# به اسم نور

٤٧٨٩٢

مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

۱۳۸۲ /۵/ ۲۰

بسمه تعالی

دانشکده مهندسی مواد و متالورژی

# بررسی تأثیر پارامترهای مکانیکی بر خواص خستگی آلیاژ بیومتریال Ti-۶Al-۴V

شبنم حسینی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی مواد

اساتید راهنما:
دکتر مرتضی تمیزی‌فر – دکتر علی‌اکبر ضیایی‌مؤید

استاد مشاور:
دکتر حسین عربی

آذر ماه ۱۳۸۱

۴۷۸۹۲

به همیشه همراه

همســـــر مهربانم

## چکیـــده

در پژوهش حاضر، رفتار خستگی آلیاژ Ti-۶Al-۴V برای نمونه‌های صاف و شیاردار بررسی شده است. آزمایش خستگی در نمونه‌های شیاردار، برای دو نوع مختلف شیار با فاکتور تمرکز تنش ۳/۶ و ۴/۱، صورت گرفت. علاوه بر این رفتار خستگی میلگردهایی با قطرهای مختلف که دارای استحکام کششی متفاوت بوده‌اند، بررسی شد. سیستم بارگذاری در این آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه خستگی چرخشی - خمشی و در نسبت تنشی R=-۱ بوده است.

منحنی‌های S-N مربوط به هر استحکام کششی رسم گردید و با استفاده از آن حساسیت به شیار در منطقه HCF به دست آمد و نسبت به فولادها مقایسه شد. نتایج نشان داد که در آلیـاژ Ti-۶Al-۴V، حضور شیار در رفتار خستگی HCF و LCF تغییرات نسبی متفاوتی ایجاد نمی‌کند. لذا این آلیاژ جهت ساخت قطعاتی که در شرایط HCF کار می‌کنند، نسبت به آلیاژهای با استحکام برابر، مناسب‌تر است.

## سپاسگـــزاری

بر خود لازم می‌دانم که از زحمات و راهنمایی‌های کلیه اساتید و سرورانی که به نحوی مرا در انجام این پروژه و گردآوری و تألیف مطالب یاری رسانده‌اند تشکر و قدردانی نمایم:

- اساتید عالیقدر راهنما آقایان دکتر مرتضی تمیزی‌فر و دکتر علی‌اکبر ضیایی‌مؤید که راهنمایی‌های ارزشمند آنها در طول پژوهش حاضر بسیار رهگشا و سازنده بوده است.

- استاد گرانقدر مشاور، آقای دکتر حسین عربی که حمایتهای بی‌دریغ و نظرات ارزنده ایشان، چراغ راهی در انجام پروژه بوده است.

- مدیریت محترم عامل شرکت آتیلا ارتوپد، جناب آقای تحسری و مدیریت محترم کارخانه، جناب آقای احمدی به دلیل مساعدت جهت تهیه و ساخت نمونه‌های مورد نیاز در این پروژه.

- مسئول محترم آزمایشگاه SEM دانشگاه علم و صنعت ایران، خانم مهندس زهرا صالحپور و مسئول محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی، آقای مهندس سیروس سعادت به دلیل همکاری جهت انجام آزمایشات.

- مسئول محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی شریف، آقای مهندس رحیمی.

- ریاست محترم آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه صنعتی امیر کبیر، آقای دکتر آقازاده و مسئول محترم آزمایشگاه، آقای طالبی.

- سرکار خانم موسویان که زحمت تایپ و صفحه‌آرایی پروژه را به عهده داشته‌اند و همچنین سایر همکاران گرامی در جامعه ریخته‌گران ایران که همواره یار و مشوق من در انجام این پروژه بوده‌اند.

