



بررسی رفتار خستگی سایشی در ورق‌های سوراخ‌دار آلومینیوم - ۲۰۲۴ تا ۳ تقویت‌شده با روش انبساط سرد

تاج بخش نوید چاخرو، پویا شهریاری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۲-۲۹
بازنگری: ۱۳۹۷-۰۷-۰۸
پذیرش: ۱۳۹۷-۰۸-۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷-۱۰-۲۵

کلمات کلیدی:

خستگی سایشی
انبساط سرد
روش المان محدود
نیروی اصطکاک
اتصالات پیچ و مهره

خلاصه: ورق‌های دارای انبساط سرد به صورت گسترده در اتصالات پیچ و مهره که تحت نیروی پیش‌بار می‌باشند، بکار می‌روند. مطالعات گذشته در مورد تاثیر انبساط سرد و نیروی پیش‌بار بر روی رفتار خستگی در اتصالات پیچ و مهره نشان داده‌اند که میزان درصد انبساط سرد به صورت قابل توجهی بر روی رفتار خستگی اتصالات تاثیرگذار بوده و احتمال وقوع خستگی سایشی را افزایش می‌دهد. برای درک بهتر این پدیده لازم است تا اطلاع دقیق‌تری در مورد تاثیر انبساط سرد بر روی تغییرات نیروی اصطکاک در طول بارگذاری خستگی سایشی و تاثیر آن بر روی توزیع تنش در نواحی اطراف محل تمرکز تنش بدست آورد. بدین منظور در این مقاله، با طراحی دستگاه مناسب، شرایط بارگذاری خستگی سایشی بر روی ورق‌های سوراخ‌دار ایجاد شده و نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت شرایط بارگذاری مختلف قرار گرفته‌اند. همچنین از شبیه‌سازی عددی به منظور تخمین توزیع تنش‌های پسماند ناشی از انبساط سرد و بررسی تاثیر آن بر روی رفتار خستگی سایشی استفاده شده است. جهت مقایسه مقاومت خستگی سایشی در نمونه‌های مختلف از پارامتر اسمیت واتسون تا پر استفاده شده است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند که انجام انبساط سرد تاثیر تمرکز تنش را در نواحی نزدیک به سوراخ کاهش می‌دهد. این در حالی است که در نواحی دورتر از سوراخ به دلیل ایجاد تنش‌های پسماند کششی احتمال وقوع خستگی سایشی را افزایش می‌دهد.

۱- مقدمه

آسیب ناشی از خستگی سایشی یکی از مهم‌ترین عوامل واماندگی در قطعات مکانیکی می‌باشد. این نوع خستگی زمانی اتفاق می‌افتد که دو سطح با نیروی عمودی به همدیگر فشرده شوند و مابین سطوح حرکت عرضی کم دامنه تکرار شونده وجود داشته باشد. شناخت پدیده خستگی سایشی مستلزم شناخت پدیده‌های خستگی، مکانیک تماس، دانش مواد، مکانیک شکست و تاثیر متقابل این پدیده‌ها بر همدیگر می‌باشد. خستگی سایشی تاثیر مخربی روی عمر قطعات دارد. در اثر این پدیده عمر قطعه کاهش محسوسی پیدا می‌کند که این کاهش عمر می‌تواند از ۵۰٪ تا ۹۰٪ عمر قطعه را شامل شود [۱]. بطور مستقیم یا غیر مستقیم، آسیب در خستگی سایشی به عوامل متعددی بستگی دارد [۲]. از جمله این عوامل می‌توان به نیروی فشاری بین سطوح، دامنه جابجایی نسبی، دما، سختی سطوح، ضریب اصطکاک و غیره اشاره کرد. تحقیقات مختلفی برای بررسی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: p.shahriari@tabrizu.ac.ir

تاثیر هریک از این عوامل بر روی خستگی سایشی توسط محققان مختلف انجام شده که نتایج بدست آمده از آن‌ها برای طراحی قطعات مکانیکی مورد استفاده قرار گرفته است [۳].

