# تاثیر اعمال پوشش سد حرارتی در کاهش زوال ساختاری پرههای متحرک ردیف اول GEF9

عباس رشوند، آرش حقگو، محمد رضا خواجهای ارشناس ارشد مهندسی مواد، کارشناس ارشد مهندسی مواد، معاونت مهندسی معاونت مهندسی شرکت قطعات توربین شهریار

#### چکیدہ

سوپرآلیاژهای پایه نیکل به دلیل خواص مکانیکی عالیشان در دماهای بالا برای ساخت پرههای متحرک توربینهای گازی مورد استفاده قرار میگیرند. قرارگیری این قطعات در شرایط کاری توربین، منجر به زوال ساختاری آنها و محدود شدن عمرکاریشان میگردد. از سوی دیگر با اعمال پوششهای سد حرارتی میتوان دمای سطح این قطعات را کاهش داده و دوام آنها را در شرایط کاری توربین بیش از پیش افزایش داد. در این مطالعه، میکروساختار نمونههایی از پرههای متحرک وEEF9 از جنس GTD-111 بعد از مدت زمان مشخصی کارکرد در توربین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تاثیر اعمال پوششهای سد حرارتی در کاهش زوال ساختاری در این نوع پرهها بررسی شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایشات مشخص شد که نمونههای دارای پوشش سد حرارتی از اندازه متوسط رسوبات 'γ کوچکتری نسبت به پرههای دارای پوشش MCrAIY برخوردار میباشند.

واژههای کلیدی: "GTD-111"، "میکروساختار "، "رسوبات 'γ"، "زوال ساختاری".

#### ۱ –مقدمه

مهمترین ویژگی سوپرآلیاژهای پایه نیکل که در ساخت پره-های متحرک توربینهای گازی مورد استفاده قرار میگیرند، قابلیت حفظ خواص مکانیکی آنها در دماهای بالا میباشد. این امر به قابلیت حفظ ساختار متالورژیکی این آلیاژها در شرایط کاری توربین مربوط میگردد. با این وجود قرارگیری دراز مدت قطعه در دمای بالا همراه با تنش، منجر به تغییراتی در ساختار متالورژیکی آلیاژ میگردد. از جمله این تغییرات می-توان به تشکیل شبکه کاربیدی پیوسته در مرز دانهها، رسوب فازهای سوزنی در ساختار آلیاژ و درشت شدن رسوبات

متناسب با <sup>1/3</sup> میباشد که t زمان قرارگیری آلیاژ در دمای مورد نظر میباشد. رشد و بهم پیوستن رسوبات گاما پرایم یکی از مهمترین عوامل افت استحکام آلیاژ در شرایط سرویس می باشد که نهایتا تعویض و یا بازسازی قطعات را اجتناب ناپذیر میسازد [۱].

پوششهای سد حرارتی (TBC<sup>۱</sup>) هدایت حرارتی پائینی دارند که این خصوصیت سبب میشود تا دمای سطح قطعه را تا ۱۷۵ درجه سانتی گراد کاهش دهند. با کاهش دمای قطعات داغ، میزان اکسیداسیون و خسارات ناشی از خزش قطعات توربین نیز به میزان قابل توجهی کاهش و بازده توربین افزایش پیدا می کند [۱].

این پوشش از دو جزء پوشش فوقانی (Top Coat) و پوشش اتصالی (Bond Coat) تشکیل شده است. ضخامت پوشش اتصالی ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون و پوشش فوقانی عموما از زیرکونیا بوده و برای جلوگیری از افزایش حجم و تغییر فاز از زیرکونیا که با ایتریا پایدار شده، مورد استفاده قرار میگیرد که به آن VSZ میگویند. ضخامت پوشش فوقانی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون میباشد (شکل ۱) [۲و۳]. به طور کلی میتوان گفت که پوششهای سد حرارتی امکان استفاده از قطعات داغ در دمای کاری بالاتر و در نتیجه منجر به بازده بالاتر توربین می-گردد [۴].



شکل ۱: پوشش سد حرارتی متشکل از پوشش Bond Coat بر روی زیرلایه و پوشش سرامیکی بر روی Bond Coat [۱].

