



بررسی اثر سیکل دمایی قبل از بارگذاری سیکلی بر روی عمر خستگی صفحات دارای تداخل و تخمین عددی عمر خستگی

هادی تقی‌زاده، تاج‌بخش نوید چاخلو*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت:

بازنگری:

پذیرش:

ارائه آنلاین:

کلمات کلیدی:

تداخل

عمر خستگی

سیکل دمایی

مدل المان محدود

تخمین عمر

چکیده: فرآیند تداخل یک تکنیک مؤثر برای بهبود عمر خستگی اتصالات می‌باشد و بصورت گسترده در صنایع مختلف به ویژه هوا-فضا و صنایع خودروسازی برای افزایش عمر خستگی اتصالات مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی مطالعات انجام گرفته در زمینه فرآیند تداخل نشان می‌دهد که تاکنون اثر تغییرات دما به عنوان عاملی تأثیرگذار بر روی عمر خستگی، مورد مطالعه قرار نگرفته است. بر این اساس، در مقاله حاضر تأثیر اعمال بارگذاری کوتاه مدت سیکل دمایی قبل از بارگذاری سیکلی، بر روی عمر خستگی صفحات سوراخ‌دار که تحت عملیات تداخل قرار گرفته‌اند بصورت تجربی و عددی بررسی شده است. اثر تغییرات دما با در نظر گرفتن دو سیکل دمایی ۶۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد، مورد بررسی قرار گرفته است. تست‌های خستگی بر روی آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-تی۶ انجام شده و نمودار تنش-عمر برای نمونه‌ها بدست آمده است. برای بدست آوردن تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از فرآیند تداخل و اعمال سیکل دمایی و همچنین تنش‌ها و کرنش‌های ناشی از اعمال بارهای تناوبی مختلف، از یک مدل سه بعدی المان محدود در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. در نهایت، نتایج تحلیل تنش به منظور تخمین عمر خستگی نمونه‌ها بکار گرفته شده است.

۱- مقدمه

صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این فرآیند عبارت است از عبور دادن بین از داخل سوراخ به طوری که قطر سوراخ از قطر بین کوچک‌تر باشد و بین در داخل سوراخ باقی بماند. در نتیجه این عمل ماده پیرامون سوراخ به عقب فشار داده می‌شود و پیش‌تنش محیطی که عموماً به صورت کششی می‌باشد، در لبه سوراخ ایجاد می‌شود. این عمل موجب کاهش دامنه تنش سیکلی موضعی می‌گردد و کاهش دامنه تنش سیکلی موضعی در لبه سوراخ باعث تأخیر در شروع و گسترش ترک‌های خستگی و در نتیجه افزایش عمر قطعه سوراخ می‌شود [۶].

اثرات مثبت تداخل به اندازه و نحوه توزیع پیش‌تنش در اطراف سوراخ بستگی دارد. با این روش می‌توان عمر قطعه را ۲ تا ۱۰ برابر افزایش داد [۷]. در نتیجه مطالعات و تحقیقات گسترده صورت گرفته، مشخص شده است که توزیع تنش در محیط سوراخ و در طول ضخامت قطعه یکنواخت نیست. بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که به منظور ارزیابی اثرات مثبت تداخل، لازم است تا مقدار و نحوه توزیع پیش‌تنش اندازه‌گیری یا پیش‌بینی شود. عوامل زیادی در بر هم زدن توزیع پیش‌تنش مؤثر هستند. زمانی که سازه تحت بارگذاری سیکلی قرار می‌گیرد، توزیع پیش‌تنش تغییر کرده که به این عمل واهلش تنش می‌گویند. یکی دیگر از این عواملی که باعث واهلش تنش می‌شود تغییرات دما می‌باشد [۸-۱۰]. این مسئله خصوصاً در مورد قطعات مورد استفاده در هواپیما مطرح است. اینکه آیا تغییرات دمایی

آلیاژهای آلومینیم در صنایع هوایی کاربرد گسترده‌ای دارند به طوری که مطالعه بر روی رفتار خستگی قطعات ساخته شده از این آلیاژها بسیار گسترده است. بسیاری از قطعات مورد استفاده در بدنه هواپیما که از آلیاژهای آلومینیم می‌باشند، با ایجاد سوراخ‌هایی در اجزاء توسط پرچ، پین و یا پیچ به هم بسته می‌شوند. از مزیت‌های این اتصالات می‌توان به مقاومت بسیار بالا در برابر خستگی نسبت به سایر اتصالات مانند جوش و همچنین قابل تعویض بودن این اتصالات اشاره نمود. با وجود مزیت‌های فراوان دارای معایبی نیز می‌باشند. ناپوستگی‌های هندسی در پی عملیات سوراخ‌کاری در این نوع اتصالات منبع تمرکز تنش بوده و بنابراین یک منطقه بالقوه برای شروع و گسترش ترک خستگی هستند. در سال‌های اخیر تکنیک‌های مختلف بهبود عمر برای اتصالات در قطعات بدنه هواپیما که همراه با کاهش وزن هستند، گسترش روز افزونی داشته است. از مهم‌ترین روش‌های بهبود عمر می‌توان به روش‌های تداخل [۱ و ۲]، انبساط سرد [۳ و ۴] نیروی فشاری پیچ و مهره [۵] اشاره کرد.

فرآیند تداخل یک روش مکانیکی ایجاد پیش‌تنش محسوب می‌شود. این روش یک تکنیک ثابت شده برای افزایش عمر بوده و چند دهه‌ای است که در صنایع مختلف به ویژه هوا-فضا برای افزایش عمر خستگی اتصالات به

تخمین عمر خستگی نمونه‌ها از نتایج تحلیل تنش و کرنش بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود استفاده شده است. عمر جوانه‌زنی و عمر گسترش ترک به طور جداگانه محاسبه شده و مجموع عمر بدست آمده از این دو مرحله مقدار عمر کل را بدست می‌دهد. برای تعیین عمر جوانه‌زنی ترک یکی از پرکاربردترین معیارهای چند محوری، معیار فاطمی-سوشی، بکار گرفته شده و عمر گسترش ترک با استفاده از نرم‌افزار آفگرو بدست آمده است.

۲- روش تجربی

۲-۱- مواد مصرفی و نمونه‌های آزمایشی

برای ساخت نمونه‌های آزمایشی از ورق آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ که یکی از پرکاربردترین آلیاژها در صنایع هوافضا می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفته است. این آلیاژ که اغلب در بال و بدنه هواپیما مورد استفاده قرار می‌گیرد همواره در معرض بارگذاری‌های دینامیکی واقع است و با توجه به وجود سوراخ بررسی این آلیاژ تحت بار خستگی که هنگام پرواز پیش می‌آید، ضروری و پر اهمیت است. از مزیت‌های این آلیاژ می‌توان به مقاومت خوب در برابر خوردگی و همچنین نسبت استحکام به وزن بالا اشاره نمود. جهت ساخت نمونه‌ها از ورق آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ به مساحت $1/22\text{m}^2 \times 1/22$ و ضخامت $6/35$ میلی‌متر استفاده شده است. محور طولی نمونه‌ها در راستای نورد ورق در نظر گرفته شده است. شکل ۱ ابعاد نمونه آزمایشی را نشان می‌دهد. برای انجام عملیات تداخل پیچ کلاس ۱۲/۹ با قطر اسمی ۶ میلی‌متر و ساق بدون رزوه ۲۰ میلی‌متر بکار گرفته شده است. پس از اتمام ساخت نمونه‌ها جهت از بین بردن هر گونه خراش سطحی بر روی نمونه‌ها که می‌تواند در تست‌های خستگی اثر نامطلوب داشته باشد سطوح بالایی و پایینی نمونه‌ها در چندین مرحله به وسیله سمباده‌های ضد آب با درجه‌های مختلف (۴۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰) سمباده‌زنی شده‌اند. چهار دسته نمونه مختلف برای انجام تست‌های خستگی در نظر گرفته شده است. این چهار دسته شامل نمونه‌های بدون تداخل، نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل حرارتی، نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل حرارتی ۶۰ درجه سانتی‌گراد و نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل حرارتی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته می‌باشند. برای مشخص شدن نمونه‌های آزمایشی برای هر چهار دسته از این نمونه‌ها نام خاصی انتخاب شده است. این نام‌گذاری در جدول ۱ بر مبنای عملیاتی که بر روی آن‌ها اعمال شده نشان داده شده است.

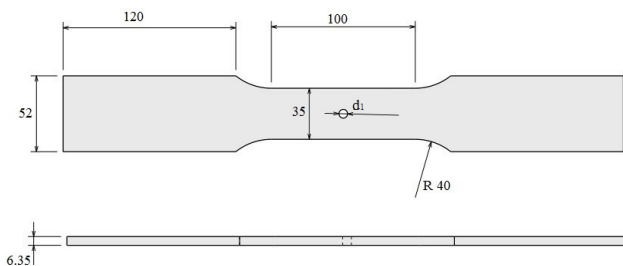


Fig. 1.

شکل ۱: ابعاد نمونه‌های آزمایشی (میلی‌متر).

می‌تواند در مقاومت قطعات تأثیر بگذارند یا نه موضوع مورد بررسی تعداد معدودی از مقالات بوده است و هیچ کدام پاسخ کاملی برای این موضوع ارائه نکرده‌اند.

در فرآیند تداخل عوامل مختلفی مانند درصد تداخل، جنس قطعات، مشخصات هندسی، بارگذاری و غیره بر افزایش عمر خستگی تأثیرگذار هستند که به منظور بررسی تأثیر این عوامل می‌بایست تست‌های تجربی و همچنین مدل‌سازی المان محدود بر روی نمونه‌ها با شرایط مختلف انجام بگیرد. به عنوان نمونه در مراجع [۱] و [۲] اثر تداخل در نمونه‌های از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ و آلومینیوم ۲۰۲۷-تی ۳ با در نظر گرفتن درصد‌های مختلف تداخل و همچنین اثر ضخامت و بارگذاری بررسی شده است. نتایج این مطالعات نشان‌دهنده آن است که میزان و نحوه تأثیر پارامترهای مختلف بر افزایش عمر خستگی نمونه‌ها در فرآیند تداخل بدون انجام تست‌های تجربی امکان‌پذیر نمی‌باشد. با توجه به اینکه بررسی مطالعات انجام گرفته در این زمینه نشان می‌دهد که تاکنون اثر تغییرات دما به عنوان عاملی تأثیرگذار بر روی عمر خستگی فرایند تداخل، مورد مطالعه قرار نگرفته است، بهبود عمر خستگی در اثر فرایند تداخل کاملاً مربوط به اثر پیش‌تنش مکانیکی ایجاد شده در اطراف سوراخ می‌باشد، حال اگر این پیش‌تنش‌ها تحت اثر بارهای حرارتی سیکلی یا استاتیکی متفاوت قرار گیرند ممکن است در عمر خستگی قطعات تأثیر بگذارد.

