دانشـکده فنــی مهندسی مکانیک
گروه مهندسی مکانیک

رساله پیشنهادی
برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی مکانیک (طراحی کاربردی)

عنوان

تاثیر هم زمان انبساط سرد و نیروی پیش بار بر عمر خستگی در اتصالات دو لبه برشی آلیاژهای آلومینیم

The combined effect of cold expansion and clamping force on the fatigue life of double shear lap joints of aluminum Alloys

استاد راهنما
دکتر تاج بخش نوید چاخرلو

استاد مشاور
دکتر علیرضا اکبری

پژوهشگر
محمد شکوری غازانی

نام خانوادگی دانشجو: شکوری غازانی **نام:** محمد

عنوان پایان‌نامه:

تاثیر هم زمان انبساط سرد و نیروی پیش بار بر عمر خستگی در اتصالات دو لبه برشی آلیاژهای آلومینیم

استاد راهنما: دکتر تاج بخش نوید چاخرلو

استاد مشاور: دکتر علیرضا اکبری

مقطع تحصیلی: دکتری **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** طراحی کاربردی

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فنی مهندسی مکانیک

تاریخ فارغ التحصیلی: **تعداد صفحه:**

کلید واژه ها: انبساط سرد- نیروی پیش بار – آلیاژ آلومینیم – خستگی – سایش – المان محدود

چکیده:

در یک اتصال پیچ و مهره که توسط عملیات انبساط سرد تقویت شده و سپس با گشتاور سفت کننده معین بسته شده است، اثر هر دو روش افزایش عمر (انبساط سرد و پیش بار) به صورت هم زمان دیده می‌شود. اثر این دو روش به صورت مجزا مورد مطالعه محققان زیادی قرار گرفته و نتایج مفیدی داشته است. ولی مطالعات منسجم و کاملی در مورد تاثیر هم زمان هر دو عامل انجام نشده است. در این پایان‌نامه اثرات انبساط سرد و پیش بار بر روی استحکام خستگی اتصالات پیچ و مهره مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از دو روش تجربی و شبیه سازی المان محدود استفاده شده است.

نمونه مورد مطالعه اتصال دو لبه برشی ساخته شده از جنس آلیاژ آلومینیم 2024-T3 است، که توسط یک اتصال پیچ و مهره به هم متصل شده‌اند. در مرحله تجربی، نمونه‌ها تحت بارگذاری متناوب با دامنه‌های مختلف قرار گرفته‌اند. تستها تا مرحله گسیختگی نهایی ادامه پیدا کرده است. سپس مقاطع شکست و سطوح سایش مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده از تستهای تجربی نشان می‌دهند که هر یک از دو روش

عملیات انبساط سرد و نیروی پیش بار به صورت جداگانه تاثیر مطلوبی روی عمر خستگی دارند. اما بر خلاف پیش بینی‌های اولیه، برای حالت ترکیبی عملیات انبساط سرد و نیروی پیش بار، وقتی که درصد انبساط سرد به مقدار بهینه و متداولی که در مقالات مختلف به آن اشاره شده است افزایش داده می‌شود، نه تنها عمر اتصال افزایش پیدا نمی‌کند بلکه کاهش شدید از خود نشان می‌دهد. بررسی سطوح سایش و مقاطع شکست نشان می‌دهد که برای این گروه از نمونه‌ها، ترک از محل سایش و در ناحیه دور از سوراخ شروع می‌شود که نشانه‌های بارز تغییر نوع گسیختگی، از خستگی ساده به خستگی سایشی است.

در مرحله شبیه سازی عددی به کمک نرم افزار المان محدود ANSYS، تمامی مراحل تستهای عملی شبیه سازی شده است. توزیع تنش و کرنش در نقاط حساس اتصال استخراج شده است. نتایج المان محدود نشان می‌دهد که عملیات انبساط سرد، اندازه تنشهای میانگین را در اطراف سوراخ کاهش می‌دهد و اعمال نیروی پیش بار نیز بیشتر باعث کاهش اندازه دامنه تنشها در اطراف سوراخ می‌شود. در نتیجه هر دو روش باعث بهبود عمر اتصال می‌شوند. با اعمال هم زمان عملیات انبساط سرد و نیروی پیش بار اثر مثبت هر دو روش باعث کاهش تنشهای میانگین و دامنه تنشها در اطراف سوراخ می‌شود. اما بررسی‌های بیشتر توسط پارامترهای خستگی سایشی نشان می‌دهند که، درصد بهینه عملیات انبساط گزارش شده در تحقیقات قبلی در ترکیب با نیروی پیش بار نه تنها باعث بهبود عمر خستگی نمی‌شود، بلکه باعث فعال شدن خستگی سایشی می‌شود. در مرحله شبیه سازی عددی هم چنین سعی شده است تا به کمک معیارهای خستگی چند محوره، عمر لازم برای شروع ترک محاسبه شود. سپس در ادامه عمر لازم برای رشد ترک توسط نرم افزار AFGROW محاسبه شده است. در نهایت با جمع عمرهای بدست آمده، عمر کل خستگی اتصال محاسبه شده و با نتایج تستهای تجربی مقایسه شده است.

