

رسالة محمد



دانشگاه بوعلی سینا
دانشکده فنی - مهندسی

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک
گرایش طراحی کاربردی

بررسی رشد ترک خستگی در ورقها در مود ترکیبی I-III

استاد راهنما:

دکتر رحمن سیفی

پژوهشگر:

ناصر امیدوار قاضیانی

۲۴ بهمن ۱۳۸۹

همه امتیازهای این پایان‌نامه به دانشگاه بوعلی سینا تعلق دارد. در صورت استفاده از تمام یا بخشی از مطالب پایان‌نامه در مجلات، کنفرانس‌ها و یا سخنرانی‌ها، باید نام دانشگاه بوعلی سینا (یا استاد یا اساتید راهنمای پایان‌نامه) و نام دانشجو با ذکر مأخذ و ضمن کسب مجوز کتبی از دفتر تحصیلات تکمیلی دانشگاه ثبت شود. در غیر این صورت مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت.



عنوان پایان نامه:

" بررسی رشد ترک خستگی در ورقها در مود ترکیبی I-III "

نام نویسنده: ناصر امیدوار قاضیانی

نام استاد راهنما: دکتر رحمن سیفی

دانشکده: فنی مهندسی

گروه آموزشی: مکانیک

رشته تحصیلی: مکانیک

گرایش تحصیلی: طراحی کاربردی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد

تاریخ تصویب: ۱۳۸۷/۰۷/۲۹

تاریخ دفاع: ۱۳۸۹/۱۱/۲۴

تعداد صفحات: ۱۸۳

چکیده:

در این تحقیق به بررسی عددی و تجربی رشد ترک خستگی تحت مود ترکیبی I-III در ورق با ترک لبه ای از جنس آلایژ آلومینیوم ۷۰۱۷ پرداخته شده است. پارامترهای متغیر، زاویه اولیه (0, 30, 45, 60)، طول ترک اولیه (10mm و 20mm)، ضخامت نمونه (4mm و 8mm) و نسبت بارگذاری (R=0.2 و R=0.01) می باشد. تاثیر تغییر این پارامترها بر رشد ترک خستگی در حالت های مختلف در ورق به صورت کمی، مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. برای برخی از حالت های فوق مسیرها و صفحات رشد ترک، منحنی های مقادیر افزایش طول ترک و تغییرات زوایای ترک در زمان رشد، منحنی های ضرایب شدت تنش در هر سه مود شکست (K_I, K_{II}, K_{III}) و ضریب شدت تنش موثر (K_{eff}) در مراحل مختلف رشد و نمودارهای تعداد سیکل های بارگذاری بر حسب تغییرات طول ترک نسبت به حالت اولیه با استفاده از نرم افزار FRANC3D بدست آمده و با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش مقایسه شده و انطباق خوبی مشاهده شده است. با افزایش زاویه ترک اثر مود III افزایش و اثر مود I کاهش می یابد. در بیشتر موارد اثر مود II شکست در مقابل دو مود دیگر قابل صرف نظر کردن است. در تمامی حالات فوق مشاهده شد که با افزایش طول ترک در زاویه یکسان و با کاهش زاویه اولیه در طول ترک یکسان، عمر رشد ترک خستگی کاهش می یابد. در مراحل مختلف رشد ترک، با افزایش طول ترک در حین رشد زاویه ترک کاهش می یابد. با کاهش ضخامت نمونه مقادیر ضریب شدت تنش افزایش یافته و با افزایش نسبت بارگذاری مقادیر آن کاهش می یابد. همچنین در تمام نمونه ها ترک در جهتی رشد می کند که مود I شکست غالب شود (مسیر رشد ترک به صورت عمود بر جهت بارگذاری قرار می گیرد). نتایج آزمایش خوبی نشان دهنده این مطلب است و انطباق خوبی با نتایج عددی دارد.

کلمات کلیدی:

مود ترکیبی I-III - ضریب شدت تنش - ورق با ترک لبه ای - مسیر رشد ترک - صفحات ترک - عمر رشد ترک خستگی - آلومینیوم ۷۰۱۷

ماصل رنج این تمقیق را که گوشه ای از تلاش من است، به برترینهای زندگی تقدیم می کنم.

تقدیم به:

پدر بزرگوار

که لمظه لمظه زیستنم را در سایه بزرگواری و دانایی اش آسودم
و وجود پر افتخارش سایه ایست جاودانه بر فراز سربلندیهای من

9

مادر مهربانم

که مفهوم بی دریغ مهربانی و صداقت است.
او که دلفوشیهای امروزه را مدیون دلوایسیهای همیشگی اش هستیم.

