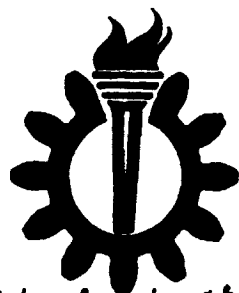


۲۳۴۵

بسمه تعالی



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

مرکز اطلاعات و آرشیو علمی ایران
تیم مدیریت مرکز
مرکز اطلاعات و آرشیو علمی ایران
تیم مدیریت مرکز

۱۳۸۰ / ۸ / ۳۰

تخمین عمر باقیمانده قطعات داغ

(پره توربین گازی فریم ۵)

علی محمد کلاگر

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته

مهندسی مواد - شناسایی و انتخاب مواد

استاد راهنما: دکتر عربی

استاد مشاور: دکتر جوانرودی

013092

بهمن ماه ۱۳۷۹

۳۹۹۴۵



تقدیم به

پدر و مادر زحمتکش و فداکارم که همه
موفقیت‌های زندگی‌م مرهون زحمات و کمک‌های
بی دریغ آنهاست.

و

تقدیم به

معلمان و اساتید بزرگواری که اندیشه و
رهنمودهایشان همواره چراغ راه زندگی‌م بوده
و خواهد بود.

چکیده

تخمین عمر باقیمانده قطعات داغ از جنس سوپر آلیاژ بدلیل هزینه بالای تولید، محدود بودن سازندگان معتبر، پیچیدگی روشهای تولید، استراتژیک بودن اینگونه قطعات مورد توجه صنایع و مراکز تحقیقاتی می باشد. بدلیل اینکه خواص مکانیکی قطعات داغ، تحت شرایط سرویس در زمانهای طولانی افت می کند لذا استفاده از حداکثر عمر مفید این قطعات از دیدگاه مهندسی بسیار حائز اهمیت است.

در این تحقیق، عمر باقیمانده پره های مستعمل ردیف اول یک توربین گازی ۲۵ مگاواتی (GE - F5) با عمر کارکرد ۳۰۰۰۰ ساعت تخمین زده شده است. برای تخمین عمر باقیمانده پره ها از روشهای لارسون - میلر، مانگمن - گرانت، دابز - میلیکا و کسر عمر باقیمانده استفاده شده است. با توجه به نتایج بدست آمده، عمر باقیمانده پره های مستعمل در روشهای فوق به ترتیب ۲۰۰۰۰، ۲۵۰۰۰، ۳۲۰۰۰ و ۲۲۰۰۰ ساعت، محاسبه شده است.

همچنین با اعمال سیکل عملیات حرارتی استاندارد روی پره های مستعمل، عمر این پره ها، ۱۲۰۰۰ ساعت افزایش یافته است. بنابراین عمر مفید باقیمانده این پره ها بعد از عملیات حرارتی و با توجه به روشهای فوق الذکر به ترتیب برابر ۳۲۰۰۰، ۴۷۰۰۰، ۴۴۰۰۰ و ۳۴۰۰۰ ساعت می باشد.

در ضمن، ساختار میکروسکوپی پره های مستعمل، باز یافتی و فابریک با میکروسکوپ نوری و SEM و خواص مکانیکی با انجام آزمایشات کشش در دمای محیط و 700°C مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تقدیر و تشکر

بدین وسیله از استاد راهنما و ارجمندم، جناب آقای دکتر عربی و استاد مشاور جناب آقای دکتر جوانرودی، بخاطر هدایت پروژه و راهنماییهای ارزندهشان که چون همیشه، بسیار مفید و راهگشا بوده است، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

بر خود لازم می‌دانم از مدیر عامل شرکت موادکاران (وابسته به مرکز تحقیقات جهاد) جناب آقای ایزدی و مسولین آزمایشگاهها آقایان مهندس طوسی، اسماعیلی، اسفندیاری و خانم قریشی که امکان استفاده از امکانات و آزمایشگاههای این مرکز را برای اینجانب فراهم نموده‌اند، کمال تشکر و سپاسگزاری را بنمایم.