عنوان **صفحه**

بخش اول: پیشینه پژوهش

فصل اول– مقدمه، بیان مسئله و اهداف پایان‌نامه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ بیان مسئله ۴

۱-۳ اهداف مشخص تحقیق ۶

فصل دوم– بررسی منابع، پایه‌های نظری و پیشینه پژوهش ۸

۲-۱ مطالعه خستگی در اتصالات دارای انبساط سرد ۹

۲-۱- ۱روش‌های تجربی اندازه‌گیری تنشهای پسماند ۱۳

۲-۱-۲ روش‌های تحلیلی محاسبه تنشهای پسماند ۱۴

۲-۱-۳ روش‌های عددی محاسبه تنشهای پسماند ۱۵

۲-۱-۴ تست‌های تجربی روی عملیات انبساط سرد ۱۷

۲-۲ مطالعه اثر نیروی پیش بار در اتصالات پیچ و مهره ۲۱

۲-۲-۱ رفتار اتصال تحت بار تکرار شونده ۲۲

۲-۳ تخمین عمر خستگی در حضور تنش و کرنش چند محوری ۳۳

۲-۳-۱ معیارهای مبتنی بر تنش ۳۴

۲-۳-۲ معیارهای مبتنی بر کرنش ۳۶

۲-۳-۳ معیارهای مبتنی بر انرژی ۳۷

۲-۴ فرآیند رشد ترک خستگی ۳۸

۲-۴-۱ مدل‌های معرفی شده برای بارگذاریهای دامنه ثابت ۴۰

۲-۴-۲ مدل‌های معرفی شده برای بارگذاریهای دامنه متغیر ۴۲

۲-۵ خستگی سایشی ۴۹

۲-۵-۱ بررسی پدیده خستگی سایشی و تاثیر آن بر عمر خستگی ۵۳

۲-۵-۲ روابط پیشنهاد شده برای محاسبه استحکام خستگی سایشی ۵۴

بخش دوم: مواد و روش‌ها

فصل سوم آزمایش‌های تجربی؛ مبانی و نتایج ۶۱

۳-۱ مقدمه ۶۲

۳-۲ مواد ۶۲

۳-۳ نمونه‌های آزمایشی ۶۴

۳-۴ انجام عملیات انبساط سرد ۶۶

۳-۵ اعمال نیروی پیش بار ۶۸

۳-۶ اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین واشر فولادی و ورق آلومینیمی ۷۰

