

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

عباس رشوند، آرش حقیگو، محمد رضا خواجه‌ای

کارشناس ارشد مهندسی مواد، کارشناس ارشد مهندسی مواد، معاونت مهندسی

معاونت مهندسی شرکت قطعات توربین شهریار

## چکیده

سوپراآلیاژهای 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 GEF9 از جنس GTD-111 بعد از مدت زمان مشخصی کارکرد در توربین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تأثیر 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  $\gamma'$  کوچکتری نسبت به پره‌های دارای پوشش MCrAlY برخوردار می‌باشند.

**واژه‌های کلیدی:** "GTD-111"، "میکروساختار"، "رسوبات  $\gamma'$ "، "زوال ساختاری".

## ۱- مقدمه

متناسب با  $t^{1/3}$  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 می‌باشد که نهایتاً تعویض و یا بازسازی قطعات را اجتناب ناپذیر می‌سازد [۱].

مهمترین ویژگی سوپراآلیاژهای پایه نیکل که در ساخت پره‌های 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 می‌توان به تشکیل شبکه کاربیدی پیوسته در مرز دانه‌ها، رسوب فازهای سوزنی در ساختار آلیاژ و درشت شدن رسوبات استحکام دهنده گاما پرایم اشاره نمود. رشد رسوبات گاما پرایم

فیزیکی بخار توسط پرتوی الکترونی (EB-PVD<sup>5</sup>), رسوب شیمیایی بخار (CVD<sup>6</sup>) و روش‌های دیگر اشاره کرد. فرآیند پوشش‌دهی توسط پاشش پلاسمایی اتمسفری از جمله متداول‌ترین 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.

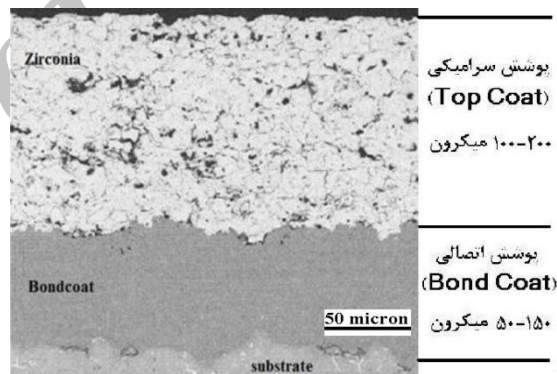
توربین‌های General Electric Frame 9001 ساخت شرکت جنرال الکتریک با توان اسمی ۱۲۰ MW می‌باشند. پره‌های متحرک ردیف اول در این نوع توربین از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل و به طور خاص از نوع GTD-111 ساخته می‌شوند. سوپرآلیاژهای پایه نیکل در سال ۱۹۷۰ طراحی شده و در سال ۱۹۸۰ به عنوان پره‌های ردیف اول در توربین‌های گازی توان بالا مورد استفاده قرار گرفته است. پوشش اولیه بر روی پره‌های متحرک این نوع توربین‌ها که توسط شرکت GE اعمال می‌شود از نوع MCrAlY انتخاب شده است. به دلیل توان بالای این توربین‌ها و متعاقباً 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 می‌گردد. دلیل انتخاب این پروژه با عنوان ذکر شده که بود که می‌توان با اعمال با اعمال پوشش‌های 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 می‌تواند 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 MCrAlY و یک دست دیگر دارای پوشش سد حرارتی (MCrAlY+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

پوشش‌های سد حرارتی (TBC<sup>1</sup>) هدایت حرارتی پائینی دارند که این خصوصیت سبب می‌شود تا دمای سطح قطعه را تا ۱۷۵ درجه سانتی‌گراد 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 می‌کند [۱].

این پوشش از دو جزء پوشش فوقانی (Top Coat) و پوشش اتصال (Bond Coat) تشکیل شده است. ضخامت پوشش اتصال ۵۰ تا ۱۵۰ میکرون و پوشش فوقانی عموماً 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 YSZ می‌گویند. ضخامت پوشش فوقانی بین ۱۰۰ تا ۲۰۰ میکرون می‌باشد (شکل ۱) [۳ و ۲]. 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 می‌گردد [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 پلازما اسپری اتمسفری (APS<sup>۲</sup>), پلازما اسپری در فشار پایین (LPPS<sup>۳</sup>), احتراق سرعت بالا با سوخت اکسیژن (HVOF<sup>۴</sup>), رسوب