همچنین از آقایان مهندس شرقی، چراغزاده، سجادی، احمدی، سلیمانی، محمدی ارهانی و کلیه دوستای که مرا بنحوی در انجام این پروژه حمایت کرده‌اند، نهایت تشکر را دارم.

علی محمد کلاگر (بهمن ۱۳۷۹)

فهرست مطالب

عنوان	شماره صفحه
فصل اول: مقدمه‌ای بر تخمین عمر باقیمانده	
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- مفهوم عمر باقیمانده	۲
۳-۱- تحقیقات انجام شده	۳
۴-۱- هدف از انجام پروژه	۴
فصل دوم: مکانیزمهای تخریب در پره‌های توربین گازی	
۱-۲- مقدمه	۵
۲-۲- خوردگی (Corrosion)	۷
۱-۲-۲- خوردگی داغ (Hot Corrosion)	۷
۱-۱-۲-۲- خوردگی داغ دما بالا (نوع I)	۸
۲-۱-۲-۲- خوردگی داغ دما پائین (نوع II)	۸
۲-۲-۲- اکسیداسیون (Oxidation)	۹
۳-۲- خستگی (Fatigue)	۹
۱-۲-۲- خستگی حرارتی (Thermal Fatigue)	۱۰
• ۲-۲-۲- خستگی مکانیکی - حرارتی (TMF)	۱۱
۴-۲- آسیب ناشی از ذرات خارجی (FOD)	۱۱
۵-۲- خزش (Creep)	۱۳
۶-۲- خزش - خستگی (Creep - Fatigue)	۱۳
۷-۲- زمان و دفعات راه‌اندازی	۱۴
۸-۲- نحوه بارگیری توربین	۱۵
۹-۲- ساعت کارکرد معادل پره	۱۵

فصل سوم: بررسی ریزساختاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل

۱۷	۱-۳- مقدمه
۱۷	۲-۲- ریز ساختار سوپر آلیاژهای پایه نیکل
۱۸	۱-۲-۳- فاز گاما
۱۸	۲-۲-۳- فاز گاما پرایم
۱۹	۳-۲-۳- کاربیدها (Carbides)
۲۰	۱-۳-۲-۳- کاربیدهای MC
۲۰	۲-۳-۲-۳- کاربیدهای M_6C
۲۱	۳-۳-۲-۳- کاربیدهای $M_{23}C_6$
۲۲	۴-۳-۲-۳- کاربید M_7C_6
۲۲	۴-۲-۳- بریدها
۲۲	۵-۲-۳- فازهای با صفحات متراکم (TCP)
۲۳	۱-۵-۲-۳- فاز سیگما (σ)
۲۳	۲-۵-۲-۳- فاز مو
۲۳	۳-۵-۲-۳- فاز لاهه (Laves)
۲۳	۶-۲-۳- فاز اتا
۲۴	۷-۲-۳- فاز بتا
۲۴	۸-۲-۳- فاز یوتکتیک $\gamma-\gamma'$
۲۴	۳-۳- موج شدن مرزدانه
۲۶	۴-۳- درشت شدن فاز
۲۷	۵-۳- تأثیر فاز بر خواص مکانیکی
۲۴	۶-۳- استحاله‌های کاربیدی
۲۶	۷-۳- صاف شدن مرزدانه‌ها
۲۶	۸-۳- تشکیل حفرات خزشی
۲۸	۹-۳- باز یافت پره‌های ریختگی

فصل چهارم: مکانیزمهای خزش در سوپر آلیاژهای پایه نیکل

۳۹	۱-۴- مقدمه
۳۹	۲-۴- مکانیزم لغزش نابجائی
۴۰	۳-۴- مکانیزمهای خزش نابجائی
۴۰	۴-۴- لغزش مرزدانه‌ها
۴۱	۵-۴- مکانیزمهای خزش دیفوزیونی
۴۳	۶-۴- مکانیزمهای خزش در ناحیه سوم
۴۶	۷-۴- مکانیزم شکست در دمای بالا