۳-۷ نام‌گذاری نمونه‌های آزمایشی ۷۱

۳-۸ انجام تست‌های خستگی ۷۲

۳-۹ نتایج تست‌های خستگی ۷۳

۳-۱۰ ضریب بهبود عمر (LIF) ۷۶

فصل چهارم شبیه سازی عددی ۷۸

۴-۱ مقدمه ۷۹

۴-۲ مدل‌سازی ۷۹

۴-۳ مش‌بندی ۸۰

۴-۴ تعیین ضرایب اصطکاک ۸۳

۴-۵ مراحل شبیه سازی ۸۵

۴-۶ صحه‌گذاری مدل المان محدود ۸۸

۴-۶-۱ مرحله بارگذاری ۸۸

۴-۶-۲ مرحله باربردادی ۹۲

۴-۷ محاسبه عمر ۹۷

۴-۷-۱ محاسبه عمر شروع ترک (N_i) ۹۷

۴-۷-۲ محاسبه عمر رشد ترک (N_p) ۹۷

۴-۷-۳ محاسبه عمر کل (N_f) ۱۰۰

بخش سوم: نتایج و بحث

فصل پنجم نتایج و بحث ۱۰۱

۵-۱ مطالعه توزیع تنش‌ها ۱۰۲

۵-۱-۱ گروه *0% & 0N.m* ۱۰۳

۵-۱-۲ گروه های *1.5% & 0N.m* و *4.7% & 0N.m* ۱۰۴

۵-۱-۳ گروه *0% & 2N.m* ۱۰۷

۵-۱-۴ گروه *0% & 4N.m* ۱۰۸

۵-۱-۵ گروه 1.5% & *2N.m* ۱۱۰

۵-۱-۶ گروه *4.7% & 2N.m* ۱۱۱

۵-۱-۷ گروه *1.5% & 4N.m* ۱۱۳

۵-۱-۸ گروه *4.7% & 4N.m* ۱۱۴

۵-۲ مقایسه عمرهای محاسبه شده به روش عددی و نتایج تست‌های خستگی ۱۲۳

فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۱۲۸

۶-۱ نتایج ۱۲۹

۶-۲ پیشنهادها ۱۳۱

فهرست مراجع ۱۳۲

پیوست ۱ ..... ۱۴۲

پیوست۲ ..... ۱۴۹

پیوست۳ ..... ۱۵۱

پیوست۴ ..... ۱۵۵

فهرست جدول‌ها

جدول۲-۱ جمع بندی شبیه سازی‌های عددی روی عملیات انبساط سرد ۱۷

جدول۲-۲ جمع بندی تحقیقات تجربی روی عملیات انبساط سرد برای آلیاژهای آلومینیم ۲۰

جدول۲-۳ ضریب بهبود عمر گزارش شده برای عملیات انبساط سرد در تحقیقات مختلف ۲۱

جدول ۲-۴ طبقه بندی انواع آنالیز خستگی ۳۴

جدول۲-۵ ضریب کاهش استحکام خستگی سایشی که توسط موسسه ESDU ارائه شده است ۵۴

جدول ۳-۱ ترکیب شیمیایی Al 2024-T3 ..... ۶۲

جدول ۳-۲ مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیم Al2024-T3 ..... ۶۳

جدول ۳-۳ مشخصات کرنش سنج‌های نصب شده روی بوش فولادی ۶۹

جدول ۳-۴ کرنشهای محوری ایجاد شده برای مقادیر مختلف گشتاور اعمالی در کرنش سنج‌ها ۶۹

جدول ۳-۵ نامگذاری گروه‌های مختلف تست خستگی ۷۱

جدول ۴-۱ مقادیر ثابت آلیاژ Al 2024-T3 برای محاسبه استحکام خستگی ۹۷

جدول ۴-۲ مقادیر ثابت آلیاژ Al 2024-T3 برای محاسبه رشد ترک ۹۸

جدول ۴-۳ اندازه، شکل و موقعیت اولیه ترک برای گروه‌های مختلف ۱۰۰

جدول ۵-۱ درصد خطای محاسبه شده ۱۲۷

جدول پیوست ۲-۱ نرخ رشد ترک برای آلیاژ Al 2024-T3 ..... ۱۵۰

جدول پیوست ۳-۱ *0% & 0N.m* ۱۵۲

جدول پیوست ۳-۲ *1.5% & 0N.m* ۱۵۲

جدول پیوست ۳-۳ *4.7% & 0N.m* ۱۵۲

جدول پیوست ۳-۴ *0% & 2N.m* ۱۵۳

جدول پیوست ۳-۵ *1.5% & 2N.m* ۱۵۳

جدول پیوست ۳-۶ *4.7% & 2N.m* ۱۵۳

جدول پیوست ۳-۷ *0% & 4N.m* ۱۵۴

جدول پیوست ۳-۸ *1.5% & 4N.m* ۱۵۴

فهرست شکل‌ها

شکل۲-۱ روش انجام عملیات انبساط سرد ۱۰
شکل۲-۲ ابزار انبساطی در روش انبساط سرد با غلطک صیقل دهنده ۱۰
شکل۲-۳ بهبود عمر ورق آلومینیمی 2024-T3 در اثر انجام انبساط سرد ۱۱
شکل۲-۴ توزیع تنشهای پسماند شعاعی و مماسی در اطراف سوراخ پس از انجام انبساط سرد ۱۲
شکل۲-۵ کیت کرنشها در روش سوراخ‌کاری ۱۴
شکل۲-۶ نحوه توزیع تنشهای پسماند در صفحات ورودی، میانی و خروجی بر حسب فاصله از سوراخ ۱۶
شکل۲-۷ نمونه‌ای از شکست در محل سوراخی که با انبساط سرد ۴٪ تقویت شده بود. ترک از محل ورود ماندریل شروع شده است ۱۷
شکل۲-۸ اثر انبساط سرد در کاهش ضریب شدت تنش ۱۸
شکل۲-۹ مقایسه رشد ترک در نمونه‌های بدون عملیات انبساط سرد و نمونه‌هایی که در آنها عملیات انبساط سرد انجام شده است ۱۹
شکل۲-۱۰ مقایسه مدت زمان لازم برای بازبینی در نمونه‌های بدون عملیات انبساط سرد و نمونه‌هایی که در آنها عملیات انبساط سرد انجام شده است ۲۰
شکل۲-۱۱ رفتار اتصال پیچی در برابر بار استاتیکی ۲۲
شکل۲-۱۲ حالتهای گسیختگی اتصالات پیچی : (الف) شکست از سطح مقطع خالص (ب) شکست از ناحیه دور از سوراخ ۲۳
شکل۲-۱۳ نمونه‌ای از گسیختگی در سطح مقطع خالص ۲۴
شکل۲-۱۴ نمونه‌ای از گسیختگی اتصال در اثر خستگی سایشی ۲۵
شکل۲-۱۵ تاثیر نیروی پیش بار در استحکام خستگی اتصال پیچی دو لبه برشی ۲۶
شکل۲-۱۶ مقطع شکست در اتصال بدون پیش بار و اتصال دارای پیش بار ۲۶
شکل۲-۱۷ صفحه سوراخ‌دار و دارای ترک اولیه ۲۷
شکل۲-۱۸ کاهش نرخ رشد ترک در ورق سوراخ‌دار به دلیل اعمال پیش بار ۲۷
شکل۲-۱۹ منحنی ΔK بر حسب طول ترک به ازای سه مقدار مختلف پیش بار(0 kN, 30 kN, 90 kN) در این تست قطر سوراخ 24mm ، $\Delta\sigma_{gross} = 110$ MPa ، R=0.1 و $\mu = 0.4$ بوده است ۲۸

