

تعیین مناطق بحرانی پره جهت نمونه برداری و انجام بررسی های ریزساختاری در پروسه ارزیابی عمر پره ها

معصومه رعیت پور
مربی پژوهش پژوهشگاه نیرو
ایران

واژه های کلیدی: پره توربین، نقاط بحرانی، تغییرات ریزساختاری، دما، تنش

چکیده

در این تحقیق براساس ارتباط دما و تنش با مقدار کرنش خزشی، نقاط بحرانی یک نمونه پره ردیف اول توربین گازی GE-F5 مشخص گردید. بر این اساس، مناطق بحرانی در قسمتهای میانی لبه فرار و لبه حمله متمرکز بودند. سپس با توجه به ارتباط بین آسیب خزشی و تغییرات ریزساختاری و به منظور تأیید صحت تحقیق صورت گرفته، از نواحی مختلف این پره (ریشه، نوک ایرفویل و نواحی بحرانی شناسایی شده) نمونه های متالوگرافی تهیه شد. بررسی های ریزساختاری و مقایسه نواحی مختلف پره، حاکی از این است که بیشترین تغییرات ریزساختاری در نواحی بحرانی شناسایی شده صورت گرفته است. با توجه به ارتباط بین تغییرات ریزساختاری و کاهش خواص مکانیکی پره، میتوان گفت که بیشترین کاهش خواص مکانیکی در نواحی بحرانی که دارای بیشترین تغییرات ریزساختاری هستند، صورت گرفته و این مناطق به عنوان نواحی مستعد آسیب مطرح می باشند.

۱- مقدمه

مزایای فراوان توربینهای گازی، سبب گشته است که همواره مورد توجه صنایع مختلف قرار گیرند. استفاده روزافزون از این توربینها در صنایع مختلف مانند برق، نفت، گاز و پتروشیمی، توجه محققان را به افزایش ضریب اطمینان کارکرد اجزای آنها جلب نموده است. صنایع نیروگاهی از اصلی ترین استفاده کنندگان این نوع توربین ها هستند به گونه ای که در حال حاضر بیش از ۴۰ درصد از کل برق کشور توسط نیروگاههای گازی و سیکل ترکیبی تولید می شود. با نگاهی به دورنمای تولید برق در سالهای آینده نیز مشخص می گردد که میزان تولید برق از طریق واحدهای گازی بیشتر از پیش خواهد شد. تولید برق از طریق واحدهای گازی مزایای مختلفی دارد که از آن میان می توان به نصب سریع واحد و سرعت بالای قرار گرفتن واحد در مدار اشاره کرد. این توربینها از اجزای مختلف با شرایط کارکرد مخصوص به خود تشکیل شده اند. از جمله قطعات حساس با شرایط ویژه کارکرد، پره های توربین گازی می باشد. این

برای ارزیابی کل قطعه، نمونه برداری باید از حساس‌ترین و ضعیف‌ترین قسمت قطعه در مقابل مکانیزم‌های خرابی صورت گیرد. با توجه به اینکه خزش مهم‌ترین مکانیزم تخریب پرها می‌باشد، در این مقاله نقاط بحرانی از دیدگاه خزش مورد بررسی قرار گرفته و با توجه به تاثیر متقابل خزش و تغییرات ریزساختاری، تغییرات ریزساختاری نواحی بحرانی با سایر مناطق مقایسه شده است تا بر این اساس صحت تشخیص نقاط بحرانی پره تأیید گردد.

۲- تعیین نقاط بحرانی پره جهت بررسی‌های ریزساختاری

فرآیند خزش یک فرآیند دما بالاست که وابسته به دما، تنش و زمان است به عبارت دیگر مقدار تغییر شکل خزشی با هر کدام از سه عامل دما، زمان و تنش رابطه مستقیم دارد و با افزایش هر کدام از این عوامل مقدار کرنش خزش افزایش می‌یابد و بالعکس. اگر تغییر شکل خزش را با ϵ نشان دهیم می‌توان نوشت

$$\epsilon \propto T, t, \sigma \quad (1)$$

که در این رابطه T بیانگر دمای تغییر شکل، t نشان‌دهنده زمان و σ نیز مقدار تنش وارد بر ماده می‌باشد. حال اگر از ϵ نسبت به t مشتق بگیریم خواهیم داشت:

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} \propto T, \sigma \quad (2)$$

این تناسب با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q_c / RT) \quad (3)$$

که در این رابطه $\dot{\epsilon}$ سرعت خزش، Q_c انرژی فعالسازی خزشی، R ثابت گازها و A و n ضرایب ثابت وابسته به ماده، دما و تنش هستند. این رابطه نشان می‌دهد که سرعت خزش با σ و T رابطه مستقیم دارد و با افزایش T و σ سرعت خزش افزایش می‌یابد [۱]

در این کار پژوهشی نقاط بحرانی پره ردیف اول توربین گازی GE-F5 تعیین شد. برای این منظور از تحلیل تنش و

قطعات به دلیل شرایط پیچیده، همواره در معرض تخریب‌های ناگهانی قرار دارند و عوامل مختلفی می‌تواند عمر این قطعات را به شدت کاهش دهد.

بسیاری از نیروگاههای گازی، کسر عمده‌ای از عمر خود را مصرف کرده‌اند و قطعات آنها دچار تخریب و زوال شده است. استفاده بیشتر از این قطعات باعث کاهش هزینه‌های نگهداری نیروگاهها می‌گردد. در نتیجه صاحبان نیروگاهها علاقه زیادی به استفاده بیشتر از این قطعات براساس سیستمهای تخمین عمر، به ویژه برای قطعات پرهزینه و حساس (مانند پره‌های توربین) دارند. پره توربین از اجزای اصلی توربین بوده و قیمت آن بالاست بنابراین توسعه روشهای تخمین عمر به منظور استفاده بیشتر و مطمئن‌تر از پرها مزایای اقتصادی فراوانی نصیب نیروگاهها خواهد کرد. زیرا پره‌های توربین در معرض شرایط کاری نامطلوبی قرار دارند و در نتیجه تخریب در آنها سریعتر اتفاق می‌افتد. علاوه بر این، در صورت شکسته شدن این پرها، به سایر پرها و قسمت‌های مختلف توربین نیز آسیب وارد می‌شود.

بنابر آنچه گفته شد، استفاده بیشتر از پره‌های توربین باعث کاهش هزینه‌ها می‌گردد، در نتیجه هزینه تولید برق (دلار به ازای هر کیلووات) کاهش می‌یابد. اما استفاده بیشتر از پرها باید براساس سیستمهای مدیریت عمر صورت گیرد تا توربین در حد بالایی از ایمنی کار کند. بر این اساس امکان استفاده بیشتر از پرها با حفظ ایمنی لازم فراهم می‌گردد. که از دستاوردهای آن میتوان به موارد زیر اشاره نمود:

- جلوگیری از خروج‌های اجباری نیروگاه
- جلوگیری از تعویض‌های غیرضروری پره‌های توربین
- تنظیم مناسب فواصل زمانی تعمیر نیروگاه و تعویض قطعات
- امکان برنامه‌ریزی جهت خرید قطعات
- افزایش عمر نیروگاه
- کاهش هزینه‌های مربوط به تهیه پره‌های توربین
- کاهش اثرات زیست محیطی ناشی از تولید پره‌های جدید
- بکارگیری فرآیند تخمین عمر در سایر صنایع

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

استفاده از تغییرات ریزساختاری حین کارکرد پره های توربین به منظور ارزیابی پرها از روشهای کارا محسوب می شود.

تغییرات اساسی به وجود آمده در حین کار پره‌های توربین شامل موارد زیر هستند [۴]:

(۱) ضخیم شدن فاز γ

(۲) تجزیه کاربیدهای اولیه و تشکیل لایه‌های پیوسته کاربیدهای ثانویه در مرز دانه‌ها

(۳) تشکیل فازهای مضر

هر چند تغییرات فوق به عنوان تغییرات اساسی در حین کار پره‌های توربین شناخته می‌شوند، ولی تغییرات دیگری نیز در حین کار پرها مشاهده شده‌اند، تغییراتی چون:

(۱) ایجاد حفرات خزشی

(۲) صاف شدن مرزهای دانه در حین کارکرد

(۳) جدایش عناصر روی مرز دانه

(۴) تغییر در دانسیته γ'

از این قبیل می‌باشند [۵ و ۷ و ۸]. هر چند تمرکز کمتری روی این تغییرات در مقایسه با تغییرات اساسی به وقوع پیوسته در حین کار پرها، صورت پذیرفته است، ولی بعضاً در بررسی‌های تخمین عمر مورد استفاده قرار می‌گیرد.