فصل پنجم: روشهای تخمین عمر و عمر باقیمانده

۵۰	۱-۵- مقدمه
۵۰	۲-۵- پارامتر لارسون-میلر (Larson-Miller Parameter)
۵۲	۲-۵- پارامتر منسون-هافرد (Manson - Hafered Parameter)
۵۲	۳-۵- معادله مانکن-گرانٹ (Monkman - Grant Equation)
۵۴	۴-۵- معادله دابز-میلیکا (Dobes - Milika Equation)
۵۴	۵-۵- معادلات Koul و همکارانش
۵۷	۶-۵- تخمین عمر باقیمانده
۵۷	۱-۶-۵- استراتژی تخمین عمر باقیمانده
۵۹	۷-۵- روشهای تخمین عمر باقیمانده
۵۹	۱-۷-۵- روشهای محاسباتی
۶۰	۲-۷-۵- روشهای غیر مخرب
۶۰	۱-۲-۷-۵- مدل حفردهای خزشی
۶۶	۲-۲-۷-۵- اندازه‌گیری تغییرات ابعادی ذرات
۶۷	۳-۲-۷-۵- اندازه‌گیری ابعادی پرده‌ها

- ۱۰۳ ۳-۷- خواص مکانیکی
- ۱۰۳ ۱-۳-۷- سختی
- ۱۰۳ ۲-۳-۷- خواص کششی
- ۱۰۴ ۳-۳-۷- خواص خزشی

فصل هشتم: بحث و تحلیل

- ۱۱۶ ۱-۸- مقدمه
- ۱۱۶ ۲-۸- مقایسه رفتار کششی و سختی پرده‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی
- ۱۱۸ ۳-۸- تخمین عمر باقیمانده خزش با استفاده از روش لارسون - میلر
- ۱۲۰ ۴-۸- تخمین عمر باقیمانده خزش با استفاده از روش کسر عمر باقیمانده
- ۱۲۱ ۵-۸- تخمین عمر باقیمانده خزش با استفاده از معادله مانکن - گرانت
- ۱۲۳ ۶-۸- تخمین عمر باقیمانده خزش با استفاده از معادله دابز - میلیکا
- ۱۲۵ ۷-۸- تخمین عمر باقیمانده خزش با استفاده از رابطه کول و همکارانش
- ۱۲۶ ۸-۸- ارزیابی تأثیر ریز ساختار بر رفتار و مکانیزمهای خزشی در شرایط مختلف
- ۱۲۷ ۱-۸-۸- دمای °C ۷۶۰ و تنش ۵۸۶Mpa
- ۱۲۹ ۲-۸-۸- دمای °C ۹۸۲ و تنش ۱۵۲Mpa
- ۱۳۵ ۹-۸- مقایسه شرایط کارکرد پرده توربین و شرایط آزمایش خزش
- ۱۳۹ ۱۰-۸- بازیافت پرده‌های مستعمل
- ۱۴۰ ۱۱-۸- محاسبه مقدار افزایش عمر پرده‌های مستعمل

فصل نهم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۴۱ ۱-۹- نتیجه گیری
- ۱۴۲ ۲-۹- پیشنهادات

