دانشکده فنی مهندسی

گروه مهندسی مواد و متالورژی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی مواد و متالورژی – شناسایی، انتخاب و ساخت مواد مهندسی

عنوان:

بررسی رفتار خزشی نمونه‌های شیاردار سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC

استاد راهنما:

دکتر سید عبدالکریم سجادی

نگارش:

مسعود اسلامی مسرور

مهر۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

"پدر و مادر عزیزم"

آنان‌که با دست‌های همیشه خسته خویش،
گهواره‌ی جهل و نادانی مرا حرکت دادند
به سوی عقل، درک، احساس و دوست داشتن.
آنان‌که توانشان رفت تا به توانایی برسم
و مویشان سفید گشت تا رویم سپید نماند.
آنان‌که فروغ نگاهشان، گرمی کلامشان و روشنی رویشان
سرمایه‌های جاودانی زندگی من بوده
و همه‌ی ندارم‌هایم با بودنشان دارم می‌شوند.

و تقدیم به
ستارگان زندگی‌ام، خواهر و برادران عزیزتر از جانم ...

تشکر و قدردانی

مراتب سپاس و تشکر خود را به جناب آقای دکترسید عبدالکریم سجادی، استاد محترم راهنمای خود و دکتر سیدی از اعضای هیئت علمی دانشگاه آزاد مشهد، جهت همفکری‌های این عزیزان، ابراز می‌نمایم. از اساتید و کارکنان محترم دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران، دکتر عباسی و آقایان مهندس مرتضوی، نیایش و محتشمی که در مراحل مختلف این پروژه از هیچ مساعدتی دریغ ننمودند، سپاسگزارم. همچنین از مهندسین محمد باقری اصل و هادی قاسم آبادی که در انجام بازنگری متن حاضر شده و دیگر دوستان عزیز خود که از نظر روحی و فکری، مرا در انجام این پروژه یاری رساندن، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

چکیده

مقالات و مراجع زیادی وجود دارد که خصوصیات خزشی و رفتار شکست ناشی از خزش نمونه های ساده و بدون شیار از جمله سوپرآلیاژها را بررسی کرده‌اند ولی تاثیر شیار روی این مشخصات تاکنون بصورت دقیق و کامل مورد مطالعه واقع نشده است. اندازه، شکل، عمق شیار و همچنین تاثیر عملیات حرارتی و ریزساختار روی نوع رفتار خزشی در حالت غیر تک محوره(چند محوره[1]) آلیاژها اثر می‌گذارد. بنابراین در این پژوهش نمونه‌های تهیه شده از ریشه پره توربین گازی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC با ایجاد شیارهایی با عمق ۲ ، ۱/۵ و ۱ میلیمتر تحت آزمون‌های تنش-گسیختگی قرار گرفتند. آزمون‌های خزشی شیاردار طبق استاندارد ASTM E292-01 تحت دو شرایط ۱۵۴MPa - ۹۸۲°C و ۵۸۶MPa - ۷۶۰°C انجام گرفت و در نهایت نتایج حاصل با نمونه‌های بدون شیار از نظر رفتار خزشی و تغییرات میکروساختاری ناشی از تنش‌های چند محوره، مورد تحقیق و مقایسه قرار گرفته است. پس از بررسی‌های انجام گرفته مشخص گردید، نمونه‌های حاوی شیار همچون آلیاژهای ترد رفتار کرده و لذا دارای عمر و داکتیلیته خزشی به مراتب کمتری نسبت به نمونه‌های عادی می‌باشند. این حساسیت به ضعیف شدن ناشی از شیار در شرایط دما پایین و تنش بالا محسوس‌تر می‌باشد تا جائیکه وجود شیار منجر به حذف ناحیه سوم خزشی و شکست ناگهانی در آلیاژ گردیده است.

کلمات کلیدی: سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC، شیار، تنش‌های چند محوره، رفتار خزشی.