تاکنون تحقیقاتی که در رابطه با فرآیند تداخل انجام گرفته شده در دمای آزمایشگاهی بررسی شده است. هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی اثرات تغییرات دما بر روی پیش‌تنش ناشی از تداخل می‌باشد. فرآیند تداخل یک فرآیند کاملاً غیر خطی بوده که به شدت متأثر از شرایط نمونه‌ها می‌باشد، که بدون انجام تست‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود نمی‌توان در مورد میزان تأثیرگذاری تغییرات دما بر افزایش یا کاهش عمر خستگی نمونه‌ها اظهار نظر نمود. از این رو بررسی اعمال تغییرات دمایی قبل از بارگذاری سیکلی بر عمر خستگی نمونه‌های دارای تداخل به صورت تجربی و شبیه‌سازی المان محدود لازم می‌باشد. در این پژوهش نمونه‌ای از ورق سوراخ‌دار با ابعاد مشخص و مورد نظر از جنس آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ تهیه گردیده است. تحقیق در دو بخش اساسی انجام شده است. بخش اول انجام آزمایش‌های عملی و بخش دوم تحلیل عددی با استفاده از نرم‌افزار المان محدود می‌باشد. هدف از انجام تست‌های تجربی بررسی تأثیر اعمال دما بر عمر خستگی و نحوه ایجاد ترک خستگی نمونه‌های تحت اعمال فرآیند تداخل که در معرض دو دمای 60°C و 120°C قرار گرفته‌اند، می‌باشد. برای توجیه و تصدیق مشاهدات تجربی با استفاده از روش المان محدود تمامی مراحل مربوط به عملیات تداخل، اعمال سیکل دمایی و بارگذاری سیکلی شبیه‌سازی شده و به این ترتیب تأثیر اعمال دما بر روی توزیع میدان پیش‌تنش اطراف سوراخ مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین برای

1 7075-T6

2 2024-T3

۲-۲- عملیات تداخل

فرآیند تداخل به صورت وارد کردن پیچ با قطر بزرگتر از قطر سوراخ در نمونه خستگی می‌باشد. فاکتور بسیار مهم در رابطه با فرآیند تداخل، درصد تداخل انجام گرفته بر روی نمونه‌ها می‌باشد که روی میزان بهبود عمر خستگی نمونه‌ها بسیار تأثیرگذار می‌باشد. بر اساس تحقیقات قبلی انجام گرفته شده در زمینه تداخل [۱] در درصدهای پایین (کمتر) تداخل (منظور ۰/۵، ۱، ۲ درصد) پیش‌تنش ایجاد می‌کند که در صورت کششی می‌باشد. این در حال است که در نسبت‌های بالاتر تداخل علاوه بر پیش‌تنش کششی در بعضی نواحی پیش‌تنش فشاری ایجاد می‌شود. این در حالی است که در درصدهای تداخل بالای ۵ درصد، انجام تداخل با وجود پیش‌تنش فشاری افزایش بیشتری در عمر خستگی نمونه‌ها نداشته است، همچنین بیشترین بهبود عمر خستگی در درصدهای بالای ۳ تا ۴ درصد تداخل به دست می‌آید. در این پژوهش درصد تداخل انجام گرفته شده بر نمونه‌ها ۳/۵ درصد می‌باشد. برای وارد کردن پیچ به داخل سوراخ نمونه‌ها از دستگاه کشش و فشار امسلر استفاده شده است که در شکل ۲ نشان داده شده است. در هنگام وارد کردن پیچ به داخل سوراخ باید دقت کافی منظور گردد تا پیچ و سوراخ نمونه هم مرکز باشند. انجام این فرآیند در هر نمونه در حدود دو دقیقه انجام گرفت، از این رو می‌توان فرآیند تداخل را به صورت یک فرآیند استاتیکی در نظر گرفت و نیاز به لحاظ کردن خواص دینامیکی ماده هنگام مدل‌سازی تداخل نیست. از یک استوانه با قطر داخلی ۱۰ و قطر خارجی ۳۵ میلی‌متر به عنوان تکیه‌گاه هنگام وارد کردن پیچ داخل سوراخ در زیر سوراخ نمونه‌ها استفاده شده است. قطر پیچ ثابت بوده و برابر $D=5/90\text{mm}$ می‌باشد. نمونه‌های مورد آزمایش شامل دو دسته بدون تداخل و نمونه‌های با تداخل ۳/۵ درصد می‌باشند. قطر سوراخ‌های نمونه‌ها ۵/۹۲ و ۵/۷۰ به ترتیب برای درصدهای ۰ (بدون تداخل) و ۳/۵ درصد انتخاب شده است. مقدار درصد تداخل با استفاده از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$I = \frac{D-d}{d} \times 100 \quad (1)$$

که D قطر بین و d قطر سوراخ می‌باشد.

جدول ۱: نام‌گذاری نمونه‌ها.

Table 1.

| توصیف | نام‌گذاری |
|---|------------------------|
| نمونه‌های سوراخ باز | OH |
| نمونه‌های دارای تداخل | IF |
| نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل حرارتی ۶۰ درجه سانتی‌گراد | IF+TEMP _{۶۰} |
| نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل حرارتی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد | IF+TEMP _{۱۲۰} |

۲-۳- اعمال سیکل حرارتی

بعد از اتمام عملیات تداخل یک گروه از نمونه‌های آزمایشی جهت انجام آزمایش‌های خستگی کنار گذاشته شد و دو گروه دیگر تحت اعمال سیکل حرارتی قرار گرفتند. الگو و نحوه اعمال سیکل حرارتی بر روی نمونه‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. جهت اعمال سیکل حرارتی بر روی نمونه‌ها از کوره حرارتی استفاده شده است. کوره مورد نظر برای محدوده دمایی مورد استفاده توسط یک دماسنج دیجیتالی کالیبره گردید. نمونه‌ها در درون کوره قرار داده شده سپس دمای کوره به آرامی افزایش داده شد تا در نهایت در مدت ۲۵ دقیقه دمای نمونه‌ها به حداکثر مقدار مورد نظر برسد. سپس دمای کوره به مدت ۱۰ دقیقه ثابت نگه داشته شد. پس از این مدت کوره خاموش گردیده و دمای قطعات با باز گذاشتن درب کوره در مدت

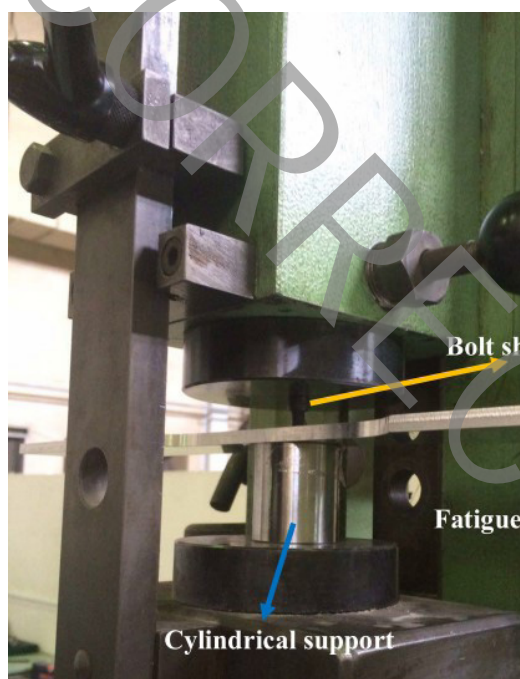


Fig. 2.

شکل ۲: نحوه انجام فرآیند تداخل.

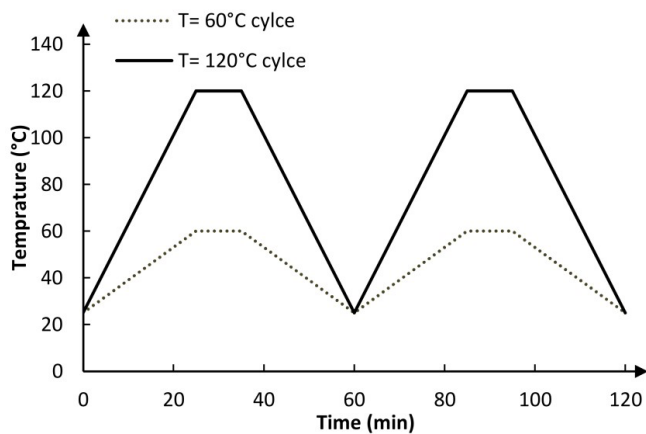


Fig. 3.

شکل ۳: سیکل حرارتی اعمالی بر نمونه‌ها.



Fig. 4.

شکل ۴: نحوه بسته شدن نمونه‌های آزمایشی.

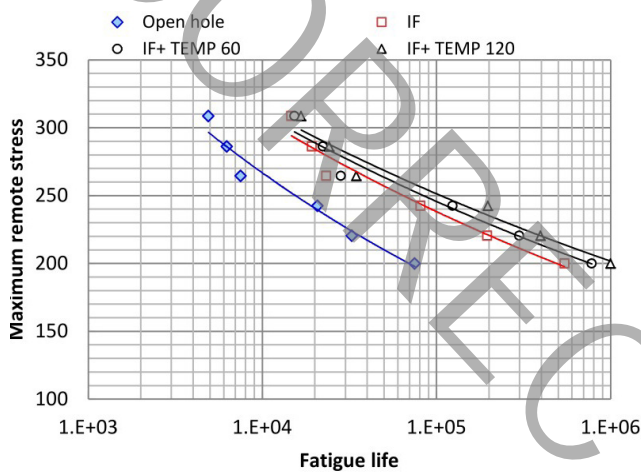


Fig. 5.

شکل ۵: نتایج تست‌های تجربی.

یافته است بطوریکه در بارهای بالا میزان بهبود عمر تمامی نمونه‌های دارای تداخل تقریباً با هم یکسان می‌باشد.

همچنین نتایج تست‌های خستگی حاکی از آن است که بهبود عمر خستگی در نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر می‌باشد. هر چه بار اعمالی افزایش می‌یابد بهبود عمر خستگی کاهش یافته است. بیشترین بهبود عمر خستگی نمونه دارای تداخل تحت سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد در حدود ۲/۵ برابر افزایش عمر نمونه دارای تداخل بدون سیکل حرارتی می‌باشد.