<sup>1</sup> Thermal Barrier Coating

<sup>2</sup> Atmospheric Plasma Spray

<sup>3</sup> Low Pressure Plasma Spray

<sup>4</sup> High Velocity Oxygen Fuel

<sup>5</sup> Electron Beam Physical Vapor Deposition

<sup>6</sup> Chemical Vapor Deposition

میکروسکپ الکترونی روبشی استفاده شد. برای اندازه‌گیری اندازه ذرات  $\gamma'$  در نمونه‌های بریده شده از پره‌های کارکرده تحت شرایط کاری ذکر شده از دستگاه میکروسکپ الکترونی روبشی بهره گرفته شد. اندازه‌گیری رسوبات  $\gamma'$  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 جدول 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 اتصال (Bond Coat) در نمونه‌های هر دو پره.

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

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

	O	Zr	Y
آنالیز پره شماره II (Wt%)	Bal.	45.8	2.9

### ۳ نتایج و بحث

#### ۳-۱ - میکروساختار اولیه سوپرآلیاژ GTD-111

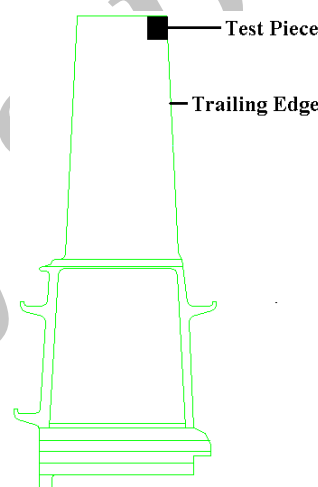
آلیاژ GTD-111 یک سوپرآلیاژ پایه نیکل استحکام داده شده توسط رسوب سختی است که به دلیل خواص دما بالا و مقاومت به خوردگی عالی‌شان به طور گسترده به عنوان پره-های متحرک در توربین‌های گازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آلیاژ شامل مقدار قابل توجهی از عناصر آلومینیوم و تیتانیوم (مجموعاً بیشتر از ۸ درصد وزنی) بوده که استحکام بخشی از طریق رسوب‌گذاری فاز بین فلزی  $\gamma'$  با ترکیب  $Ni_3(Al, Ti)$  را فراهم می‌کند [۵]. به طور کلی میکروساختار آلیاژ ریخته‌گری GTD-111 شامل رسوبات  $\gamma'$  در زمینه آلیاژ همراه با کاربیدهای MC و M23C6 و همچنین فازهای یوتکتیکی  $\gamma-\gamma'$  در کسرهای حجمی کوچک‌تر که در طول

پره قبلاً 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 پره	نوع پره	نوع پوشش	ساعت کارکرد پره
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  $1 \times 1$  سانتی‌متر از قسمت لبه‌ی  $TE^\gamma$  آنها، به جهت بررسی بریده شد (شکل ۲).

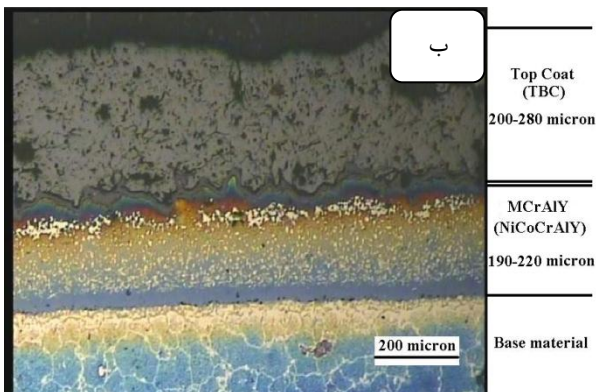
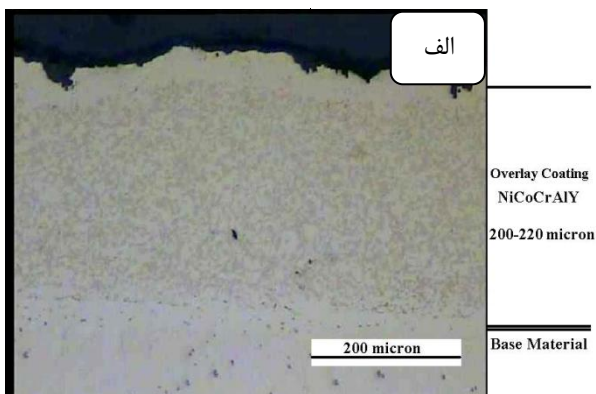


شکل ۲: تصویر شماتیک از پره‌ی GE9.