[1] Multiaxial

فهرست مطالب

مقدمه ۲

فصل اول: مروری بر منابع

۱-۱- معرفی انواع سوپرآلیاژها ۶

۱-۱-۱-۱- تقسیم‌بندی براساس خواص مکانیکی ۶

۱-۱-۱-۲- تقسیم بندی براساس ترکیب شیمیایی ۷

۱-۱-۱-۳- تقسیم بندی سوپرآلیاژها بر اساس تولید ۷

۱-۱-۱-۳-۱- سوپرآلیاژهای پایه نیکل کار شده ۷

۱-۱-۱-۳-۲- سوپرآلیاژهای پایه نیکل ریختگی ۹

۱-۱-۱-۳-۳- سوپرآلیاژهای تهیه شده با فرآیند متالورژی پودر ۱۰

۱-۲- سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC ۱۲

۱-۳- رفتار خزشی سوپرآلیاژها ۱۵

۱-۳-۱- خزش دمای پایین ۱۵

۱-۳-۲- خزش دمای متوسط ۱۷

۱-۳-۲- خزش دمای بالا ۱۹

۱-۳-۴- شبکه های نابجایی ۲۰

۱-۳-۵- جهت دار شدن ۲۰

۱-۴- شکست خزشی در سوپرآلیاژها ۲۲

۱-۵- تاثیر شیار بر شکست ۲۳

۱-۵-۱- داکتیلیته خزشی چند محوره ۲۵

۱-۵-۲- متدهای بررسی حالت چند محوره ۲۶

۱-۵-۲-۱- تاثیر عمق شیار و ابعاد نمونه بر عمر خزشی ۲۶

۱-۵-۲-۲- تاثیر شکل و ابعاد شیار بر عمر خزشی ۳۰

۱-۵-۲-۳- تاثیر شکل شیار بر شکست ناشی از خستگی-خزش ۳۲

۱-۵-۲-۴- تاثیر عملیات حرارتی(ریزساختار) بر عمر خزشی نمونه شیاردار ۳۴

۱-۵-۲-۵- ناحیه تغییر شکل پلاستیک ناشی از شیار ۳۵

۱-۵-۲-۶- رشد ترک خزشی در ناحیه HAZ اتصالات جوش ۳۸
۱-۵-۳- تاثیر شیار بر عمر و رفتار خزشی سوپرآلیاژها ۴۰
۱-۵-۳-۱- بررسی متدهای رشد ترک خزشی در سوپرآلیاژها ۴۰
۱-۵-۳-۲- خواص خزشی و گسیختگی IN718 ۴۳
۱-۵-۳-۳- تاثیر شیار بر عمر خزشی سوپرآلیاژهای تک کریستال ۴۵
۱-۶- جمع‌بندی و اهمیت انجام این پژوهش ۴۷

فصل دوم: مواد و روش تحقیق

۲-۱- آزمایش‌های بررسی ساختاری ۵۰
۲-۱-۱- مطالعه ساختار میکروسکوپی توسط میکروسکوپ نوری ۵۰
۲-۱-۱-۱- تعیین اندازه دانه ۵۳
۲-۱-۱-۲- تعیین فاصله بین شاخه‌های ثانویه دندریت ۵۳
۲-۱-۱-۳- اندازه‌گیری ابعاد و ترکیب شیمیایی کاربید ۵۴
۲-۱-۲- مطالعه ساختار میکروسکوپی و سطح شکست به کمک میکروسکوپ الکترونی(SEM) ۵۴
۲-۲- آزمایش‌های خزش ۵۴

فصل سوم: نتایج و بحث

۳-۱- ساختار پره‌ها ۵۸
۳-۱-۱- دانه‌بندی ۵۸
۳-۱-۲- شاخه‌های دندریت ۵۸
۳-۱-۳- یوتکتیک ۶۲
۳-۱-۴- فاز γ' ۶۵
۳-۱-۵- کاربیدها ۶۵
۳-۱-۶- مرزدانه ۶۵
۳-۲- بررسی ساختار اولیه پره‌های مورد بررسی ۶۷
۳-۳- آزمایش‌های خزش ۷۰
۳-۳-۱- شرایط دما پایین و تنش بالا ۵۸۶MPa-۷۶۰°C ۷۱
۳-۳-۲- شرایط دما بالا و تنش پایین ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۷۴
۳-۴- آسیب خزشی ۷۸
۳-۵- بررسی میکروساختاری آسیب خزشی ۸۲
۳-۵-۱- جوانه‌زنی و رشد حفرات ۸۳
۳-۵-۲- ضخیم شدن فاز γ' ۸۹

۳-۵-۳- تشکیل کاربیدهای ثانویه از کاربیدهای اولیه و ضخیم شدن آنها ۹۳
۳-۵-۴- صاف شدن مرز دانه ۹۸