در آغاز لازم می‌دانم از زحمات پدر و مادر گرامی‌ام و کلیه کسانی که در دوران تحصیل همواره مشوق و پشتیبان اینجانب بوده‌اند کمال تشکر را بنمایم.

همچنین از زحمات استاد ارجمندم جناب آقای دکتر رحمن سیفی

که همواره در مراحل انجام پژوهش و در طول دوران تحصیل از راهنمایی‌ها و محبت‌های ارزنده ایشان برفوردار بوده‌ام، به خاطر تمامی لطف‌ها، راهنمایی‌ها و حمایت‌هایشان کمال تشکر و سپاس را دارم.

ناصر امیدوار

بهمن ماه ۱۳۸۹

۱.....	فصل اول: مقدمه.....
۶.....	فصل دوم: مروری بر تحقیقات.....
۱۳.....	فصل سوم: تئوری مکانیک شکست و خستگی.....
۱۴.....	۱-۳ مکانیک شکست.....
۱۵.....	۲-۳ موده‌های ماکروسکوپی شکست.....
۱۵.....	۳-۳ شکست ترد و شکست نرم.....
۱۷.....	۴-۳ مکانیک شکست الاستیک خطی.....
۱۸.....	۱-۴-۳ چقرمگی شکست.....
۱۹.....	۲-۴-۳ میدان تنش و جابه جایی درنوک ترک.....
۲۱.....	۳-۴-۳ ضرایب شدت تنش (SIF).....
۲۱.....	۴-۴-۳ محاسبه ضریب شدت تنش.....
۲۲.....	۵-۴-۳ اثر اندازه محدود سازی.....
۲۴.....	۵-۳ تصحیح ناحیه پلاستیک.....
۲۷.....	۶-۳ مکانیک شکست الاستو-پلاستیک.....
۳۲.....	۷-۳ خستگی.....
۳۳.....	۱-۷-۳ شکست ناشی از خستگی.....
۳۳.....	۲-۷-۳ حالت های رشد ترک خستگی.....
۳۴.....	۳-۷-۳ انواع بارگذاری خستگی.....
۳۴.....	۱-۳-۷-۳ بارگذاری با بزرگی ثابت.....
۳۵.....	۲-۳-۷-۳ بارگذاری با دامنه متغیر.....
۳۶.....	۴-۷-۳ رشد ترک ناشی از خستگی.....
۳۸.....	۵-۷-۳ مدل‌های پیش بینی عمر خستگی برای بارگذاری با دامنه ثابت.....
۴۰.....	۱-۵-۷-۳ مدل پاریس.....
۴۰.....	۲-۵-۷-۳ مدل والکر.....

۴۱	.....مدل فورمن ۳-۵-۷-۳
۴۲	.....مدل اصلاح شده فورمن ۴-۵-۷-۳
۴۳	.....فصل چهارم: معیارهای شکست و خواص مکانیکی مواد
۴۴	.....۱-۴ معیارهای شکست مکانیک در قطعات ترکدار تحت بارگذاری مود I
۴۴	.....۱-۱-۴ نظریه تنش
۴۴	.....۲-۱-۴ نظریه انرژی
۴۵	.....۲-۴ معیارهای شکست در حالت بارگذاری مود ترکیبی
۴۵	.....۱-۲-۴ معیار ماکزیمم تنش مماسی (MTS)
۴۶	.....۲-۲-۴ معیار بیشترین تنش نرمال (MNS)
۴۷	.....۳-۲-۴ معیار کمترین چگالی انرژی کرنشی (SED)
۴۹	.....۴-۲-۴ معیار بیشترین نرخ رها سازی انرژی (G_{max})
۵۲	.....۵-۲-۴ معیارهای دیگر
۵۲	.....۳-۴ معیارهای شکست برای بارگذاری مود ترکیبی I-III
۵۸	.....۴-۴ خواص مکانیکی مواد
۵۸	.....۱-۴-۴ منحنی تنش-کرنش
۶۰	.....۲-۴-۴ اثر باشینگر
۶۱	.....۳-۴-۴ ارائه مدل‌های ساده از رفتار پلاستیک
۶۲	.....۴-۴-۴ مباحث مقدماتی
۶۲	.....۵-۴-۴ روابط الاستیک - کاملاً پلاستیک
۶۳	.....۶-۴-۴ روابط الاستیک - سخت شوندگی خطی
۶۳	.....۷-۴-۴ روابط الاستیک - سخت شوندگی نمایی
۶۵	.....فصل پنجم: انجام آزمایش
۶۶	.....۱-۵ مقدمه
۶۶	.....۲-۵ دستگاه آزمایش
۶۹	.....۳-۵ فیکسچر
۶۹	.....۴-۵ خصوصیات ماده نمونه آزمایش
۷۲	.....۵-۵ شکل هندسی نمونه آزمایش
۷۲	.....۶-۵ ساخت نمونه بدون ترک