۲-۵- سطح مقطع شکست نمونه‌ها

پس از انجام تست‌های خستگی به منظور ارائه دید واضح‌تر بر نتایج تست‌های خستگی و جهت بررسی اثر تداخل و سیکل حرارتی بر محل و نحوه شروع ترک خستگی و همچنین منطقه گسترش ترک خستگی بررسی مقاطع شکست لازم می‌باشد. از این‌رو سطوح مقاطع شکسته شده هر چهار

۲۵ دقیقه به دمای محیط یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد بازگردانده شده است. این عمل برای هر یک از نمونه‌ها در سه مرحله انجام شده است. در نتیجه این روش هیچ‌گونه شوک حرارتی ایجاد نشده و با توجه به کم بودن نرخ افزایش دما، تمامی نقاط قطعه به‌صورت یکنواخت و یکسان افزایش می‌یابد. در خصوص تغییرات دمای اعمال شده بر روی نمونه‌ها لازم به ذکر است که عملیات حرارتی بر روی فلزات به منظور از بین بردن تنش‌های پسماند مضر و ناخواسته که در طول پروسه ساخت نمونه‌ها یا قطعات در اثر فرآیندهایی مانند ماشین‌کاری و سوراخ‌کاری و غیره به وجود می‌آید، مورد استفاده قرار می‌گیرد و این عملیات موجب افزایش مقاومت ماده می‌گردد. عملیات حرارتی که موجب افزایش مقاومت می‌شود، دارای شرایطی متفاوتی با آنچه در پژوهش حاضر انجام گرفته، می‌باشد. در تحقیق حاضر اعمال سیکل حرارتی بر روی نمونه‌ها به منظور از بین بردن تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند تولید و افزایش مقاومت ماده، انجام نشده است. دلیل اعمال سیکل حرارتی بر نمونه‌ها، بررسی چگونگی تأثیر آن بر روی توزیع پیش‌تنش مکانیکی ناشی از تداخل می‌باشد. لازم به ذکر است پیش‌تنش‌های مکانیکی ایجاد شده ناخواسته نبوده و به صورت عمدی و به منظور افزایش عمر خستگی، ایجاد شده است.

۲-۴- تست‌های خستگی

پس از انجام عملیات تداخل تست‌های خستگی به منظور بدست آوردن منحنی $S-N$ ، بر روی تمامی چهار گروه نمونه‌های آزمایشی انجام شده است. برای انجام تست‌های خستگی از دستگاه زوویخ روئل امسلر با توانایی اعمال بار ۵۰۰ کیلو نیوتن استفاده شده است. بارگذاری از نوع سینوسی با نسبت بار $R=0/1$ و در دمای اتاق و در فرکانس ۴ هرتز انجام شده‌اند. در شکل ۴ نحوه بسته شدن نمونه‌های خستگی بر روی دستگاه خستگی نشان داده شده است.

نمودار تنش-عمر حاصل از تست‌های خستگی برای نمونه‌ها در یک نمودار نیمه لگاریتمی در شکل ۵ نشان داده شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهند نمونه‌های دارای تداخل نسبت به نمونه‌هایی که تحت عملیات تداخل قرار نگرفته‌اند عمر بیشتری دارند. در بارهای پایین میزان بهبود عمر نمونه‌های دارای تداخل در مقایسه با نمونه‌های بدون تداخل بیشتر می‌باشد. با افزایش مقدار بار میزان بهبود عمر در نمونه‌های دارای تداخل کمتر شده است. نتایج به دست آمده از اعمال سیکل حرارتی بر روی نمونه‌های دارای تداخل، نتایج جالب و غیر منتظره‌ای می‌باشد. در حقیقت اثر سیکل حرارتی که گمان می‌رفت باعث کاهش و کاهش پیش‌تنش مؤثر ناشی از تداخل گردد، باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌ها شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای تداخلی که تحت سیکل حرارتی قرار گرفته‌اند (یعنی نمونه‌های IF+TEMP ۶۰ و IF+TEMP ۱۲۰) در مقایسه با نمونه‌هایی که تحت سیکل دمایی قرار نگرفته‌اند بهبود عمر خستگی بیشتری دارند. با افزایش بار اعمالی میزان بهبود عمر در این نمونه‌ها کاهش

یکنواخت بودن تنش‌ها در ضخامت)، به دست آوردن حل‌های تحلیلی بسیار مشکل است. از طرف دیگر در فرآیند تداخل با توجه به اینکه در حین انجام فرآیند، پیچ داخل سوراخ باقی می‌ماند از این رو استفاده از روش‌های تجربی به منظور بدست آوردن توزیع تنش در جهت ضخامت قطعه بسیار مشکل می‌باشد برای تحلیل عددی تنش و کرنش به روش المان محدود از نرم‌افزار انسیس^۱ نسخه ۱۲ [۱۱] که قادر به شبیه‌سازی واقعی فرآیند تداخل بوده و قابلیت به دست آوردن توزیع مقادیر تنش در امتداد ضخامت نمونه را دارد، استفاده شده است. این روش یکی از پرکاربردترین روش‌ها برای محاسبه تنش بوده و امروزه بسیاری از محققین برای تعیین تنش پسماند از روش المان محدود استفاده می‌کنند و یک روش تصدیق شده می‌باشد [۱۲ و ۱۳]. بر اساس مطالعات انجام شده [۱۴] تحقیقاتی که قبلاً به منظور تعیین تنش پسماند هم به صورت تجربی و هم به صورت عددی انجام شده است حاکی از آن است که نتایج تنش پسماند حاصل از شبیه‌سازی عددی تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی داشته و درصد خطا بین نتایج تجربی و المان محدود کم بوده و می‌توان از شبیه‌سازی المان محدود برای تعیین توزیع تنش پسماند بهره برد. اندازه‌گیری تنش پسماند به صورت تجربی دارای هزینه زیاد بوده و با توجه به فرآیند انجام شده و قرار گرفتن پیچ درون سوراخ اندازه‌گیری تنش‌های ناشی از اعمال تداخل با مشکلات زیادی همراه است. از این رو در این تحقیق از روش المان محدود برای بدست آوردن پیش‌تنش‌ها استفاده

گروه مختلف نمونه‌های آزمایشی مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل‌های ۶ و ۷ سطح مقطع شکست نمونه‌ها در دو بار ۵۰ و ۷۰ کیلو نیوتن نشان داده شده است. در نمونه‌های بدون تداخل در همه بارهای اعمالی ترک‌ها از لبه میانی و از لبه سوراخ شروع و گسترش یافته‌اند. در نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل دمایی ترک‌های خستگی از لبه سوراخ و محل ورود پیچ به داخل سوراخ ایجاد شده و به صورت ربع بیضی از دو طرف سوراخ گسترش یافته‌اند. در نمونه‌های دارای تداخل که تحت سیکل دمایی قرار گرفته‌اند در بارهای بالاتر (۷۰ کیلو نیوتن) همانند نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل دمایی ترک‌های خستگی از لبه سوراخ و به صورت ربع بیضی از دو طرف سوراخ گسترش یافته‌اند ولی در بارهای پایین در نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل دمایی ترک خستگی از لبه ورودی و از لبه خروجی شروع شده است و محل شروع ترک‌ها از لبه سوراخ دور شده‌اند.

۳- مدل المان محدود

برای اندازه‌گیری پیش‌تنش و تنش پسماند روش‌های مختلفی وجود دارد که این روش‌ها عبارتند از روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش المان محدود. روش‌های تحلیلی بر اساس فرضیات ساده شده بوده، و قادر به پیش‌بینی تنش در جهت ضخامت قطعه نمی‌باشند. وجه مشترک مدل‌های تحلیلی، ماهیت دو بعدی آن‌هاست. به دلیل پیچیدگی‌های سه بعدی (غیر

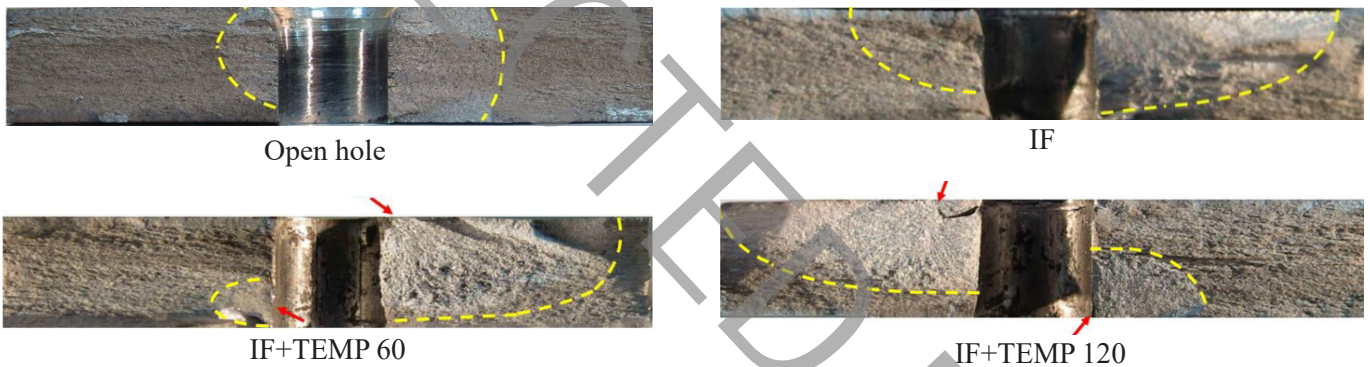


Fig. 6.

شکل ۶: سطح مقطع شکست نمونه‌ها برای بار ۵۰ کیلو نیوتن.

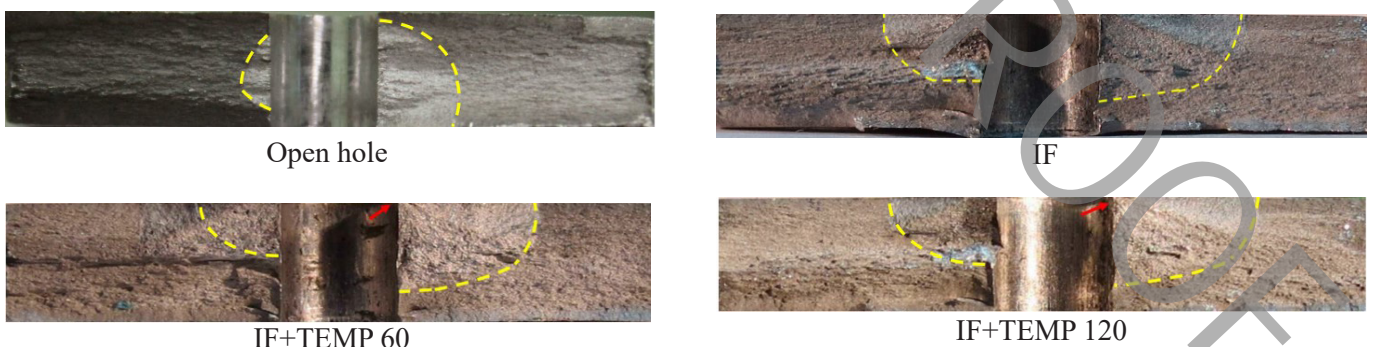


Fig. 7.