- دوست بسیار عزیزم سرکار خانم مهندس بهاره معتمدی

در پایان از زحمات بی‌دریغ همسرم، آقای مهندس لیمویی که در تمام مراحل انجام پروژه یار و یاور من بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

# فهـرست مطالب

**عنوان** **صفحه**


**فصل اول: مقدمه**

۱- مقدمه ..... ۲

**فصل دوم: مروری بر منابع**

۲-۱- پدیده خستگی در فلزات ..... ۵

۲-۱-۱- تاریخچه ..... ۵

۲-۱-۲- انواع خستگـی ..... ۷

۲-۱-۳- فاکتـور تمرکز تنش ..... ۹

۲-۱-۴- بررسی تأثیر وجود شیـار در استحکام خستگی ..... ۱۲

۲-۱-۵- فاکتور حساسیت به شیار و روشهای تجربی برای محاسبه $K_f$ ..... ۱۸

۲-۲- تیتانیم و آلیاژهای آن ..... ۲۱

۲-۲-۱- تاریخچه ..... ۲۱

۲-۲-۲- ریز ساختار آلیاژهای تیتانیم ..... ۲۲

۲-۲-۲-۱- آلیاژهای آلفا ..... ۲۳

۲-۲-۲-۲- آلیاژهای آلفا- بتا ..... ۲۷

۲-۲-۲-۳- آلیاژهای بتا ..... ۲۸

۲-۲-۳- ارتباط بین ریزساختار و عملیات حرارتی و توپوگرافی شکست در آلیاژهای تیتانیم $\alpha + \beta$ ..... ۲۹

۲-۲-۴- بررسی علل استفاده از تیتانیم و آلیاژهای آن به عنوان بیومواد ..... ۳۸

۲-۳- اهمیت خستگی و حساسیت به شیار در ایمپلنتها ..... ۴۱

۲-۴- تأثیر عوامل مختلف در خواص خستگی آلیاژ Ti-۶Al-۴V ..... ۴۴

## فصل سوم: روش انجام تحقیق


۳-۱- مواد اولیه ..... ۴۹
۳-۲- بررسی‌های متالوگرافی ..... ۴۹
۳-۳- آزمایشهای مکانیکی ..... ۴۹
۳-۳-۱- آزمایش سختی سنجی ..... ۵۱
۳-۳-۲- آزمایش کشش ..... ۵۱
۳-۳-۳- آزمایش خستگی ..... ۵۱
۳-۳-۳-۱- آزمایش خستگی نمونه‌های بدون شیار ..... ۵۴
۳-۳-۳-۲- آزمایش خستگی نمونه‌های شیاردار ..... ۵۴
۳-۴- بررسی شکست نگاری ..... ۵۵


## فصل چهارم: نتایج و بحث


۴-۱- نتایج بررسی‌های متالوگرافی ..... ۵۷
۴-۲- نتایج آزمایش کشش و سختی سنجی ..... ۵۷
۴-۳- نتایج آزمایشات خستگی ..... ۶۲
۴-۴- نتایج بررسی شکست نگاری ..... ۷۸
نتیجه‌گیری نهایی ..... ۸۰
پیشنهادات ..... ۸۱
منابع و مراجع ..... ۸۲

# فهـرست اشکال و نمودارها

**عنوان** **صفحه**

**فصل دوم: مروری بر منابع**


شکل (۱-۲) شماتیک منحنی وهلر ..... ۶

شکل (۲-۲) تقسیم‌بندی منحنی S-N به مناطق مختلف ..... ۸

شکل (۳-۲) توزیع تنش در اثر (الف) سوراخ دایره‌ای، (ب) سوارخ بیضوی ..... ۹

شکل (۴-۲) شیارهای بیضوی ..... ۱۱

شکل (۵-۲) خطوط توزیع تنش در اطراف شیار ..... ۱۳

شکل (۶-۲) اثر شیار روی منحنی S-N حاصل از خستگی خمشی چرخشی یک آلیاژ آلومینیم و مقایسه اثر $K_t$ و $K_f$ بر روی کاهش مقاومت به خستگی آن ..... ۱۳