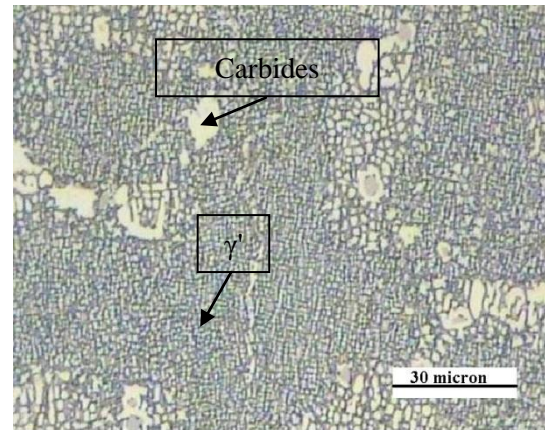
نمونه‌ها مانده و تحت عملیات متالوگرافی دستگامی با سنباده‌هایی با مش ۱۲۰ تا ۲۵۰۰ قرار گرفته و در نهایت پولیش مکانیکی شدند. بعد از اچ کردن نمونه‌ها با محلولی حاوی آب مقطر و اگزالیک اسید به نسبت‌های مناسب، میکروساختار توسط میکروسکپ نوری ( $OM^8$ ) مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تعیین جنس و پوشش پره‌ها از آنالیزگر 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

<sup>7</sup> Trailing Edge

<sup>8</sup> Optical Microscopic



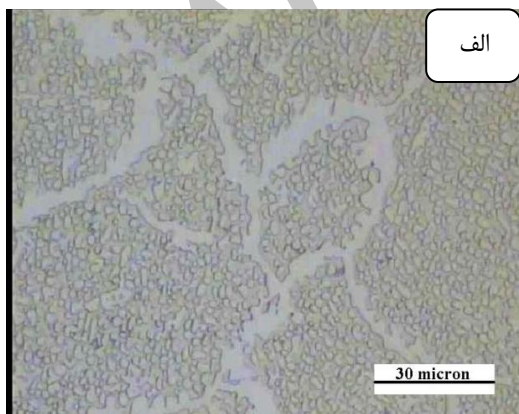
مناطق بین دندریتی حین سرد شدن شکل می‌گیرند می‌باشد [۶]. میکروگراف نوری از ریزساختار اولیه سوپراآلیاژ GTD-111 در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳، فاز بین فلزی  $\gamma'$  و کاربیدهای  $M_{23}C_6$  در ریزساختار این سوپراآلیاژ نشان داده شده است.



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

شکل ۴: میکروگراف نوری از پوشش‌های موجود بر روی هر دو پره، (الف) پره‌ی شماره I با پوشش روکشی از نوع NiCoCrAlY، (ب) پره شماره II با پوشش اتصالی (Bond Coat) از نوع NiCoCrAlY و پوشش سرامیکی (TBC) از نوع  $ZrO_2-7\text{ Wt}\% .Y_2O_3$

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

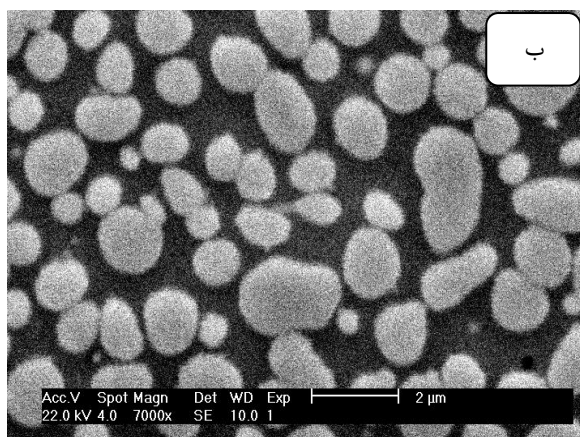
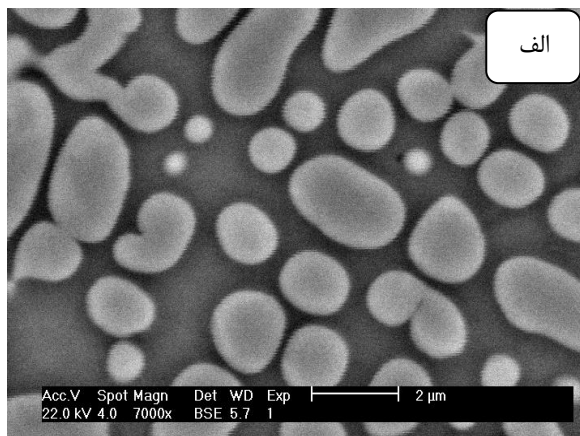