خواص مکانیکی نیز تابعی از ریزساختار ماده است و با تغییر ریزساختار، خواص مکانیکی تغییر می‌کند. ریزساختار پره‌های توربین بواسطه شرایط حاکم بر پرها، دچار تغییرات متعددی می‌شود که هر کدام می‌تواند خواص مکانیکی را تحت تاثیر قرار دهد. در حالت کلی، تغییرات خواص مکانیکی را عمدتاً مربوط به ضخیم شدن فاز γ' و ضخیم شدن کاربیدهای مرز دانه‌ای $M_{23}C_6$ در حین کار پره‌های توربین و تشکیل فازهای مضر مانند فاز سگیمای دانند.

ضخیم شدن فاز γ' ، منجر به کاهش خواص کششی و همچنین کاهش مقاومت به خزش می‌گردد؛ در حالیکه ضخیم شدن کاربیدهای مرز دانه‌ای و تشکیل فاز سگیمای، کاهش خواص خستگی حرارتی و مقاومت به ضربه را به دنبال خواهد داشت.

دمای پره توربین در حالت کار دائم [۲] استفاده شد. محل بحرانی بصورت محلی که بیشترین سرعت خزش را داشته باشد در نظر گرفته شد. برای تعیین مقدار سرعت خزش در هر نقطه از معادله (۳) استفاده شد. در این معادله ثابت A برابر با ۱ فرض شد و برای تعیین سایر ثوابت از اطلاعات موجود استفاده شد. Jianting و همکارانش [۳] نشان دادند که برای سوپر آلیاژ IN738LC در تنشهای بالا $9/8 - 8/3 = n$ و $Q_c = 570 - 730 \text{ kJ}$ بوده و در تنشهای پائین $4/9 - 4/1 = n$ و $Q_c = 370 - 420 \text{ kJ}$ می‌باشد. برای سادگی انجام محاسبات مقدار n را در تنشهای بالا ۹ و در تنشهای پایین ۴/۵ فرض کرده و مقدار Q_c نیز 650 kJ در تنشهای بالا و 400 kJ در تنشهای پایین فرض شد. با این فرضیات و با قرار دادن نتایج تحلیل تنش و دما در حالت کار دائم در معادله (۳) مقدار سرعت خزش در نقاط مختلف حجم پره بدست آمد. پروفیل نتایج این بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است.

این نتایج با نتایجی که نقاط بحرانی پره را با توجه به پارامتر لارسون - میلر محاسبه کرده بود سازگار است. نتایج این بررسی‌ها نیز در شکل (۲) نشان داده شده است.

همانطور که مشاهده می‌شود بحرانی ترین محل های پره بر روی ایرفویل پره و نزدیک به Platform بر روی لبه حمله و لبه فرار قرار دارد. با توجه به ارتباط مستقیم خزش با تغییرات ریزساختاری پره، انتظار می‌رود که بیشترین تغییرات ریزساختاری در قسمتهایی با بیشترین مقدار آسیب خزشی مشاهده شود. لذا پس از تعیین نقاط بحرانی، تغییرات ریزساختاری قسمتهای مختلف پره جهت مقایسه مورد بررسی قرار گرفت.

۲-۱- استفاده از بررسیهای ریزساختاری در ارزیابی پرها

ریز ساختار سوپر آلیاژهای موجود در پره‌های توربین به واسطه شرایط کاری خاص این اجزاء (ترکیب دما و تنش بالا)، دچار تغییرات زیاد می‌شود. این تغییرات می‌توانند کاهش خواص مکانیکی پرها را باعث شوند که یکی از دلایل نرسیدن پرها به عمر کاری خود می‌باشد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۲): محل های بحرانی بر روی پره ردیف اول GE-F5. این محاسبات براساس پارامتر لارسون - میلر انجام شده است [۵]