فصل اول : مقدمه‌ای بر تخمین عمر باقیمانده

فصل دوم : مکانیزمهای تخریب در پردهای توربین گازی

- شکل ۱-۲- شمایی از توربین گازی همراه با معرفی اجزاء آن ۵
- شکل ۲-۲- مقایسه مکانیزمهای اصلی محدودکننده عمر پره‌ها ۶
- شکل ۳-۲- محدوده ماکزیمم دما در سطح ایرفویل الف) هنگام گرم شدن ب) هنگام سرد شدن ۱۰
- شکل ۴-۲- تغییر شکل در ایرفویل پره ۱۰
- شکل ۵-۲- پیچیدگی شرایط کاری در لبه حمله پره ردیف اول توربین گازی نوع GE MS7001 ۱۱
- شکل ۶-۲- کاهش چقرمگی ضربه در 900°C بعد از قرارگیری در محدوده دمایی 871°C - 788°C ۱۲
- شکل ۷-۲- کاهش چقرمگی ضربه در 900°C بعد از قرارگیری در محدوده 871°C برای آلیاژهای U500 و IN738 ۱۲
- شکل ۸-۲- منحنی تعداد دفعات راه‌اندازی و نوع راه‌اندازی در ارتباط با زمان نگهداری ۱۵
- شکل ۹-۲- منحنی درصد نرخ بار در ارتباط با ضریب هزینه نگهداری ۱۵
- شکل ۱۰-۲- منحنی بارگیری توربین گازی ۱۶

فصل سوم : بررسی ریزساختاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل

- شکل ۱-۳- اثرات عناصر تشکیل دهنده سوپر آلیاژها ۱۸
- شکل ۲-۳- تغییرات مورفولوژی فاز گاما پرایم ۱۹
- شکل ۳-۳- شماتیک ساختار میکروسکوپی سوپر آلیاژ پایه نیکل ۲۱
- شکل ۴-۳- شماتیک مدل موج شدن مرزدانه در اثر تشکیل فاز رسوبی در طی سرد شدن از درجه حرارت محلول‌سازی ۲۵
- شکل ۵-۳- تشکیل موج در مرزدانه در اثر رشد رسوب بصورت نامتقارن ۲۵
- شکل ۷-۳- تصویر میکروسکوپی SEM رسوبات در مرزدانه نمونه اکستروود شده ۲۵
- شکل ۶-۳- تصویر میکروسکوپی SEM رسوبات در یک نمونه Spray-Formed ۲۵
- شکل ۸-۳- ارتباط عمر گسیختگی خزش با اندازه فاز ۲۷
- شکل ۹-۳- تغییرات تنش سیلان با درجه حرارت برای آلیاژهایی با درصدهای حجمی مختلف از ذرات بر سختی سوپر آلیاژ و نوع مکانیزم عبور نابجائی ۲۹

- شکل ۳-۱- اثر اندازه ذرات و دمای پیرسازی ۲۹
- شکل ۳-۱۱- اثر کرنش شبکه‌ای روی اندازه اپتیمم های اولیه ۲۹
- شکل ۳-۱۲- تغییرات استحکام تسلیم با اندازه ذرات در درجه حرارت $T=593^{\circ}C$ ۳۰
- شکل ۳-۱۳- تغییرات سختی، استحکام و تنش تسلیم با تعداد رسوبات ۳۰
- شکل ۳-۱۴- اثر درصد حجمی بر عمر خزشی سوپر آلیاژهای پایه نیکل ۳۱
- شکل ۳-۱۵- تنش آستانه‌ای لازم برای فعال شدن مکانیزمهای Orowan (-) و برش ذرات (---) در آزمایشهای خزش IN738LC بر حسب تغییرات اندازه ذرات ناشی از زمان پیرسازی ۳۱
- شکل ۳-۱۶- اثر کسر حجمی فاز در عمر خزش آلیاژ IN738LC ۳۲
- شکل ۳-۱۷- فرایند خزش براساس صعود نابجائیهای اطراف ذرات ۳۳
- شکل ۳-۱۸- تغییرات قطر ذرات با زمان رسوب سختی در دامنه حرارتی $750-900^{\circ}C$ برای آلیاژ IN738LC ۳۳
- شکل ۳-۱۹- نمودار آرنیوس برای نشان دادن انرژی اکتیواسیون رسوبات برای آلیاژ IN738LC [۶۵] ۳۳
- شکل ۳-۲۰- محدوده دمائی پایداری کاربیدها، بریدها و فاز سیگما در چند سوپر آلیاژ ۳۵
- شکل ۳-۲۳- مرزدانه‌های صاف در سوپر آلیاژ IN738 ۳۶
- شکل ۳-۲۴- نحوه توزیع حفرات در پره مستعمل از جنس سوپر آلیاژ پایه نیکل ۳۷
- شکل ۳-۲۵- توزیع گاما پرایم‌های در امتداد هم در شرایط کاری ۳۷
- شکل ۳-۲۶- اثر پارامترهای مختلف ساختاری بر عمر و داکتیلیته خزشی سوپر آلیاژها ۳۷
- شکل ۳-۲۷- خواص تنش-گسیختگی سوپر آلیاژ U700 ۳۷
- شکل ۳-۲۸- مقایسه خواص خزشی پره‌های بازیافت شده از جنس آلیاژ IN713C ۳۸