۷۲	۱-۶-۵ برشکاری
۷۳	۲-۶-۵ ماشین کاری
۷۳	۳-۶-۵ سوراخ کاری
۷۴	۷-۵ شکل هندسی ترک
۷۸	۸-۵ آماده سازی نمونه برای انجام آزمایش
۷۸	۹-۵ انجام آزمایش
۸۱	۱۰-۵ نتایج آزمایش
۹۱	فصل ششم: مدل سازی و تحلیل با نرم افزار FRANC3D
۹۲	۱-۶ مقدمه
۹۲	۲-۶ مشخصات نرم افزار FRANC3D
۹۳	۳-۶ ارزیابی دقت نتایج مدلسازی نرم افزار FRANC3D
۹۵	۴-۶ مزایا و معایب نرم افزار FRANC3D
۹۵	۱-۴-۶ مزایای نرم افزار FRANC3D
۹۶	۲-۴-۶ معایب نرم افزار FRANC3D
۹۶	۵-۶ ایجاد هندسه نمونه در نرم افزار OSM
۹۹	۶-۶ ایجاد ترک در مدل
۱۰۰	۷-۶ تعریف المان های پیشانی ترک
۱۰۳	۸-۶ المان بندی مدل
۱۰۶	۹-۶ تعریف خواص ماده
۱۰۶	۱۰-۶ اعمال شرایط مرزی
۱۱۰	۱۱-۶ تحلیل با نرم افزار FRANC3D
۱۱۳	۱-۱۱-۶ مدل ضریب تمرکز تنش موثر
۱۱۷	۲-۱۱-۶ استخراج مقادیر شدت تنش و رشد ترک
۱۲۹	۳-۱۱-۶ استخراج مقادیر ضریب شدت تنش موثر
۱۳۳	۴-۱۱-۶ تعیین تعداد سیکل های بارگذاری
۱۳۶	۵-۱۱-۶ استخراج مقادیر شدت تنش برای نمونه ها با نسبت بارگذاری $R=0.2$
۱۴۰	۶-۱۱-۶ استخراج مقادیر شدت تنش و رشد ترک برای نمونه ها ضخامت ۴ میلیمتر

فصل هفتم: مقایسه و نتیجه گیری.....	۱۴۶
۱-۷ مقدمه.....	۱۴۷
۲-۷ بررسی زوایای شکست.....	۱۴۷
۱-۲-۷ نتایج عددی.....	۱۴۷
۲-۲-۷ نتایج تجربی.....	۱۴۸
۳-۷ بررسی مسیر رشد ترک.....	۱۴۹
۴-۷ بررسی صفحات ترک.....	۱۵۵
۵-۷ مقایسه نتایج تجربی و عددی تعداد سیکل ها و تغییر طول ترک.....	۱۶۲
۶-۷ بررسی تاثیر تغییر ضخامت و نسب بارگذاری در مقادیر ضریب تمرکز تنش.....	۱۶۵
۷-۷ نتیجه گیری.....	۱۵۳
۸-۷ پیشنهادهایی برای ادامه کار.....	۱۵۴