شکل ۷: سطح مقطع شکست نمونه‌ها برای بار ۷۰ کیلو نیوتن.

محدوده دمایی مورد نظر به نرم افزار معرفی شده است [۱۷]. رفتار پیچ مورد استفاده به صورت الاستیک مستقل از دما با مدول الاستیسیته و ضریب پواسون به ترتیب $E = 209\text{GPa}$ و $\nu = 0.33$ در نظر گرفته شده است. $\alpha = 12\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ ضریب انبساط حرارتی برای پیچ به نرم افزار وارد شده است.

شرایط مرزی مورد استفاده در مدل را می توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول شرایط مرزی هستند که به علت استفاده از مدل یک چهارم باید از آن ها استفاده نمود. این شرط مرزی، شرط مرزی متقارن است که بر اساس آن حرکت گره های روی سطح، در جهت عمود بر سطح محدود می گردد. این شرط مرزی بر سطوح تقارن صفحه سوراخ دار و پیچ اعمال می گردد. شرایط مرزی دسته دوم ناشی از قیودی هستند که به طور فیزیکی در عمل بر قطعه اعمال می شوند؛ مانند حرکت پیچ که برای آن از قید جابه جایی در راستای محور Z استفاده می شود و اثر حضور استوانه فولادی نگه دارنده ورق آلومینیوم به صورت اعمال قیدهای جابجایی در جهت Z به گره های زیرین ورق که ما بین فاصله شعاعی ۵ و ۱۷/۵ میلی متر از مرکز سوراخ مقید شده است.

شبیه سازی عددی در چندین مرحله انجام گرفته شده است. در مرحله اول فرایند تداخل در دمای آزمایشگاه (۲۵ درجه سانتی گراد) شبیه سازی شده است. برای مدل سازی فرایند تداخل ابتدا پین به صورت هم مرکز در تماس با لبه سوراخ صفحه قرار گرفته است. با جابجایی گره های بالای پیچ، پیچ در امتداد محور به سمت پایین حرکت داده می شود. پین به اندازه ی ۱۱ میلی متر به سمت پایین حرکت داده می شود و در داخل سوراخ باقی می ماند. برای جلوگیری از حرکت پین و همگرا شدن حل مسئله گره های خط مرکزی بین در جهت محور x بسته شده اند. پس از انجام فرایند تداخل به عنوان بارگذاری مرحله اول و پس از انجام تنظیمات و تغییرات مربوط، بار حرارتی به صورت دمای یکنواخت در بارگذاری مرحله دوم بر روی مدل اعمال می شود. در بارگذاری مرحله سوم دمای قطعه به دمای محیط آزمایشگاه یعنی ۲۵ درجه

شده است. همچنین باید به این نکته اشاره گردد که برای پیش بینی عمر خستگی نمونه ها، تحلیل تنش و کرنش المان محدود لازم می باشد.

شبیه سازی فرایند تداخل به صورت سه بعدی انجام شده و برای صرفه جویی در زمان حل و با توجه به اینکه مدل دارای دو محور تقارن می باشد، فقط یک چهارم مدل شبیه سازی شده است. برای مش بندی مدل از المان های سه بعدی سولید ۱۸۵ استفاده شده است که دارای ۸ گره و هر گره دارای سه درجه آزادی می باشد. نوع تماس بکار گرفته شده در مدل سازی از نوع تماس قابل انعطاف با سطح قابل انعطاف و مدل اصطکاک کولمب می باشد. برای شبیه سازی مسئله تماس، المان های تماس بکار گرفته شده اند. این المان ها باعث می شود که سطوح تماس بدون وجود تداخل (نفوذ) با هم دیگر امکان تبادل نیرو داشته باشند. در شکل ۸ مدل المان محدود نشان داده شده است.

برای شبیه سازی مدل المان رفتار ماده باید به نرم افزار تعریف شود. آنجایی که خواص مکانیکی مواد مستقیماً از ساختار میکروسکوپی ماده نشأت می گیرد هر عاملی که باعث تغییر در ریز ساختار ماده بشود خواص مکانیکی را تحت تأثیر قرار می دهد. درجه حرارت و تغییر آن یکی از عواملی است که باعث تغییر ساختار میکروسکوپی ماده و در نتیجه تغییر خواص مکانیکی آن می شود. از این رو رفتار آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ به صورت الاستیک-پلاستیک وابسته به دما در نظر گرفته شده است. در زمینه اندازه گیری خواص آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ تحقیقات فراوانی انجام گرفته شده است و در این پژوهش از نتایج بدست آمده از این تحقیقات در درجه حرارت های مختلف استفاده شده است [۱۵]. رفتار تنش-کرنش آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ که در شکل ۹ نشان داده شده است در سه دمای ۲۵، ۹۳/۳۳ و ۲۰۴/۴۴ درجه سانتی گراد در نرم افزار تعریف شده است [۱۶ و ۱۷]. نرم افزار انسیس این قابلیت را دارد که در صورت اعمال هر دمایی بین دماهای داده شده خواص ماده را ارزیابی کند. ضریب پواسون آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶، $\nu = 0.33$ در نظر گرفته شده است. همچنین ضریب انبساط حرارتی آلومینیوم $\alpha = 25/4\mu\text{m/m}^\circ\text{C}$ در

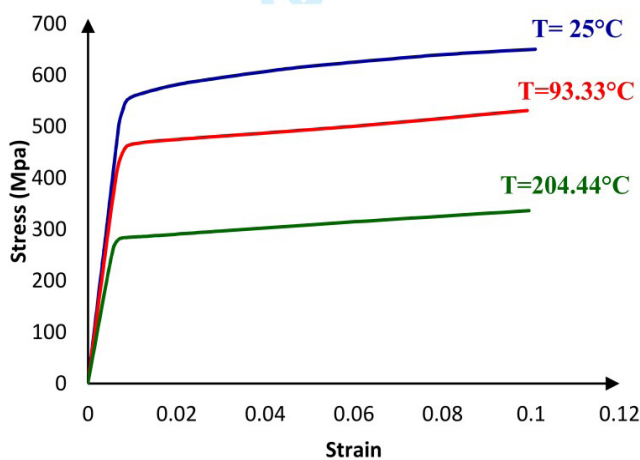


Fig. 9.

شکل ۹: منحنی تنش-کرنش برای آلومینیوم ۷۰۷۵-تی ۶ در سه دمای مختلف [۱۲].

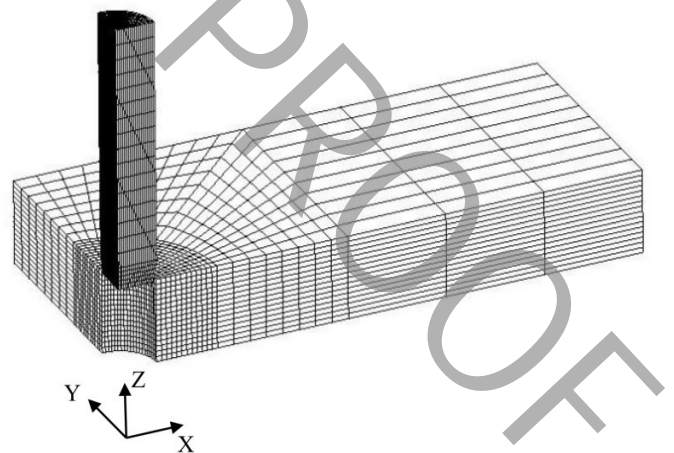


Fig. 8.

شکل ۸: مدل المان محدود.

می‌توان به بررسی چشمی، عکس‌برداری اشعه ایکس^۱، بازتاب امواج مافوق صوت و استفاده از جریان الکتریکی اشاره کرد. برای آنالیزهای مهندسی بر اساس تحقیقات انجام گرفته طول ترک اولیه در حدود $0/۱۲۷ - 0/۲۵۴$ میلی‌متر می‌باشد [۱۸ و ۱۹]. در این تحقیق اندازه طول ترک اولیه $0/۱۲۷$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. این مقدار با توجه به تحقیقات انجام گرفته در مورد طول ترک اولیه در اتصالات مکانیکی آلومینیوم انتخاب شده است [۱۸].

برای بدست آوردن محل شروع ترک از سطح مقطع شکست نمونه‌ها استفاده شده است. در نمونه‌های تحت تداخل ترک‌ها در صفحه ورودی و از دو طرف سوراخ به صورت ربع بیضوی شروع و گسترش یافته‌اند ولی در نمونه‌های بدون تداخل به صورت نیم بیضوی در دو طرف سوراخ می‌باشند. از این‌رو برای پیش‌بینی عمر خستگی نمونه‌ها در نرم‌افزار آفگرو از مدل ترک ربع بیضوی دو طرفه برای نمونه‌های دارای تداخل و از ترک نیم بیضوی دو طرفه برای نمونه‌های بدون تداخل استفاده شده است. در شکل ۱۰ به صورت شماتیک شکل ترک نشان داده شده است.

۴-۱- عمر جوانه‌زنی ترک

پدیده جوانه‌زنی ترک با شکل‌گیری ترک در ناحیه‌ای که تنش در آن ماکزیمم می‌باشد، شروع می‌شود. با ملاحظه بالا بودن ضریب تمرکز تنش و گرا دیان تنش در نزدیکی سوراخ، اغلب ترک از این مکان شروع می‌شود. اگرچه در این پژوهش نیروی اعمالی به نمونه تک محوری می‌باشد اما به دلیل شرایط هندسی خاص و اعمال فرآیند تداخل با توجه به تنش‌های به دست آمده از مدل المان محدود، می‌توان چنین متوجه شد که تنش‌های موجود دارای ماهیت چند محوری بوده و بایستی در تعیین عمر خستگی، تأثیرات تنش چند محوری در نظر گرفته شود. از این‌رو با توجه به پیچیدگی

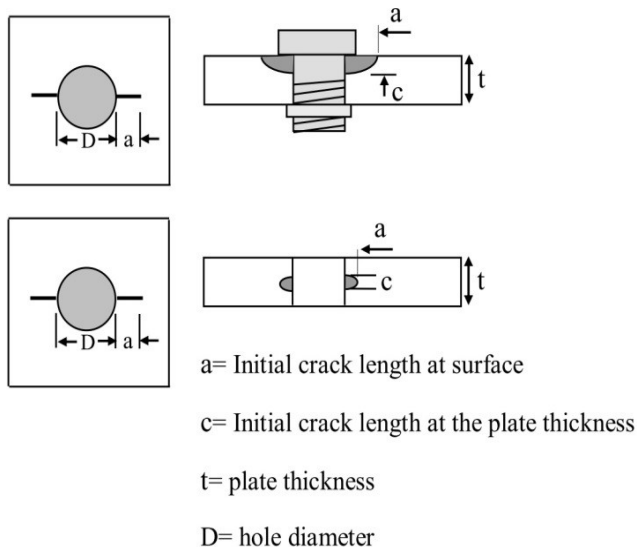


Fig. 10.