فصل چهارم: مکانیزمهای خزش در سوپر آلیاژهای پایه نیکل

- شکل ۴-۱- نقشه مکانیزم تغییر فرم تصحیح شده برای آلیاژ IN738LC با اندازه دانه $1/5mm$ ۳۹
- شکل ۴-۲- تغییرات کرنش گذرا نرماله شده، با درجه حرارت برای پره‌های فابریک و مستعمل در تنش 90 Mpa ۴۱
- شکل ۴-۳- منحنی خزش پره‌های فابریک و مستعمل IN738LC در شرایط $T=899^{\circ}C$ و $\sigma=90\text{ Mpa}$ [۷۶، ۶۹] ۴۱
- شکل ۴-۴- مقایسه شمایک مکانیزم مدل‌های پیوسته خزش دیفوزیونی ۴۲
- شکل ۴-۵- بررسی ناحیه سوم خزشی که فاصله ذرات مطابق با رابطه (۷-۴) کنترل کننده رفتار خزش می‌باشند ۴۵
- شکل ۴-۶- بررسی ناحیه سوم خزشی سوم آلیاژ IN738LC وقتی که دانسیته نابجایی متحرک مکانیزم کنترل کننده باشند ۴۵
- شکل ۴-۷- بررسی ناحیه سوم خزشی آلیاژ IN738LC وقتی که جوانه‌زنی حفره‌های خزشی در مرزدانه‌ها کنترل کننده باشد ۴۶

- شکل ۴-۸- شماتیک مکانیزمهای شکست در درجه حرارت کمتر از $0.3T_m$ ۴۷
- شکل ۴-۹- شماتیک مکانیزمهای شکست در درجه حرارت بیشتر از $0.3T_m$ ۴۸
- شکل ۴-۱۰- اثر درجه حرارت خزش روی t_p پره‌های مستعمل و فابریک در $\sigma=90 \text{ Mpa}$ ۴۹
- شکل ۴-۱۱- اثر درجه حرارت خزش روی ϵ^m پره‌های مستعمل و فابریک در $\sigma=90 \text{ Mpa}$ ۴۹
- شکل ۴-۱۲- اثر درجه حرارت خزش روی ϵ_p پره‌های مستعمل و فابریک در $\sigma=90 \text{ Mpa}$ ۴۹