شکل۲-۲۰ اثر ضریب اصطکاک بین واشر و ورق روی تغییرات ضریب شدت تنش نسبی و عمر خستگی ورق ... ۲۸
شکل۲-۲۱ تغییرات عمر خستگی با اعمال نیروهای پیش بار مختلف ۲۹
شکل۲-۲۲ توزیع تنش محوری پس از اعمال نیروی Clamping (بر حسب مگاپاسکال) ۳۰
شکل۲-۲۳ گسترش ترک از سطح میانی در نمونه‌ای با $F_{Clamping} = 3409\ N, S_{max} = 130\ MPa$ ۳۰
شکل۲-۲۴ باز شدن کمتر ترک در سطح تماس به علت وجود نیروی برشی ناشی از اصطکاک ۳۱
شکل۲-۲۵ منحنی تنش- عمر برای اتصال تک لبه با ورق‌های 2mm و مقایسه با نمونه سوراخ‌دار ساده ۳۲
شکل۲-۲۶ منحنی تنش- عمر برای اتصال دو لبه با ورق‌های 2mm و مقایسه با نمونه سوراخ‌دار ساده ۳۲
شکل۲-۲۷ منحنی تنش- عمر برای اتصال دو لبه با ورق‌های 5mm و مقایسه با نمونه سوراخ‌دار ساده ۳۲
شکل۲-۲۸ ماهیت فیزیکی معیار Fatemi و Socie ۳۷
شکل۲-۲۹ مراحل گسیختگی یک قطعه در اثر پدیده خستگی ۳۸
شکل۲-۳۰ منحنی نرخ رشد ترک خستگی $\frac{da}{dN}$ برحسب ΔK ۳۹
شکل۲-۳۱ رفتار ترک در مقابل بارگذاری‌های مختلف ۴۲
شکل۲-۳۲ پارامترهای استفاده شده در رابطه Wheeler برای ناحیه نوک ترک ۴۳
شکل۲-۳۳ نمودار شماتیک مفهوم بسته شدن ترک ۴۵
شکل۲-۳۴ کمیتهای استفاده شده در معاله Huang ۴۸
شکل۲-۳۵ نمونه‌ای از کاهش عمر در اثر خستگی سایشی ۴۹
شکل۲-۳۶ رابطه بین اندازه لغزش و عمر در خستگی سایشی و نیز حجم سایش ۵۰
شکل۲-۳۷ شکست شفت توربین گازی در اثر خستگی سایشی در محل اتصال ۵۱
شکل۲-۳۸ ایمپلنت مورد استفاده در ارتوپدی، محل نشان داده شده در معرض خستگی سایشی می‌باشد ۵۱
شکل۲-۳۹ اثرات خستگی سایشی در محل اتصالات پیچی کاسه چرخ کامیون ۵۱
شکل۲-۴۰ ترکهای خستگی سایشی شفت در محل یاتاقان ۵۲
شکل۲-۴۱ مراحل مختلف گسترش ترک خستگی سایشی ۵۴
شکل۲-۴۲ پارامترهای استفاده شده در رابطه SWT ۵۸