همچنین بررسی‌ها نشان داده است، ذرات γ' موجود در ریز ساختار سوپرآلیاژها، در حین کار پره‌های توربین، تحت بارگذاری خزشی موجود بصورت کشیده در می‌آیند. با افزایش زمان، آنها در جهت تنش اعمالی کشیده خواهند شد. بعد از یک زمان مشخص کشیدگی γ' به حد تعادلی خواهد رسید و کشیدگی بیشتر در آن روی نخواهد داد. زمان لازم برای رسیدن به حالت تعادلی بستگی به تنش و دمای اعمالی دارد؛ بطوریکه زمان لازم برای رسیدن به کشیدگی نهایی با افزایش تنش و دما، کاهش خواهد یافت. طول γ' تعادلی نهایی نیز، بسته به تنش و دمای اعمالی تفاوت می‌کند.

۳- انجام آزمایشات

به منظور بررسی ریزساختاری پره ردیف اول GE-F5 ، ۴ نمونه متالوگرافی از ۴ قسمت مختلف یک پره که به مدت ۱۶۰۰۰ ساعت کار کرده، تهیه شد. این ۴ قسمت عبارت بودند از :

لبه حمله و لبه فرار پره بر روی ایرفویل، به عنوان نماینده بخش بحرانی پره ؛ نوک ایرفویل پره به عنوان نماینده گرم-

رایج‌ترین تغییر ریزساختاری که از آن برای ارزیابی پره‌های توربین استفاده می‌شود، ضخیم شدن ذرات γ' است. همانطور که می‌دانیم γ' های موجود در ریزساختار سوپرآلیاژها، در حین کارکرد پره توربین، با حذف تدریجی γ' های کوچک (ثانویه) ضخیم می‌شوند. ضخیم شدن این فاز اثرات مستقیمی روی رفتار خزشی (استحکام گسیختگی) سوپرآلیاژ خواهد داشت و نهایتاً استحکام گسیختگی را آن قدر کاهش می‌دهد که پره‌ها را از معیارهای استاندارد در طراحی دور می‌کند و باید چنین قطعه‌ای از توربین خارج گردد.

مقایسه سینتیک ضخیم شدن γ' در سوپرآلیاژهای پایه نیکل و کاهش استحکام گسیختگی بر اثر زمان کارکرد نشان می‌دهد که عمر گسیختگی سوپرآلیاژها با ضخیم شدن اولیه γ' ، به شدت کاهش می‌یابد؛ اما از یک مقدار مشخص (بحرانی) اندازه γ' ، نرخ این تغییرات افت می‌کند. بنابراین، بسیار مشکل است که بتوان از اندازه γ' برای اندازه‌گیری استحکام گسیختگی سوپرآلیاژ استفاده کرد.

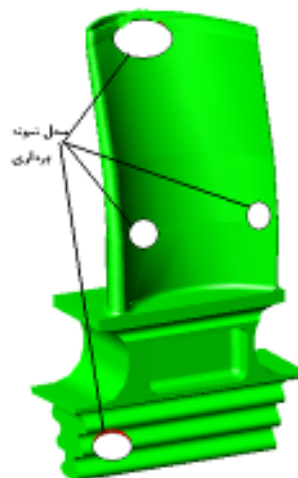


شکل (۱): توزیع سرعت خزش در قسمتهای مختلف پره توربین GE-F5 براساس محاسبات طراحی. الف) در سمت مقعر، ب) در سمت محدب پره. این توزیع نشاندهنده محل های بحرانی بر روی این پره از دیدگاه خزشی است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

لبه فرار به عنوان نواحی بحرانی و ریشه به عنوان منطقه دست نخورده و بدون تاثیر از کارکرد پره کارکرده انجام شد. برای به دست آوردن سختی ۳ نقطه از هر ناحیه اندازه گرفته شد