فصل چهارم: نتیجه‌گیری
۴-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۲

منابع ۱۰۴

فهرست جدول‌ها

فصل اول: مروری بر منابع

جدول۱-۱: ترکیب شیمیایی گروهی از سوپر آلیاژهای پایه نیکل کار شده [۹] ۸

جدول۱-۲: ترکیب شیمیایی گروهی از سوپرآلیاژهای ریختگی [۱] ۱۰

جدول۱-۳: ترکیب شیمیایی برخی از سوپرآلیاژهای متالورژی پودر [۱۰] ۱۲

جدول۱-۴: محدوده مجاز ترکیب شیمیایی IN738LC بصورت درصد وزنی[۲۱] ۱۴

جدول۱-۵: نقش عناصر آلیاژی مختلف در خواص سوپرآلیاژ IN738LC[۲۱] ۱۴

جدول۱-۶: اثر دمای شکل‌دهی گرم بر روی خواص گسیختگی(دمای ۱۲۰۰°F و تنش ۱۰۰Ksi) [۳۵] ۴۵

فصل دوم: مواد و روش تحقیق

جدول۲-۱: آنالیز شیمیایی عناصر اصلی در پره‌های مورد بررسی(درصد وزنی) ۵۱

جدول۲-۲: مراحل سایش، پولیش و مواد ساینده مورد استفاده در هر مرحله ۵۱

فصل سوم: نتایج و بحث

جدول۳-۱: پارامترهای ساختاری مشاهده شده در پره ۵۹

جدول۳-۲: ترکیب شیمیایی(درصد اتمی) فازهای γ' و کاربید MC در پره‌ها به روش EDX ۵۹

جدول۳-۳: نتایج آزمون‌های خزش ۷۰

جدول۳-۴: آنالیز EDX از نقاط مشخص شده در شکل۴-۱۲ برای شرایط ۷۶۰°C-۵۸۶MPa ۸۰

جدول۳-۵: آنالیز EDX از نقاط مشخص شده در شکل۴-۱۳ برای شرایط ۹۸۲°C-۱۵۴MPa ۸۲

جدول۳-۶: ضرایب رشد ذرات رسوبی در اثر پیرشدن در دمای بالا [۵۱،۵۸] ۹۲

جدول۳-۷: آنالیز EDX از نقاط نزدیک ترک نمونه حاوی شیار ۱mm برای شرایط ۹۸۲°C-۱۵۴MPa ۹۵

جدول۳-۸: آنالیز EDX از نقاط نزدیک ترک برای نمونه حاوی شیار ۲mm برای شرایط ۹۸۲°C-۱۵۴MPa ۹۷

فهرست شکل‌ها

فصل اول: مروری بر منابع

شکل۱-۱: افزایش کسر حجمی γ' سوپرآلیاژها به مرور زمان جهت بهبود خواص دما بالا بعنوان پره و دیسک[۲۰] ۱۳

شکل۱-۲: افزایش میزان عناصر شکل دهنده γ' در کنار میزان کرم، از سال ۱۹۳۰[۲۰] ۱۳

شکل۱-۳ : مکانیزم نابجایی دیگری برای برش γ' در دماهای کم[۲۲] ۱۷

شکل۱-۴ : میکروگراف سه بعدی CMSX-10 (a) قبل و (b) بعد از جهت‌دار شدن. تنش کششی عمود بر ورقه ها است و δ منفی است [۲۸] ۲۱

شکل۱-۵: استحکام گسیختگی خزشی تابعی از زمان گسیختگی برای فولاد CrMoV در ۵۰۰°C. فولاد مورد آزمون تحت عملیات حرارتی: ۹۵۰°C /هوا+۶۸۰°C /هوا با استحکام تسلیم حاصل ۸۳۹MPa قرار گرفته است [۴] ۲۴

شکل۱-۶: هندسه و ابعاد نمونه تحت آزمایش(ابعاد بصورتmm) [۳۲] ۲۷

شکل۱-۷: رابطه بین طول ترک خزشی و میزان جابه جایی با زمان: (a) فولاد 1CrMoV [۳۲]، (a) فولاد 12CrWCoB [۳۳] ۲۸

شکل۱-۸: رفتار تنش گسیختگی فولادهای CrMoV تحت شرایط دو نوع عملیات حرارتی مختلف [۳] ۲۹

شکل۱-۹ : مقایسه عمر خزشی نمونه‌های شیاردار و بدون شیار از جنس فولاد CrMoV: (a) استحکام خزشی در ۱۰۰۰۰۰ساعت، (b) استحکام خزشی در ۱۰۰۰۰ساعت [۳] ۲۹