شکل۲-۴۳ معادل‌سازی خستگی سایشی با قطعه ترک‌دار ۵۸
شکل۳-۱ نمودار تنش – کرنش حقیقی آلیاژ آلومینیم Al2024-T3 ..... ۶۳
شکل۳-۲ ساختار دانه بندی آلیاژ Al2024-T3 ..... ۶۴
شکل۳-۳ (الف) ابعاد نمونه (ب) شکل سه بعدی فیکسچر و ابعاد آن در حالت مونتاژی ۶۴
شکل۳-۴ اندازه‌گیری قطر سوراخ توسط دستگاه سبیتو ۶۵
شکل۳-۵ (الف) پین استفاده شده برای درصد انبساط سرد 1.5% و (ب) پین استفاده شده برای درصد انبساط سرد 4.7% ۶۶
شکل۳-۶ (الف) دستگاه تست کشش و فشار بکار رفته برای انبساط سرد و (ب) نمایش عملیات انبساط سرد ... ۶۶
شکل۳-۷ فیکسچر نگه دارنده پین ۶۷
شکل۳-۸ نمودار نیروی وارد شده از طرف دستگاه به پین در طی عملیات انبساط سرد 4.7% ۶۷
شکل۳-۹ پیچ و مهره و واشرهای بکار رفته در اتصال ۶۸
شکل۳-۱۰ اندازه‌گیری نیروی پیش بار وارد به اتصال ۶۹
شکل۳-۱۱ رابطه خطی مابین گشتاور اعمالی و کرنش محوری ایجاد شده در بوش ۷۰
شکل۳-۱۲ اندازه‌گیری ضریب اصطکاک بین واشر و صفحه آلومینیمی ۷۱
شکل۳-۱۳ دستگاه تست خستگی Zwick/Roell Amsler HA250 ..... ۷۲
شکل۳-۱۴ بارگذاری اعمال شده در تستهای خستگی ۷۲
شکل۳-۱۵ منحنی تنش – عمر برای گروه های *0% & 0N.m* ،*1.5% & 0N.m* و *4.7% & 0N.m* ۷۳
شکل۳-۱۶ منحنی تنش – عمر برای گروه های *0% & 2N.m* ،*1.5% & 2N.m* و *4.7% & 2N.m* ۷۴
شکل۳-۱۷ منحنی تنش – عمر برای گروه های *0% & 4N.m* ،*1.5% & 4N.m* و *4.7% & 4N.m* ۷۵
شکل۳-۱۸ منحنی تنش – عمر برای تمام گروه ها ۷۶
شکل ۳-۱۹ ضرایب بهبود عمر خستگی برای گروه های مختلف ۷۷
شکل۴-۱ فیکسچر استفاده شده در تستهای خستگی ۷۹
شکل۴-۲ المان Solid 185 ..... ۸۱
شکل۴-۳ المان Contact 173 ..... ۸۱

شکل۴-۴ المان Target 170 ..... ۸۲
شکل۴-۵ المان Combin14 ..... ۸۲
شکل۴-۶ مدل المان محدود ۸۳
شکل۴-۷ نیروی وارد به پین در مرحله انبساط سرد 4.7% به صورت تجربی و مقایسه آن با نیروهای بدست آمده از شبیه سازی عددی به ازای ضرایب اصطکاک مختلف ۸۴
شکل۴-۸ مراحل شبیه سازی ۸۷
شکل۴-۹ یک صفحه دایروی با شعاع محدود با سوراخ دایروی و فشار داخی ۸۸
شکل۴-۱۰ شکل شماتیک صفحه وقتی که متحمل تغییر شکل الاستیک – پلاستیک شده است ۸۹
شکل۴-۱۱ مدل المان محدود و نام گذاری صفحات ۹۶
شکل۴-۱۲ تنشهای پسماند مماسی محاسبه شده توسط شبیه سازی عددی و مدل تحلیلی برای (الف) درصد انبساط سرد 1.5% و (ب) درصد انبساط سرد 4.7% ۹۶
شکل۴-۱۳ نمودار نرخ رشد ترک آلیاژ Al 2024-T3 ..... ۹۹
شکل ۵-۱ توزیع تنشها روی خطوط ممتد نشان داده شده استخراج شده است ۱۰۲
شکل ۵-۲ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 0N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۳
شکل ۵-۳ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 0N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۳
شکل ۵-۴ مقطع شکست قطعه برای حالت *0% & 0N.m* تحت بارگذاری10kN ۱۰۴
شکل ۵-۵ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 0N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۵
شکل ۵-۶ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 0N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۵
شکل ۵-۷ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 0N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۶
شکل ۵-۸ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 0N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۶

شکل ۵-۹ مقطع شکست قطعه برای حالت *4.7% & 0N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۰۶
شکل ۵-۱۰ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 2N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۷
شکل ۵-۱۱ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 2N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۷
شکل ۵-۱۲ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 4N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۸
شکل ۵-۱۳ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *0% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۰۸
شکل ۵-۱۴ مقطع شکست قطعه برای حالت *0% & 2N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۰۹
شکل ۵-۱۵ مقطع شکست قطعه برای حالت *0% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۰۹
شکل ۵-۱۶ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 2N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۰
شکل ۵-۱۷ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 2N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۱
شکل ۵-۱۸ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 2N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۲
شکل ۵-۱۹ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 2N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۲
شکل ۵-۲۰ مقطع شکست قطعه برای حالت *4.7% & 2N.m* تحت بارگذاری10kN ۱۱۲
شکل ۵-۲۱ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۳
شکل ۵-۲۲ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۳
شکل ۵-۲۳ مقطع شکست قطعه برای حالت *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۱۴
شکل ۵-۲۴ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 4N.m* تحت بارگذاری10kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۵