پیوست ها..... ۱۷۲

پیوست (آ)..... ۱۷۳

پیوست (ب)..... ۱۷۶

منابع و مراجع..... ۱۷۹

فهرست اشکال

عنوان

صفحه

- شکل (۱-۲) مشخصات نمونه و دستگاه بکار رفته برای اعمال بار پیچشی و خمشی ۸
- شکل (۲-۲) نمودار افزایش طول ترک بر حسب تعداد سیکل اعمال بار ۹
- شکل (۱-۳) سه مود اصلی شکست: (a) بازشوندگی کششی (مود I) (b) لغزش داخل صفحه ای (مود II) (c) برش خارج صفحه-ای (مود III) ۱۵
- شکل (۲-۳) نمایی از سطح شکست ترد ۱۶
- شکل (۳-۳) نمایی از سطح شکست نرم ۱۷
- شکل (۴-۳) شرایطی که تحت آن LEFM صادق است (a) یا صادق نمی باشد (b، c و d) ۱۸
- شکل (۵-۳) اثر ضخامت بر سختی شکست ۱۹
- شکل (۶-۳) نمایش دستگاه مختصات استوانه ای بر روی جبهه ترک ۲۰
- شکل (۷-۳) مقادیر $f(a/W)$ برای نمونه های استاندارد ۲۳
- شکل (۸-۳) شکل دیگری از مقادیر $f(a/W)$ برای نمونه های استاندارد ۲۴
- شکل (۹-۳) تخمین اندازه ناحیه پلاستیک ۲۵
- شکل (۱۰-۳) نمودارهای انرژی در تحلیل مسایل شکست ۲۹
- شکل (۱۱-۳) حالت های مختلف رشد ترک خستگی ۳۴
- شکل (۱۲-۳) بارگذاری با دامنه ثابت ۳۴
- شکل (۱۳-۳) بارگذاری (آ) متناوب ، (ب) نیمه تصادفی ، (پ) کاملاً تصادفی ۳۶
- شکل (۱۴-۳) شمای افزایش منحنی رشد ترک براساس محدوده تغییرات تنش وارده ۳۷
- شکل (۱۵-۳) منحنی رشد ترک خستگی در مقابل تغییرات ضرایب شدت تنش ۳۹
- شکل (۱-۴) نمایش تنشها در سیستم مختصات استوانه ای موجود در نوک ترک ۵۴
- شکل (۲-۴) تنش های نرمال و برشی در صفحه $Z - \theta$ ۵۵
- شکل (۳-۴) منحنی تنش - کرنش در بارگذاری تک محوره برای دو نوع ماده (الف) فولاد (ب) آلومینیوم ۵۹
- شکل (۴-۴) اثر باشینگر در بارگذاری تناوبی ۶۰
- شکل (۵-۴) پاسخ تنش - کرنش در ۲۰ سیکل برای نوعی از آلومینیوم ۶۲
- شکل (۶-۴) منحنی تنش - کرنش برای الف: رفتار الاستیک - تمام پلاستیک ب: رفتار الاستیک - سخت شونده گی خطی پلاستیک ۶۳
- شکل (۷-۴) منحنی تنش - کرنش در مختصات خطی و لگاریتمی ۶۴
- شکل (۱-۵) دستگاه اینسترون ۸۰۸۳ ۶۷
- شکل (۲-۵) نماهای مختلف از فیکسچرها ۶۹
- شکل (۳-۵) نمودار تنش - کرنش آلومینیوم ۷۰۱۷ ۷۱
- شکل (۴-۵) ابعاد هندسی نمونه آزمایش (ابعاد به میلیمتر) ۷۲
- شکل (۵-۵) دستگاه فرز دستی ۷۳
- شکل (۶-۵) دستگاه پرس فرز CNC ۷۳
- شکل (۷-۵) نمونه (a) 0° ، (b) نمونه 30° ، (c) نمونه 45° ، (d) نمونه 60° ۷۵
- شکل (۸-۵) دستگاه وایرکات سی ان سی ۷۶
- شکل (۹-۵) تصاویری از نمونه های ساخته شده ۷۷
- شکل (۱۰-۵) نمونه های آماده شده ۷۸
- شکل (۱۱-۵) نحوه قرار گرفتن نمونه در فیکسچر ۷۹
- شکل (۱۲-۵) چگونگی قرارگیری نمونه آزمایش در دستگاه اینسترون ۷۹
- شکل (۱۳-۵) نمایی از نمونه در حال آزمایش ۸۰