شکل (۷-۲) فاکتور شیار خستگی بر حسب شعاع‌های مختلف شیار برای حد خستگی حاصل از خستگی خمشی چرخشی فولاد نرم ..... ۱۴

شکل (۸-۲) تفسیر حد خستگی به عنوان تنش میانگین در یک فاصله محدود $\delta$ جلوی شیار .... ۱۵

شکل (۹-۲) نمونه صاف و نمونه شیاردار با تنش موضعیِ یکسان که دارای ترک می‌باشند ..... ۱۷

شکل (۱۰-۲) تأثیر تسلیم معکوس در ناحیه کوچکی نزدیک شیار روی دامنه تنش ..... ۱۷

شکل (۱۱-۲) ثوابت تجربی برای $K_f$ که از روابط پترسون برای بارگذاری محوری یا خمشی بدست آمده‌اند ..... ۱۹

شکل (۱۲-۲) ثوابت تجربی برای $K_f$ مربوط به فولاد بر پایه روابط نیوبر ..... ۲۰

شکل (۱۳-۲) ریزساختار آلیاژهای تیتانیم $\alpha$، $\alpha + \beta$ و $\beta$ ..... ۲۲

شکل (۱۴-۲) مورفولوژی $\alpha$ اولیه در عملیات فورج ..... ۳۰

شکل (۱۵-۲) تأثیر نرخ سرد کردن روی ریز ساختار ..... ۳۱

شکل (۱۶-۲) رسوب فاز $\beta$ در مارتنزیت تمپر شده ..... ۳۲

شکل (۱۷-۲) ریز ساختار Ti-۶Al-۴V (شرایط A) ..... ۳۴

شکل (۱۸-۲) ریز ساختار Ti-۶Al-۴V (شرایط A) ..... ۳۵
شکل (۱۹-۲) ریز ساختار شامل صفحات $\alpha$ خشن به علاوه $\alpha$ اولیه هم محور و $\beta$ استحاله یافته . ۳۶
شکل (۲۰-۲) توپوگرافی شکست آلیاژ Ti-۶Al-۴V (شرایط A) ..... ۳۷
شکل (۲۱-۲) وسایل پروتزی ساخته شده از تیتانیم و آلیاژهای آن..... ۴۱
شکل (۲۲-۲) مثالهایی از شکست خستگی وسایل طبی ..... ۴۲
شکل (۲۳-۲) استحکام خستگی برخی از آلیاژهای معمول ایمپلنت ..... ۴۳
شکل (۲۴-۲) استحکام خستگی Ti-۶Al-۴V در هوا و محیط شبیه سازی شده بدن..... ۴۴
شکل (۲۵-۲) منحنی‌های S-N (R=-۱) برای Ti-۶Al-۴V..... ۴۵
شکل (۲۶-۲) منحنی S-N (R=-۱) برای Ti-۶Al-۴V با ریز ساختار لایه‌ای ظریف ..... ۴۶
شکل (۲۷-۲) اثرات شیار روی استحکام خستگی آلیاژ Ti-۶Al-۴V ..... ۴۶
شکل (۲۸-۲) حد خستگی نمونه شیاردار و بدون شیار آلیاژ Ti-۶Al-۴V نسبت به استحکام کششی ..... ۴۷

**فصل سوم: روش انجام تحقیق**

شکل (۱-۳) روند انجام آزمایشات ..... ۵۰
شکل (۲-۳) تصویر نمونه کششی طبق استاندارد ASTM E8 ..... ۵۱
شکل (۳-۳-الف) دستگاه خستگی مورد استفاده..... ۵۳
شکل (۳-۳- ب) اجزای دستگاه خستگی ..... ۵۳
شکل (۴-۳) تصویر نمونه خستگی طبق استاندارد ASTM E466..... ۵۴
شکل (۵-۳) تصویر نمونه خستگی شیاردار ..... ۵۴

