



Available in:  
Journal.isrc.ac.ir

Journal of  
Space Science, Technology  
& Applications (Persian)

Vol. 3, No. 1, pp.: 76-86  
2023

DOI:  
10.22034/jssta.2023.386919.1112

## Article Info

Received: 2023-02-22  
Accepted: 2023-05-31

## Keywords

Thermal barrier coatings, YSZ,  
self-healing.

## How to Cite this article

M.S. Zoei, S.J. Mirahmadi, M. Forghani, M. Chiani, S. Asghari, "A review of self-healing technologies in YSZ thermal barrier coatings", *Journal of Space Science, Technology and Applications*, vol 3 (1), p.: 76-86, 2023.

# A review of self-healing technologies in YSZ thermal barrier coatings

M.S. Zoei<sup>1\*</sup>, S.J. Mirahmadi<sup>2</sup>, M. Forghani<sup>3</sup>, M. Chiani<sup>4</sup>, S. Asghari<sup>5</sup>

<sup>1</sup> \*Assistant Prof., Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran (Corresponding Author)  
m.zoei@isrc.ac.ir

<sup>2</sup> Assistant Prof., Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran  
sj.mirahmadi@isrc.ac.ir

<sup>3</sup> M.Sc., Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran  
m.forghani@isrc.ac.ir

<sup>4</sup> Ph.D., Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran  
m.chiani@isrc.ac.ir

<sup>5</sup> Associated Prof., Institute of Materials and Energy, Isfahan, Iran  
s.asghari@isrc.ac.ir

## Abstract

Thermal barrier coatings (TBCs), are advanced ceramic systems that are usually applied to the surface of hot industrial parts to improve equipment performance at higher temperatures. During each thermal cycle, due to the mismatch in the coefficients of thermal expansion of TBC layers, these layers expand and contract unbalanced. The resulting thermal stresses cause the nucleation and growth of microcracks in the TBC system. After several hundreds of thermal cycles, the microcracks eventually combine and form a relatively large crack that causes spallation and separation of the coating, exposing the parts to high temperatures and ultimately leading to catastrophic failure of the entire equipment. The creation of self-healing capability provides the ability to repair cracks spontaneously. In this article, various types of technologies for achieving self-healing in YSZ thermal barrier coatings and the structure and properties of the resulting coatings have been introduced and reviewed. After extracting the technologies of applying self-healing thermal barrier coating and comparing them with each other, it is possible to obtain coatings with self-healing properties according to the needs of each industry and then determined the proper composition of the self-healing coating, the proper thickness of the self-healing coating layer, the proper arrangement of the self-healing coating layer and the parameters of the coating process.



# مروری بر فناوری‌های دستیابی به خودترمیمی در پوشش‌های سد حرارتی YSZ

دسترس پذیر در نشانی:  
Journal.isrc.ac.ir

دو فصلنامه

علوم، فناوری و  
کاربردهای فضایی

سال سوم، شماره ۱، صفحه ۸۶-۷۶  
بهار و تابستان ۱۴۰۲

DOI:  
10.22034/jsssta.2023.386919.1112

تاریخچه داوری

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۳  
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۰

واژه‌های کلیدی

پوشش‌های سد حرارتی، YSZ،  
خودترمیمی.

نحوه استناد به این مقاله

مائده السادات ضوئی، سید جاوید میراحمدی، مجتبی فرقانی، محمد چیانی، سعید اصغری. "مروری بر فناوری‌های دستیابی به خودترمیمی در پوشش‌های سد حرارتی YSZ"، دو فصلنامه علوم، فناوری و کاربردهای فضایی، جلد سوم، شماره اول، صفحات ۸۶-۷۶، ۱۴۰۲.

مائده السادات ضوئی<sup>۱\*</sup>، سید جاوید میراحمدی<sup>۲</sup>، مجتبی فرقانی<sup>۳</sup>،  
محمد چیانی<sup>۴</sup>، سعید اصغری<sup>۵</sup>

- ۱- \* استادیار، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، (نویسنده مسئول) m.zoei@isrc.ac.ir
- ۲- استادیار، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، sj.mirahmadi@isrc.ac.ir
- ۳- کارشناسی ارشد، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، m.forghani@isrc.ac.ir
- ۴- دکتری، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، m.chiani@isrc.ac.ir
- ۵- دانشیار، پژوهشکده مواد و انرژی، اصفهان، ایران، s.asghari@isrc.ac.ir

## چکیده

پوشش‌های سد حرارتی (TBCها)، سیستم‌های سرامیکی پیشرفته‌ای هستند که معمولاً بر روی سطح قطعات داغ اعمال می‌شوند تا امکان افزایش عملکرد تجهیزات در دمای بالاتر را فراهم سازند. در طی هر سیکل حرارتی، به دلیل عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی لایه‌های سیستم TBC، این لایه‌ها به صورت غیرمتعادل منبسط و منقبض می‌شوند. تنش‌های حرارتی حاصل باعث هسته‌گذاری و رشد میکروترک‌ها در سیستم TBC می‌شود. پس از چند صد سیکل حرارتی، میکروترک‌ها به هم می‌پیوندند و ترک نسبتاً بزرگی را تشکیل می‌دهند که موجب ورقه ورقه شدن و جدایش پوشش، قرارگیری قطعات در برابر دمای بالا و در نهایت، منجر به شکست فاجعه‌آمیز کل تجهیز می‌شوند. ایجاد قابلیت خودترمیمی، توانایی ترمیم خودبه‌خودی ترک را فراهم می‌سازد. در این مقاله به معرفی و بررسی انواع فناوری‌های دستیابی به خودترمیمی در پوشش‌های سد حرارتی YSZ و ساختار و خواص پوشش‌های حاصله پرداخته شده است. پس از استخراج فناوری‌های مذکور و مقایسه آن‌ها با یکدیگر می‌توان با توجه به نیاز هر یک از صنایع به دستیابی به پوشش‌هایی با خاصیت خودترمیمی، گزینه مناسب توسعه فناوری پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم را انتخاب کرد و سپس ترکیب مناسب پوشش خودترمیم، ضخامت مناسب لایه‌ی پوشش خودترمیم، چیدمان مناسب لایه پوشش خودترمیم و پارامترهای فرایند پوشش‌دهی را تعیین نمود.

## ۱- مقدمه

خودترمیمی TBCها ترکیبات SiC، MoSi<sub>2</sub> و TiC معرفی شده‌اند که با رهاسازی اکسید ایجاد شده توسط واکنش با هوا و O<sub>2</sub>، ترمیم منافذ و ترک‌های پوشش را امکان‌پذیر می‌سازند [۷].