- شکل (۱۳-۵b) رشد ترک حین آزمایش ۸۱
- شکل (۱۳-۵c) بزرگنمایی رشد ترک حین آزمایش ۸۱
- شکل (۱۴-۵) نتایج تجربی منحنی a-N نمونه های با طول ترک 20mm و زوایای مختلف ۸۳
- شکل (۱۵-۵) نتایج تجربی منحنی a-N برای دو نمونه با زاویه 60° و طول ترک 10mm و 20mm ۸۴
- شکل (۱۶-۵) نتایج تجربی منحنی a-N برای دو نمونه با زاویه 60° و طول ترک 10mm و 20mm ۸۴
- شکل (۱۷-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 0° ۸۵
- شکل (۱۸-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 30° ۸۶
- شکل (۱۹-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 45° ۸۷
- شکل (۲۰-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 60° ۸۸
- شکل (۱۹-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 10mm و زاویه 45° ۸۹
- شکل (۲۱-۵) نمایی از سطوح شکست و مسیر رشد ترک در دو وجه نمونه با طول ترک اولیه 10mm و زاویه 60° ۹۰
- شکل (۱-۶) : شکل ترک در مسئله ۹۳
- شکل (۲-۶): المان بندی سطح ترک مسأله ارزیابی ۹۴
- شکل (۳-۶) مدل اولیه بدون ترک ساخته شده در نرم افزار OSM ۹۷
- شکل (۴-۶) مدل نهایی بدون ترک ساخته شده در نرم افزار OSM ۹۸
- شکل (۵-۶) شکل ترک در مدل ۹۹
- شکل (۶-۶): مدل ترکدار ساخته شده در نرم افزار FRANC3D با زاویه ۴۵ درجه ۱۰۰
- شکل (۷-۶) نحوه ایجاد المان سینگولار ۱۰۱
- شکل (۸-۶) المان های سینگولار دو بعدی در نوک ترک ۱۰۱
- شکل (۹-۶) المان های سینگولار سه بعدی در پیشانی ترک [۵۱] ۱۰۲
- شکل (۱۰-۶) المان های سینگولار سه بعدی ایجاد شده در پیشانی ترک در نرم افزار FRANC3D ۱۰۲
- شکل (۱۱-۶): نمایی از المان بندی سطح ترک ۱۰۴
- شکل (۱۲-۶) نمایی از مدل مش بندی شده در نرم افزار FRANC3D ۱۰۵
- شکل (۱۳-۶) تعریف خواص ماده در نرم افزار FRANC3D ۱۰۶
- شکل (۱۴-۶) روشهای اعمال بارگذاری ۱۰۷
- شکل (۱۵-۶) نمایی از سطوح بارگذاری شده ۱۱۰
- شکل (۱۶-۶) مدل های رشد ترک در نرم افزار FRANC3D ۱۱۱
- شکل (۱۷-۶) مدل بیشترین ضریب شدت تنش مود I برای گسترش ترک ۱۱۲
- شکل (۱۸-۶) مدل نرخ ضریب شدت تنش مود I برای گسترش ترک ۱۱۲
- شکل (۱۹-۶) مدل ضریب شدت تنش موثر برای گسترش ترک ۱۱۳
- شکل (۲۰-۶) مدل ضریب شدت تنش موثر برای گسترش ترک ۱۱۴
- شکل (۲۱-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 0° و طول 10mm ۱۱۴
- شکل (۲۲-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 30° و طول 10mm ۱۱۵
- شکل (۲۳-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 45° و طول 10mm ۱۱۵
- شکل (۲۴-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 60° و طول 10mm ۱۱۵
- شکل (۲۵-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 0° و طول 20mm ۱۱۶
- شکل (۲۶-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 30° و طول 20mm ۱۱۶
- شکل (۲۷-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 45° و طول 20mm ۱۱۶
- شکل (۲۸-۶) تغییرات ضریب گسترش در پیشانی ترک در مراحل مختلف برای ترک با زاویه 60° و طول 20mm ۱۱۷
- شکل (۲۹-۶) نمایش مراحل رشد ترک ۱۱۸
- شکل (۳۰-۶) نمودار تغییرات طول پیشانی ترک در حین رشد ترک برای طول پیش ترک 10mm ۱۱۸
- شکل (۳۱-۶) نمودار تغییرات طول پیشانی ترک در حین رشد ترک برای طول پیش ترک 20mm ۱۱۹
- شکل (۳۲-۶) نمودار تغییرات مساحت سطح ترک در حین رشد ترک برای طول پیش ترک 10mm ۱۱۹
- شکل (۳۳-۶) نمودار تغییرات مساحت سطح ترک در حین رشد ترک برای طول پیش ترک 10mm ۱۲۰