فصل پنجم: روشهای تخمین عمر و عمر باقیمانده

- شکل ۵-۱- نمودار تنش بر حسب لارسون - میلر برای نتایج بدست آمده برای پره‌های IN738LC ۵۱
- شکل ۵-۲- نمودار Manson - Hafered برای آلیاژ IN738LC ۵۲
- شکل ۵-۳- رابطه بین عمر خزش و کمترین سرعت خزش براساس رابطه برای آلیاژ IN738LC ۵۳
- شکل ۵-۴- نمودار نتایج بدست آمده براساس معادله دابز - میلیکا ۵۴
- شکل ۵-۵- منحنی تغییرات بر حسب سرعت خزش مینیمم برای آلیاژ IN738LC ۵۵
- شکل ۵-۶- مقایسه عمر خزش اندازه‌گیری شده و مقادیر محاسبه شده آن با توجه به رابطه (۵-۷) ۵۶
- شکل ۵-۷- پراکندگی داده‌های مربوط به خواص گسیختگی آلیاژ IN738 و FSX-414 ۵۸
- شکل ۵-۸- ارزیابی عمر خزشی براساس طبقه‌بندی حفرات ۶۱
- شکل ۵-۹- کسر عمر سپری شده در ارتباط با پارامتر A ۶۲
- شکل ۵-۱۰- ارتباط بین کسر عمر با طبقه‌بندی آسیب برای فولاد 5/4Cr- 1/2Mo ۶۳
- شکل ۵-۱۱- رابطه بین حفره‌های خزشی با عمر خزشی ۶۵
- شکل ۵-۱۲- نمودار کاهش زمان پارگی با درصد حجمی حفره‌های خزشی ۶۵
- شکل ۵-۱۳- نمودار تغییرات R-Ratio بر حسب زمان سرویس ۶۷
- شکل ۵-۱۴- نمودار تغییرات عمر باقیمانده خزش در ارتباط با R-Ratio ۶۷
- شکل ۵-۱۵- ارتباط سختی با پارامتر لارسون - میلر ۷۰
- شکل ۵-۱۶- نمودار درجه حرارت با عمر گسیختگی در روش هم‌تنش برای فولادهای فابریک و مستعمل ۷۲
- شکل ۵-۱۷- روش برون‌یابی برای تخمین عمر (منحنی پارامتر لارسون - میلر با تنش گسیختگی) ۷۲
- شکل ۵-۱۸- رابطه پیش‌بینی شده برای سرعت کرنش در زمان t و کسر عمر باقیمانده برای داکتیلیته و مقادیر متفاوت M-G ۷۵
- شکل ۵-۱۹- نمودار کسر کاربرد MC تجزیه شده (1/FMC) با پارامتر خزش ثالثیه (t_p/ϵ_p) ۷۶

فصل ششم: روش تحقیق

- شکل ۶-۱- شکل پره‌های مستعمل همراه با پره فابریک ۷۸
- شکل ۶-۲- فلوجارت آزمایشات انجام شده ۷۹
- شکل ۶-۳- مکان نمونه برداری نمونه‌های کشش و خزش از ایرفویل ۸۰
- شکل ۶-۴- تصویر پره از سه نمای جلو، بالا و چپ ۸۱
- شکل ۶-۵- نقشه نمونه‌های کشش و خزش مطابق استاندارد ASTM E8 ۸۵
- شکل ۶-۶- سیکل عملیات حرارتی بازگشت اعمال شده روی نمونه‌ها ۸۶

فصل هفتم: نتایج

- شکل ۷-۱- تصویر میکروسکوپ الکترونی از ریز ساختار آلیاژ IN738LC برای پره‌های فابریک ۸۷
- شکل ۷-۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی آلیاژ IN738LC برای پره‌های مستعمل با زمان کاری ۳۰۰۰۰۰ ساعت ۸۸
- شکل ۷-۳- تصویر میکروسکوپی فاز گاما پرایم اولیه واقع در مرزدانه فاز گاما ۸۸
- شکل ۷-۴- تصاویر میکروسکوپ الکترونی از مرزدانه پره‌های فابریک ۹۰
- شکل ۷-۵- تصویر میکروسکوپ نوری از پره‌های مستعمل با زمان کاری ۳۰۰۰۰ ساعت ۹۰
- شکل ۷-۶- تصاویر کاربیدهای MC در پره فابریک ۹۲
- شکل ۷-۷- تصویر کاربیدهای $M_{23}C_6$ در مرزدانه در پره‌های مستعمل با زمان کاری ۳۰۰۰۰ ساعت ۹۲
- شکل ۷-۸- تجزیه کاربید MC به $M_{23}C_6$ همراه با آنالیز EDX از کاربید MC ۹۳
- شکل ۷-۹- تصویر میکروسکوپی از فاز یونکتیک مشاهده شده در پره فابریک ۹۴
- شکل ۷-۱۰- تصویر میکروسکوپی فازهای سوزنی برای پره‌های مستعمل با ۳۰۰۰۰ ساعت عمرکاری ۹۴
- شکل ۷-۱۱- تصویر میکروسکوپی فازهای سوزنی همراه با آنالیز شیمیایی به روش EDX ۹۵
- شکل ۷-۱۲- تصاویر میکروسکوپی حفرات در پره‌های مستعمل با ۳۰۰۰۰ ساعت عمرکاری ۹۶
- شکل ۷-۱۳- تصاویر میکروسکوپی حفرات و آنالیز شیمیایی از ذره داخل حفره در پره‌های مستعمل ۹۷
- شکل ۷-۱۴- نمودار درصد میزان حفرات در پره‌های مستعمل با عمر کاری ۳۰۰۰۰ ساعت ۹۸
- شکل ۷-۱۵- نمودار تغییرات مجموع کاربید با فاز گاما پرایم در پره‌های فابریک، بازیافتی و مستعمل ۹۸
- شکل ۷-۱۶- نمودار تغییرات کسر سطحی فاز گاما پرایم اولیه در پره‌های فابریک، بازیافتی و مستعمل ۹۹
- شکل ۷-۱۷- نمودار تغییرات کسر سطحی فاز گاما پرایم ثانویه در پره‌های فابریک، بازیافتی و مستعمل ۹۹
- شکل ۷-۱۸- تصاویر میکروسکوپی از ریز ساختار پره‌های بازیافتی ۱۰۰
- شکل ۷-۱۹- تصویر میکروسکوپ الکترونی SEM همراه با آنالیز شیمیایی از لکه سفید، در پره بازیافتی ۱۰۲