## ۲- پوشش‌های سد حرارتی

TBCها، سیستم‌های سرامیکی پیشرفته‌ای هستند که معمولاً بر روی سطح فلزی قطعات داغ اعمال می‌شوند تا امکان افزایش عملکرد تجهیزات در دمای بالاتر بدون خرابی را فراهم سازند. علاوه بر صنایع تولید انرژی از جمله صنایع نیروگاهی، از پوشش سد حرارتی در صنایع هوا-فضا، صنعت خودروسازی، صنایع نظامی و دیگر صنایع نیز استفاده شود. این پوشش‌ها سیستم‌های چند لایه‌ای با الزامات خاص مانند نقطه ذوب بالا، رسانایی حرارتی پایین، عدم تغییر فاز در دمای بالا، سختی بالا و چگالی نسبتاً پایین هستند [۹،۸]. پوشش‌های سد حرارتی به طور گسترده بر روی قطعات فلزی از جنس سوپرآلیاژهای پایه نیکل با استحکام کششی و مقاومت خزشی دما بالا اعمال می‌شوند. در ساختار TBC، سه لایه بر روی سطح زیرلایه فلزی وجود دارد: (۱) لایه پوشش میانی<sup>۴</sup> (BC) که بر روی سطح زیرلایه اعمال می‌شود و دارای چسبندگی به زیرلایه، مقاومت به خوردگی و مقاومت به اکسایش بالایی است. BC معمولاً MCrAlY است که M می‌تواند Co، Ni، Fe یا ترکیبات آن‌ها و Y ایتیریم یا Si، Ta یا Hf باشد. در حقیقت پوشش میانی با خواصی مابین زیرلایه فلزی و پوشش بالایی سرامیکی برای جبران اختلاف ضریب انبساط حرارتی به منظور بهبود چسبندگی بین لایه‌ها و ایجاد لایه اکسید حرارتی نفوذناپذیر با خواص مکانیکی قابل قبول در دمای بالا طراحی شده است [۱۰، ۱۱]. (۲) لایه پوشش بالایی<sup>۵</sup> (TC) که از پوشش پایه سرامیکی تشکیل شده و دارای رسانایی حرارتی کم، ضریب انبساط حرارتی بالا، پایداری حرارتی بالا، تحمل کرنش بالا و عیوب کم‌تر مانند ترک است. پوشش بالایی سرامیکی از اکسیدهای سرامیکی دیرگداز ساخته می‌شود، زیرا این مواد خواص حرارتی عالی و همچنین نقاط ذوب بسیار بالاتری نسبت به زیرلایه‌های فلزی دارند. پوشش‌های بالایی بر پایه زیرکونیا، به دلیل ضریب انبساط

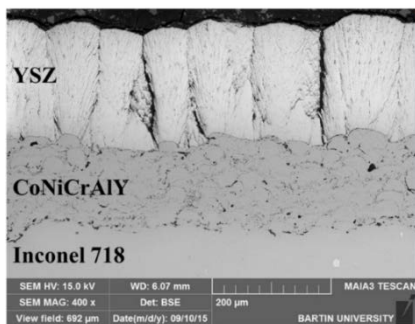
قطعات صنعتی تحت شرایط کاری در معرض عوامل مخربی مانند فشار بالا، گرادیان دمایی، خوردگی، اکسایش و تنش‌های بالا قرار دارند. توسط فرایندهای پوشش‌دهی، مانع ضخیمی بر روی سطوح این قطعات ایجاد می‌شود تا خواص ظاهری، مکانیکی و فیزیکی آن‌ها بهبود یابد [۱-۳]. پوشش‌های سد حرارتی<sup>۱</sup> (TBC)، به منظور محافظت در برابر اکسایش و خوردگی در دمای بالا، فراهم ساختن دماهای عملکردی بالاتر و بهبود قابلیت دوام قطعات و در نتیجه افزایش طول عمر، به کار برده می‌شوند [۴-۶].

متداول‌ترین TBC بر پایه زیرکونیای (ZrO<sub>2</sub>) پایدار شده با ایتیریا (Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)<sup>۲</sup> (YSZ) است، زیرا این سرامیک دارای خواص عالی حرارتی-مکانیکی است و می‌تواند از طریق لایه پوشش MCrAlY به خوبی با اجزای متداول زیرلایه پیوند برقرار کند [۳]. پاشش پلاسما ایتمسفری فرایندی است که به صورت گسترده برای اعمال این پوشش به کار می‌رود. APS TBCها در اثر تنش‌های حرارتی ناشی از عملکرد در دمای بالا، دچار ترک خوردگی می‌شوند [۶]. ترک‌های عمود بر سطح TBC، به خودی خود مضر نیستند، اما اگر همراه با ترک‌هایی باشد که به موازات فصل مشترک گسترش یافته‌اند، منجر به ورقه ورقه شدن پوشش‌های سرامیکی می‌شود که قرارگیری فلز بدون پوشش در معرض محیط دما بالا و گازهای داغ خورنده را به همراه دارد. جایگزینی متناوب TBCها هزینه‌های بالای نگهداری و تعمیر را به همراه دارد. بنابراین لازم است ساختار، خواص، محدودیت‌ها و روش‌های ترمیم پوشش‌های TBC مورد بررسی قرار گیرد [۳].

در سال‌های اخیر، مفهوم مواد خودترمیم<sup>۳</sup> مطرح شده است که به دلیل افزایش مدت زمان عملکرد مواد بسیار مطلوب بوده و همچنین از لحاظ ایمنی انسانی و جنبه‌های مالی نیز مفید است. هدف از کاربرد مواد خودترمیم، بازیابی سریع یکپارچگی و خواص مکانیکی و فیزیکی پس از ایجاد عیوب است. بنابراین، منظور از TBC با قابلیت خودترمیمی، دستیابی به TBC با قابلیت ترمیم خودبه‌خودی ترک و بازیابی یکپارچگی ساختار در محیط اکسیدکننده با درجه حرارت بالا است [۷]. تا به امروز عوامل

<sup>۴</sup> Bond-Coat<sup>۵</sup> Top-Coat<sup>۱</sup> Thermal Barrier Coating<sup>۲</sup> Yttria Stabilized Zirconia<sup>۳</sup> Self-healing materials

در TBCهای رسوب داده شده توسط پاشش پلاسمایی، ورقه ورقه شدن در مرزهای اسپلت<sup>۲</sup> پوشش بالایی سرامیکی اتفاق می‌افتد [۱۵]. علاوه بر عیوب ناشی از حرارت، عیوب TBC ممکن است به دلایل مکانیکی مانند خستگی مکانیکی ناشی از ارتعاش و برخورد ذرات خارجی باشد. در راستای اصلاح پوشش‌های سد حرارتی، در سال‌های اخیر، پیشرفت‌هایی در زمینه توسعه مواد جدید و بهبود فرایندهای رسوبدهی حاصل شده است. این روش‌ها شامل ترکیبات جدید، تغییر ساختار، اعمال عناصر دوپانت در پوشش YSZ، پوشش‌های سد حرارتی چندلایه و فرایندهای خودترمیمی است [۱۵].