شکل ۱۰: شکل شماتیک اولیه ترک.

سانتی‌گراد باز گردانده می‌شود. چنانچه که قبلاً ذکر گردید دو دمای مختلف (سیکل دمایی ۶۰ و ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) انتخاب شده است. از این‌رو شبیه‌سازی برای هر دما بطور جداگانه انجام شده است. مرحله بعدی اعمال بار ماکزیمم محوری کششی به صورت شبه استاتیکی در جهت محور طولی و دور از سوراخ در انتهای سمت راست مدل (بارگذاری) و سپس اعمال بار مینیمم محوری بر روی نمونه می‌باشد (باربرداری).

۴- تخمین عمر خستگی

مسئله خستگی به عنوان عامل اصلی در خرابی قطعات مکانیکی و صنایع هوا و فضا شناخته شده است. این خرابی‌ها علاوه بر خسارت‌های اقتصادی فراوان موجب تلفات جانی سنگینی نیز شده است. هدف از انجام تست‌های خستگی یافتن عمر قطعه تحت اعمال بارهای سیکلی مختلف می‌باشد. از آن‌جاکه مکانیزم دقیق پدیده خستگی هنوز به طور کامل مشخص نشده است روش‌های زیادی برای تخمین عمر قطعات توسط پژوهشگران ارائه و ابداع شده است. بهترین و دقیق‌ترین روش برای تعیین عمر خستگی انجام تست‌های خستگی می‌باشد. البته روش تجربی برای پیش‌بینی عمر قطعات یقیناً منجر به جواب‌های قابل اطمینانی خواهد شد ولی برای عملی نمودن آن می‌بایست آزمایش چندین بار تکرار گردد، این فرایند نیازمند صرف وقت و هزینه بیشتری است. از این‌رو در سال‌های اخیر با استفاده از روش‌هایی برای تخمین عمر خستگی نمونه‌ها از روش‌های عددی استفاده شده است. تخمین عمر در سازه‌هایی که تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند، یکی از الزامات طراحی است و امروزه بطور گسترده توسط محققان مورد پژوهش قرار می‌گیرند. نتایج تخمین عمر از قبل قابل پیش‌بینی نبوده و نمی‌توان از قبل پیش‌بینی کرد که نتایج تخمینی دارای چه مقدار دقت می‌باشند. در واقع هدف از انجام این بخش از تحقیق بررسی دقت روش تخمین عددی انتخاب شده می‌باشد که با چه مقدار دقت قادر به پیش‌بینی نتایج تجربی بدست آمده است. پارامتر آسیب در خستگی از دو قسمت جوانه‌زنی ترک و گسترش ترک تشکیل شده است. پارامتر جوانه‌زنی ترک شامل اولین حرکت نابجایی، اشباع حرکت نابجایی‌ها و همچنین ایجاد ترک با طول قابل اندازه‌گیری می‌شود. پارامتر گسترش ترک، مرحله پس از جوانه‌زدن ترک تا شکست نهایی قطعه را شامل می‌شود. در این مقاله عمر جوانه‌زنی و عمر گسترش ترک به طور جداگانه محاسبه شده و مجموع عمر بدست آمده از این دو مرحله مقدار عمر کل را بدست می‌دهد. پارامتر مهم و تأثیرگذار در این پروسه تعریف طول ترکی است که در آن عمر خستگی از مرحله جوانه‌زنی به مرحله گسترش گذر می‌کند یعنی موقعیتی که عمر جوانه‌زنی و عمر رشد ترک را از هم جدا می‌کند. این اندازه تأثیر قابل توجهی روی عمرهای جوانه‌زنی و گسترش ترک دارد. تعیین اندازه و شکل ترک اولیه به منظور بدست آوردن رشد ترک خستگی ضروری می‌باشد.

اندازه طول ترک اولیه، کوچک‌ترین طول قابل اندازه‌گیری ترک می‌باشد که با استفاده از روش‌های گوناگونی بدست می‌آید. از جمله این روش‌ها

جدول ۲: ضرایب عمر خستگی آلومینیوم - ۷۰۷۵ تی ۶ [۱۸].

| ثابت‌های ماده | σ_f (MPa) | b | c | ϵ_f |
|---------------|------------------|--------|--------|--------------|
| | ۱۴۶۶ | -۰/۱۴۳ | -۰/۶۱۹ | ۰/۲۶۲ |

۴-۲- عمر گسترش ترک

برای تخمین عمر گسترش ترک از نرم‌افزار آفگرو استفاده شده است. نرم‌افزار آفگرو، نرم‌افزاری بر اساس مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی برای پیش‌بینی عمر خستگی می‌باشد. آنچه در عمر گسترش ترک تحت بار خستگی اهمیت دارد، تعیین تعداد سیکل لازم برای رسیدن طول ترک از طول جوانه‌زنی تا طول نهایی (شکست کامل قطعه) می‌باشد. این نرم‌افزار بر اساس مفهوم مکانیک شکست الاستیک خطی برای پیش‌بینی عمر خستگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. چهار مدل برای پیش‌بینی عمر رشد ترک در این نرم‌افزار وجود دارد که از بین مدل‌های موجود، مدل ناسگرو دارای دقت و قابلیت بالاتری می‌باشد. در این تحقیق از مدل رشد ترک ناسگرو برای پیش‌بینی عمر رشد ترک استفاده شده است.

برای پیش‌بینی عمر خستگی با استفاده از نرم‌افزار آفگرو می‌بایست پارامترهای پیش‌تنش، شکل و اندازه ترک اولیه در دسترس باشند. مقادیر پیش‌تنش از نتایج المان محدود مشخص گردیده و همچنین با استفاده از سطح مقطع شکست نمونه‌ها محل و ناحیه گسترش ترک مشخص می‌شود. برای معرفی خواص ماده، اندازه نمونه‌ها و بارها به نرم‌افزار آفگرو، از داده‌های تست‌ها استفاده شده است. ورودی بارگذاری در این برنامه تنش می‌باشد و نمی‌توان قطعه را بطور کامل در آن مدل نمود پس لازم است که ابتدا قطعه در یک نرم‌افزار آنالیز تنش تحلیل و سپس با توجه به این نتایج موضوع ترک و بارگذاری روی آن در نرم‌افزار آفگرو تحلیل گردد.

برای پیش‌بینی عمر رشد ترک مدل نرخ رشد ترک ناسگرو استفاده شده است. مدل ناسگرو که بوسیله نیومن و فورمن تعمیم یافته است برای آنالیز عددی رشد ترک با استفاده از داده‌های آفگرو مورد استفاده قرار گرفته است. این معادله بدین صورت بیان می‌شود:

$$\frac{da}{dN} = c \left[\frac{1-f}{1-R} \Delta K \right]^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{th}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{max}}{K_{crit}} \right)^q} \quad (3)$$

که n ، p و q ثابت‌های تجربی هستند که با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده‌اند. f نسبت فاکتور شدت تنش باز شدگی ترک به فاکتور شدت تنش ماکزیمم می‌باشد. مقدار f مرتبط با تنش و حالت تنش/کرنش صفحه‌ای می‌باشد. مقادیر فوق برای ماده مورد نظر در کتابخانه نرم‌افزار آفگرو موجود است [۲۱].

حالت تنش (چند محوری)، لازم است از یک معیار چند محوری خستگی برای پیش‌بینی عمر جوانه‌زنی ترک استفاده شود. تاکنون الگوهای مختلفی برای آسیب جوانه‌زنی خستگی بر اساس عبارتهای تنش، کرنش و انرژی بر حسب صفحه بحرانی ارائه شده است. روش‌های صفحه بحرانی دارای مبنای فیزیکی هستند و معمولاً صفحه تنش/کرنش اصلی ماکزیمم و یا صفحه‌ی تنش/کرنش برشی ماکزیمم را برای آغاز جوانه‌زنی ترک خستگی در نظر می‌گیرند. در این تحقیق برای تعیین عمر جوانه‌زنی ترک، با توجه به شرایط ذکر شده یکی از پرکاربردترین معیارهای چند محوری، معیار فاطمی-سوشی، استفاده شده است. با استفاده از مقادیر تنش و کرنش بدست آمده از مدل المان محدود در محل طول ترک اولیه، پارامتر آسیب جوانه‌زنی (سمت چپ معادله ۲) محاسبه شده است. لازم به توضیح است که در معیارهای چند محوری سمت چپ معادله به عنوان پارامتر آسیب می‌باشد. سپس با قرار دادن این مقدار در سمت چپ معادله ۲ و حل این معادله غیرخطی، مقدار عمر جوانه‌زنی بدست می‌آید. لازم به توضیح است که برای هر نمونه پارامتر آسیب جداگانه و در نتیجه عمر جوانه‌زنی جداگانه محاسبه شده است.

با توجه به پیچیدگی حالت تنش (چند محوری بودن)، لازم است از یک معیار چند محوری خستگی برای پیش‌بینی عمر جوانه‌زنی ترک استفاده شود. این معیارها یا بر اساس صفحه تنش/کرنش اصلی ماکزیمم و یا بر اساس صفحه تنش/کرنش برشی ماکزیمم بوده که در اصطلاح به آن‌ها معیار صفحه بحرانی گفته می‌شود و به سه گروه دسته‌بندی می‌شوند. این سه گروه عبارت‌اند از: عمر بر حسب معیار تنش، عمر بر حسب معیار کرنش و عمر بر حسب معیار انرژی.

در این پژوهش برای تخمین عمر جوانه‌زنی ترک از معیار فاطمی-سوشی به عنوان یکی از مشهورترین معیارهای خستگی چند محوری استفاده شده است [۲۰]. این معیار یک معیار صفحه بحرانی می‌باشد و صفحه کرنش برشی ماکزیمم به عنوان صفحه بحرانی در این معیار می‌باشد و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\Delta \gamma_{max}}{2} \left(1 + k \frac{\sigma_n^{max}}{\sigma_y} \right) = \left((1+\nu) \frac{\sigma_f^2}{E} (2N_f)^b + \frac{k}{2} (1+\nu) \frac{\sigma_f^2}{E} (2N_f)^{2b} + 1.5 \epsilon_f' (2N_f)^c + \frac{k}{2} 1.5 \frac{\sigma_f' \epsilon_f'}{E} (2N_f)^{b+c} \right) \quad (2)$$

که در این معادله σ_f ضریب مقاومت خستگی، ϵ_f' ضریب سختی بیچشی، b و c ثوابت ماده، $\Delta \gamma_{max}$ تغییرات کرنش برشی، σ_y تنش تسلیم ماده و σ_{max}^n تنش نرمال روی صفحه بحرانی (کرنش برشی ماکزیمم)، که مقادیر این ثوابت در جدول ۲ آورده شده است.