شکل۱-۱۰ : هندسه نمونه‌های حاوی دو شیار(DEN)، بررسی تاثیر شکل شیار [۳۷] ۳۰

شکل۱-۱۱: (a) شماتیکی از تاثیر قیود تغییرشکل بر روی استحکام نمونه های شیاردار، (b) تاثیر ساختار برروی قیود تغییر شکل [۳۷] ۳۱

شکل۱-۱۲: نمونه‌های حاوی شیار به همراه مدل‌های FEM آنها [۴۰] ۳۲

شکل۱-۱۳: توسعه ماکزیمم خسارت وارده با زمان خزش در نمونه‌های حاوی شیار:(a) C-type، (b) U-type و (c) V-type [۴۰] ۳۳

شکل۱-۱۴: میزان خسارت وارده در سطح مقطع جانبی انتهای شیار:(a) C-type، (b) U-type و (c) V-type [۴۰] ۳۴

شکل۱-۱۵: رفتار گسیختگی نمونه های مسطح و شیاردار: (a) تمپرشده، (b) تمپرنشده [۴۱] ۳۵

شکل۱-۱۶: تصویر SEM از انتهای شیار نمونه تمپر نشده تحت تنش σ=۱۲۰MPa [۴۱] ۳۵

شکل۱-۱۷: ریشه شیار در زمان اولیه خزش $t\sim t_i$ با عمق شیار: (a) ۰/۵mm، (b) ۲mm [۴۲] ۳۷

شکل۱-۱۸: شماتیکی از تغییر شکل خزشی: (a) نمونه حاوی شیار کم عمق با تسلیم شدن افزایش یافته، (b) نمونه با شیار عمیق و بدون اعمال تسلیم شدن افزایش یافته [۴۲] ۳۷

شکل۱-۱۹: ساختار تبلور مجدد یافته در عرض نمونه بعد از عملیات آنیل. مناطق سیاه ناشی از تبلور مجدد $CPZ_{0/02}$است: (a) ۰/۵mm، ۵۲۰hr (b) ۰/۵mm، ۳۰۰۰hr (c) ۲mm، ۵۲۰hr (d) ۲mm، ۳۰۰۰hr (e) ۰/۵mm، t_i=۳۴۵۰hr (f) ۱mm، t_i=۴۱۰۰hr (g) ۲mm، t_i=۵۰۰۰hr [۴۲] ۳۸

شکل۱-۲۰: الگوی رشد ترک خزشی در نمونه جوش در ۶۲۵°C برای K_I= ۱۸ $MPa.m^{1/2}$ [۴۳] ۳۹

شکل۱-۲۱: نمونه‌های CT مورد آزمایش جهت بررسی نرخ رشد ترک خزشی [۴۶] ۴۰

شکل۱-۲۲: رابطه بین طول ترک خزشی و زمان نرماله شده با زمان گسیختگی(t_f) برای سوپرآلیاژهای IN100 و IN713C [۴۶] ۴۱

شکل۱-۲۳: میکروساختارهای مشاهده شده از γ-γ' در نزدیکی نوک ترک خزشی نمونه‌های CT سوپرآلیاژها [۴۶] ۴۲

شکل۱-۲۴: انرژی اکتیواسیون رشد ترک خزشی برای سوپرآلیاژهای پایه نیکل [۴۶] ۴۲

شکل۱-۲۵: عمر گسیختگی نمونه‌های شیاردار و ساده حاصل از نورد گرم با قطر ۱۶mm [۳۵] ۴۳

شکل۱-۲۶: شماتیکی از پارامتر لارسون-میلر از عمر گسیختگی نمونه نورد گرم با قطر ۱۶mm [۳۵] ۴۴

شکل۱-۲۷: نمونه‌های خزش: (a) نمونه بدون شیار، (b) نمونه شیاردار [۷۰] ۴۶

شکل۱-۲۸ : مقایسه عمر خزشی در حالت شیاردار و بدون شیار: (a) مقایسه عمر خزشی در دمای ۹۵۰ °C، (b) تاثیر نیروی اعمالی بر عمر خزشی نمونه‌های شیاردار [۷۰] ۴۶

شکل۱-۲۹: مقایسه نمودار خزشی در دمای ۹۵۰°C و شرایط تنشی(Load(KN)/Stress(MPa)) نمونه‌های شیاردار و بدون شیار [۷۰] ۴۷

فصل دوم: مواد و روش آزمایش

شکل۲-۱: ریشه پره توربین گازی از جنس سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC ۵۲