شکل (۱): لایه‌های پوشش سد حرارتی [۱۳]

### ۳- فرایند خودترمیمی

#### ۳-۱- مواد سرامیک حجمی خودترمیم

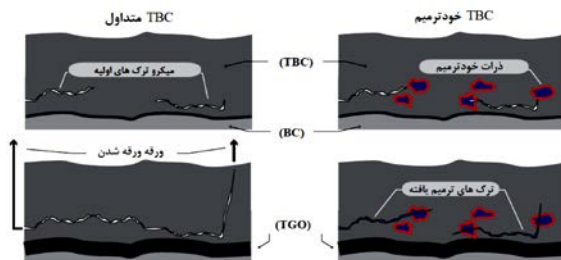
در دهه ۱۹۷۰، برای نخستین بار مواد سرامیکی خودترمیم با قابلیت ترمیم ترک‌ها پس از عملیات حرارتی معرفی شدند. طی چندین سال گذشته، بسیاری از مواد پلیمری، فلزی و پایه بتنی به عنوان مواد خودترمیم معرفی شده‌اند. ایجاد خودترمیمی برای فلزات و سرامیک‌ها چالش برانگیز است، زیرا این مواد به صورت ذاتی ویسکوز نیستند. وجود حداقل یک فاز با ویسکوزیسته نسبتاً بالا در یک کامپوزیت شرط مهمی برای طراحی مواد خودترمیم محسوب می‌شود. فرایندهای خودترمیمی به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند: (۱) فرایندهای خودکار که بدون احتیاج به انرژی اضافی آسیب را ترمیم می‌کنند و (۲) فرایندهای غیرخودکار که یکی از صورت‌های انرژی مانند حرارت، نور یا هر تأمین‌کننده خارجی انرژی برای فعال‌سازی خودترمیمی

حرارتی نسبتاً بالا، مقاومت در برابر اکسایش، مقاومت در برابر شوک حرارتی، رسانایی حرارتی پایین و پایداری میکروساختار در میان TBCها بسیار مورد توجه هستند [۱۲]. بر اساس الزامات محصول، پوشش بالایی توسط فرایندهای پاشش پلاسمای اتمسفری (APS)، رسوبدهی فیزیکی بخار-پاشش پلاسمای (PS-PVD)، رسوبدهی فیزیکی بخار-پرتو الکترونی (EB-PVD) و پاشش پلاسمایی سوسپانسیونی (SPS) رسوبدهی شده و پوشش میانی توسط پاشش پلاسمای اتمسفری یا خلاء، پاشش حرارتی سرعت بالا توسط سوخت اکس میژن (HVOF)، پاشش حرارتی با قوس الکتریکی یا فرایند پاشش سرد اعمال می‌شود [۱۰]. فرایندهای پاشش حرارتی معمولاً ساختاری با مقدار اکسید کم، رسانایی حرارتی کم‌تر و رسوبدهی فیزیکی بخار توسط پرتو الکترونی پوششی با عمر طولانی‌تر ایجاد می‌کند [۱۳]. به همین دلیل با انتخاب فرایند EB-PVD و تغییر پارامترهای فرایند، تعداد و محل تخلخل‌ها در فرایند بهینه می‌شود و رسانایی حرارتی به سمت مقادیر به دست آمده توسط روش APS ( $\leq 1$  W/m.K) کاهش می‌یابد [۹]. (۳) لایه اکسید رشد یافته حرارتی<sup>۱</sup> (TGO) که در فصل مشترک پوشش میانی و پوشش بالایی (TC) ایجاد می‌شود (شکل (۱)). لایه اکسیدی TGO که عمدتاً از  $Al_2O_3$  تشکیل شده است، در فصل مشترک BC/TC هنگام کار در دمای بالا در معرض هوا ایجاد می‌شود. TGO لایه نازک توسعه یافته است که وظیفه کاهش انتشار اکسیژن به سمت زیرلایه، مقاومت در برابر اکسایش و تحمل شوک حرارتی را بر عهده دارد. در مراحل اولیه عملکردی، TGO به محافظت از زیرلایه در برابر اکسایش کمک می‌کند و قابلیت دوام TBCها را بهبود می‌بخشد. اما تنش‌های خارج از صفحه که به طور معمول در زبری فصل مشترک BC-TC ایجاد می‌شوند، با ضخیم شدن TGO افزایش می‌یابند تا جایی که در نهایت باعث ترک خوردگی در پوشش‌های سرامیکی ترد و جدایش در فصل مشترک و شکست TBC شوند [۱۴]. بنابراین، قابلیت دوام TBCها عمدتاً با لایه اکسید رشد یافته حرارتی، هسته‌گذاری و انتشار ترک در امتداد فصل مشترک TGO-TC مرتبط بوده که ناشی از تنش عدم تطابق حرارتی بین لایه‌های سرامیکی و فلزی در هنگام خنک‌سازی از دمای کاری است [۸، ۱۳، ۱۴]. هم‌چنین،

<sup>۲</sup> Splat

<sup>۱</sup> Thermally Grown Oxide

به داخل ترک جویان می‌پلبد، به گونه‌ای که با ماده زمینه واکنش داده و ترک را ترمیم می‌سازد [۱۷، ۱۸]. بنابراین، بررسی و مطالعه پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم با عوامل مختلف خودترمیمی حائز اهمیت است و در ادامه ارائه می‌شود.



شکل (۲): نمایش شماتیک مکانیزم‌های شکست TBC و اصول سیستم TBC خود ترمیم [۱۸]

### ۳-۲-۱- پوشش‌های سد حرارتی خود ترمیم با عامل خود ترمیمی SiC توسط فرایند APS

در این روش، برای بهبود مقاومت در برابر اکسایش TBC معمولی، پوششی تحت عنوان SAZ شامل SiC به عنوان عامل خودترمیمی، 8YSZ و  $Al_2O_3$ ، توسط فرایند پاشش پلاسمای هوا (APS) بر روی پوشش کلاسیک دولایه‌ای TBC شامل پوشش میانی (BC) و پوشش YSZ اعمال می‌شود. ایوناگ<sup>۳</sup> و همکارانش [۱۱] با هدف بهبود مقاومت در برابر اکسایش و ورقه شدن سیستم TBC، از عامل خودترمیم SiC استفاده کردند و به بررسی مکانیزم اکسایش عامل خودترمیم، اثر پرکنندگی و آبندی، رفتار اکسایش TBC در دمای بالا و تکامل ترک در TGO و پوشش پرداختند. در این بررسی، دو نوع نمونه TBC، شامل TBC YSZ و SAZ TBC توسط پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) ایجاد شدند که تصویر شماتیک ساختار لایه‌ای این پوشش‌های کامپوزیتی در شکل نشان داده شده است. پودر  $NiCoCrAl$  برای پوشش BC، پودر  $Y_2O_3 - ZrO_2$  (8YSZ) برای لایه YSZ و ترکیب پودرهای SiC با درصد وزنی ۶٪، 8YSZ با درصد وزنی ۵۶٪ و  $Al_2O_3$  با درصد وزنی ۳۸٪ برای SAZ به کار برده شده است. قطر پودرهای SiC، 8YSZ و  $Al_2O_3$  برابر با nm

مورد نیاز است. مواد خودترمیم به دو دسته خودترمیم بیرونی<sup>۱</sup> و خودترمیم ذاتی<sup>۲</sup> نیز تقسیم‌بندی می‌شوند. خاصیت خودترمیمی بیرونی مستلزم عوامل افزودنی خارجی به صورت کپسول‌های نانو یا میکرو، فیبرهای توخالی، آوند یا ذرات تسهیل‌کننده است، در حالی که مواد خودترمیم درونی به افزودن چنین موادی نیاز ندارند [۱۶].