روشهای مختلفی جهت اعمال پوششهای سد حرارتی وجود دارد، از جمله این روشها میتوان به روش پلاسما اسپری اتمسفری (APS<sup>T</sup>)، پلاسما اسپری در فشار پایین (PPS<sup>T</sup>)، احتراق سرعت بالا با سوخت اکسیژن (HVOF<sup>F</sup>)، رسوب

فیزیکی بخار توسط پرتوی الکترونی (EB-PVD<sup>6</sup>)، رسوب شیمیایی بخار (CVD<sup>5</sup>) و روشهای دیگر اشاره کرد. فرآیند پوششدهی توسط پاشش پلاسمایی اتمسفری از جمله متداول ترین روشها برای اعمال پوششهای سد حرارتی محسوب میشود. این روش به دلیل دارا بودن قابلیت ترسیب آسان مواد گوناگون، کاربرد گستردهای در صنعت توربین و قطعات داغ یافته است.

توربین های General Electric Frame 9001 ساخت شرکت جنرال الکتریک با توان اسمی ۱۲۰MW می باشند. پرههای متحرک ردیف اول در این نوع توربین از جنس سوپرآلیاژ پایه نيكل و به طور خاص از نوع GTD-111 ساخته مي، شوند. سوپرآلیاژهای پایه نیکل در سال ۱۹۷۰ طراحی شده و در سال ۱۹۸۰ به عنوان پرههای ردیف اول در توربینهای گازی توان بالا مورد استفاده قرار گرفته است. پوشش اولیه بر روی پره-های متحرک این نوع توربینها که توسط شرکت GE اعمال می شود از نوع MCrAlY انتخاب شده است. به دلیل توان بالای این توربینها و متعاقبا دمای کاری بالا بر روی پرههای مرحله اول تخریب و زوال ساختاری بعد از مدت زمان کاری معین بسیار بالا بوده و این امر منجر به محدود شدن عمر کاری این قطعات می گردد. دلیل انتخاب این پروژه با عنوان ذکر شده که بود که می توان با اعمال با اعمال پوشش های سد حرارتی بر روی این پرهها منجر به کاهش دمای کاری قطعه شد و بنابراین زوال ساختاری در این نوع پرهها را کاهش داد. که این امر خود می تواند باعث سهولت در امر بازسازی قطعات و همچنین افزایش عمر کاری آنها گردد.

## ۲ -بررسیهای آزمایشگاهی

به جهت بررسی تاثیر پوشش TBC بر زوال ساختاری پرههای متحرک ردیف اول GEF9 یک دست از این پرهها دارای تنها پوشش MCrAIY و یک ست دیگر دارای پوشش سد حرارتی (MCrAIY+TBC) مورد بررسیهای آزمایشگاهی قرار گرفتند. تعداد ۳ عدد پره از هر دست از این پرهها برای انجام مطالعات آزمایشگاهی انتخاب شدند. لازم به ذکر است که هر دو دست

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Thermal Barrier Coating

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Atmospheric Plasma Spray

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Low Pressure Plasma Spray

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> High Velocity Oxygen Fuel

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Electron Beam Physical Vapor Deposition

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Chemical Vapor Deposition

پره قبلا تحت بازسازی قرار نگرفته و دارای شرایط بهره برداری یکسانی بودند. مشخصات هر دو دست پره در جدول ۱ آمده است.

#### جدول ۱: مشخصات مربوط به پرههای مورد مطالعه.

شماره یره	نوع پره	نوع پوشش	ساعت کارکرد یرہ
I	GE-F9	MCrAlY	۲۰۰۰۰
II	GE-F9	TBC + MCrAlY	۲۷۰۰۰

بعد از انتخاب نوع پره، نمونههای آزمایشگاهی از هر دو نوع پره با اندازهی ۱×۱ سانتیمتر از قسمت لبهی TE<sup>v</sup> آنها، به جهت بررسی بریده شد (شکل ۲).



شکل ۲: تصویر شماتیک از پرهی GEF9.