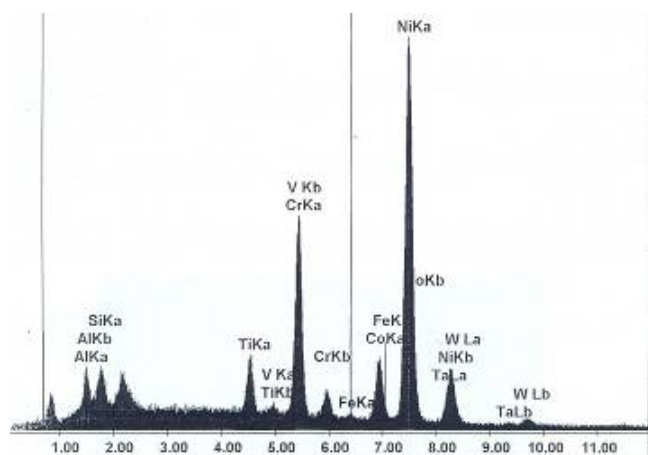
ترین قسمت پره؛ و ریشه پره به عنوان نماینده بخش دست نخورده پره. (مطابق شکل ۳)



شکل (۳) نمایش مکانهای نمونه برداری جهت انجام بررسیهای ریزساختاری

جدول (۱) : ترکیب شیمیایی آلیاژ IN738LC

نام عنصر	درصد وزنی	درصد اتمی
آلومینیوم	۳/۰۲	۶/۳۳
سیلیسیم	۲/۲۵	۴/۵۲
تیتانیوم	۳/۲۲	۳/۷۹
وانادیوم	۰/۲۰	۰/۲۲
کرم	۱۴/۸۶	۱۶/۱۳
آهن	۰/۴۶	۰/۴۶
نیکل	۶۰/۶۷	۵۸/۳۳
کبالت	۸/۴۷	۸/۱۱
تانتالیم	۲/۴۲	۰/۷۵
تنگستن	۴/۴۳	۱/۳۷



شکل (۴) پیکهای EDAX مربوط به ترکیب شیمیایی آلیاژ IN738LC مورد استفاده.

۴- نتایج و بحث

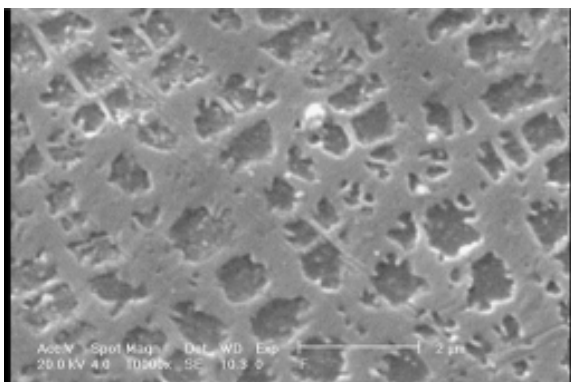
در شکل (۵) تصویر تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی از ریشه پره IN738LC نشان داده شده است. شرایط کاری ریشه پره به نحوی است که در نتیجه کارکرد تغییرات ریز ساختاری محسوسی در آن اتفاق نمی افتد. لذا ریزساختار مربوط به ریشه پره را می توان به عنوان ریز ساختار نماینده

مشاهدات ریز ساختاری نمونه های تهیه شده، توسط میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی SEM انجام شد. آماده سازی این نمونه ها شامل مانت گرم ، سنباده زنی و پولیش بود. مانت گرم این نمونه ها توسط دستگاه Struers, Prontopress-2 با ماده مانت گرانول شیشه ای از جنس پلی استیرین شفاف، در دمای ۱۶۰-۱۷۰ درجه سانتیگراد و فشار ۳۰ تا ۳۵ کیلو نیوتن، به مدت ۱۵ دقیقه (۱۰ دقیقه گرمایش و ۵ دقیقه سرمایش) انجام شد. سنباده زنی نمونه های مانت شده با دستگاه سنباده زنی انجام شد و برای این کار به ترتیب از کاغذ سنباده ۱۲۰ تا ۲۰۰۰ استفاده شد. نمونه ها پس از سنباده زنی تحت عملیات پولیش قرار گرفتند. برای پولیش این نمونه ها از خمیر الماسه ۰/۲ میکرون تا ۲ میکرون استفاده شد.