شکل۲-۲: استاندارد ASTM E292-01 جهت آزمون تنش-گسیختگی در حالت چند محوره ۵۲

شکل۲-۳: نقشه سه بعدی نمونه شیاردار(ابعاد به mm) ۵۵

شکل۲-۴: نمونه‌های نهایی آماده شده برای انجام آزمون خزش ۵۶

فصل سوم: نتایج و بحث

شکل۳-۱: شاخه‌های دندریتی: (a) اچانت ماربل، (b) اچانت اسیداستیک ۶۱

شکل۳-۲: (a) نحوه‌ی توزیع یوتکتیک: (a) اچانت ماربل، (b) اچانت اسیداستیک ۶۳

شکل۳-۳: (a) تصویر میکروسکوپ الکترونی(FE-SEM) از نحوه‌ی توزیع ذرات رسوبی γ' در زمینه γ (b)حضور ذرات رسوبی اولیه(مکعبی) و ثانویه(کروی) ۶۴

شکل۳-۴: (a) نحوه توزیع و اندازه کاربید MC با اچانت اسید استیک، (b) تصویر FE-SEM از نحوه‌ی توزیع ذرات رسوبی و کاربیدها ۶۶

شکل۳-۵: وضعیت مرزدانه‌ها در ریزساختار قبل از خزش ۶۷

شکل۳-۶: نمودار خزشی نمونه‌های شیاردار و بدون شیار در شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C ۷۲

شکل۳-۷: تاثیر قیود تغییر شکل(۲a/w) بر روی عمر خزشی در شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C ۷۲
شکل۳-۸: میزان تنش وارده بر طول سنجه نمونه‌های شیاردار تحت شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C ۷۳
شکل۳-۹: نمودار خزشی نمونه‌های شیاردار و بدون شیار در شرایط ۱۵۴MPa -۹۸۲°C ۷۵
شکل۳-۱۰: تاثیر قیود تغییر شکل(۲a/w) بر روی عمر خزشی در شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۷۵
شکل۳-۱۱: میزان تنش وارده بر طول سنجه نمونه‌های شیاردار تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۷۷
شکل۳-۱۲: میکروساختار نزدیک سطح شکست نمونه‌های بدون شیار در شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C: (a) ایجاد حفرات خزشی در راستای مرزدانه‌ها، (b) تصویر SEM از ترک‌گذاری در سطح شکست ۷۹
شکل۳-۱۳ : آنالیز EDX از سطح شکست برای شرایط۵۸۶MPa-۷۶۰°C ۸۰
شکل۳-۱۴: میکروساختار نزدیک سطح شکست نمونه‌های بدون شیار در شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C: (a) همراستا شدن کاربیدها در امتداد مرزدانه به همراه ایجاد حفرات خزشی، (b) تصویرSEM از وجود کاربیدهای M۲۳C۶ در امتداد ترک-گذاری در سطح شکست ۸۱
شکل۳-۱۵ : آنالیز EDX از سطح شکست برای شرایط۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۸۲
شکل۳-۱۶: ترک‌گذاری خزشی در نمونه‌های بدون شیار تحت شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C: (a) میکروسکوپ نوری، (b) تصویر SEM ۸۴
شکل۳-۱۷: ترک‌گذاری خزشی در نمونه‌های بدون شیار تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C: (a) میکروسکوپ نوری، (b) تصویر SEM ۸۵
شکل۳-۱۸: نحوه‌ی ترک‌گذاری در نزدیکی شیار نمونه‌های با عمق شیار ۱/۵mm: (a) تحت شرایط ۵۸۶MPa-۷۶۰°C، (b) تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۸۷
شکل۳-۱۹: تغییرات ریزساختاری در نزدیکی شیار نمونه‌های خزش کرده با عمق شیار ۱/۵mm: (a) تحت شرایط MPa ۵۸۶-۷۶۰°C، (b) تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۹۰
شکل۳-۲۰: نمونه‌های خزش کرده با عمق شیار ۱mm تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C: (a) نحوه‌ی ترک گذاری در نزدیکی شیار، (b) بهم پیوستن حفرات خزشی و ایجاد ترک ۹۴
شکل۳-۲۱ : نمودار EDX از نقاط نزدیک ترک نمونه‌های خزش کرده با عمق شیار ۱mm تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۹۵
شکل۳-۲۲: نمونه‌های خزش کرده با عمق شیار ۲mm تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C: (a) نحوه‌ی ترک گذاری در نزدیکی شیار، (b) رسوب کاربیدها در امتداد مرزدانه و ایجاد ترک ۹۶
شکل۳-۲۳: نمودار EDX از نقاط نزدیک ترک برای نمونه حاوی شیار ۲mm برای شرایط۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۹۷
شکل۳-۲۴: حالت مرزدانه بعد از خزش در نمونه با عمق شیار ۲mm تحت شرایط ۱۵۴MPa-۹۸۲°C ۹۹