نمونهها مانت شده و تحت عملیات متالوگرافی دستگاهی با سنبادههایی با مش ۱۲۰ تا ۲۵۰۰ قرار گرفته و در نهایت پولیش مکانیکی شدند. بعد از اچ کردن نمونهها با محلولی حاوی آب مقطر و اگزالیک اسید به نسبتهای مناسب، میکروساختار توسط میکروسکپ نوری (^OM) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین جنس و پوشش پرهها از آنالیزگز EDAX میکروسکوپ الکترونی Philips XL-40 استفاده شد. همچنین برای بررسی میکروساختار در هر دو پره و ارزیابی زوال ساختاری در آنها از دستگاه میکروسکپ نوری (OM) و

www.SID.ir

میکروسکپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای اندازه گیری اندازه ذرات 'γ در نمونههای بریده شده از پرههای کارکرده تحت شرایط کاری ذکر شده از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی بهره گرفته شد. اندازه گیری رسوبات 'γ از قسمت وسط دانهها به دلیل حذف اثرات مرزدانهای و نواحی یوتکتیکی و در ۱۰ ناحیه از هر نمونه انجام شد.

آنالیز از جنس فلز پایه در هر دو ست پره انجام و مشخص شد که جنس فلز پایه از سوپرآلیاژ نوع GTD-111 است. همچنین آنالیز پوشش از نمونههای هر دو ست پره گرفته و در جداول ۲ و ۳ گزارش شده است.

بنابراین در این مقاله، با توجه به آزمایشات ذکر شده، مقدار زوال ساختاری در هر دو نمونه بررسی و تاثیر اعمال پوشش-های سرامیکی (TBC) بر زوال ساختاری نشان داده شده است.

### جدول ۲: آنالیز پوشش اتصالی (Bond Coat) در نمونههای هر دو پره.

	Ni	Со	Cr	Al	Y
پره شماره I (Wt%)	Bal	27.4	19.2	10.4	0.8
یرہ شمارہ II (Wt%)	Bal	24.3	19.1	5.8	0.9

جدول ۳: آنالیز پوشش سرامیکی (Top Coat) در نمونهی پره

شماره II.

	0	Zr	Y				
آنالیز پره شماره II ( Wt%)	Bal.	45.8	2.9				
۲ ختایج و بحث							

## GTD-111 میکروساختار اولیه سوپر آلیاژ GTD-111

آلیاژ GTD-111 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل استحکام داده شده توسط رسوب سختی است که به دلیل خواص دما بالا و مقاومت به خوردگی عالیشان به طور گسترده به عنون پره-های متحرک در توربینهای گازی مورد استفاده قرار می گیرد. این آلیاژ شامل مقدار قابل توجهی از عناصر آلومینیوم و تیتانیوم (مجموعا بیشتر از ۸ درصد وزنی) بوده که استحکام بخشی از طریق رسوب گذاری فاز بین فلزی 'γ با ترکیب بخشی از طریق رسوب گذاری فاز بین فلزی 'γ با ترکیب بخشی از میدهم می کند [۵]. به طور کلی میکروساختار آلیاژ ریخته گری GTD-111 شامل رسوبات 'γ در زمینه آلیاژ همراه با کاربیدهای MC و M23C6 همچنین فازهای یوتکتیکی 'γ-γ در کسرهای حجمی کوچکتر که در طول

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Trailing Edge

<sup>8</sup> Optical Microscopic

مناطق بین دندریتی حین سرد شدن شکل می گیرند می باشد GTD-111 [9]. میکرو گراف نوری از ریزساختار اولیه سوپر آلیاژ  $\gamma'$  منان داده شده است. در شکل ۳، فاز بین فلزی  $\gamma'$  و کاربیدهای  $M_{23}C_6$  در ریزساختار این سوپر آلیاژ نشان داده شده است.



GTD-111 شکل ۳: میکروگراف نوری از میکروساختار سوپر آلیاژ در شرایط اولیه و بدون هیچ کارکردی در توربین.

با توجه به شکل ۳ میتوان گفت که سوپرآلیاژ GTD-111 در حالت اولیه و بدون هیچ کارکردی در توربین دارای ریزساختاری با 'γ های یوتکتیکی، همچنین شامل مرزدانههای غیر پیوسته شامل کاربیدهای MC هM<sub>23</sub>C<sub>6</sub> و 'γ رسوب کرده در مرزدانه میباشد.

