- [6] U. Schulz, et al. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerospace Science and technology*, Vol. 7, No. 1, 2004, pp. 73-80.
- [7] S. M. Aouadi, J. Gu, and D. Berman, Self-healing Ceramic Coatings That Operate in Extreme environments: a Review, *Journal of Vacuum Science & Technology*, Vol. 38, No. 5, 2020.
- [8] W. G. Sloof, S. R. Turteltaub, A. L. Carabat, Z. Derelioglu, S. A. Ponnusami and Song, G. M. Crack Healing in Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings, 2015, pp. 219-227.
- [9] T. Ouyang, et al. Enhancement of high temperature oxidation resistance and spallation resistance of SiC-self-healing thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 286, 2016, pp. 365-375.
- [10] S. T. Nguyen, et al., Self-healing ceramic coatings, *Advanced Ceramic Coatings*, Elsevier, 2023, pp. 107-136.
- [11] Vásquez Hernández, G. I et al., Study of the Incorporation of SiC Microfibers and Their Effect on Adherence at the Interface of a NiCoCrAlY-7YSZ Thermal Barrier Coating. *High Temperature Corrosion of Materials*, 101(1), 2024, pp. 105-124.
- [12] Liu, Guang-Lei, Lin Zhu, Xin-Yu Li, Hussain Sajjad, Xiang-Yu Song, Guang-Rong Li, and Guan-Jun Yang. "Achieving durable double-layered thermal barrier coatings by tailoring multi-scale structures." *Journal of Advanced Ceramics* 13, no. 12, 2024, 2068-2086.
- [13] F. Ghadami, A. Sabour Rouh Aghdam, S. Ghadami, B. N. F. Isothermal and Cyclic Oxidation Behavior of the Nanostructured MCrAlY Coatings Deposited by Thermal Spraying Process. *Corrosion Science and Engineering Journal*, 2020, 9(37), 81-96.