مقدمه

مقدمه

آغاز توسعه آلیاژهای مقاوم در برابر خزش و خوردگی به اوایل جنگ جهانی اول برمی‌گردد. در این سال‌ها نیاز به آلیاژهایی مناسب جهت ساخت موتور هواپیماهای جنگی احساس شد. اختراع موتورهای احتراق داخلی و کشف این قانون که در سیکل‌های ترمودینامیکی در صورت استفاده از دمای بالاتر راندمان افزایش می‌یابد نیز محققان را به سمت یافتن مواد و آلیاژهایی پیش برد که توانایی و قابلیت کاربرد در درجه حرارت‌های بالاتر را داشته باشند. با افزایش درجه حرارت مسائلی از جمله خوردگی در دمای بالا، اکسیداسیون و کاهش استحکام خزشی مطرح گردید. در اوایل قرن بیستم جهت فائق آمدن بر این مشکلات، فولادهای زنگ نزن آستنیتی اختراع و تولید شدند که دارای مقاومت مناسبی در مقابل خوردگی و اکسیداسیون بودند .با توجه به زمینه آستنیتی و وجود دو عنصر کرم و نیکل بعنوان عناصر اصلی مقاوم کننده در این نوع فولادها، شرایط برای توسعه این نوع آلیاژها فراهم شد. در حدود سالهای ۱۹۳۰ در مورد آلیاژهای Ni-Cr تحقیق آغاز و پژوهش بر روی این آلیاژ دوتایی با مقادیر کمی از عنصر تیتانیوم و آلومینیوم افزوده شده و خواص آن ادامه یافت. این آلیاژ مقاومت خزشی بالایی از خود نشان می‌داد .روند توسعه این آلیاژها به موازات پیشرفت در طراحی و ساخت توربین‌های گازی، موتورهای جت و هواپیماهای مافوق صوت منجر به طراحی و ساخت آلیاژهایی گردید که توانایی کارکردن درشرایط دما بالا در مقایسه با آلیاژهای تجاری معمول را دارا بودند و لذا این آلیاژها سوپرآلیاژ نامیده شدند. امروزه به کلیه آلیاژهایی که قابلیت کاربرد در دماهای بالا را دارند و در هنگام کار با تنش‌های مکانیکی زیادی مواجه می‌شوند و معمولاً به پایداری سطحی بالایی نیاز دارند، عنوان سوپر آلیاژ اطلاق می‌شود. این سوپرآلیاژها عمدتا بر پایه یکی از عناصر Co، Fe و یا Ni می‌باشند، که در بین آنها گروه آلیاژهای پایه نیکل با توجه به پیچیدگی متالورژیکی، فیزیکی و همچنین قابلیت کاربرد آنها در دماهای بالاتر، از اهمیت بیشتری برخوردارند.

سوپرآلیاژهای پایه نیکل را بر حسب روش تولید به سه گروه کلی: ۱) سوپرآلیاژهای کارپذیر، ۲) سوپرآلیاژهای متالورژی پودر ۳) سوپرآلیاژهای ریختگی همانند IN738LC، تقسیم‌بندی می‌کنند.

از مهمترین کاربردهای سوپرآلیاژ پایه نیکل IN738LC، استفاده در پره‌های توربین گازی زمینی در شرایط کارکرد سخت فشار و دما بالا به همراه محیط خورنده می‌باشد. لذا تنش‌های اعمالی بر روی آن در حین کار معمولا بصورت تک‌محوره می‌باشد، اما به هر حال سازه‌های تحت شرایط طراحی صنعتی در برخی موارد تحت‌تنش های چند محوره ناشی از فشار داخلی، گرادیان‌های دمایی و تنش‌های ناشی از نوع طراحی قرار می‌گیرند. از جمله مواردی که شرایط تنش‌های چند محوره در آنها حاکم است، عبارتند از:

سطوح شیاردار موجود برروی روتور در نواحی ورودی، شیارهای موجود برروی دیسک برای اتصال پره‌ها، ریشه پره‌های توربین‌های بخار و گازی، فولادهای Cr-Mo-V استفاده شده بعنوان پیچ و مهره، سیستم لوله‌کشی[1]، و یا حتی ترک‌های بوجود آمده بعد از کارکرد قطعه.