# ۲ – میکروساختار سوپر آلیاژهای GTD-111 بعد از کارکرد در شرایط توربین

در این مطالعه دو پره از جنس GTD-111، با پوششهای متفاوت به جهت بررسی زوال ساختاری در آنها بعد از کارکرد به مدت زمان معینی در شرایط توربین استفاده شده است. پرهی شماره I دارای پوشش از نوع NiCoCrAlY (پوشش روکشی) با ضخامتی برابر با ۲۲۰-۲۰۰ میکرون و ترکیب گزارش شده در جدول ۲ میباشد (شکل ۴. الف). پرهی شماره گزارش شده در جدول ۲ میباشد (شکل ۴. الف). پرهی شماره ا نیز دارای پوشش از نوع ۲۸۲-۲۰۰ میکرون و ترکیب نوارش شده در جدول ۲ میباشد (تکل ۴. الف). پره همچنین پوشش از نوع ۲۸۲ (Bond Coat) با ضخامتی برابر با و همچنین پوشش TBC (Top Coat) با ضخامتی برابر با (شکل ۴. ب).



شکل ۴: میکروگراف نوری از پوششهای موجود بر روی هر دو پره، (الف) پرهی شماره I با پوشش روکشی از نوع NiCoCrAIY (ب) پره شماره II با پوشش اتصالی (Bond Coat) از نوع (ب) پره شماره II با پوشش اتصالی (TBC) از نوع %NiCoCrAIY دو پوشش سرامیکی (TBC) از نوع %Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

میکروگرافهای نوری از میکروساختار هر دو پره (یکی دارای پوشش MCrAIY و دیگری دارای پوشش MCrAIY) بعد از کارکرد در شرایط توربین برای مدت زمان معینی در بزرگنماییهای متفاوت در شکل ۵ و ۶ نشان داده شده است.





شکل ۵: میکروگراف نوری از ریزساختار در دو نمونه، (الف) دارای پوشش MCrAly با ۲۰۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین، (ب) دارای پوشش MCrAly+TBC با ۲۷۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین.



شکل ۶: میکروگراف نوری از ریزساختار در دو نمونه در بزرگنمایی بالا، (الف) دارای پوشش MCrAIY با ۲۰۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین، (ب) دارای پوشش MCrAIY+TBC با ۲۷۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین.

با توجه به اشکال ۵ (الف و ب) و ۶ (الف و ب) می توان توزیع ناهمگن رسوبات ' $\gamma$  را در هر دو ریزساختار و همچنین احاطه شدن کاربیدهای  $M_{23}C_6$  توسط رسوبات ' $\gamma$  در طول مرزدانه را مشاهده کرد. میکروساختار در هر دو پره (چه با TBC و چه بدون TBC) در حین کار در شرایط توربین و قرارگیری در www.SID.ir

در مرز دانهها  $M_{23}C_6$  در مرز دانهها دماهای بالا، منجر به رسوب کاربیدهای  $M_{23}C_6$  در مرز دانهها و از طرفی دیگر به هم پیوستن و انعقاد ذرات گاما پرایم منجر به درشت شدن این ذرات شده است. همچنین با توجه به تصاویر SEM از ریزساختار هر دو نمونه، میتوان درشت بودن اندازه ذرات  $\gamma$  در نمونهی دارای پوشش MCrAIY را نسبت به نمونه دارای پوشش 7DC را نسبت به نمونه دارای پوشش ۲BC



شکل ۷: تصویر SEM از ریزساختار در دو نمونه، (الف) دارای پوشش MCrAIY با ۲۰۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین، (ب) دارای پوشش MCrAIY+TBC با ۲۷۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین.

درجهی زوال ساختار در هر دو پره توسط اندازه ذرات گاما پرایم در زمینه، بررسی می شود. اندازه ذرات گاما پرایم اولیه از ۱ تا ۱/۴ میکرون متغیر است [۷]. اندازه ذرات ' $\gamma$  در ریزساختار هر دو پره ( پره دارای پوشش TBC و پره دارای پوشش MCrAIY) در نمودار شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: میانگین اندازه ذرات 'γ در ریزساختار پره دارای پوشش TBC و پره دارای پوشش MCrAIY بعد از شرایط کاری.