۵- نتایج و بحث

به تأخیر افتادن شروع ترک و همچنین گسترش ترک شده در نتیجه باعث افزایش عمر خستگی می‌شود. دلیل سوم بهبود عمر خستگی روش تداخل افزایش نیروی تماسی بین سطوح می‌باشد. زمانی که صفحه تحت بار سیکلی تحت بارگذاری قرار می‌گیرد جابجایی‌های موضعی به وجود آمده ناشی از بارگذاری باعث می‌گردد که اعضا در معرض پدیده سایش قرار گیرند. با اعمال فرایند تداخل نیروی تماسی بین پیچ و صفحه افزایش می‌یابد و این امر موجب کاهش جابجایی نسبی شده و از این رو باعث کم کردن اثر پدیده سایش می‌گردد.

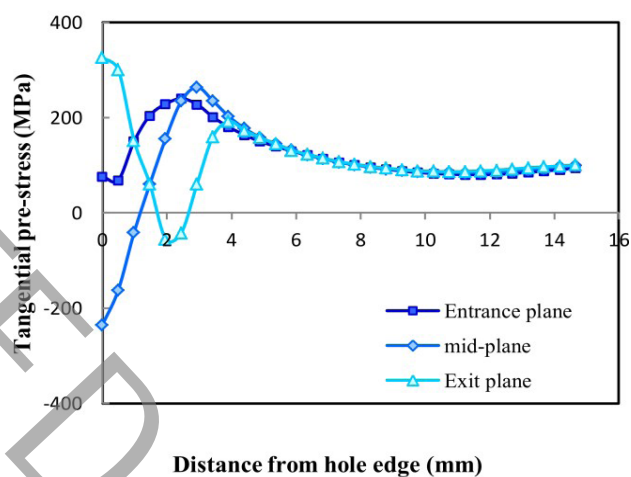
اعمال دما بر روی نمونه‌ها، توزیع تنش ناشی از تداخل را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شکل ۱۲ توزیع تنش در سه صفحه ورودی، میانی و خروجی را در دماهای اعمال شده نشان می‌دهد. نتایج المان محدود نشان می‌دهد که اعمال سیکل حرارتی توزیع تنش ناشی از تداخل را تغییر داده است. این تغییر بطور محسوس در ناحیه نزدیک سوراخ به ویژه در صفحات ورودی و خروجی قابل توجه می‌باشد اما در صفحه میانی مقادیر تنش پس از اعمال دما تغییر چندانی نکرده است. همچنان که از نمودارهای شکل ۱۲ مشاهده می‌شود میزان تغییرات تنش در دمای بالاتر (۱۲۰ درجه سانتی‌گراد) در صفحات بیان شده بیشتر می‌باشد.

در شکل ۱۳ توزیع تنش در امتداد ضخامت صفحه در دماهای مختلف نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود توزیع تنش ناشی از تداخل در امتداد ضخامت به صورت غیر یکنواخت می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که با اعمال سیکل حرارتی مقادیر تنش در لبه سوراخ کاهش یافته است. با اعمال سیکل حرارتی مقادیر تنش در صفحات ورودی و خروجی به سمت پایین شیف‌ت داده شده و در صفحه میانی مقادیر تنش به سمت بالا شیف‌ت پیدا کرده است. مقدار تغییرات تنش برای دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. لازم به توضیح است که تغییرات در محدوده بین صفحه ورودی تا صفحه میانی قابل توجه‌تر می‌باشد. پیش تنش ایجاد شده ناشی از تداخل در صفحه ورودی در مقایسه با صفحات خروجی و میانی بیشتر تحت تأثیر سیکل دمایی قرار گرفته است. با حرکت از صفحه ورودی به سمت صفحه خروجی میزان کاهش تنش کمتر شده است. در دو طرف صفحه میانی ناحیه‌ای وجود دارد که در آن ناحیه تغییرات تنش تقریباً ثابت می‌باشد.

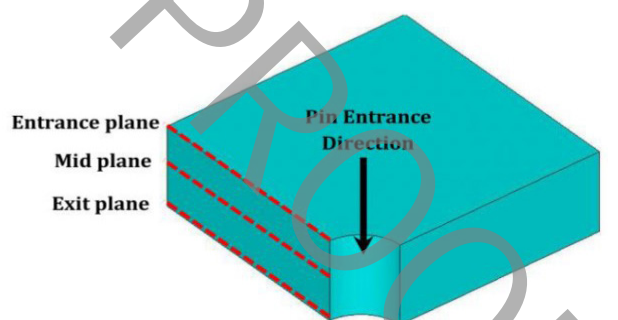
بیشترین پیش تنش فشاری در ناحیه میانی ایجاد شده است و مقادیر آن در حدود ۴۴۰- مگاپاسکال می‌باشد. اعمال سیکل حرارتی باعث واهلش تنش‌ها شده و مقدار آن برای سیکل دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۹۵- مگاپاسکال و برای سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۳۷۵- مگاپاسکال تغییر پیدا کرده است. در صفحات ورودی و خروجی نیز همچنین واهلش تنش انجام شده است. برای نمونه در صفحه ورودی پیش تنش کششی از ۱۲۶ مگاپاسکال بعد از اعمال سیکل دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۴ مگاپاسکال و برای سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به ۷۱- مگاپاسکال کاهش یافته است.

در شکل ۱۱ توزیع تنش‌های ناشی از فرایند تداخل را برای نسبت تداخل ۳/۵ درصد نشان داده شده است. در نمونه‌های دارای تداخل همانطور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است تنش مماسی ناشی از اعمال پیچ در طول ضخامت صفحه غیر یکنواخت می‌باشد. در لبه‌های بالایی و پایینی تنش‌های ایجاد شده به صورت کششی و در لبه‌ی میانی به صورت فشاری می‌باشد. به منظور آگاهی از نحوه توزیع تنش‌ها در اطراف سوراخ و رسم نمودارهای مقایسه‌ای در لبه سوراخ، از نام‌گذاری که در شکل ۱۱ بکار رفته، استفاده شده است. سه تأثیر مهم فرایند تداخل در بهبود عمر خستگی بدین صورت می‌باشد:

دلیل اول ایجاد پیش تنش محیطی مؤثر در اطراف سوراخ می‌باشد که این پیش‌تنش باعث کاهش دامنه تنش موضعی در اطراف سوراخ می‌شود. دلیل دوم قرار گرفتن پیچ در داخل سوراخ سبب ایجاد یک مسیر انتقال بار می‌شود و زمانی که صفحه تحت بار سیکلی قرار می‌گیرد، مقدار تنش سیکلی محلی در اطراف سوراخ کاهش یابد؛ به عبارت دیگر فرایند تداخل باعث کاهش ضریب تمرکز تنش در اطراف سوراخ می‌شود که این عمل موجب



(الف)



(ب)

Fig. 11

شکل ۱۱: (الف) نام‌گذاری صفحات مختلف (ب) توزیع تنش‌های طولی در سه صفحه‌ی کوچک‌ترین سطح مقطع برای نسبت تداخل ۵/۳ درصد.

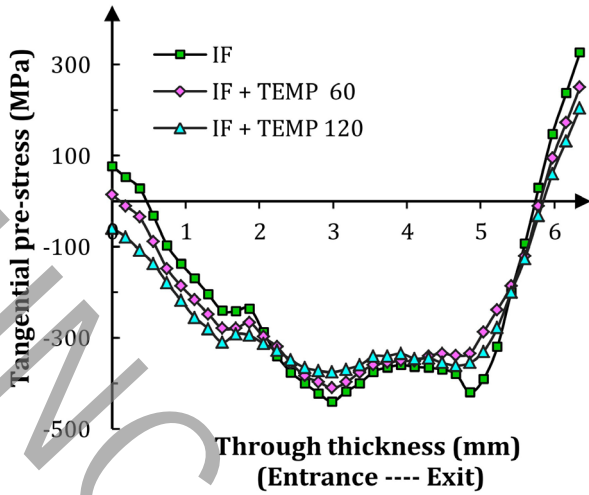


Fig. 13

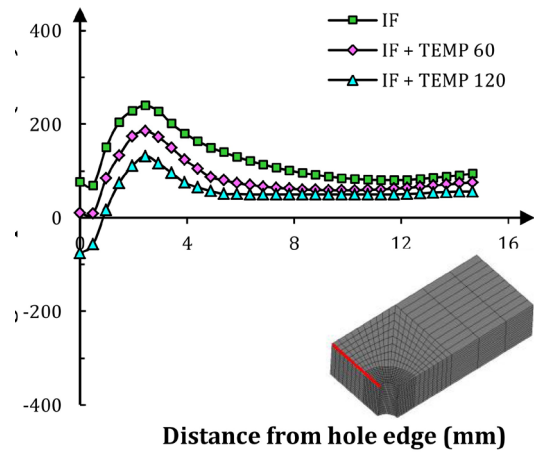
شکل ۱۳: توزیع تنش‌های طولی در امتداد ضخامت صفحه.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (۴)$$

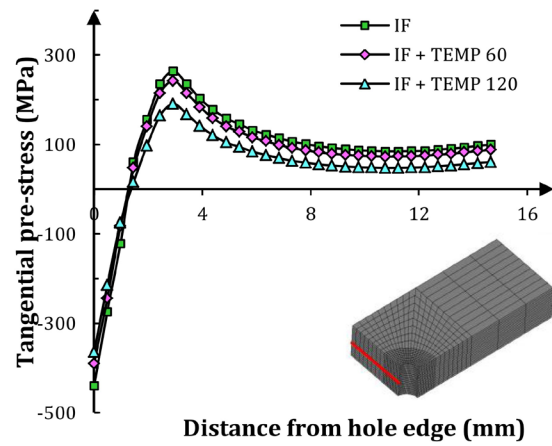
$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (۵)$$

بدین منظور تغییرات تنش میانگین و دامنه تنش به ترتیب روی سه صفحه‌ی ورودی، میانی و خروجی در کمترین سطح مقطع ورق برای تنش اعمالی ۲۶۵ مگاپاسکال در شکل ۱۴ نشان داده شده است. فرایند تداخل باعث ایجاد پیش‌تنش مؤثر در اطراف سوراخ می‌شود که این پیش‌تنش هر چند ممکن است باعث افزایش تنش میانگین شود ولی بطور چشمگیری دامنه تنش در اطراف سوراخ را کاهش می‌دهد. دامنه تنش و تنش میانگین دو عامل بسیار تأثیرگذار بر عمر خستگی می‌باشد؛ که از بین دو عامل تأثیرگذار ذکر شده دامنه تنش تأثیر بیشتری نسبت به تنش میانگین بر روی عمر خستگی دارد. هر چه دامنه تنش و تنش میانگین دارای مقادیری کمتری داشته باشد در این صورت عمر خستگی بیشتر خواهد بود. چنانچه شکل ۱۴ نشان می‌دهد مقادیر دامنه تنش در نمونه دارای تداخل در مقایسه با نمونه بدون تداخل به صورت قابل توجهی کاهش یافته است بطوریکه بیشترین کاهش در صفحه میانی اتفاق افتاده است. نحوه توزیع تنش میانگین در نمونه‌ها در مقایسه با دامنه تنش پیچیده‌تر است. چنانچه شکل ۱۴ نشان می‌دهد در صفحه ورودی و میانی تنش میانگین در نمونه دارای تداخل در مقایسه با نمونه بدون تداخل کاهش یافته بطوریکه در صفحه میانی این مقدار کاهش چشمگیر می‌باشد ولی در صفحه خروجی مقدار تنش میانگین در نمونه دارای تداخل افزایش یافته است.