### ۳-۲-۲- پوشش‌های سد حرارتی خود ترمیم

ایجاد ساختار متخلخل در پوشش‌های سرامیکی توسط فرایندهایی هم‌چون APS اجتناب‌ناپذیر است و منافذ موجود در پوشش‌ها، مسیرهای انتشار سریع اکسیژن را فراهم می‌سازند. اگر منافذ و ترک‌ها توسط عامل خودترمیم پر شوند، انتشار اکسیژن بسیار کندتر می‌شود. بنابراین، مواد خودترمیم‌یک راه‌حل نوآورانه برای رفع عیوب پوشش‌های متخلخل است [۱۱]. پوشش‌های خودترمیم مانند مواد حجمی خودترمیم نیازمند مشارکت عوامل خودترمیمی هستند که با تحریک بیرونی فعال می‌شوند. برای ایجاد یک TBC خودترمیم، ماده‌ای که به عنوان عامل ترمیم انتخاب می‌شود، باید دارای خواص زیر باشد: (الف) دارای نقطه ذوبی بالاتر از حداکثر دمای کاری برای TBC‌ها بوده و ضریب انبساط حرارتی در تطابق با یکی از مواد TBC باشد، (ب) قابلیت اکسایش داشته باشد تا ترک بسته شود، (ج) در شرایط تشکیل سیال و پر شدن ترک توسط آن، ترشدگی سطوح ترک باید توسط واکنش شیمیایی حالت جامد مابین مایع و مواد TBC ادامه یابد و منجر به تشکیل ماده تحمل‌کننده بارگذاری شود. خروجی نهایی همه این واکنش‌ها، ترک پرشده با مواد کریستالی پیوند خورده با هدایت حرارتی پایین است. برای کاربردهای واقعی، معیارهای دیگر طراحی باید در نظر گرفته شود. کسر حجمی و تاریخ ماندگاری نیز وارد می‌شود. باید مطابق با ابعاد حجمی ترک تنظیم شوند. اصول مکانیزم خودترمیمی در سیستم TBC در شکل (۲) نشان داده شده است. در طی فرایند پوشش‌دهی عامل خودترمیمی صلب در دمای بالا، پوشش بالایی TBC جاسازی می‌شود. هنگامی که ترک ناشی از سیکل حرارتی به عامل خودترمیم می‌رسد، این عامل خودترمیم اکسید شده و

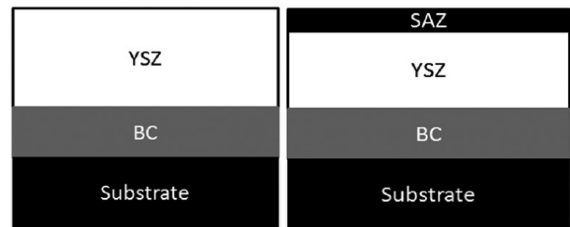
<sup>3</sup> Ouyang

Extrinsic  
<sup>2</sup> Intrinsic

پلاسمای هوا (APS) بر روی پوشش کلاسیک دولایه‌ای TBC شامل پوشش میانی (BC) و پوشش YSZ اعمال می‌شود. پوشش خودترمیم TiC پس از عملیات پیش اکسایش در کوره در دمای  $600^{\circ}\text{C}$  موجب جلوگیری از رشد اکسیدهای مضر توسط تشکیل لایه خودترمیم کم تخلخل در فصل مشترک پوشش بالایی (TiC) / پوشش میانی (BC) می‌شود. تحقیقات نشان داده که TiC عامل خودترمیمی مناسبی در پوشش‌های APS و قابل مقایسه با  $\text{Al}_2\text{O}_3$  است. TiC تخلخل را (برای نمونه از  $43\%$  به  $46\%$ ) کاهش داده و موجب کاهش قابل توجه ترک و منافذ می‌شود. در حقیقت اکسایش / انبساط TiC در پوشش نقش مهمی در آب‌بندی منافذ دارد [۱۹].

ایوناگ و همکارانش [۱۵]، به بررسی پوشش‌های خودترمیم شامل نانوذرات TiC،  $\text{Al}_2\text{O}_3$  و 8YSZ (TAZ) با نسبت‌های مختلف (TAZ1، TAZ2 و TZ)، مابین TC و BC پرداختند. در این بررسی در TAZ1 از ترکیب پودرهای TiC با درصد وزنی  $20\%$ ، 8YSZ با درصد وزنی  $40\%$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با درصد وزنی  $40\%$ ، در TAZ2 از ترکیب پودرهای TiC با درصد وزنی  $10\%$ ، 8YSZ با درصد وزنی  $45\%$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با درصد وزنی  $45\%$  و در TZ از ترکیب پودرهای TiC با درصد وزنی  $20\%$ ، 8YSZ با درصد وزنی  $80\%$  بدون  $\text{Al}_2\text{O}_3$  استفاده شده‌است. در همه ترکیبات قطر پودرهای TiC، 8YSZ و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  برابر با  $40\text{ nm}$  بوده‌است. مورفولوژی سطح مقطع تمام پوشش‌های کامپوزیت TBC قبل از آزمون نشان داده که پوشش‌ها زبر و ناهموار بوده و چسبندگی مناسبی به پوشش‌های میانی داشته‌اند. همچنین منافذ و ترک‌های ریز زیادی در پوشش‌ها وجود داشته‌است. تخلخل پوشش‌های کامپوزیتی پاشش شده قبل و پس از عملیات حرارتی خودترمیم در شکل (۴) نشان داده شده‌است. تخلخل با افزایش زمان عملیات حرارتی کاهش یافته که نشان‌دهنده‌ی آزادسازی عامل خودترمیمی در طی عملیات حرارتی و اثر خودترمیمی آن به‌صورت پرشوندگی ترک‌ها و منافذ است. نتیجه قابل توجه آن است که تخلخل اولیه و نهایی برای پوشش‌های TZ بسیار کمتر از تخلخل در پوشش‌های TAZ1 و TAZ2 است.

$60^{\circ}\text{C}$  بوده‌است. تحلیل مورفولوژی سطح مقطع قبل و بعد از عملیات حرارتی، اثرات پرشوندگی و آب‌بندی توسط منافذ و میکروترک‌های پر شده در سطح میکروساختار، کاهش تخلخل در پوشش‌های SAZ پس از اکسایش به مقدار  $76/71\%$ ، از  $19/9\%$  به  $2/14\%$  و عدم آسیب به فصل مشترک‌های پوشش ناشی از انبساط حجمی حاصل خودترمیمی در دمای بالاتر از  $720^{\circ}\text{C}$  را نشان می‌دهد. نتایج آزمون الکتروشیمیایی نیز اثر پرشوندگی و آب‌بندی در پوشش‌های SAZ پس از عملیات حرارتی را تأیید می‌کنند. چگالی جریان خوردگی برای نمونه‌های TBC SAZ پس از عملیات حرارتی خودترمیم  $70/68\%$  کاهش یافته که نشان‌دهنده اثر پرشوندگی و آب‌بندی است. بنابراین، پوشش‌های SAZ باعث افزایش مقاومت در برابر اکسایش دمای بالای سیستم TBC می‌شوند. به عبارت دیگر، پوشش‌های SAZ می‌توانند مقاومت در برابر اکسایش و مقاومت در برابر ورقه ورقه شدن سیستم TBC را در طی اکسایش دمای بالا به میزان قابل توجهی افزایش دهند.