- شکل ۲۰-۷- تصویر میکروسکوپی از مرزدانه در پره بازیافتی ۱۰۳
- شکل ۲۱-۷- نمودار تغییرات سختی برای پره‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی ۱۰۴
- شکل ۲۲-۷- نمودار تغییرات استحکام کششی در دمای محیط برای پره‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی ۱۰۷
- شکل ۲۳-۷- نمودار تغییرات ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در دمای ۲۵۰C برای پره‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی ۱۰۷
- شکل ۲۴-۷- نمودار تغییرات استحکام کششی در دمای ۷۰۰ °C برای پره‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی ۱۰۸
- شکل ۲۵-۷- نمودار تغییرات ازدیاد طول و کاهش سطح مقطع در دمای ۷۰۰C برای پره‌های فابریک، مستعمل و بازیافتی ۱۰۸
- شکل ۲۶-۷- نمودار خزش برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 982°C/152Mpa ۱۰۹
- شکل ۲۷-۷- نمودار خزش برای پره‌های بازیافتی در شرایط 982°C/152Mpa ۱۰۹
- شکل ۲۸-۷- نمودار خزش برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 760°C/586Mpa ۱۱۰
- شکل ۲۹-۷- نمودار خزش برای پره‌های بازیافتی در شرایط 760°C/586Mpa ۱۱۰
- شکل ۳۰-۷- نمودار کرنش خزش برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 982°C/152Mpa ۱۱۳
- شکل ۳۱-۷- نمودار کرنش خزش برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 760°C/586Mpa ۱۱۳
- شکل ۳۲-۷- نمودار زمان گسیختگی برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 982°C/152Mpa ۱۱۴
- شکل ۳۳-۷- نمودار زمان گسیختگی برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 760°C/586Mpa ۱۱۴
- شکل ۳۴-۷- نمودار سرعت خزش مینیم برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 982°C/152Mpa ۱۱۵
- شکل ۳۵-۷- نمودار سرعت خزش مینیم برای پره‌های مستعمل و فابریک در شرایط 760°C/586Mpa ۱۱۵