تنش‌های اصلی ناشی از نوع طراحی، به منظور محاسبه عمر خزشی مواد تحت تنش‌های سه محوره، مورد بررسی قرار می‌گیرند. این مفاهیم براساس تطابق عمر گسیختگی مواد طراحی شده تحت شرایط چند محوره با حالتی که مواد تحت شرایط تنش تک محوره قرار می‌گیرند، گزارش می‌شوند.

عوامل زیادی بر عمر پره‌ها تاثیر می‌گذارد، مشخصه‌های مختلفی همچون تاثیر محیط، تنش‌های مکانیکی و حرارتی بالا از جمله این موارد می‌باشند. لذا خسارت‌های مختلفی بصورت داخلی و خارجی از جمله تغییر ابعادی ناشی از افزایش تنش اعمالی و کاهش بازدهی موثر پره حاصل می‌گردد. گزارش‌های رسیده از انهدام پره‌های توربین، حاکی از ایجاد فرورفتگی و ترک‌گذاری‌های سطحی بر روی ناحیه حمله پره بوده و حفرات بوج.د آمده در اثر تنش‌های خمشی نیز از دیگر موارد اصلی خرابی توربین بوده است.

[1] Piping

لذا در این تحقیق سعی شده است با توجه به شرایط کاربردی سوپرآلیاژ IN738LC و از طرفی گزارش‌های رسیده از انهدام پره‌هایی از این جنس در توربین‌های گازی تولید برق، نمونه‌های شیاردار از این جنس تحت شرایط خزشی با عمق شیار مختلف قرار گرفته تا رفتار و عمر خزشی ناشی از وجود حالت چند محوره با نمونه‌های بدون شیار مقایسه گردند تا بدین صورت رفتار این سوپرآلیاژ هنگام ترک گذاری و شکست بررسی شود.

فصل اول

مروری بر منابع

۱-۱- معرفی انواع سوپرآلیاژها

سوپرآلیاژها، آلیاژهای پایه نیکل، پایه آهن – نیکل و پایه کبالت هستند که عموما در دماهای بالاتر از$^{\circ}C$۵۴۰ استفاده می شوند.

با توجه به این ویژگی، کاربرد زیادی برای سوپرآلیاژها وجود دارد، از جمله: قطعات و اجزاء هواپیماها، تجهیزات شیمیایی و پتروشیمی، قطعات توربین های گازی مولد نیرو، ساخت قالبهای ریخته‌گری و ابزارهای گرمکار، مصارف پزشکی و دندانپزشکی، فضاپیماها، تجهیزات عملیات حرارتی، سیستمهای نوترونی و هسته ای، تجهیزات کور ها و بطور کلی در بخش‌هایی که نیاز به تحمل دما و تنش بالا باشد، این مواد بهترین انتخاب به شمار می-آیند[۱-۷].

۱-۱-۱- تقسیم‌بندی سوپرآلیاژها

سه نوع تقسیم‌بندی مطرح را برای سوپرآلیاژها براساس خواص مکانیکی، فرآیند تولید و ترکیب شیمیایی می‌توان متصور شد.

۱-۱-۱-۱- تقسیم‌بندی براساس خواص مکانیکی

سوپرآلیاژها براساس خواص مکانیکی به دو گروه زیر تقسیم بندی می‌شوند[۲]:

- سوپرآلیاژهای مقاوم به خزش
- سوپرآلیاژهای استحکام بالا

نحوه ایجاد هر یک از این دو گروه سوپرآلیاژ که عمدتا با نوع عملیات حرارتی انجام شده بر روی آنها ارتباط دارد، در بخش‌های بعد مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۱-۱-۱-۲- تقسیم بندی براساس ترکیب شیمیایی

همان‌گونه که در مقدمه بیان شد ترکیب شیمیایی سوپرآلیاژها بر پایه یکی از عناصر Ni، Fe و یا Co بوده که هر کدام از این عناصر محدوده وسیعی از خواص و ریزساختار را پدید می‌آورند. به همین ترتیب این مواد را براساس عناصر تشکیل دهنده به سه گروه تقسیم می‌نمایند:

۱- سوپرآلیاژهای پایه آهن که به علت وجود نیکل زیاد در آنها، این آلیاژها را سوپرآلیاژهای پایه آهن_نیکل نیز می‌نامند.