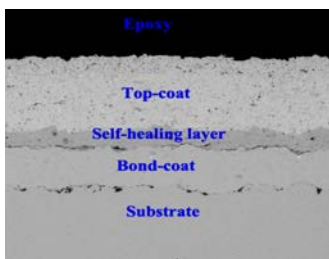
(ب)

(الف)

شکل (۳): نمایش شماتیک (الف) ساختار YSZ TBC و (ب) ساختار SAZ TBC [۱۱]

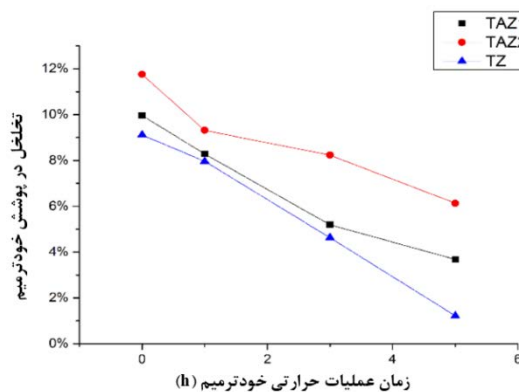
### ۳-۲-۲- پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم با عامل خودترمیمی TiC توسط فرایند APS

یکی دیگر از عوامل خودترمیم در پوشش‌های سد حرارتی، ترکیب TiC است که در اثر واکنش با اکسیژن هوا، اکسید  $\text{TiO}_2$  را آزاد می‌کند و ترک‌ها و منافذ موجود در پوشش‌ها را بهبود می‌بخشد. در این روش، برای بهبود مقاومت در برابر اکسایش TBC معمولی، پوششی تحت عنوان SAZ شامل TiC به عنوان عامل خودترمیمی، 8YSZ و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  توسط فرایند پاشش



شکل (۵): تصویر سطح مقطع پوشش سد حرارتی خودترمیم

[۱۹]YSZ/TAZ/NiCoCrAlY



شکل (۴): تغییرات تخلخل در پوشش‌های خودترمیم TAZ1، TAZ2 و TZ

[۱۵]

### ۳-۲-۳- پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم با عامل خودترمیمی $\text{MoSi}_2$ توسط فرایند APS

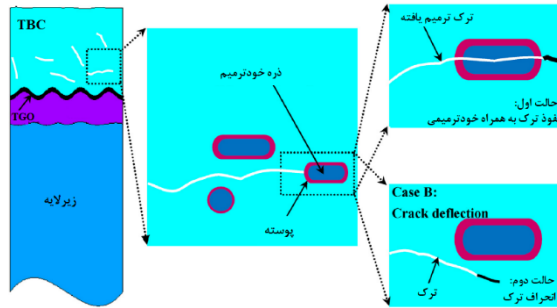
اسلوف<sup>۱</sup> [۲۰] برای نخستین بار ساخت پوشش‌های سد حرارتی با قابلیت خودترمیمی توسط جاسازی ذرات دی‌سیلیسید مولیبدن ( $\text{MoSi}_2$ ) به عنوان عامل ترمیم نزدیک به سطح مشترک به منظور آب‌بندی ترک‌ها قبل از انتشار در زمینه YSZ و شکست پوشش را مورد بررسی قرار داد. این اثر خودترمیمی توسط اکسایش  $\text{MoSi}_2$  برای تشکیل  $\text{SiO}_2$  آمورف حاصل می‌شود که در حین کار در دمای بالا به ترک‌ها نفوذ می‌کند. سپس  $\text{SiO}_2$  با YSZ اطراف واکنش نشان داده و  $\text{ZrSiO}_4$  تشکیل می‌شود که به دیواره‌ها می‌چسبند و پتانسیل ایجاد ترک دوم در همان مکان را کاهش می‌دهد. در این راستا امکان ترکیب آلیاژ  $\text{MoSi}_2$  حاوی بور ( $\text{B-MoSi}_2$ ) با پوشش YSZ نیز مطرح شد و نتایج نشان داد که افزودن این ذرات باعث ایجاد تنش‌های اضافی در طی سیکل‌های حرارتی نمی‌شود. در غیاب اتمسفر اکسایشی، ذرات  $\text{B-MoSi}_2$  در دمای  $1100^\circ\text{C}$  جامد باقی می‌مانند و ضریب انبساط حرارتی آن‌ها نزدیک به زمینه YSZ است. علاوه بر این، سیالیت  $\text{SiO}_2$  در دمای سرویس توسط آلیاژسازی  $\text{MoSi}_2$  با B افزایش می‌یابد که موجب پر شدن ترک‌ها می‌شود [۱۷].

در مبحث پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم توسط ذرات ترمیمی بر پایه  $\text{MoSi}_2$ ، روش‌های پوشش‌دهی (ایجاد پوسته) برای ایجاد کپسول<sup>۲</sup> حائز اهمیت است. در اتمسفر حاوی اکسید بیژن، مواد در دمای  $1200-1000^\circ\text{C}$  به سرعت اکسید می‌شوند. TBCهای صنعتی بر پایه  $\text{ZrO}_2$  متخلخل هستند (در حدود ۲۰ درصد حجمی) و به عنوان یک رسانای یونی عالی برای

وانگ و همکارانش [۱۹] پوشش سد حرارتی خودترمیم چند لایه‌ی  $\text{YSZ/TiC+Al}_2\text{O}_3+\text{YSZ (TAZ)/NiCoCrAlY}$  توسط فرایند پاشش پلاسمای اتمسفری بر روی زیرلایه اعمال کردند که لایه خودترمیم TAZ بین لایه YSZ و  $\text{NiCoCrAlY}$  قرار گرفت (شکل ۵). اندازه‌گیری تنش پسماند نشان داده که این تنش فشاری بوده که تأثیر مثبتی بر عملکرد خستگی تماسی پوشش در هنگام تحمل آس‌ییب حاصل از جسم خارجی دارد. تنش پسماند فشاری از انتشار و گسترش ترک از سطح پوشش جلوگیری کرده و در نتیجه موجب افزایش طول عمر TBCها می‌شوند. بررسی پوشش در این مطالعه نشان داد که در پوشش TBC با لایه خودترمیم بدون عملیات حرارتی فعال‌کننده خودترمیمی، میکروحفره و میکروتُرک‌های بیش‌تری در لایه خودترمیم وجود خواهند داشت. در این حالت، در صورت اعمال کم‌تری برای TBC خودترمیم بدون عملیات فعال‌سازی خودترمیمی، اتفاق می‌افتد. اما در صورت عملیات پیش خودترمیمی به منظور فعال‌سازی خودترمیمی، میکروحفره‌ها و میکروتُرک‌ها با ماده خودترمیم پر شده و مانعی برای نفوذ اکسیژن بیرونی به فصل مشترک بین لایه TAZ و لایه پوشش میانی، کاهش فشار جزیبی اکسیژن در فصل مشترک بین لایه TAZ و لایه پوشش میانی و در نتیجه کاهش نرخ رشد لایه TGO می‌شود.

<sup>2</sup> Capsule

<sup>1</sup> Sloof



شکل (۶): نمایش شماتیک مکانیزم خودترمیمی TBCها در دمای بالا [۲۱]

چن<sup>۲</sup> و همکارانش [۶] به مقایسه ایجاد لایه بالایی پوشش TBC با توزیع همگن ذرات MoSi<sub>2</sub> در کل پوشش و توزیع ذرات MoSi<sub>2</sub> فقط در مناطق نزدیک به فصل مشترک یعنی محل متداول وقوع ترک خوردگی و لایه لایه شدگی پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که چنین طراحی نه تنها احتمال برخورد ذرات با ترک‌های انتشار یافته و درگیر شدن در ترمیم ترک بعدی را به حداکثر می‌رساند، بلکه اثر ذرات ترمیمی را بر خصوصیات کلی پوشش بالایی (به عنوان مثال ضریب انبساط حرارتی (CTE)، رسانایی حرارتی و سختی) را به حداقل می‌رساند. همچنین، در این مطالعه، رابطه ضخامت پوسته با شعاع ذره ترمیمی نیز تعیین شد.