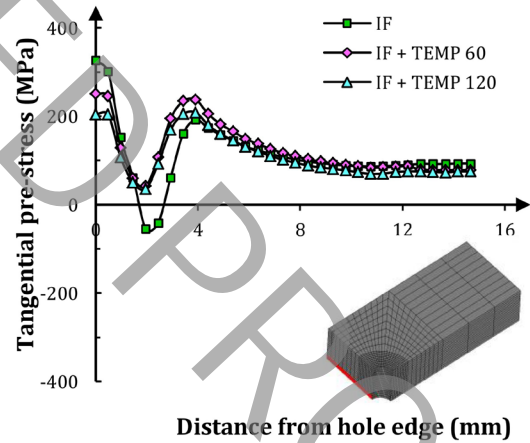
اعمال سیکل دمایی بر نمونه‌های دارای تداخل تأثیر بسزایی بر روی توزیع تنش میانگین در صفحات ورودی و خروجی دارد حال آنکه در صفحه میانی تغییرات چندانی مشاهده نمی‌شود. چنانچه شکل ۱۴ نشان می‌دهد اعمال سیکل حرارتی باعث کاهش مقادیر تنش میانگین در دو صفحه



(الف) صفحه ورودی،



(ب) صفحه میانی،



(ج) صفحه خروجی،

Fig. 12

شکل ۱۲: توزیع تنش‌های طولی ناشی از تداخل و باز توزیع آن پس از اعمال سیکل حرارتی در کوچک‌ترین سطح مقطع.

تأثیر بارگذاری و باربرداری دوردست بر روی میدان پیش‌تنش به صورت تأثیر آن بر روی تنش میانگین σ_m و دامنه‌ی تنش σ_a مورد بررسی قرار گرفته است. این مقادیر بر اساس روابط زیر بدست می‌آید:

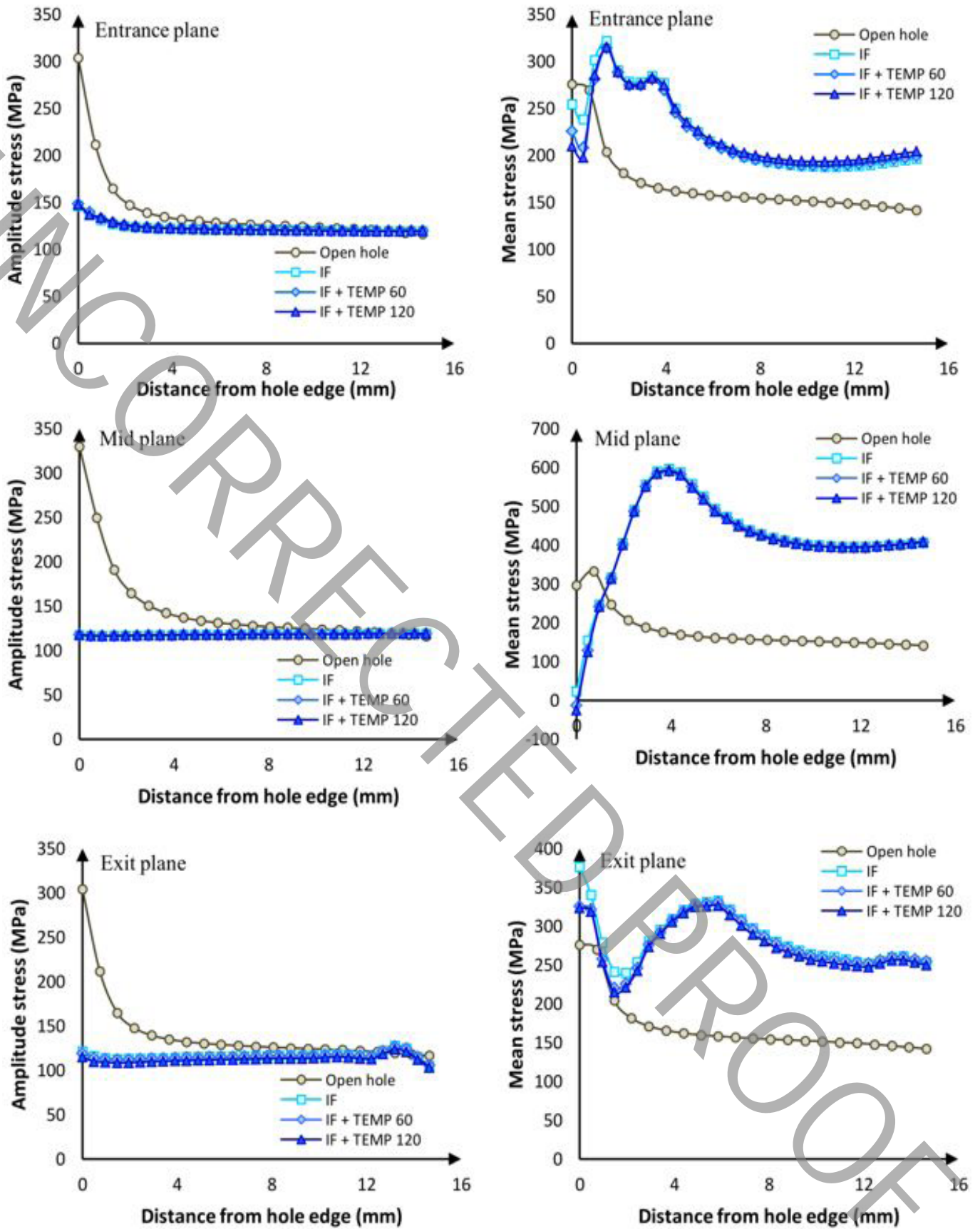
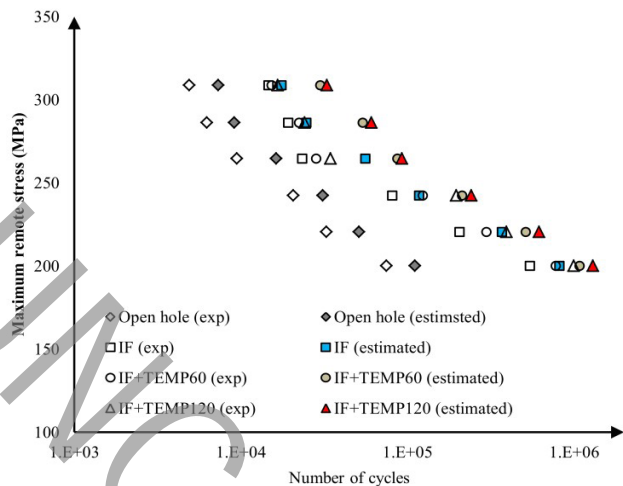
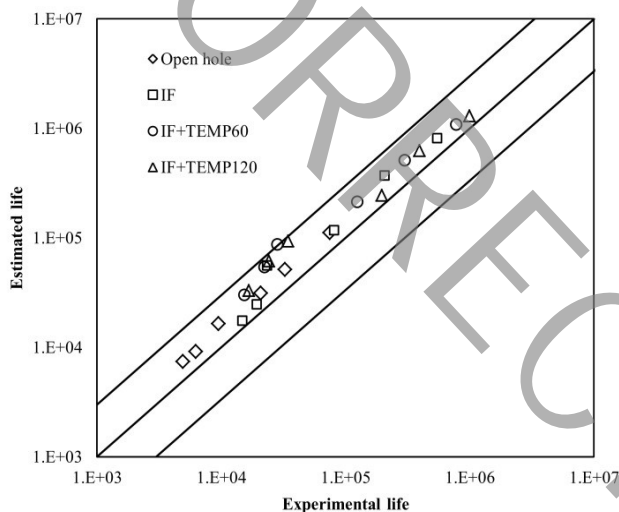


Fig. 13

شکل ۱۴. توزیع دامنه‌ی تنش و تنش میانگین تحت تنش اعمالی ۲۶۵ مگاپاسکال در کوچک‌ترین سطح مقطع.



(ب)



(ب)

Fig. 15

شکل ۱۵: (الف) نمودار تنش-عمر برای نتایج تجربی و پیش‌بینی شده (ب) مقایسه عمرهای پیش‌بینی شده و عمرهای تجربی

حرارتی قرار گرفته‌اند عمر خستگی بالاتری از نمونه‌های تداخل دارند و بهبود این نمونه‌ها بیشتر است. بطوریکه نمونه‌های تحت سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشترین بهبود عمر را نشان می‌دهند.

- برای توجیه و بررسی رفتار خستگی و افزایش عمر خستگی نمونه‌ها، از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار انسیس استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که تداخل باعث ایجاد یک پیش‌تنش مؤثر در اطراف سوراخ می‌شود. اثر پیش‌تنش ایجاد شده کاهش چشمگیر دامنه تنش و همچنین تنش میانگین در اطراف سوراخ می‌باشد. افزایش عمر خستگی نمونه‌های دارای تداخل نیز مرتبط با کاهش دامنه تنش و همچنین تنش میانگین در این نمونه‌ها می‌باشد.

ورودی و خروجی شده است ولی مقادیر دامنه تنش تقریباً در سه صفحه برای نمونه‌ها یکسان است. لازم به ذکر است که مقادیر کاهش تنش میانگین برای دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر می‌باشد.