با توجه به نمودار شکل ۸ دیده می شود که پره دارای پوشش سد حرارتی (TBC) با دارا بودن ذرات ' $\gamma$  با اندازهی متوسط برابر با ۱/۱۹ نسبت به پره دارای پوشش MCrAIY با اندازه متوسط رسوبات ' $\gamma$  در حدود ۱/۴۲ میکرون زوال کمتری پیدا کرده است. بدین ترتیب پوشش سد حرارتی با کاهش چشمگیر دمای سطح پره، از انتقال دما به فلز زمینه جلوگیری کرده و در نتیجه منجر به زوال ساختاری کمتر در این نوع پره (پره دارای پوشش TBC) کرده است.

بنابراین با توجه به ویژگیها و مقادیر ذکر شده در نمودار شکل ۸، در مورد هر دو پره دارای پوشش TBC و دارای پوشش MCrAIY، میتوان به این نتیجه رسید که از میکروساختار پرهی بدون پوشش TBC (این پره تنها دارای پوشش MCrAIY است)، به طور تئوریکی انتظار مقاومت کمتری در برابر حرکت نابهجاییها در حین بارگذاری در دماهای بالا رفته (به دلیل داشتن اندازه ذرات 'γ بزرگتر نسبت به پره دارای پوشش TBC) و بنابراین مقاومت به خزش کمتری نسبت به پرهی TBC دار از خود نشان میدهد. به این ترتیب، محافظ دمایی توسط پوششهای TBC به دلیل تاثیر بر روی اندازهی گاما پرایمها میتواند منجربه کاهش زوال ساختاری و در نتیجه جلوگیری از خزش در این نوع پرهها گردد.

## ۴ ختیجهگیری

با توجه به بررسیها و آزمایشات انجام شده نتایج زیر حاصل شد:

پوششهای سد حرارتی با دارا بودن هدایت حرارتی پائین
دمای انتقالی به فلز پایه را کاهش داده و منجر به کاهش
زوال ریزساختار قطعات می گردد.

اندازه متوسط ذرات 'γ، که تعیین کننده میزان زوال ساختاری در این پرهها میباشد، در پره دارای پوشش TBC بعد از شرایط کارکرد در دمای بالا کوچکتر از اندازه این رسوبات در پره دارای پوشش MCrAIY میباشد.

- اندازهی رسوبات 'γ در نمونهی دارای پوشش TBC برابر با ۱/۱۹ میکرون و اندازهی این رسوبات در نمونهی دارای پوشش MCrAIY برابر با ۱/۴۲ میکرون به دست آمده است.
- بزرگتر بودن اندازه متوسط رسوبات 'γ در نمونه دارای پوشش MCrAIY نسبت به نمونه دارای پوشش TBC.
  حاکی از زوال ساختاری بیشتر در این پره می باشد.
- زوال ساختاری بیشتر در پره دارای پوشش MCrAlY میتواند منجر به مقاومت کمتر در برابر حرکت نابهجایی-ها در این پره نسبت به پره دارای پوشش TBC گشته و در نتیجه مقاومت به خزش کاهش در این پره کاهش یابد.

مراجع

- R. Viswanathan, Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components, ASM International, Third printing, September 1995.
- [2] S. Bose, "High Temperature Coatings", Elsevier Inc., pp. 155-252, 14 September 2007.
- [3] M. Eskner, "Mechanical Behavior of Gas Turbine Coatings", Doctorial Thesis, Dep. Mater. Scie. Eng, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2004.
- [4] N. P. Padture, M. Gell, E. H. Jordan, "Thermal Barrier Coatings for Gas Turbine Engine Application", Science., Vol. 296, pp. 280-284, 2002.
- [5] P. Wangyao, V. Krongtong, P. Tuengsook, "The Relation Between Reheat-Treatment and Hardness Behavior of Cast Nickel Superalloy GTD-111", Journal of materials and minerals., Vol. 16, No. 1, pp. 55-62, 2006.
- [6] O. A. Ojo, N. L. Richards, M. C. chaturvedi, " Contribution of Constitutional Liquation of Gamma Prime Precipitate to Weld HAZ Cracking of Cast Inconel 738 Superalloy", Scripta Materialia., Vol. 50, No. 5, pp. 641-646, 2004.
- [7] P. Jencus, J. Zrink, P. Lukas, P. Hornak, "Thermal Fatigue Aspects in Nickel Base Single Crystal Superalloy", Acta Matellurgica Slovaca., Vol. 10, pp. 487-493, 2004.

www.SID.ir