دیرآغلو<sup>۳</sup> و همکارانش [۳] به مطالعه پوشش TBC با ذرات MoSi<sub>2</sub>(B) پوشش داده شده بر روی زیرلایه فولاد نرم توسط پاشش پلاسمای اتمسفری (APS) پرداختند. مشاهدات SEM به وضوح نشان داد که لایه فصل مشترک تشکیل شده شامل ZrSiO<sub>4</sub> (زیرکون) بوده و ZrSiO<sub>4</sub> کاملاً به زمینه پیوند خورده است. در مورد ترک‌های نازک‌تر، هیچ SiO<sub>2</sub> دیگری مشاهده نشد و فقط ZrSiO<sub>4</sub> در ترک دیده شده است. اما ذرات ترمیمی کوچک‌تر MoSi<sub>2</sub> غنی شده با B نیز که به فاصله کافی دور از ترک‌ها قرار گرفته بودند، به ZrSiO<sub>4</sub> تبدیل شده‌اند. هیچ نشانه‌ای از تشکیل ترک محلی در مجاورت ذرات ترمیم بزرگ‌تر در فاصله دور از ماکرو ترک اعمال شده و هیچ نوع علامت ترک خوردگی در فصل مشترک TBC – ZrSiO<sub>4</sub> گزارش نشده است.

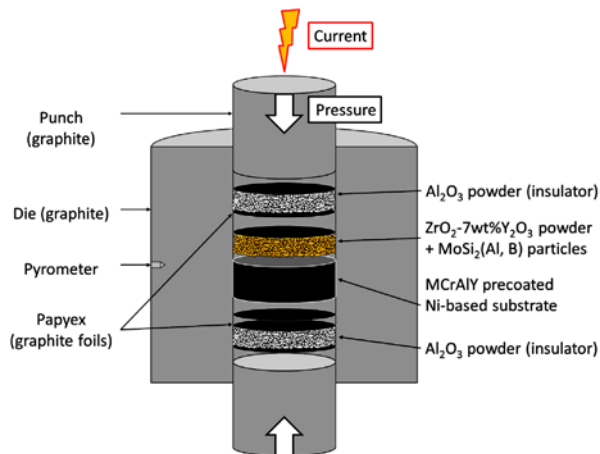
اکسیژن در دمای بالا شناخته می‌شوند. به عبارتی دیگر، ساختار متخلخل YSZ نفوذ اکسیژن را آسان می‌کند که منجر به اکسایش زودرس ذرات حتی در صورت عدم وجود ترک‌های درگیر در فرایند ترمیم TBCها می‌شود. همچنین تشکیل SiO<sub>2</sub> تشکیل شده با ZrO<sub>2</sub> واکنش داده و زیرکون تشکیل می‌شود. بنابراین، برای جلوگیری از شروع زودرس مکانیزم ترمیم در TBCها و حفظ ذرات در حالت غیرفعال، نیاز به اعمال پوسته‌ای بی‌اثر و غیر قابل نفوذ در برابر اکسیژن بر روی سطح ذرات بین فلزی است. از این رو، کپسوله شدن ذرات MoSi<sub>2</sub> توسط پوسته پایدار در دمای بالا و غیر قابل نفوذ در برابر اکسیژن به منظور جلوگیری از اکسایش خودبه‌خودی این ذرات مطرح می‌شود. مواد مختلفی برای ایجاد پوسته مانند ZrSiO<sub>4</sub>، Al<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>13</sub> و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. با این حال، معمولاً از Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> به دلیل نفوذپذیری کم برای اکسیژن و پایداری حرارتی خوب برای پوشش‌دهی سرامیک‌های خودترمیم در TBCها استفاده می‌شود. رسوب پوسته‌ای از آلومینا در اطراف ذرات بر پایه MoSi<sub>2</sub> از طریق دو روش متداول رسوب‌دهی لایه اتمی<sup>۱</sup> (ALD) و سل-ژل انجام می‌شود [۷، ۱۴، ۲۱]. فرایند خودترمیمی با کاربرد ذرات ترمیمی بر پایه MoSi<sub>2</sub> کپسوله شده در شکل (۶) نشان داده شده است. هنگامی که TBCها تحت تنش‌های حرارتی یا سایر بارهای خارجی قرار می‌گیرند، میکروترک‌ها می‌توانند در داخل یا فصل مشترک TBCها ایجاد شوند، هنگامی که میکروترک‌ها به ناحیه‌ای که در نزدیکی کپسول قرار دارد انتشار می‌یابند، کپسول شکسته شده و برخی از مواد خودترمیم (معمولاً از فلز یا مواد آلیاژی) رها خواهند شد. این مواد ترک را پر می‌کند و مانع از انتشار ترک می‌شوند (مورد A). اگر میکروترک‌ها کپسول را دور بزنند، خودترمیمی اتفاق نمی‌افتد (مورد B). در مورد A، کپسول در جای B مسیر مستقیم برای تحقق فرایند ترمیمی TBCها در دمای بالا است. بنابراین، ایجاد اثر ترمیمی، فرایند دینامیکی انتشار ترک و در نتیجه شکست فصل مشترک TBCها را به تأخیر می‌اندازد [۲۱].

<sup>3</sup> Derelioglu

Atomic layer deposition  
<sup>2</sup> Chen



نتایج نشان دهنده افزایش قابل توجه تعداد سیکل حرارتی تا زمان پدیدار شدن ورقه شدن ورقه شدن سیستم بوده است.



شکل (۷): نمایش شماتیک مواد در قالب گرافیتی برای ساخت TBCهای خودترمیم توسط زینتر پلاسمای جرقه‌ای [۱۴]

نتایج مطالعه نوزاهیک و همکارانش [۷] در زمینه پوشش سد حرارتی خودترمیم ساخته شده توسط زینتر پلاسمای جرقه‌ای (YSZ - 20MoSi<sub>2</sub>) نشان داد که ذرات MoSi<sub>2</sub> به طور همگن در زمینه YPSZ توزیع شده و هیچ واکنش قابل مشاهده‌ای بین زمینه YPSZ و ذرات MoSi<sub>2</sub> در نتیجه فرایند زینتر رخ نداده است.