شکل ۵-۲۵ توزیع تنشهای محیطی برای حالت *4.7% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN (الف) تنش میانگین (ب) دامنه تنش ۱۱۵
شکل ۵-۲۶ (الف) سطح تماس قطعه (ب) کانتور پارامتر F_1(Pa.m) برای حالت *1.5% & 2N.m* تحت بارگذاری10kN ۱۱۷
شکل ۵-۲۷ (الف) سطح تماس قطعه (ب) کانتور پارامتر F_1(Pa.m) برای حالت *1.5% & 2N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۱۷
شکل ۵-۲۸ (الف) سطح تماس قطعه (ب) کانتور پارامتر F_1(Pa.m) برای حالت *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری10kN ۱۱۸
شکل ۵-۲۹ (الف) سطح تماس قطعه (ب) کانتور پارامتر F_1(Pa.m) برای حالت *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۱۸
شکل ۵-۳۰ تقسیم بندی سطح قطعه به سه ناحیه Stick، Stick-Slip و Slip ۱۱۹
شکل ۵-۳۱ توزیع پارامتر F_2 در سطح مقطع قطعه تحت بارگذاری10kN برای حالتهای (الف) *0% & 4N.m* (ب) *1.5% & 4N.m* (ج) *4.7% & 4N.m* ۱۲۱
شکل ۵-۳۲ توزیع پارامتر F_2 در سطح مقطع قطعه تحت بارگذاری 14kN برای حالتهای (الف) *0% & 4N.m* (ب) *1.5% & 4N.m* (ج) *4.7% & 4N.m* ۱۲۱
شکل ۵-۳۳ مقطع شکست قطعه برای حالت *4.7% & 4N.m* تحت بارگذاری14kN ۱۲۲
شکل ۵-۳۴ نتایج عمرهای محاسبه شده به روش عددی و مقایسه با نتایج تستهای تجربی برای سه گروه *0% & 0N.m*، *1.5% & 0N.m* و *4.7% & 0N.m* ۱۲۴
شکل ۵-۳۵ نتایج عمرهای محاسبه شده به روش عددی و مقایسه با نتایج تستهای تجربی برای سه گروه *0% & 2N.m*، *1.5% & 2N.m* و *4.7% & 2N.m* ۱۲۵
شکل ۵-۳۶ نتایج عمرهای محاسبه شده به روش عددی و مقایسه با نتایج تستهای تجربی برای سه گروه *0% & 4N.m*، *1.5% & 4N.m* و *4.7% & 4N.m* ۱۲۶
شکل پیوست۴-۱ منحنی‌های رشد ترک برای سه گروه *0% & 0N.m*، *1.5% & 0N.m* و *4.7% & 0N.m* تحت بارگذاری 14kN..... ۱۵۶
شکل پیوست۴-۲ منحنی‌های رشد ترک برای سه گروه *0% & 2N.m*، *1.5% & 2N.m* و *4.7% & 2N.m* تحت بارگذاری 14kN..... ۱۵۶
شکل پیوست۴-۳ منحنی‌های رشد ترک برای دو گروه *0% & 4N.m* و *1.5% & 4N.m* تحت بارگذاری 14kN..... ۱۵۷

فهرست نمادها

$\%CE$	درصد انبساط سرد
a	طول ترک
a_0	طول ترک اولیه
a_m	قطر پین
b	توان استحکام خستگی محوری
b_0	توان استحکام خستگی برشی
c	توان شکل‌پذیری خستگی محوری
c_0	توان شکل‌پذیری خستگی برشی
$D_{manderl}$	قطر پین
D_{hole}	قطر سوراخ
E	مدول الاستیسیته
E_m	مدول الاستیسیته پین
f_{-1}	حد دوام خمشی
F_1	پارامتر خستگی سایشی اول
F_2	پارامتر خستگی سایشی دوم
$F_{Clamping}$	پیش بار
G	مدول برشی
H	سختی قطعه
$J_{2,a}$	دامنه دومین غیر متغیر تانسور تنش انحرافی
K_c	ضریب شدت تنش بحرانی ماده
K_{eff}	ضریب شدت تنش موثر
K_I	ضریب شدت تنش در مد اول
K_{IC}	ضریب شدت تنش بحرانی برای حالت کرنش مسطح