مشاهدات میکروسکوپ الکترونی با دستگاه SEM انجام شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ با دستگاه EDAX متصل به میکروسکوپ تعیین شده و در جدول (۱) و شکل (۴) ارائه شده است. همچنین تست سختی سنجی ویکرز با استفاده از دستگاه سختی سنجی با نیروی ۳۰ کیلوگرم نیرو بر روی چهار منطقه نوک ایرفول با بالاترین دمای کاری ، لبه حمله و

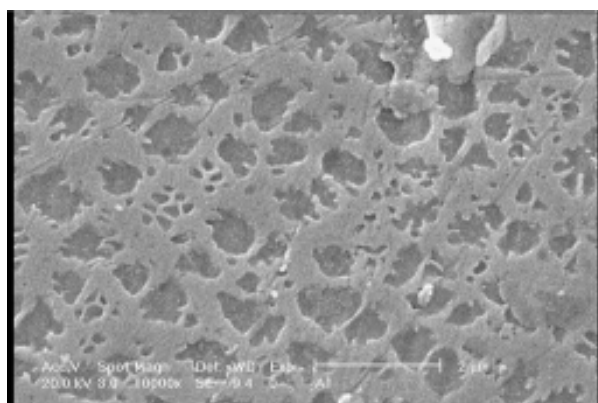
بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق

حمله پره GEF5 یکی از مناطق بحرانی پره در هنگام کارکرد است که تحت شدیدترین شرایط کاری قرار دارد. این شکل ریز ساختار کلی این قسمت از پره را پس از کارکرد در شرایط بحرانی نشان می دهد. رشد γ' های اولیه و کم شدن تعداد γ' های ثانویه از مشخصه های این ساختار است.



شکل (۷) : تصویر IN738LC کارکرده در قسمت بحرانی لبه فرار پره.

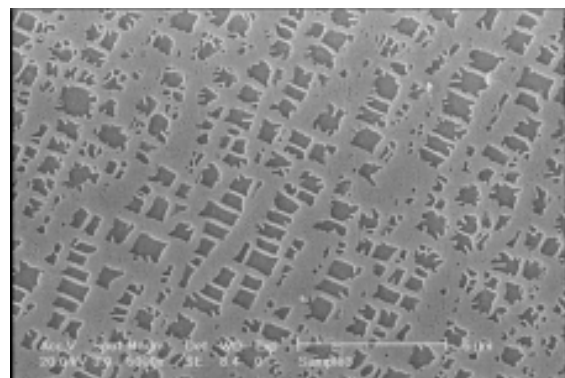
در شکل (۷) میکروگراف تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی از لبه فرار پره GEF5 نشان داده شده است. لبه فرار این پره، دیگر منطقه بحرانی آن در شرایط کاری است که همانند لبه حمله تحت شرایط کاری دشواری قرار دارد.



شکل (۸) : ریزساختار IN738LC کارکرده در قسمت نوک ایرفویل پره.

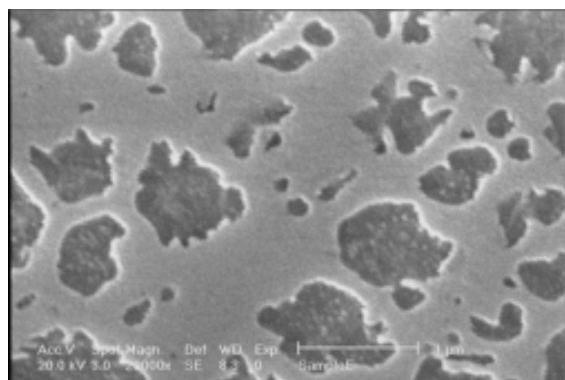
در شکل (۸) میکروگراف تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی از ساختار نوک پره GEF5 نشان داده شده است که در مقایسه با لبه حمله و لبه فرار، γ' های اولیه کشیدگی چندانی نداشته اند. در واقع گرچه در هنگام کارکرد توربین، این منطقه دارای بالاترین دمای کاری است ولی چون تنش اعمال شده بر آن

ماده کارنکرده جهت مقایسه و مرجع استفاده کرد. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، ریز ساختار پره نشاندهنده گاما پرایم های اولیه و ثانویه در زمینه گاما است.