- شکل (۶-۷۸) ضرایب شدت تنش برای مود I در حالت 60° با طول ترک 20mm ۱۳۹
- شکل (۶-۷۹) ضرایب شدت تنش برای مود II در حالت 60° با طول ترک 20mm ۱۳۹
- شکل (۶-۸۰) ضرایب شدت تنش برای مود III در حالت 60° با طول ترک 20mm ۱۴۰
- شکل (۶-۸۱) ضرایب شدت تنش برای مود I در حالت 45° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۰
- شکل (۶-۸۲) ضرایب شدت تنش برای مود II در حالت 45° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۱
- شکل (۶-۸۳) ضرایب شدت تنش برای مود III در حالت 45° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۱
- شکل (۶-۸۴) ضرایب شدت تنش برای مود I در حالت 60° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۱
- شکل (۶-۸۵) ضرایب شدت تنش برای مود II در حالت 60° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۲
- شکل (۶-۸۶) ضرایب شدت تنش برای مود III در حالت 60° با طول ترک 10mm و ضخامت 4mm ۱۴۲
- شکل (۶-۸۷) ضرایب شدت تنش برای مود I در حالت 45° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۲
- شکل (۶-۸۸) ضرایب شدت تنش برای مود II در حالت 45° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۳
- شکل (۶-۸۹) ضرایب شدت تنش برای مود III در حالت 45° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۳
- شکل (۶-۹۰) ضرایب شدت تنش برای مود I در حالت 60° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۳
- شکل (۶-۹۱) ضرایب شدت تنش برای مود II در حالت 60° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۴
- شکل (۶-۹۲) ضرایب شدت تنش برای مود III در حالت 60° با طول ترک 20mm و ضخامت 4mm ۱۴۵
- شکل (۷-۱) نمودار تغییرات زاویه ترک در حال رشد برای زوایای مختلف پیش ترک با طول اولیه 10 mm ۱۴۷
- شکل (۷-۲) نمودار تغییرات زاویه ترک در حال رشد برای زوایای مختلف پیش ترک با طول اولیه 20 mm ۱۴۸
- شکل (۷-۳) نمایی از نحوه بدست آوردن زاویه رشد ترک توسط نرم افزار DigitizeIt ۱۴۹
- شکل (۷-۴) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 0° ۱۵۰
- شکل (۷-۵) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 30° ۱۵۱
- شکل (۷-۶) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 45° ۱۵۲
- شکل (۷-۷) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 60° ۱۵۳
- شکل (۷-۸) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 10mm و زاویه 45° ۱۵۴
- شکل (۷-۹) مقایسه مسیر رشد ترک با طول پیش ترک 10mm و زاویه 60° ۱۵۵
- شکل (۷-۱۰) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 0° ۱۵۶
- شکل (۷-۱۱) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 30° ۱۵۷
- شکل (۷-۱۲) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 45° ۱۵۸
- شکل (۷-۱۳) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 20mm و زاویه 60° ۱۵۹
- شکل (۷-۱۴) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 10mm و زاویه 45° ۱۶۰
- شکل (۷-۱۵) مقایسه صفحه رشد ترک با طول پیش ترک 10mm و زاویه 60° ۱۶۱
- شکل (۷-۱۶) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 0° با طول اولیه 20mm ۱۶۲
- شکل (۷-۱۷) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 30° با طول اولیه 20mm ۱۶۳
- شکل (۷-۱۸) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 45° با طول اولیه 20mm ۱۶۳
- شکل (۷-۱۹) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 60° با طول اولیه 20mm ۱۶۴
- شکل (۷-۲۰) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 60° با طول اولیه 10mm ۱۶۴
- شکل (۷-۲۱) مقایسه نتایج عددی و تجربی تعداد سیکل بر حسب افزایش طول ترک
برای ترک 60° با طول اولیه 10mm ۱۶۵
- شکل (۷-۲۲) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_I برای حالت‌های مختلف
در ترک 45° با طول اولیه 10mm ۱۶۶

۱۶۶	شکل (۲۳-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{II} برای حالت‌های مختلف در ترک 45° با طول اولیه 10mm
۱۶۶	شکل (۲۴-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{III} برای حالت‌های مختلف در ترک 45° با طول اولیه 10mm
۱۶۷	شکل (۲۵-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_I برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 10mm
۱۶۷	شکل (۲۶-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{II} برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 10mm
۱۶۷	شکل (۲۷-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{III} برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 10mm
۱۶۸	شکل (۲۸-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_I برای حالت‌های مختلف در ترک 45° با طول اولیه 20mm
۱۶۸	شکل (۲۹-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{II} برای حالت‌های مختلف در ترک 45° با طول اولیه 20mm
۱۶۸	شکل (۳۰-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{III} برای حالت‌های مختلف در ترک 45° با طول اولیه 20mm
۱۶۹	شکل (۲۵-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_I برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 20mm
۱۶۹	شکل (۲۶-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{II} برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 20mm
۱۶۹	شکل (۲۷-۷) مقایسه مقادیر ضریب شدت تنش متوسط K_{III} برای حالت‌های مختلف در ترک 60° با طول اولیه 20mm