فصل هشتم: بحث و نتیجه گیری

- شکل ۱-۸- تغییرات شعاع گاما پرایم نانوپه با زمان t در شرایط سرویس برای آلیاژ IN738LC ۱۱۸
- شکل ۲-۸- منحنی لارسون - میلر برای آلیاژ IN738LC ۱۲۰
- شکل ۳-۸- نمودار مانکنم - گرانت برای پره‌های فابریک و مستعمل ۱۲۱
- شکل ۴-۸- نقشه مکانیزم تغییر فرم خزش برای آلیاژ IN738LC با اندازه دانه ۰/۳mm ۱۲۳
- شکل ۵-۸- نمودار دایز - میلیکا برای پره‌های فابریک و مستعمل ۱۲۵
- شکل ۶-۸- نمودار Koul - Castillo برای پره‌های فابریک و مستعمل ۱۲۶
- شکل ۷-۸- شماتیک منحنی خزش ۱۳۱
- شکل ۸-۸- بررسی ناحیه سوم خزشی با استفاده از رابطه (۷-۴) ۱۳۳
- شکل ۹-۸- بررسی ناحیه سوم خزشی با استفاده از رابطه (۸-۴) ۱۳۳
- شکل ۱۰-۸- بررسی ناحیه سوم خزشی با استفاده از رابطه (۹-۴) ۱۳۴

عنوان	شماره صفحه
فصل اول: مقدمه‌ای بر تخمین عمر باقیمانده	
فصل دوم: مکانیزمهای تخریب در پرده‌های توربین گازی	
جدول ۱-۲- آنالیز گاز طبیعی مصرفی	۸
جدول ۲-۲- آنالیز گاز خروجی	۸
فصل سوم: بررسی ریزساختاری سوپر آلیاژهای پایه نیکل	
جدول ۱-۳- ترکیب شیمیائی کاربیدهای مشاهده شده در ریزساختار سوپر آلیاژ پایه نیکل	۳۵
فصل چهارم: مکانیزمهای خزش در سوپر آلیاژهای پایه نیکل	
جدول ۱-۴- تعیین مکانیزم غالب در دو شرایط آزمایش خزشی مطابق با معادلات (۷-۴) تا (۹-۴)	۴۶
فصل پنجم: روشهای تخمین عمر و عمر باقیمانده	
جدول ۲-۵- استراتژی تخمین عمر	۵۸
فصل ششم: روش تحقیق	
جدول ۱-۶- ترکیب شیمیائی آلیاژ IN738	۷۷
جدول ۲-۶- خصوصیات فیزیکی و مکانیکی آلیاژ IN738LC	۷۸
فصل هفتم: نتایج	
جدول ۱-۷- نتایج بدست آمده از استخراج الکترولیتی رسوبات گاماپرایم و کاربیدها برای پره‌های فابریک و مستعمل	۸۹
جدول ۲-۷- نتایج بدست آمده از متالوگرافی کمی و سختی پره‌های فابریک و مستعمل با زمان کاری ۳۰۰۰۰ ساعت	۸۹
جدول ۳-۷- نتایج بدست آمده از استخراج الکترولیتی رسوبات گاماپرایم و کاربیدها برای پره‌های بازیافتی	۱۰۱
جدول ۴-۷- نتایج آنالیز تصویری و سختی آلیاژ IN738LC برای پره‌های بازیافتی	۱۰۱
جدول ۵-۷- نتایج خواص کششی پره‌های فابریک و مستعمل در دمای محیط (25°C)	۱۰۵
جدول ۶-۷- نتایج خواص کششی پره‌های فابریک و مستعمل در 700°C	۱۰۵
جدول ۷-۷- نتایج خواص کششی پره‌های بازیافتی در دمای محیط (25°C)	۱۰۶
جدول ۸-۷- نتایج خواص کششی پره‌های بازیافتی در 700°C	۱۰۶
جدول ۹-۷- نتایج بدست آمده از آزمایش خزش پره‌های مستعمل و فابریک	۱۱۱
جدول ۱۰-۷- نتایج بدست آمده از آزمایش خزش پره‌های بازیافتی	۱۱۲
فصل هشتم: بحث و نتیجه گیری	
جدول ۱-۸- مقادیر شیب خط و ضریب همبستگی خطوط مطابق با مدل‌های مختلف مکانیزمهای مرحله سوم	۱۳۴