آسیب خستگی سایشی بر روی قطعات مختلفی مانند پره‌های توربین، چرخ و محور قطار و اتصالات پیچی و پرچی اتفاق می‌افتد [۴-۶]. اتصالات مکانیکی جداشدنی که شامل پرچ‌ها، پیچ‌ها و پین‌ها می‌شوند، به صورت گسترده در صنایع مختلف به ویژه در سازه‌های هوایی و فضایی کاربرد دارند. یکی از نقاط ضعف اتصالات پیچی ایجاد سوراخ در قطعات اتصالی است که باعث تمرکز تنش موضعی در اطراف سوراخ و تضعیف اتصال می‌گردد. بنابراین 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 و روش‌های متفاوتی برای تقویت اتصالات مکانیکی پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به روش انبساط سرد [۷]، اعمال نیروی پیش‌بار [۸] و انطباق تداخلی [۹] اشاره کرد.

صافی سطح یکسان، شرایط هندسی و بارگذاری مشابه برای نمونه‌ها استفاده شده است. همچنین از شبیه‌سازی المان محدود برای توجیه مشاهدات تجربی استفاده شده است. بدین منظور تمامی مراحل مربوط به عملیات انبساط سرد و تست‌های خستگی سایشی شبیه‌سازی شده و با استخراج میدان پیش‌تنش و تنش اطراف سوراخ تحت بارگذاری متناوب، محل شروع ترک مورد پیش‌بینی قرار می‌گیرد.

۲- تست‌های آزمایشگاهی

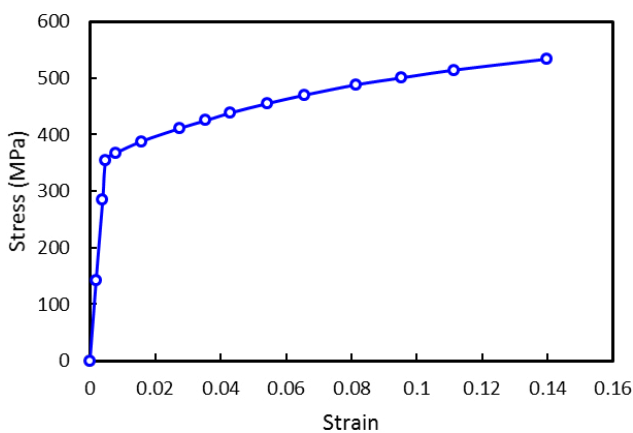
۲-۱- نمونه‌های آزمایشی و عملیات انبساط سرد

در این بخش مبانی و جزئیات مربوط به نحوه انجام آزمایش‌های خستگی سایشی بر روی نمونه‌های دارای انبساط سرد شرح داده می‌شوند. هدف از انجام این آزمایش‌ها، بررسی عمر خستگی نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت شرایط خستگی سایشی و تعیین نحوه تغییر نیروی اصطکاک در طول تست‌ها می‌باشد. نمونه‌های مورد مطالعه از جنس آلایژ آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ می‌باشند. علت انتخاب این آلایژ کاربرد وسیع آن در صنایع هوافضا به دلیل برخورداری از دو ویژگی نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب در برابر خوردگی است. این آلایژ به شکل ورق نورد سرد شده با ضخامت ۳/۲ میلی‌متر تهیه شده است. به هنگام عملیات نورد، دانه‌ها در راستای نورد افزایش طول می‌دهند که باعث غیر ایزوتروپ شدن خواص مکانیکی ماده به ویژه چقرمگی شکست و استحکام خستگی می‌شود. برای تعیین خواص مکانیکی این آلایژ، آزمون کشش ساده بر روی نمونه‌ای که برش طولی آن در راستای نورد انتخاب شده، انجام شده است. مشخصات مکانیکی

انبساط سرد یکی از معروف‌ترین و متداولترین روش‌ها برای بهبود عمر خستگی اتصال می‌باشد. 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 تنش کششی در اطراف سوراخ گردیده و از باز شدن نوک ترک 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 [۱۰].

در هنگام مونتاژ کردن اتصال پیچ و مهره، یک گشتاور سفت کننده به مهره اعمال می‌شود که در اثر اعمال این گشتاور، پیچ تحت کشش قرار گرفته و قطعات اتصال تحت تاثیر نیروی فشاری واقع می‌شوند. وجود این نیروی پیش‌بار باعث می‌شود تا قسمتی از نیروی اعمالی به اتصال توسط نیروی اصطکاک بین صفحات تحمل شده و از شدت تنش در اطراف سوراخ کاسته شود. در نتیجه این امر عمر خستگی اتصال بهبود پیدا می‌کند. از طرف دیگر وجود نیروی فشاری مابین سطوح اتصال، باعث ایجاد پدیده خستگی سایشی در محل اتصال می‌شود که می‌تواند اثر مخرب قابل توجهی در عمر اتصال داشته باشد [۱۱].