فهرست جداول

صفحه	عنوان
۷۰	جدول (۱-۵) ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم برحسب درصد وزنی
۷۰	جدول (۲-۵) خواص مکانیکی ماده
۸۲	جدول (۳-۵) نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 0°
۸۲	جدول (۴-۵) نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 30°
۸۲	جدول (۵-۵) نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 45°
۸۲	جدول (۶-۵) نمونه با طول ترک اولیه 20mm و زاویه 60°
۸۳	جدول (۷-۵) نمونه با طول ترک اولیه 10mm و زاویه 45°
۸۳	جدول (۸-۵) نمونه با طول ترک اولیه 10mm و زاویه 60°
۹۴	جدول (۱-۶): مقایسه بین جواب های نرم افزار و جواب های تحلیلی برای ضریب شدت تنش K_I
۹۵	جدول (۲-۶): مقایسه بین جواب های نرم افزار و جواب های تحلیلی برای ضریب شدت تنش K_{II}
۹۵	جدول (۳-۶): مقایسه بین جواب های نرم افزار و جواب های تحلیلی برای ضریب شدت تنش K_{III}
۱۰۸	جدول (۴-۶) مقایسه روشهای اعمال بارگذاری
۱۴۹	جدول (۱-۷) نتایج تجربی زاویه شروع رشد ترک در حالات مختلف و درصد خطا نتایج عددی

فصل اول:

مقدمه

پدیده شکست در اجسام یکی از عمده ترین مسائلی است که انسان از زمان ساختن ساده ترین ابزارها با آن مواجه بوده و بدلیل پیشرفت تکنولوژی در عصر حاضر، این مساله از اهمیت بیشتری نسبت به گذشته برخوردار می باشد. آسیب های وارد شده به برخی از هواپیماها و فضاپیماها در طی دهه های گذشته، لزوم درک دقیقتری از مکانیک شکست¹ در اجسام را در علوم جدید ایجاب می کند. علیرغم پیشرفت های چشمگیر در زمینه مکانیک شکست طی سالهای پس از جنگ جهانی دوم، نادانسته های بسیاری همچنین باقی مانده که انگیزه محققان را در ارائه تلاشهای گذشته فراهم آورده است. در واقع گسیختگی ناگهانی بسیاری از تجهیزات و سازه های صنعتی، نه تنها عواقب جانی ناگواری را در پی دارد، بلکه ضررهای چشمگیر اقتصادی را نیز فراهم می آورد.

علت شکست در اکثر سازه ها در یکی از دو دلیل زیر نهفته است:

۱- نادیده گرفتن برخی عوامل طراحی نظیر عدم رعایت استاندارد ها و خطاها در محاسبات، بی دقتی در ساخت و مونتاژ در کارگاه و استفاده از مواد غیر استاندارد و بالاخره عدم بازرسی مداوم از وضعیت سازه.

۲- استفاده از مواد جدید و روشهای طراحی نو که منجر به پدیده های غیر منتظره می گردد. استفاده از مواد جدید که ممکن است از استحکام بالاتر و وزن کمتر برخوردار باشند ولی بدون انجام آزمایشات مکانیکی لازم نظیر کشش، فشار، خزش و خستگی در شرایط مختلف کاری بکار گرفته شوند منجر به رفتارهای پیش بینی نشده می گردد.

رشد ترکها، از مهمترین عوامل تخریب در بسیاری از قطعات مهندسی است. سازه هایی که دچار شکست استاتیکی می شوند، معمولاً به دلیل فراتر رفتن تنش از مقاومت تسلیم ماده، مقدار زیادی تغییر شکل می دهند و به همین دلیل قابل مشاهده هستند و از قبل نسبت به وقوع شکست هشدار می دهند. اما در مورد گسیختگی خستگی هشدار وجود ندارد و در نتیجه خطرناک است. در

¹ Fracture Mechanics

بارگذاری دینامیکی، مشاهده شده است قطعه عموماً تحت تنش هایی بسیار کمتر از حد استحکام خود و غالباً به طور ناگهانی و غیر منتظره دچار شکست می گردد و به همین علت خسارات فراوانی نیز ایجاد می کند. از این رو پدیده خستگی^۱ اهمیت فراوانی یافت. با استفاده از مبانی مکانیک شکست و تحقیقات فراوان بر روی بارگذاری های تناوبی با دامنه ثابت^۲، مدل های کاربردی که توانایی توجیه و پیش بینی رشد ترک تحت بارگذاری با دامنه ثابت را داشته باشد، ارائه شد.