**فصل چهارم: نتایج و بحث**

شکل (۱-۴) ریزساختار میلگرد با قطر ۸ میلیمتر..... ۵۸
شکل (۲-۴) ریزساختار میلگرد با قطر ۱۴ میلیمتر..... ۵۹
شکل (۳-۴) ریزساختار میلگرد با قطر ۲۰ میلیمتر..... ۶۰
شکل (۴-۴) ریزساختار میلگرد با قطر ۲۵ میلیمتر..... ۶۱
شکل (۵-۴) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۲۵mm ..... ۶۳

شکل (۴-۶) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۱۴mm ..... ۶۴
شکل (۴-۷) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۱۸mm ..... ۶۴
شکل (۴-۸) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۲۰mm ..... ۶۵
شکل (۴-۹) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۱۱mm ..... ۶۵
شکل (۴-۱۰) منحنی S-N برای میلگردی با قطر ۸mm ..... ۶۶
شکل (۴-۱۱) نمودار نسبت خستگی بر حسب استحکام کششی..... ۶۶
شکل (۴-۱۲) منحنی S-N میلگردی با قطر ۲۵mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۶۷
شکل (۴-۱۳) منحنی S-N میلگردی با قطر ۱۴mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۶۸
شکل (۴-۱۴) منحنی S-N میلگردی با قطر ۱۸mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۶۹
شکل (۴-۱۵) منحنی S-N میلگردی با قطر ۲۰mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۷۰
شکل (۴-۱۶) منحنی S-N میلگردی با قطر ۱۱mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۷۱
شکل (۴-۱۷) منحنی S-N میلگردی با قطر ۸mm طبق معادله (۴-۱) ..... ۷۲
شکل (۴-۱۸) نمودار درصد کاهش استحکام خستگی بر حسب استحکام کششی..... ۷۳
شکل (۴-۱۹) نمودار $K_f$ و $K_f$ بر حسب استحکام کششی ..... ۷۴
شکل (۴-۲۰) نمودار حساسیت به شیار بر حسب اندازه عمق شیار..... ۷۷
شکل (۴-۲۱) نمودار حساسیت به شیار بر حسب استحکام کششی..... ۷۷
شکل (۴-۲۲) نمودار حساسیت به شیار بر حسب درصد تغییر طول ..... ۷۸
شکل (۴-۲۳) مقطع شکست خستگی میلگرد با قطر ۱۴mm بدون شیار..... ۷۹
شکل (۴-۲۴) مقطع شکست خستگی میلگرد با قطر ۱۴mm شیاردار ($K_t$=۴/۱)..... ۷۹

# فهـرست جـــداول

**عنوان** **صفحه**


**فصل دوم: مروری بر منابع**

جدول (۱-۲-الف) ترکیبات آلیاژهای تیتانیم نزدیک آلفا و آلفا..... ۲۴

جدول (۱-۲- ب) ترکیبات آلیاژهای تیتانیم نزدیک آلفا/بتا ..... ۲۵

جدول (۱-۲- ج) ترکیبات آلیاژهای تیتانیم بتا ..... ۲۶

جدول (۲-۲) مزایای نسبی مورفولوژی سوزنی و هم محور در آلیاژهای نزدیک $\alpha$ و $\alpha/\beta$..... ۲۷