با توجه به شکل ۳ می‌توان گفت که سوپراآلیاژ GTD-111 در حالت اولیه و بدون هیچ کارکردی در توربین دارای ریزساختاری با  $\gamma'$  های یونکتیکی، همچنین شامل مرزدانه‌های غیر پیوسته شامل کاربیدهای  $M_{23}C_6$ ، MC و  $\gamma'$  رسوب کرده در مرزدانه می‌باشد.

### ۳ ۴ - میکروساختار سوپراآلیاژهای GTD-111 بعد از کارکرد در شرایط توربین

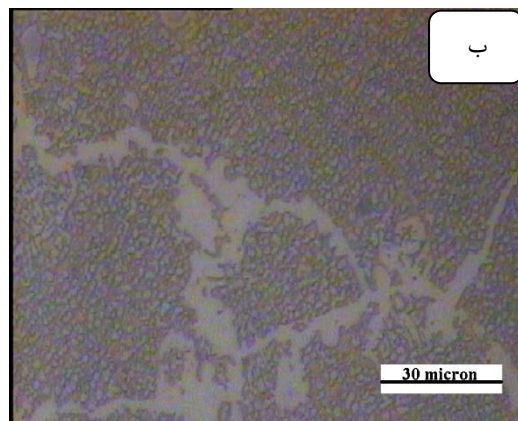
در این مطالعه دو پره از جنس GTD-111، با پوشش‌های متفاوت به جهت بررسی زوال ساختاری در آنها بعد از کارکرد به مدت زمان معینی در شرایط توربین استفاده شده است. پره‌ی شماره I دارای پوشش از نوع NiCoCrAlY (پوشش روکشی) با ضخامتی برابر با ۲۰۰-۲۲۰ میکرون و ترکیب گزارش شده در جدول ۲ می‌باشد (شکل ۴. الف). پره‌ی شماره II نیز دارای پوشش از نوع NiCoCrAlY (Bond Coat) با ضخامت ۱۹۰-۲۲۰ میکرون و ترکیب گزارش شده در جدول ۲ و همچنین پوشش TBC (Top Coat) با ضخامتی برابر با ۲۰۰-۲۸۰ میکرون و ترکیب گزارش شده در جدول ۳ است (شکل ۴. ب).

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 MCrAlY را نسبت به نمونه دارای پوشش TBC مشاهده کرد (شکل ۷).

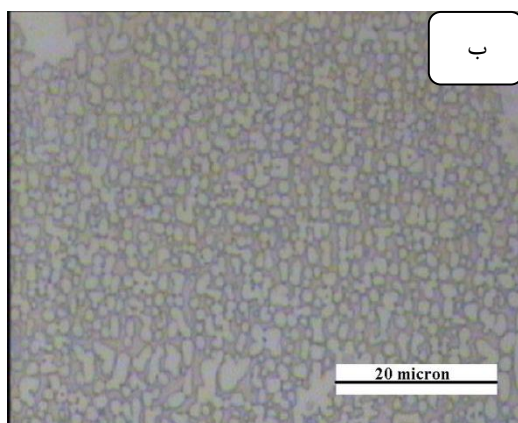
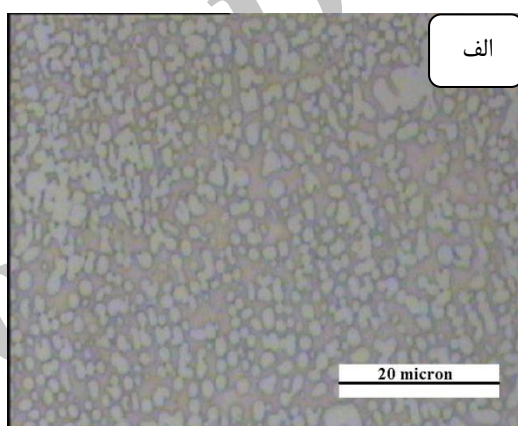


شکل ۷: تصویر SEM از ریزساختار در دو نمونه، (الف) دارای پوشش MCrAlY با ۲۰۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین، (ب) دارای پوشش MCrAlY+TBC با ۲۷۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین.