K_{II}	ضریب شدت تنش در مد دوم
K_{max}	ضریب شدت تنش بیشینه
$(K_{max})_{ol}$	بیشترین ضریب شدت تنش با ازای بیش بار
K_{op}	ضریب شدت تنش لازم برای باز شدن نوک ترک
LIF	ضریب بهبود عمر
N	تعداد سیکل
N_f	عمر خستگی
p	نیروی تماس
P_0	بیشترین فشار تماس
R	نسبت تنش
$r_p^{\sim}$	شعاع منطقه پلاستیک بعد از باربردای
r_p	شعاع منطقه پلاستیک
S_b	دامنه تنش خمشی
S_{max}	تنش بیشینه
S_t	دامنه تنش پیچشی
S_y	تنش تسلیم
t	ضخامت
t_{-1}	حد دوام پیچشی
t_0	ضخامت مرجع
$t_{A,B}$	حد دوام برشی
u_p	اندازه حرکت شعاعی در منطقه پلاستیک
y	ضریب شکل
Z_{OL}	اندازه ناحیه پلاستیک در مرحله اعمال بیش بار
α	پارامتر Budiansky

α_a	مقدار پارامتر Budiansky در لبه سوراخ
α_p	مقدار پارامتر Budiansky در انتهای منطقه پلاستیک
γ'_f	ثابت شکل‌پذیری خستگی برشی
δ	دامنه حرکت نسبی
Δa	اندازه رشد ترک با ازای یک سیکل
ΔK	بازه ضریب شدت تنش
ΔK_{eff}	بازه ضریب شدت تنش موثر
ΔK_{th}	بازه حد تحمل ضریب شدت تنش
ΔK_{th0}	مقدار ΔK_{th} برای نسبت تنش صفر
$\Delta\gamma$	بازه کرنش برشی
$\Delta\gamma_{max}$	مقدار بیشینه تغییرات کرنش برشی
$\Delta\varepsilon$	دامنه کرنش
$\Delta\varepsilon_n$	بازه کرنش عمودی روی صفحه بحرانی
$\Delta\varepsilon_{n\,max}$	دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی
$\Delta\sigma_n$	بازه تنش عمودی روی صفحه بحرانی
$\Delta\tau$	بازه تنش برشی
$\Delta\tau_{max}$	بازه تنش برشی بیشینه
ε	کرنش
ε'_f	ضریب شکل‌پذیری خستگی
μ	ضریب اصطکاک
ν	ضریب پواسون
ν_m	ضریب پواسون پین
σ	تنش
$\tilde{\sigma}_p$	تنش پسماند شعاعی

$\tilde{\sigma}_{\theta}$	تنش پسماند مماسی
σ'_f	ضریب استحکام خستگی
σ_a	دامنه تنش
$\sigma_{a,eq}$	دامنه تنش معادل
σ_{alt}	حد دوام خستگی سایشی
σ_{eq}	تنش تک محوری معادل
$\sigma_{H,M}$	تنش هیدرواستاتیک
σ_m	تنش میانگین
$\sigma_{n\,max}$	تنش محوری بیشینه روی صفحه بحرانی
$\sigma_{n,cr}$	دامنه تنش عمودی در صفحه بحرانی
σ_{op}	تنش لازم برای باز شدن نوک ترک
σ_R	دامنه تغییرات تنش عمودی
σ_r	تنش شعاعی
σ_u	تنش نهایی کششی
σ_{θ}	تنش مماسی
τ'_f	ضریب استحکام خستگی برشی
$\tau_{a,cr}$	دامنه تنش برشی در صفحه بحرانی
τ_{alt}	حد دوام نمونه تحت برش
τ_n	دامنه تنش برشی
φ	اختلاف فاز بین دامنه تنش خمشی و تنش پیچشی
Φ_R	پارامتر تاخیر