شکل (۵) : ریزساختار پره کارنکرده IN738LC؛ نشاندهنده γ' های اولیه و ثانویه. قرار گرفتن γ' های اولیه در ردیف های متوالی قابل توجه است. اجانت: اسید مولیبدیک

در حالیکه γ' های اولیه در ردیف های منظم پشت سرهم قرار دارند، γ' های ثانویه بین آنها قرار گرفته اند. γ' های اولیه بصورت مکعبی و γ' های ثانویه بصورت کروی دیده می شود. γ' های ثانویه از نظر ابعادی بسیار کوچکتر از γ' های اولیه بوده و بصورت دانه های ریز در میان γ' های اولیه قرار دارند. کاربیدهای موجود در ساختار به صورت ذرات درشت پراکنده و جدا از هم می باشند.



شکل (۶) : ریزساختار پره کارکرده IN738LC در قسمت بحرانی لبه حمله.

در شکل (۶) میکروگراف تهیه شده با میکروسکوپ الکترونی از لبه حمله پره GEF5 نشان داده شده است. لبه

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

۲. پژوهشگاه نیرو "آنالیز حرارت و تنش پره های ردیف اول توربین گازی GEF5" گروه پژوهشی متالورژی ۱۳۸۵
3. G Jianting, D Ranucci, E Picco, PM Strocchi. "An investigation on the creep and fracture behavior of cast nickel – base superalloy IN738LC" Metall. Trans. A. Vol. 14A, no. 11, pp. 2329-2335. Nov. 1983
4. R. Viswanathan, " damage mechanisms and life assessment of high – temperature components" , ASM international, 1995.
5. A.K.Koul , R.Castillo , " effects of microstructural instability on the creep and fracture behavior of a Cast Ni base Superalloy " , Proceedings of high temperature alloys for gas turbine and other application ,1986.
6. H.R. TIPLER , " Metallographic aspects of Creep Fracture in a cast Ni-Cr-Base alloy " , J. Creep Fracture and related phenomena , Vol.4 , 1981.
7. R.A.Stevens, P.E.J.Flewitt , " Intermediate regenerative heat treatments for extending the creep life of the superalloy IN 738", Mater Sci , Eng , Vol.50 , 1981.
8. A.K.Shinna , M.G.Mebsur , " The effects of aging between 704 and 871°C on Microstructural changes in Inconel

در مقایسه با لبه حمله و لبه فرار کمتر می‌باشد، آسیب خزشی کمتری در آن رخ داده است.

علاوه بر بررسی‌های ریزساختاری، سختی حاصل از نقاط مختلف پره (مطابق جدول ۲) مؤید بحرانی بودن لبه فرار و لبه حمله می‌باشد چرا که کاهش بیشتر سختی در هر ناحیه ناشی از تغییرات ریزساختاری اتفاق افتاده در آن ناحیه می‌باشد.

جدول (۲): نتایج تست سختی بر روی نواحی مختلف از پره کارکرده

مقدار سختی بر حسب ویکرز	محل سختی سنجی
۳۷۰	نوک پره
۳۶۶.۳	لبه فرار
۳۶۲	لبه حمله
۳۷۶.۳	ریشه

۵- نتیجه گیری

- در پره مورد بررسی، با حرکت از ریشه پره به سمت نوک ایر فویل دما افزایش یافته ولی تنش کاهش می‌یابد. لذا به دلیل اینکه بیشترین دما با کمترین تنش و بیشترین تنش با کمترین دما همراه است، بیشترین سرعت خزش یا به عبارت دیگر منطقه با بیشترین سرعت خزش در قسمتهای میانی ایرفویل قرار دارد. که این مناطق به عنوان نواحی بحرانی پره شناسایی می‌شوند.
- اندازه γ' ها در قسمتهای مختلف پره نسبت به ریشه پره افزایش یافته و از تعداد آنها کاسته شده است.
- سختی، با معکوس فاصله بین γ' ها متناسب بوده و با افزایش فاصله بین آنها، سختی کم می‌شود. به دلیل کشیده شدن رسوبات γ' در نواحی بحرانی، این فاصله در نمونه‌های حاصل از این قسمتها افزایش یافته و در نتیجه سختی این مناطق کاهش بیشتری داشته است.

مراجع

1. R. Castillo , et al. "The effect of Service exposure on the creep properties of cast IN-738LC subjected to low stress high temperature creep condition", Superalloys 1988, The metallurgical Society , 1988