کولزیک مالکا<sup>۵</sup> و همکارانش [۲۴] به بررسی تأثیر پوشش YPSZ با ذرات MoSi<sub>2</sub> ساخته شده به روش زینتر پلاسمای جرقه‌ای بر خواص ترمومکانیکی YPSZ و قابلیت خودترمیمی آن پرداختند. در این مطالعه، کسر حجمی ذرات MoSi<sub>2</sub> تغییر کرده و در چهار حالت شامل ذرات خالص MoSi<sub>2</sub>، ذرات MoSi<sub>2</sub> آلیاژ شده با Al، ذرات MoSi<sub>2</sub> آلیاژ شده با B، ذرات MoSi<sub>2</sub> آلیاژ شده با Al و B بررسی شدند. نتایج تحلیل ترمومکانیکی نشان داد که عدم تطابق ضریب انبساط حرارتی بین زمینه YPSZ و ذرات خلص و آلیاژی MoSi<sub>2</sub> کم بوده و از ترک خوردن ذرات در سیکل‌های حرارتی جلوگیری شده است. در نتیجه، جاسازی ذرات MoSi<sub>2</sub> منجر به افزایش عدم تطابق حرارتی بین پوشش بالایی سرامیکی و سوپراآلیاژهای بر پایه نیکل نمی‌شود. بررسی مقادیر مقاومت در برابر شکست فرورفتگی نشان داد که این

سانگ<sup>۱</sup> و همکارانش [۲۲] رفتار عامل خودترمیم Si معمولی و Si کپسوله در برابر مقاومت در برابر ترک در پوشش TBC مورد ارزیابی قرار دادند. سه نوع چیدمان پوشش شامل TBC معمولی با پوشش بالایی YSZ (نمونه A)، TBC خودترمیم با عامل خودترمیمی در لایه محافظ (نمونه B) و TBC خودترمیم با عوامل خودترمیم کپسوله شده (نمونه C) مطابق بررسی شد. مقایسه نتایج میکرو ساختار پوشش‌ها نشان داد که پوسته کپسول و اندازه بزرگ‌تر حاصل از آگلومره شدن<sup>۲</sup>، تبخیر عامل ترمیم را کاهش داده است که کپسوله کردن از اکسایش زودرس در حین فرایند APS جلوگیری می‌کند. نتایج سیکل حرارتی نشان داده که نمونه‌های A، B و C به ترتیب پس از ۱۰۶۷، ۱۱۴۳ و ۱۱۰۳ سیکل ورقه ورقه شده‌اند. بنابراین TBC با عامل خودترمیم (نمونه‌های B و C) مقاومت خستگی حرارتی بالاتری در مقایسه با YSZ معمولی از خود نشان داده است. مشاهدات رفتار ترمیم ترک نیز نشان داد که مکانیزم‌های مقاومت در برابر ترک بر اساس توزیع و شکل عوامل ترمیم است.

### ۳-۲-۴- پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم توسط فرایند زینتر پلاسمای جرقه‌ای

فرایند زینتر پلاسمای جرقه‌ای<sup>۳</sup> (SPS) با قابلیت ساخت پوشش‌های چند لایه توسط حرارت و فشار، برای ایجاد پوشش‌های TBC خودترمیم شامل پوشش‌های YPSZ با ذرات دی‌سیلیسیور مولیبدن (MoSi<sub>2</sub>) با پوسته آلومینای غیرقابل نفوذ در برابر اکسیژن استفاده شده است [۲۴، ۲۳، ۱۴، ۷]. نوزاهیک<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۴] از این فرایند به منظور اعمال پودر تجاری YPSZ با ذرات ترمیمی بر پایه (B) MoSi<sub>2</sub> استفاده کردند. پوشش‌های میانگین NiCrAlY توسط روش APS و NiCoCrAlY توسط روش HVOF بر روی زیرلایه‌هایی از جنس سوپراآلیاژ پایه Ni (Hastelloy) اعمال شده و بدین منظور از قالب گرافیتی با اعمال برادین حرارتی بین سطوح قالب و نمونه مطابق با شکل (۷) استفاده شده است.

<sup>4</sup> Nozahic

<sup>5</sup> Kulczyk-Malecka

Song  
<sup>2</sup> Agglomerated condition  
<sup>3</sup> Spark plasma sintering

و به‌کارگیری آنها کم‌تر از دیگر روش‌ها است. استفاده از روش ذرات کپسوله شده  $\text{MoSi}_2$  به تجهیزات مورد نیاز به کپسوله کردن ذرات نیاز دارد که فرایند را پیچیده می‌سازد. روش زینتر پلاسمای جرقه‌ای به تجهیز ویژه‌ای برای اعمال پوشش نیازمند است. بر اساس مقایسه بین فرایندها با توجه به نیاز هر یک از صنایع به دستیابی به پوشش‌هایی با خاصیت خودترمیمی می‌توان بر اساس سه پارامتر پیچیدگی فرایند، هزینه توسعه و عملی بودن اجرا در آن واحد صنعتی، گزینه‌ی مناسب توسعه فناوری پوشش‌های سد حرارتی خودترمیم را انتخاب کرد. همچنین، مطالعات انجام شده در زمینه فناوری و راهکار ایجاد خاصیت خودترمیمی نشان می‌دهد که اثرات اضافه کردن عامل خودترمیم، عوارض جانبی یا محصولات ناخواسته‌ای هنگام کارکرد ایجاد نمی‌کند. این ویژگی نیز بر مزایای این پوشش و در نتیجه توسعه بازار این محصول خواهد افزود.

#### ۵- تشکر و قدردانی

این مقاله تحت حمایت مالی گروه مپنا به شماره قرارداد RD-RFE-1400-1 انجام شده که بدین وسیله، تشکر و قدردانی می‌شود.

#### ۶- مراجع

1. I. Hammood, G. Barber, B. Wang, "A review of some of experimental and numerical studies of self-crack-healing in ceramics," *International Journal of Ceramic Engineering & Science*, vol. 2, pp. 274–291, 2020.
2. E.R. Brinley, "Combustion turbine component having bond coating and associated methods," U.S. Patent 8,192,850, 2012.
3. Z. Derelioglu, A.L. Carabat, G.M. Song, S. van der Zwaag, W.G. Sloof, "On the use of B-alloyed  $\text{MoSi}_2$  particles as crack healing agents in yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 35, pp. 4507–4511, 2015.
4. M. Belmonte, "Advanced Ceramic Materials for High Temperature Applications," *Advanced engineering materials*, vol. 8, pp. 693–703, 2006.
5. A.L. Carabat, M.J. Meijerink, J.C. Brouwer, E.M. Kelder, J.R. van Ommen, S. van der Zwaag, W.G. Sloof, "Protecting the  $\text{MoSi}_2$  healing particles for thermal barrier coatings using a sol-gel produced  $\text{Al}_2\text{O}_3$  coating," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, pp. 2728–2734, 2018.
6. Y. Chen, X. Zhang, S. van der Zwaag, W.G. Sloof, P. Xiao, "Damage evolution in a self-healing air plasma sprayed thermal barrier coating containing self-shielding  $\text{MoSi}_2$

مقادیر برای مواد کامپوزیت بدون توجه به نوع ذره  $\text{MoSi}_2$  و کسر حجمی، تقریباً نزدیک به مقادیر به دست آمده برای YPSZ خالص است. بنابراین، افزودن ذرات خودترمیم، خواص مکانیکی TBCها را در محدوده مورد مطالعه به طور قابل توجهی تغییر نمی‌دهد. برهم‌کنش ترک- ذره در کامپوزیت‌های حاوی حجم بیش‌تری از ذرات مشهودتر است که باعث کاهش طول ترک قطعه قطعه شده برای ترمیم توسط یک ذره می‌شود. به طور کلی، مسدود شدن ترک تحت تأثیر حضور ذرات قرار نگرفته و کم و بیش مسطح باقی می‌ماند. تفاوت‌هایی جزئی در کسر حجمی نسبی ترک‌های عبوری از ذره یا در امتداد سطح مشترک ذرات برای کامپوزیت‌های حاوی ذرات  $\text{MoSi}_2$  آلیاژ شده با B مشاهده شده است. مطالعات برهم‌کنش ترک- ذره نشان داده که برای مواد کامپوزیتی ساخته شده توسط SPS، مقدار حداقل درصد حجمی از ذرات باید وجود داشته باشد تا ترمیم مؤثر در دمای بالا را امکان‌پذیر سازد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