مطالعات انجام شده نشان می‌دهند که هر یک از دو روش عملیات انبساط سرد و اعمال نیروی پیش‌بار به صورت جداگانه تاثیر مطلوبی روی افزایش عمر خستگی دارند. اما مطالعه انجام شده توسط شکوری و نوید [۱۲] برای حالت ترکیبی عملیات انبساط سرد و نیروی پیش‌بار نشان می‌دهد که وقتی درصد انبساط سرد بالا با نیروی پیش‌بار بالا ترکیب می‌شود، پدیده خستگی سایشی در قطعه رخ داده و عمر قطعه به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. نتایج غیرمنتظره این تحقیق لزوم بررسی بیشتر تاثیر انبساط سرد را بر روی رفتار خستگی سایشی در اتصالات دو لبه برشی نمایان می‌سازد. بنابراین تحقیق حاضر به بررسی رفتار خستگی ورق‌های سوراخ‌دار دارای انبساط سرد تحت تست‌های خستگی سایشی می‌پردازد. بدین منظور دستگاه تست خستگی سایشی طراحی و ساخته شده است. این دستگاه امکان اندازه‌گیری تغییرات نیروی اصطکاک را به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای تاثیرگذار بر رفتار خستگی سایشی در طول تست فراهم می‌سازد. به منظور دستیابی به نتایج قابل قبول و انجام مقایسه میان رفتار خستگی در نمونه‌های مختلف با درصد انبساط سرد متفاوت، از



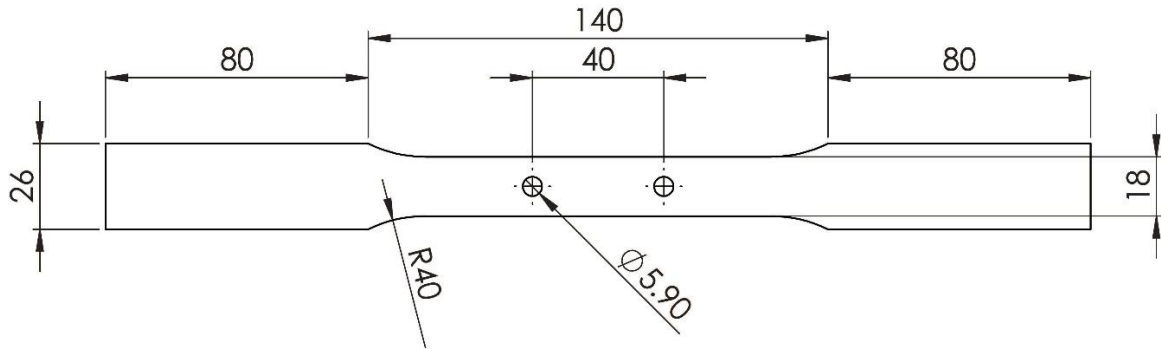
شکل ۱: نمودار تنش- کرنش آلایژ آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳

Fig. 1: Monotonic stress-strain diagram of Al-alloy 2024-T3

جدول ۱: مشخصات مکانیکی آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴-تی ۳

Table 1: Mechanical properties of the Al-alloy 2024-T3

ضریب پواسون	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	آلیاژ
۰/۳۳	۷۱/۵	۵۳۵	۳۷۵	آلومینیم ۲۰۲۴-تی ۳



شکل ۲: ابعاد نمونه‌های ساخته شده از آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴-تی ۳ (ابعاد بر حسب میلی‌متر است)

Fig. 2: Dimensions of Al-alloy 2024-T3 fretting fatigue test specimens (mm)

سمباده در حدود ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ میکرومتر می‌باشد. برای انجام عملیات سرد از روش پین مخروطی استفاده شده است که ابعاد پین‌های استفاده شده در شکل ۳ نشان داده شده است. عملیات انبساط سرد با استفاده از دستگاه کشش و فشار امسلر^۱ انجام شده است. برای انجام عملیات انبساط سرد، پین با استفاده از یک فیکسچر مخصوص به داخل سوراخ هدایت شده و از طرف دیگر نمونه خارج می‌گردد (شکل ۴). برای کاستن از اصطکاک مابین سطح پین و دیواره سوراخ و جلوگیری از خراش برداشتن دیواره سوراخ، پین به گریس آغشته شده است. با توجه به اندازه قطر سوراخ و پین‌ها می‌توان درصد انبساط سرد را در نمونه‌ها با استفاده از رابطه (۱) محاسبه نمود:

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

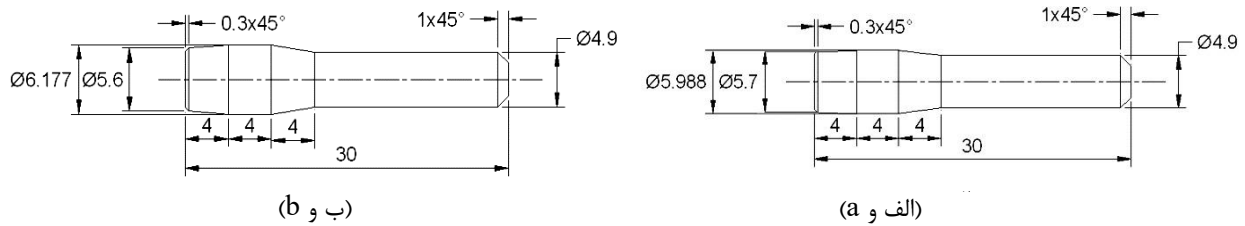
در این رابطه D قطر پین و d قطر سوراخ می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) و ابعاد پین‌ها مقادیر انتخاب شده برای انبساط سرد ۱/۵ و ۴/۷ درصد می‌باشند.

به دست آمده و نمودار تنش- کرنش مربوط به آن به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۱ ارائه شده است.

ابعاد نمونه‌های آزمایشی سوراخ‌دار در شکل ۲ ارائه شده است. برش این نمونه‌ها طوری انجام شده که راستای طولی آن‌ها با راستای نورد ورق موازی باشد. بر روی نمونه‌ها دو سوراخ به قطر ۵/۹ میلی‌متر و با فاصله مرکزی ۲۰ میلی‌متر از هم ایجاد شده است. فاصله میان سوراخ‌ها به گونه‌ای انتخاب شده است که انجام انبساط سرد بر روی یک سوراخ بر روی تنش‌های پسماند در سوراخ دیگر تاثیرگذار نباشد. ایجاد دو سوراخ بر روی نمونه‌ها به منظور ایجاد تقارن در نمونه به هنگام اندازه‌گیری ضریب اصطکاک می‌باشد.

بدلیل حساسیت بالای تست‌های خستگی سایشی به کیفیت صافی سطح [۱۳]، سطح نمونه‌ها با استفاده از کاغذهای سمباده با درجه‌های ۱۸۰، ۴۰۰، ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۰۰۰ به ترتیب سمباده زده شده است به طوری که آخرین مرحله سمباده‌زنی در راستای طولی نمونه‌ها انجام شده است. صافی سطح نمونه‌ها به روش مکانیکی بر روی خطی به طول ۵/۶ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که صافی سطح نمونه‌ها در راستای خطوط سمباده در حدود ۰/۲۶ تا ۰/۳۰ میکرومتر بوده و در جهت عمود بر خطوط

1 Amsler



شکل ۳: (الف) پین استفاده شده برای درصد انبساط سرد ۱/۵٪ و (ب) پین استفاده شده برای درصد انبساط سرد ۴/۷٪ (ابعاد بر حسب میلی‌متر)
Fig. 3: Dimensions of the pins for a) 1.5% cold expansion & b) 4.7% cold expansion



شکل ۴: عملیات انبساط سرد توسط پین بر روی فیکسچر مخصوص

Fig. 4: Cold expansion process on a specimen

نیروی عمودی ایجاد شده و در دو طرف دیگر قاب کرنش‌سنج‌هایی برای اندازه‌گیری مقدار نیروی عمودی وارد بر قطعه وصل می‌شود. این کرنش‌سنج‌ها جهت تعیین مقدار بار عمودی وارد بر قطعه کالیبره می‌شوند.