نتایج بدست آمده از المان محدود تصدیق‌کننده نتایج تست‌های خستگی می‌باشد. بر اساس نتایج آزمایشگاهی در بارهای پایین اعمالی نمونه‌های دارای تداخل که تحت سیکل دمایی قرار گرفته‌اند، دارای عمر خستگی بیشتری می‌باشند. بر اساس نتایج بدست آمده در نمونه‌های دارای تداخل، محل شروع و گسترش ترک خستگی صفحه ورودی سوراخ می‌باشد. نتایج المان محدود نشان می‌دهد که اعمال سیکل دمایی بر روی نمونه‌های دارای تداخل باعث می‌شود که مقادیر تنش در لبه سوراخ در امتداد ضخامت صفحه کاهش یابد. بطوری‌که بیشترین کاهش تنش در صفحه ورودی جایی که مستعدترین محل برای شروع ترک خستگی، اتفاق می‌افتد. چنانچه ذکر شد در صفحه ورودی برای نمونه‌هایی که تحت سیکل دمایی قرار گرفته‌اند مقادیر پیش‌تنش کاهش یافته و به صورت فشاری می‌باشد. وجود تنش فشاری ایجاد و رشد ترک در ناحیه اطراف سوراخ را به تأخیر می‌اندازد و باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌ها می‌شود. بدین صورت که هنگامی قطعه تحت کشش قرار می‌گیرد ابتدا باید بر این پیش‌تنش فشاری غلبه کند و سپس ناحیه وارد کشش شود. بیشترین کاهش در مقادیر پیش‌تنش مربوط به نمونه‌هایی است که تحت سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته‌اند. از این رو انتظار می‌رود که این نمونه‌ها در مقایسه با نمونه‌های دیگر دارای بیشترین عمر خستگی باشند که این نتیجه کاملاً مطابق با نتایج بدست آمده از تست‌های خستگی می‌باشد.

همچنین در این مقاله عمر خستگی نمونه‌ها با استفاده از روش عددی تخمین زده شده است. چنانچه که قبلاً ذکر شد عمر کل خستگی از دو قسمت عمر جوانه‌زنی ترک و عمر گسترش ترک تشکیل شده است. شکل ۱۵الف نتایج عمر خستگی آزمایشگاهی در مقابل عمر تخمین‌زده برای همه نمونه‌ها را نشان می‌دهد. چنانچه مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تخمین عمر تطابق قابل قبولی با نتایج تجربی دارند. نتایج تخمین‌زده شده نشان می‌دهد تمامی نتایج پیش‌بینی شده در محدوده سه برابری نتایج تجربی قرار گرفته‌اند (شکل ۱۵ ب را ببینید).

۶- نتیجه‌گیری

- نتایج بدست آمده از انجام پژوهش حاضر به شرح زیر می‌باشد:
- تست‌های خستگی بر روی نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیم ۷۰۷۵-تی در بارهای مختلف اعمالی انجام شده است. تست‌های خستگی نشان می‌دهد که نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل حرارتی و با سیکل حرارتی به صورت قابل توجهی باعث افزایش عمر خستگی نمونه‌های می‌شود. بهبود عمر در بارهای پایین‌تر بیشتر از بارهای بالاتر می‌باشد.
- نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد نمونه‌هایی که تحت سیکل

| | |
|--|-----|
| ثابت تجربی | n |
| نسبت فاکتور شدت تنش باز شدگی ترک به فاکتور شدت تنش ماکزیمم | f |
| ثابت ماده | k |
| ثابت تجربی | p |
| ثابت تجربی | q |

علائم یونانی

| | |
|--------------------------------|----------------------|
| ضریب سختی پیچشی | ϵ_f' |
| نسبت پواسون | ν |
| تنش تسلیم | σ_y |
| ماکزیمم تنش نرمال | σ_{max}^n |
| دامنه تنش محلی | σ_a |
| تنش میانگین محلی | σ_m |
| ماکزیمم تنش محلی | σ_{max} |
| مینیمم تنش محلی | σ_{min} |
| ضریب مقاومت خستگی | σ_f' |
| تغییرات کرنش برشی | $\Delta\gamma_{max}$ |
| تغییرات ضریب شدت تنش | ΔK |
| تغییرات ضریب شدت تنش آستانه‌ای | ΔK_{max} |

منابع

- [1] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell, Experimental and numerical investigations into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2066-2080, 2009.
- [2] A. Lanciotti, C. Polese, The effect of interference-fit fasteners on the fatigue life of central hole specimens, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, pp. 587-597, 2004.
- [3] T. Chakherlou, J. Vogwell, The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes, *Engineering failure analysis*, Vol. 10, No. 1, pp. 13-24, 2003.
- [4] T.N. Chakherlou, J. Vogwell, A novel method of cold expansion which creates near uniform compressive tangential residual stress around a fastener holes, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 27, pp. 343-351, 2004.
- [5] T. Chakherlou, B. Abazadeh, J. Vogwell, The effect of bolt clamping force on the fracture strength and the stress

- نتایج شبیه‌سازی المان محدود نشان می‌دهد که اعمال سیکل حرارتی باعث باز توزیع پیش‌تنش ناشی از تداخل شده است و باعث یکنواخت‌تر شدن توزیع پیش‌تنش در امتداد ضخامت صفحه شده است. اعمال سیکل حرارتی باعث کاهش مقادیر تنش در نمونه‌ها به ویژه در صفحه ورودی شده است و این مقدار کاهش تنش برای سیکل دمایی ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد بیشتر از سیکل دمایی ۶۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. پس از اعمال سیکل حرارتی مقادیر پیش‌تنش در صفحه ورودی کاهش یافته است و این کاهش منجر به کاهش مقادیر تنش میانگین در صفحه ورودی شده (مستعدترین مکان برای شروع ترک خستگی) و از این رو موجب افزایش عمر خستگی نمونه‌ها شده است. کاهش تنش میانگین تأثیر بسزایی بر روی بهبود عمر خستگی دارد.
- سطح مقطع شکست نشان می‌دهد که ترک‌های خستگی در نمونه‌های بدون تداخل از دو طرف سوراخ از صفحه میانی شروع شده و گسترش می‌یابد. در نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل دمایی ترک‌های خستگی از صفحه‌ی ورودی جوانه‌زده و به شکل ربع بیضی گسترش می‌یابند. در نمونه‌های دارای تداخل که تحت سیکل دمایی قرار گرفته‌اند در بارهای بالا همانند نمونه‌های دارای تداخل بدون سیکل دمایی ترک‌های خستگی از لبه سوراخ و به صورت ربع بیضی از دو طرف سوراخ گسترش یافته‌اند ولی در بارهای پایین در نمونه‌های دارای تداخل تحت سیکل دمایی ترک خستگی از لبه ورودی و از لبه خروجی شروع شده است و محل شروع ترک‌ها از لبه سوراخ دور شده‌اند.
- عمر خستگی بدست آمده از نتایج تجربی با استفاده از یک روش عددی که ترکیب عمر جوانه‌زنی ترک با عمر گسترش ترک می‌باشد، تخمین زده شده است. نتایج بدست آمده از تخمین عمر به روش عددی نشان می‌دهد که عمر کل بدست آمده تطابق قابل قبولی با نتایج تست‌های خستگی دارد.

فهرست علائم انگلیسی

| | |
|-----------------------|-----------------|
| ثابت تجربی | C |
| قطر پیچ (mm) | D |
| مدول الاستیسیته (GPa) | E |
| نسبت تداخل | I |
| عمر جوانه‌زنی ترک | N_i |
| ثابت ماده | b |
| ثابت ماده | c |
| نرخ رشد ترک | $\frac{da}{dN}$ |

- 46, pp. 465-472, 1993.
- [14] A.T. Özdemir, L. Edwards, Through-thickness residual stress distribution after the cold expansion of fastener holes and its effect on fracturing, *ASME Journal Engineering Material Technology*, Vol. 126, pp. 129–35, 2004.
- [15] Royster DM. Tensile properties and creep strength of three aluminum alloys exposed up to 25000 hours at 200–400 F. Langley Station, Hampton VA: Langley Research Center; 1969 [January, NASA TN D-5010].
- [16] Stowell EZ. A phenomenological relation between stress, strain rate and temperature for metals at elevated temperature. Langley Field, VA: Langley Aeronautical Laboratory, National Advisory Committee for Aeronautics; 1957.
- [17] Metals handbook. 10th ed., vol. 2. Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials. ASM International; 1990.
- [18] R. Dhamari, The effect of water-displacing corrosion preventives on the fatigue behaviour of mechanically fastened aluminium joints. Ph.D. Thesis, University of New South Wales, 2004.
- [19] J.P. Gallagher, F.J. Giessler, A.P. Berens, R. M. Jr. Engle, guidelines for the analysis and design of damage tolerant aircraft structures, *USAF Damage Tolerant Design Handbook*, 1984.
- [20] A. Fatemi, D.F. Socie, A critical plane approach to multiaxial fatigue damage including out of phase loading, *Fatigue Fracture Engineering of Materials Structures*, Vol.11, pp.149–65, 1988.
- [21] J.A. Harter, AFGROW version4.0009.12, AFRL-VASM 2004.
- intensity factor of a plate containing a fastener hole with edge cracks, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 1, pp. 242-253, 2009.
- [6] T.N. Chakherlou, H. Taghizadeh, M. Mirzajanzadeh, A.B. Aghdam, On the prediction of fatigue life in double shear lap joints including interference fitted pin., *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 96, No. 7, pp. 340-354, 2012.
- [7] T.N. Chakherlou, H. Taghizadeh, A.B. Aghdam, Experimental and numerical comparison of cold expansion and interference fit methods in improving fatigue life of holed plate in double shear lap joints, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 29, pp. 351–362, 2013.
- [8] D.A. Clark, W.S. Johnson, Temperature effects on fatigue performance of cold expanded holes in 7050-T7451 aluminum alloy, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 159–65, 2003.
- [9] J.M. Minguéz, J. Vogwell, Fatigue life of an aerospace aluminum alloy subjected to cold expansion and a cyclic temperature regime. *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 6, pp. 997-1004, 2006.
- [10] I.J. Polmear, G. Pons, H. Octor, C. Sanchez, A. Morton, W. Borbridge, After Concorde: evaluation of an Al–Cu–Mg–Ag alloy for use in the proposed European SST, *Material Science Forum*, Vol. 12, pp. 217–222, 1996.
- [11] ANSYS Release 12.0 Documentation, ANSYS Inc., 2008.
- [12] X. Yuan, Z.F. Yue, S.F. Wen, L. Li, T. Feng. Numerical and experimental investigation of the cold expansion process with split sleeve in titanium alloy TC4, *International Journal of Fatigue*; Vol. 77, pp. 78–85, 2015.
- [13] W.Guo; Elastic-plastic analysis of a finite sheet with a cold-worked hole, *Engineering. Fracture Mechanics*, Vol.