درجه‌ی زوال ساختار در هر دو پره توسط اندازه ذرات گاما پرایم در زمینه، بررسی می‌شود. 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 MCrAlY) در نمودار شکل ۸ 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 MCrAlY با ۲۰۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین، (ب) دارای پوشش MCrAlY+TBC با ۲۷۰۰۰ ساعت کارکرد در توربین.

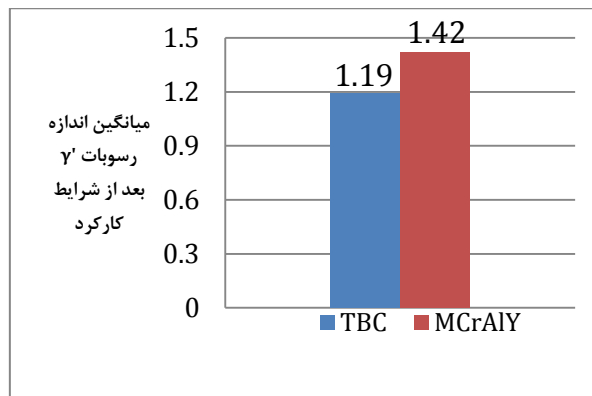
با توجه به اشکال ۵ (الف و ب) و ۶ (الف و ب) می‌توان توزیع ناهمگن رسوبات  $\gamma'$  را در هر دو ریزساختار و همچنین احاطه شدن کاربیدهای  $M_{23}C_6$  توسط رسوبات  $\gamma'$  در طول مرزدانه را مشاهده کرد. میکروساختار در هر دو پره (چه با TBC و چه بدون TBC) در حین کار در شرایط توربین و قرارگیری در

- اندازه متوسط ذرات  $\gamma'$ ، که تعیین کننده‌ی میزان زوال ساختاری در این پره‌ها می‌باشد، در پره دارای پوشش TBC بعد از شرایط کارکرد در دمای بالا کوچکتر از اندازه‌ی این رسوبات در پره دارای پوشش MCrAlY می‌باشد.

- اندازه‌ی رسوبات  $\gamma'$  در نمونه‌ی دارای پوشش TBC برابر با  $1/19$  میکرون و اندازه‌ی این رسوبات در نمونه‌ی دارای پوشش MCrAlY برابر با  $1/42$  میکرون به دست آمده است.

- بزرگتر بودن اندازه متوسط رسوبات  $\gamma'$  در نمونه‌ی دارای پوشش MCrAlY نسبت به نمونه‌ی دارای پوشش TBC، حاکی از زوال ساختاری بیشتر در این پره می‌باشد.

- 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.



شکل ۸: میانگین اندازه ذرات  $\gamma'$  در ریزساختار پره دارای پوشش TBC و پره دارای پوشش MCrAlY بعد از شرایط کاری.

با توجه به نمودار شکل ۸ دیده می‌شود که پره دارای پوشش سد حرارتی (TBC) با دارا بودن ذرات  $\gamma'$  با اندازه‌ی متوسط برابر با  $1/19$  نسبت به پره دارای پوشش MCrAlY با اندازه متوسط رسوبات  $\gamma'$  در حدود  $1/42$  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.

## مراجع

- [1] 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 Liquefaction 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 Metallurgica Slovaca*, Vol. 10, pp. 487-493, 2004.

بنابراین با توجه به ویژگی‌ها و مقادیر ذکر شده در نمودار شکل ۸، در مورد هر دو پره دارای پوشش TBC و دارای پوشش MCrAlY می‌توان به این نتیجه رسید که از میکروساختار پره‌ی بدون پوشش TBC (این پره تنها دارای پوشش MCrAlY است)، به طور تئوریک انتظار مقاومت کمتری در برابر حرکت نابه‌جایی‌ها در حین بارگذاری در دماهای بالا رفته (به دلیل داشتن اندازه ذرات  $\gamma'$  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 منجر به کاهش زوال ساختاری و در نتیجه جلوگیری از خزش در این نوع پره‌ها گردد.

## ۴ نتیجه‌گیری

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 می‌گردد.