بخش اول: پیشینه پژوهش

فصل اول

مقدمه، بیان مسئله و اهداف پایان‌نامه

۱-۱ مقدمه

اتصالات مکانیکی جداشدنی که شامل پرچ‌ها، پیچ‌ها و پین‌ها می‌شود به صورت گسترده در صنایع مختلف به ویژه در سازه‌های فضایی کاربرد دارد. معمولاً برای قطعات فضایی، عمر سرویس محدودی تعریف می‌شود که باید پس از اتمام، قطعات تعویض شوند از طرف دیگر هزینه ساخت قطعات مورد استفاده در این صنعت معمولاً بسیار بالا است و تعویض کل سازه یا یک مجموعه مقرون به صرفه نیست. از این رو استفاده از اتصالات جدا شدنی، از جمله اتصالات پیچ و مهره راه حل خوبی برای این منظور محسوب می‌شود. در طول چند دهه گذشته مطالعات گسترده‌ای در زمینه اصول طراحی و رفتار اتصالات پیچ و مهره در برابر بارهای استاتیکی و دینامیکی، به کمک روش‌های تجربی و محاسباتی انجام شده است. این شاخه از علوم مهندسی همیشه از طرف موسسات تحقیقاتی هوا و فضا مورد حمایت قرار گرفته است. یکی از نقاط ضعف اتصالات پیچی این است که برای انجام این نوع اتصال باید در محل اتصال سوراخ ایجاد شود و این امر باعث تضعیف و ایجاد تمرکز تنش در محل اتصال می‌شود. بنابراین در طراحی این اتصالات باید دقت کافی اعمال شود، تا از بروز گسیختگی جلوگیری شود. روشهای متفاوتی برای تقویت اتصالات مکانیکی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش انبساط سرد[۱]، نیروی پیش بار[۲] و انطباق تداخلی[۳] اشاره کرد.

انبساط سرد یکی از متداولترین روشها برای بهبود عمر خستگی اتصال محسوب می‌شود. در این روش با عبور پین یا ساچمه با قطر بزرگتر از قطر سوراخ، در ناحیه اطراف سوراخ تغییر شکل پلاستیک اتفاق افتاده و باعث ایجاد تنشهای پسماند فشاری می‌شود. وجود تنشهای پسماند فشاری، باعث کاهش تاثیر مخرب تنشهای کششی وارد به اتصال شده و از باز شدن نوک ترک نیز جلوگیری می‌کند و به این ترتیب ایجاد و گسترش ترک را به تاخیر می‌اندازد. به کمک این روش می‌توان عمر اتصال را ۲ تا ۱۰ برابر افزایش داد. از ضعفهای عمده روش انبساط سرد عدم یکنواختی در کرنشها و تنشهای پسماند ایجاد شده در عمق سوراخ می‌باشد،

[1] . Cold Expansion
[2] . Preload or Clamping
[3] . Interference Fit

که جهت رفع این مشکل روشهایی نظیر استفاده از یک بوش مخروطی بین پین و سوراخ و یا گذراندن یک پین دیگر از درون سوراخ در جهت خلاف پین اولی، پیشنهاد شده است.

برای مطالعه تنشهای پسماند ایجاد شده در اطراف سوراخ از روشهای تحلیلی، تجربی و عددی استفاده می‌شود. محققین زیادی از روشهای تجربی برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند استفاده کرده‌اند. در اغلب این روشها، اندازه‌گیری تنش در یک ناحیه مشخص دور از لبه سوراخ امکان پذیر است و تنش درست در لبه سوراخ قابل اندازه‌گیری نیست. هم چنین این روشها معمولاً هزینه بر بوده و تنش اندازه‌گیری شده، به صورت تنش میانگین در یک ناحیه با طول معین می‌باشد.

در بررسی تنشهای پسماند با استفاده از روابط ریاضی برای شبیه سازی انبساط سرد، معمولاً در سطح داخلی سوراخ یک تنش فشاری یکسان یا یک جابجایی یکنواخت اعمال می‌شود و عموماً از فرض حالت تنش مسطح یا کرنش مسطح استفاده می‌شود. این فرضها معمولاً برای ساده سازی است که با شرایط واقعی فاصله دارد و باعث دور شدن نتایج، از مقادیر واقعی می‌شود. با پیشرفتهای صورت گرفته در نرم افزارهای المان محدود، شبیه سازی علمیات انبساط سرد توسط این نرم افزارها با دقت مطلوب امکان پذیر شده است. به کمک روشهای المان محدود، می‌توان رفتار غیر خطی ماده، هندسه اتصال و تنشهای تماسی که در محل اتصال اتفاق می‌افتد را شبیه سازی کرد. این روشها محدودیتهای روشهای ریاضی را ندارند و در مقایسه با روشهای تجربی، ارزان‌تر بوده و می‌توانند اندازه تنش پسماند را درست در لبه سوراخ محاسبه کنند.

در هنگام مونتاژ کردن اتصال پیچ و مهره، یک گشتارو سفت کننده به مهره اعمال می‌شود. در اثر اعمال این گشتاور، پیچ تحت کشش قرار گرفته و قطعات اتصال تحت تاثیر نیروی فشاری واقع می‌شوند. وجود این نیروی پیش بار باعث می‌شود که با توجه به میزان گشتاور اعمال شده، قسمتی از نیروی وارد به اتصال توسط نیروی اصطکاک بین صفحات تحمل شود و شدت تنش در اطراف سوراخ کاهش پیدا کند. در نتیجه عمر خستگی اتصال بهبود پیدا می‌کند. اما از طرف دیگر وجود نیروی فشاری و لغزش نسبی مابین سطوح اتصال،