۲- سوپرآلیاژهای پایه کبالت

۳- سوپرآلیاژهای پایه نیکل

علاوه بر عناصر فوق به این سوپرآلیاژها، عناصر دیگری از قبیل کرم، تنگستن، مولیبدن، تانتالم،.نیوبیوم، تیتانیوم، آلومینیوم افزوده می‌شود[۸].

۱-۱-۱-۳- تقسیم بندی سوپرآلیاژها بر اساس تولید

اصولا سوپرآلیاژها بر اساس نحوه تولید به سه گروه تقسیم می‌شوند:

۱-۱-۱-۳-۱- سوپرآلیاژهای پایه نیکل کار شده

ترکیب شیمیایی تعدادی از سوپرآلیاژهای پایه نیکل کار شده در جدول۱-۱ مشاهده می‌شود. این آلیاژها عموما ۱۵ تا ۲۰ درصد کروم با مقدار قابل توجهی کبالت و مقداری نیز مولیبدن و گاهی کمی تنگستن اضافه شده جهت استحکام‌دهی به فاز زمینه، دارا می‌باشند. فاز γ' نیزحاوی تیتانیوم و آلومینیوم است. بیشتر این سوپرآلیاژها علاوه بر کربن دارای زیرکونیوم و بور به منظور استحکام‌دهی از طریق مرزدانه‌ها هستند. قابلیت کار در دمای بالا این سوپرآلیاژها اصولا مربوط به کسر حجمی γ' حاضر در آنها دارد که مقدار آن در آلیاژهای Udimet720 و

Udimet720Li به بیشترین مقدار خود درحدود ٪۴۵ می رسد. در کسرهای حجمی بالاتر، ناحیه کارگرم قابل دسترس بین خط انحلال γ' و دماهای ذوب آغازین به منظور کاربردهای عملی بسیار باریک شده و امکان تشکیل ناحیه جدایش یافته γ' در بدنه را بوجود می‌آورد[۸].

جدول۱-۱: ترکیب شیمیایی گروهی از سوپر آلیاژهای پایه نیکل کار شده[۹]

Alloy	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Ta	Fe	Hf	C	B	Zr	Ni
Nimonic PE16	16.5	1.0	1.1	—	—	1.2	1.2	—	33.0	—	0.05	0.020	—	Bal
Nimonic PK33	18.5	14.0	7.0	—	—	2.0	2.0	—	0.3	—	0.05	0.030	—	Bal
N18	11.5	15.7	6.5	0.6	—	4.35	4.35	—	—	0.45	0.015	0.015	0.03	Bal
Pyromet 860	13.0	4.0	6.0	—	0.9	1.0	3.0	—	28.9	—	0.05	0.01	—	Bal
Pyromet 31	22.7	—	2.0	—	1.1	1.5	2.5	—	14.5	—	0.04	0.005	—	Bal
Rene 41	19.0	11.0	1.0	—	—	1.5	3.1	—	—	—	0.09	0.005	—	Bal
Rene 88DT	16.0	13.0	4.0	4.0	0.7	2.1	3.7	—	—	—	0.03	0.015	0.03	Bal
Rene 95	14.0	8.0	3.5	3.5	3.5	3.5	2.5	—	—	—	0.15	0.010	0.05	Bal
Rene 104	13.1	18.2	3.8	1.9	1.4	3.5	3.5	2.7	—	—	0.030	0.030	0.050	Bal
RR1000	15.0	18.5	5.0	—	1.1	3.0	3.6	2.0	—	0.5	0.027	0.015	0.06	Bal
Udimet 500	18.0	18.5	4.0	—	—	2.9	2.9	—	—	—	0.08	0.006	0.05	Bal
Udimet 520	19.0	12.0	6.0	1.0	—	2.0	3.0	—	—	—	0.05	0.005	—	Bal
Udimet 630	18.0	—	3.0	3.0	6.5	0.5	1.0	—	18.0	—	0.03	—	—	Bal
Udimet 700	15.0	17.0	5.0	—	—	4.0	3.5	—	—	—	0.06	0.030	—	Bal
Udimet 710	18.0	15.0	3.0	1.5	—	2.5	5.0	—	—	—	0.07	0.020	—	Bal
Udimet 720	17.9	14.7	3.0	1.25	—	2.5	5.0	—	—	—	0.035	0.033	0.03	Bal
Udimet 720LI	16.0	15.0	3.0	1.25	—	2.5	5.0	—	—	—	0.025	0.018	0.05	Bal
Waspaloy	19.5	13.5	4.3	—	—	1.3	3.0	—	—	—	0.08	0.006	—	Bal