جدول (۳-۲) خلاصه فرآیند، عملیات حرارتی و ریز ساختار آلیاژ Ti-۶Al-۴V ..... ۳۳

جدول (۴-۲) خواص مکانیکی آلیاژ Ti-۶Al-۴V منتج از شرایط جدول ۳-۲..... ۳۷

**فصل سوم: روش انجام تحقیق**

جدول (۱-۳) ترکیب شیمیایی آلیاژ Ti-۶Al-۴V (درصد وزنی ) ..... ۴۹

**فصل چهارم: نتایج و بحث**

جدول (۱-۴) نتایج آزمایش کشش و سختی سنجی ..... ۵۷

جدول (۲-۴) مقادیر استحکام خستگی نمونه‌های بدون شیار و شیاردار ..... ۶۲

جدول (۳-۴) مقادیر $K_t$ و $K_f$ و $K_f'$ برای هر یک از نمونه‌ها ..... ۷۴

جدول (۴-۴) مقادیر q برای هر یک از نمونه‌ها..... ۷۶



مرکز اطلاعات و مدارک علمی ایران
تهیه مدارک

# فصل اول
## مقدمه

## ۱- مقدمه

استفاده از تیتانیم و آلیاژهای آن به دلیل مقاومت به خوردگی بسیار خوب این مواد می‌باشد. مقاومت به خوردگی عالی آنها در نتیجه تشکیل یک لایه اکسید محافظتی و پایدار، روی سطح فلز است. استحکام کششی و همین طور نسبت استحکام به وزن بالای آلیاژهای تیتانیم و مدول الاستیک پایین از دیگر علل استفاده از این آلیاژها می‌باشد. آلیاژهای تیتانیم، ابتدا برای کاربردها نظامی استفاده می‌شدند ولی از دهه ۶۰ میلادی به عنوان مواد ایمپلنت مورد استفاده قرار گرفتند. در مقایسه با آلیاژهایی نظیر فولاد زنگ نزن و آلیاژهای کبالت - کروم که برای کاربردهای بیومدیکال استفاده می‌شوند، این آلیاژها زیست سازگاری بهتری از خود نشان می‌دهند.

آلیاژ Ti-۶Al-۴V، گسترده‌ترین آلیاژ مورد استفاده می‌باشد. این آلیاژ دارای ساختار آلفا- بتا است که در دمای اتاق حدود ۹۰٪ حجمی فاز آلفا دارد. بنابراین فاز آلفا، کنترل کننده خواص مکانیکی است.

شکست در اثر خستگی، مسئله اصلی شکست ایمپلنتها می‌باشد، زیرا طی حرکت بدن، بارگذاری سیکلی برای ایمپلنتهای ارتوپدی، اتفاق می‌افتد. در نتیجه این تناوب، تغییر فرم پلاستیک در نواحی کوچک میکروسکپی، حاصل می‌شود. ترکیب فرایندهای شیمیایی و مکانیکی، نقش حیاتی در آغاز ترک ایفا می‌کند. در مورد فولادهای زنگ نزن، استحکام خستگی در محیط نمکی و دمای ۳۷°C (مایع شبیه‌سازی شده بدن) حدود ۱۵۰MPa نسبت به هوا افت پیدا کرده است. نتایج همین آزمایش برای آلیاژ Ti-۶Al-۴V، استحکام خستگی یکسان را در دو محیط نشان می‌دهد. عدم کاهش استحکام خستگی آلیاژهای تیتانیم در محیط بدن، به عنوان یک ویژگی، مطرح شده است.

در طراحی ایمپلنتهای ارتوپدی، ناپیوستگی‌های هندسی نظیر حفره‌ها، فیلتها و شیارها اجتناب‌ناپذیر است که باعث ایجاد تنش به صورت موضعی می‌شوند. توجه به این شیارها بسیار ضروری است، زیرا حضور آنها، مقاومت به خستگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. برای کاربردهای بیومدیکال، حساسیت به شیار، فاکتور بحرانی می‌باشد. به این دلیل که ایمپلنتها، به ندرت دارای یک سطح صاف می‌باشند.

ایمپلنتهای ارتوپدی اغلب در منطقه HCF کار می‌کنند، البته مواقعی نیز سطح تنش بالاست و در منطقه LCF قرار دارند. بنابراین حساسیت به شیار آلیاژ Ti-۶Al-۴V در این مناطق مهم است. حساسیت به شیار موادی نظیر آلومینیم و فولادها، در منطقه HCF بسیار زیاد است. در این پژوهش، سعی در یافتن این حساسیت برای آلیاژ Ti-۶Al-۴V شده است. همین طور تأثیر استحکام کششی بر خواص خستگی بحث گردیده است.

# فصل دوم
## مروری بر منابع