در مباحث مکانیک شکست برای بررسی شرایط مختلف بارگذاری قطعات ترکدار، میدان تنش و جابجایی در نوک ترکها به سه حالت مستقل تقسیم می شود: مود I که در آن سطوح ترک فقط نسبت به هم باز شده و جابجایی لبه های ترک، عمود بر سطح ترک اولیه است؛ مود II که در آن سطوح ترک بدون هیچ بازشدگی، در داخل صفحه نسبت به هم می لغزند؛ و مود III که در این حالت نیز سطوح ترک بدون هیچ باز شدگی نسبت به هم در خارج از صفحه قطعه می لغزند و جابجایی به موازات جبهه ترک می باشد. اما در عمل، مودهای خالص ترک به ندرت وجود داشته و رشد ترک به ویژه در حضور بارهای برشی، اغلب در شرایط مود ترکیبی^۳ اتفاق می افتد. مود ترکیبی هنگامی ایجاد می شود که ترک در معرض ترکیبی از دو یا سه حالت از مودهای اشاره شده فوق باشد.

از آنجا که اکثر مطالعات رشد ترک خستگی^۴ در مود I و مود ترکیبی I-II انجام شده است، اطلاعات کمتری از رشد ترک خستگی در مودهای ترکیبی دیگر در دسترس می باشد. با توجه به اینکه، امروزه آلیاژهای آلومینیوم کاربرد وسیعی در صنعت دارند مخصوصاً آلیاژهای سری ۷۰۰۰ که دارای درصد بالایی از منیزیم بوده و دارای سختی نسبتاً بالایی می باشند. این آلیاژها چون در مقابل خوردگی بسیار مقاوم هستند و در صنایع نظامی و هوافضا از آنها استفاده های زیادی می شود. موارد ذکر شده موجب شد که در این تحقیق به بررسی عددی و تجربی رشد ترک خستگی تحت مود ترکیبی I-III در ورق با ترک لبه ای از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۱۷ پرداخته شود.

¹ Fatigue

² Constant Amplitude Loading

³ Mixed Mode

⁴ Fatigue Crack Growth

پارامترهای متغیر در ورق مورد نظر، زاویه اولیه (0 , 30 , 45 , 60) درجه، طول ترک اولیه (10mm و 20mm)، ضخامت نمونه (4mm و 8mm)، نسبت بارگذاری ($R=0.01$ و $R=0.2$) می باشد. تاثیر تغییر این پارامترها بر رشد ترک خستگی در حالت های مختلف در ورق به صورت کمی، مورد بررسی قرار گرفت و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شد.

برای برخی از حالت های فوق مسیرها و صفحات رشد ترک، منحنی های مقادیر افزایش طول ترک و تغییرات زوایای ترک در زمان رشد، منحنی های ضرایب شدت تنش در هر سه مود شکست (K_I, K_{II}, K_{III}) و ضریب شدت تنش موثر (K_{eff}) در مراحل مختلف رشد و نمودارهای تعداد سیکل های بارگذاری بر حسب تغییرات طول ترک نسبت به حالت اولیه با استفاده از نرم افزار FRANC3D بدست آمده و با نتایج تجربی بدست آمده از آزمایش مقایسه شد.

در این نرم افزار ترک به صورت مرحله ای رشد می کند. از معیارهای مختلفی که برای پیش بینی مسیر و جهت رشد ترک وجود دارد، از معیار ماکزیمم تنش مماسی استفاده شده است که دلیل آن جوابهای قابل قبولی است که این معیار ارائه می دهد.

در فصل دوم کارهای انجام شده توسط برخی محققان به همراه نتایج آنها آورده شده است.

فصل سوم شامل مبانی مکانیک شکست و خستگی می باشد. در این فصل مطالبی به منظور آشنایی با مکانیک شکست، شکست تحت مود ترکیبی و روابط آن و مدل های پیش بینی رشد ترک خستگی معرفی شده است.

در فصل چهارم معیارهای متداول رشد ترک برای مودهای ترکیبی شرح داده شده است و به بررسی دو معیار جدید برای مود ترکیبی I-III پرداخته می شود. سپس بررسی مختصری بر روی خواص مکانیکی مواد شده است.