به منظور محافظت از قطعات داغ در برابر اکسایش و خوردگی در دمای بالا و افزایش طول عمر، پوشش‌های سد حرارتی (TBC) بر روی سطوح قطعات مذکور اعمال می‌شوند. در سال‌های اخیر، کاربرد مواد خودترمیم مطرح شده که باعث افزایش طول عمر TBC می‌شود. منظور از TBC با قابلیت خودترمیمی، دستیابی به TBC با قابلیت ترمیم خودبه‌خودی ترک و بازیابی یکپارچگی ساختار در محیط اکسیدکننده با درجه حرارت بالا است. عوامل خودترمیمی TBCها، ترکیبات  $\text{SiC}$ ،  $\text{MoSi}_2$  و  $\text{TiC}$  معرفی شده‌اند که با رهاسازی فاز ویسکوز اکسیدی حاصل از واکنش با هوا و  $\text{O}_2$ ، منافذ و ترک‌های پوشش را ترمیم می‌کنند. در این مقاله، به استخراج فناوری‌های اعمال پوشش سد حرارتی خودترمیم و نتایج به دست آمده در عملکرد پوشش خودترمیم حاصل از فرایندها پرداخته شد. مقایسه بین فرایندها نشان می‌دهد، از نظر میزان پیچیدگی فرایند، فرایندهای پوشش لایه خودترمیم  $\text{SiC}$  و  $\text{TiC}$  به روش APS کم‌ترین پیچیدگی را دارند. به علاوه، با توجه به این که از پودرهای تجاری  $\text{SiC}$  و  $\text{TiC}$  بدین منظور استفاده می‌شود، هزینه و ریسک توسعه

20. W.G. Sloof, "Self Healing in Coatings at High Temperatures," *Self healing materials*. Springer, Dordrecht, pp. 309–321, 2007.
21. L. Wang, F. Shao, X.H. Zhong, J.X. Ni, K. Yang, S.Y. Tao, Y. Wang, "Tailoring of self-healing thermal barrier coatings via finite element method," *Applied Surface Science*, vol. 431, pp. 60–74, 2018.
22. D. Song, T. Song, U. Paik, G. Lyu, Y.-G. Jung, B.-G. Choi, I.-S. Kim, J. Zhang, "Crack-Resistance Behavior of an Encapsulated, Healing Agent Embedded Buffer Layer on Self-Healing Thermal Barrier Coatings," *Coatings*, vol. 9, p. 358, 2019.
23. J. Kulczyk-Malecka, X. Zhang, J. Carr, A.L. Carabat, W.G. Sloof, S. van der Zwaag, F. Cernuschi, F. Nozahic, D. Monceau, C. Estournès, P.J. Withers, P. Xiao, "Influence of embedded MoSi<sub>2</sub> particles on the high temperature thermal conductivity of SPS produced yttria-stabilised zirconia model thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 308, pp. 31–39, 2016.
24. J. Kulczyk-Malecka, X. Zhang, J. Carr, F. Nozahic, C. Estournès, D. Monceau, A.L. Carabat, W.G. Sloof, S. van der Zwaag, P.J. Withers, P. Xiao, "Thermo – mechanical properties of SPS produced self-healing thermal barrier coatings containing pure and alloyed MoSi<sub>2</sub> particles," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 38, pp. 4268–4275, 2018.
- particles," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 102, pp. 4899–4910, 2019.
7. F. Nozahic, D. Monceau, C. Estournès, "Thermal cycling and reactivity of a MoSi<sub>2</sub>/ZrO<sub>2</sub> composite designed for self-healing thermal barrier coatings," *Materials & Design*, vol. 94, pp. 444–448, 2016.
8. V. Carnicer, M.J. Orts, R. Moreno, E. Sánchez, "Influence of solids concentration on the microstructure of suspension plasma sprayed Y-TZP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiC composite coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 143–150, 2019.
9. S.M. Lakiza, M.I. Grechanyuk, O.K. Ruban, V.P. Redko, M.S. Glabay, O.B. Myloserdov, O. V. Dudnik, S. V. Prokhorenko, "Thermal Barrier Coatings: Current Status, Search, and Analysis," *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, vol. 57, pp. 82–113, 2018.
10. A.A. Kulkarni, R. Subramanian, A.J. Burns, "Bond coat compositions and arrangements of same capable of self healing," U.S. Patent 7,507,484, 2009.
11. T. Ouyang, X. Fang, Y. Zhang, D. Liu, Y. Wang, S. Feng, T. Zhou, S. Cai, J. Suo, "Enhancement of high temperature oxidation resistance and spallation resistance of SiC-self-healing thermal barrier coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 286, pp. 365–375, 2016.
12. K. Portilla-Zea, M.A. González, E. Rodríguez, G.I. Vásquez, "Enhanced adhesion resistance of an 8YSZ thermal barrier coating through the formation of zircon and mullite as self-healing reaction products under cyclic oxidation conditions," *Materials Letters*, vol. 282, p. 128697, 2021.
13. K.M. Doleker, Y. Ozgurluk, H. Ahlatci, A.C. Karaoglanli, "Evaluation of oxidation and thermal cyclic behavior of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and YSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> TBCs," *Surface and Coatings Technology*, vol. 371, pp. 262–275, 2019.
14. F. Nozahic, C. Estournès, A.L. Carabat, W.G. Sloof, S. van der Zwaag, D. Monceau, "Self-healing thermal barrier coating systems fabricated by spark plasma sintering," *Materials & Design*, vol. 143, pp. 204–213, 2018.
15. T. Ouyang, J. Wu, M. Yasir, T. Zhou, X. Fang, Y. Wang, D. Liu, J. Suo, "Effect of TiC self-healing coatings on the cyclic oxidation resistance and lifetime of thermal barrier coatings," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 656, pp. 992–1003, 2016.
16. S.M. Aouadi, J. GU, D. Berman, "Self-healing ceramic coatings that operate in extreme environments: A review," *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, vol. 38, p. 050802, 2020.
17. D. Koch, G. Mauer, R. Vaßen, "Manufacturing of Composite Coatings by Atmospheric Plasma Spraying Using Different Feed-Stock Materials as YSZ and MoSi<sub>2</sub>," *Journal of Thermal Spray Technology*, vol. 26, pp. 708–716, 2017.
18. J. Krishnasamy, S.A. Ponnusami, S. Turteltaub, S. van der Zwaag, "Modelling the fracture behaviour of thermal barrier coatings containing healing particles," *Materials & Design*, vol. 157, pp. 75–86, 2018.
19. L. Wang, C. Ming, X.H. Zhong, J.X. Ni, J.S. Yang, S.Y. Tao, F.F. Zhou, Y. Wang, "Microstructure and self-healing properties of multi-layered NiCoCrAlY/TAZ/YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying," *Applied Surface Science*, vol. 488, pp. 246–260, 2019.



#### COPYRIGHTS

© 2023 by the authors. Licensee Iranian Space Research Center of Iran. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)