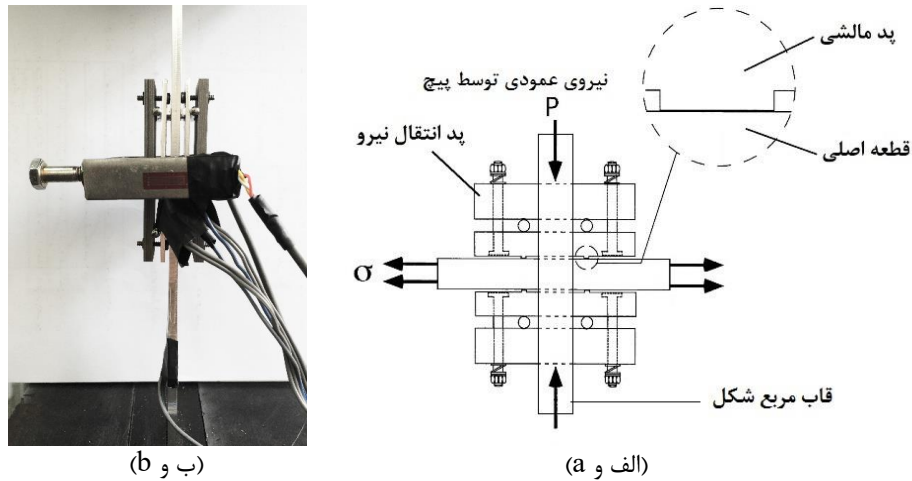
قطعه اصلی تحت آزمایش به صورت ورق مسطح بوده و مابین قاب مربعی قرار می‌گیرد و در دو سوی آن پدهای تماسی^۳ توسط پیچ‌های اعمال نیرو بر روی قطعه فشرده می‌شوند. این پدها دارای دو پایه و به شکل پل می‌باشند و در دو نقطه با قطعه اصلی تماس می‌یابند. با توجه به شکل پدهای تماسی در صورتی که این پدها به طور مستقیم تحت فشار پیچ‌ها قرار گیرند دچار خمش زیادی می‌شوند

۲-۲- تست‌های خستگی سایشی

برای انجام تست‌های خستگی سایشی و اندازه‌گیری نیروی اصطکاک فیکسچر مخصوصی مطابق استاندارد آ.اس.تی.ام ۲۷۸۹-۱۰^۱ [۱۴] طراحی شده است که شامل یک قاب نگهدارنده مربع شکل، پدهای تماسی، پدهای انتقال نیرو و پیچ‌های اعمال نیرو می‌باشد. شکل ۵ نمای کلی از این فیکسچر را ارائه می‌دهد.

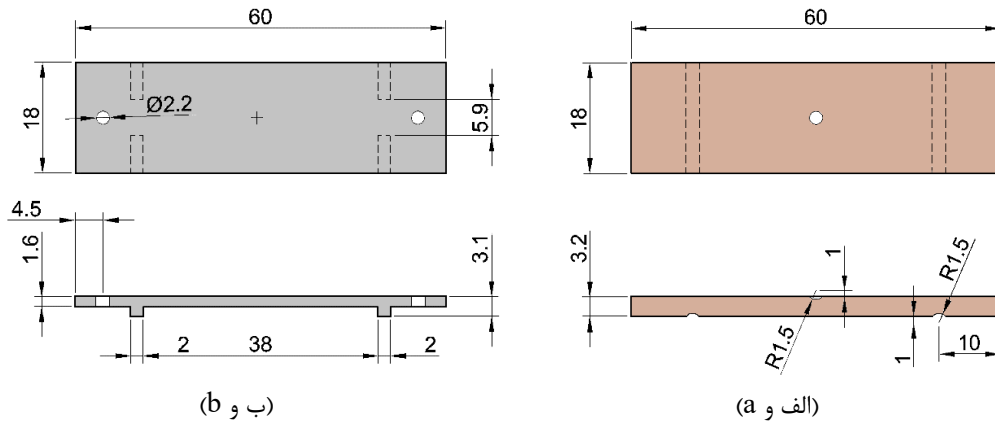
قاب مربع شکل به عنوان نگهدارنده اصلی قسمت‌های مختلف فیکسچر می‌باشد. جنس قاب از فولاد سی.کا ۴۵^۲ تعیین گردیده است تا در اثر اعمال نیروهای فشاری دچار تغییر شکل پلاستیک نگردد. در دو سوی این قاب سوراخ‌هایی برای قرار گرفتن پیچ‌های اعمال

- 1 ASTM 2789-10
- 2 CK45



شکل ۵: نمای کلی از فیکسچر اندازه‌گیری نیروی اصطکاک و (ب) فیکسچر ساخته شده

Fig. 5: Schematic diagram of the fretting fatigue test fixture (Right) and fabricated fretting fatigue test fixture (Left)



شکل ۶: ابعاد الف) پدهای تماسی (ب) پدهای فشاری، تمامی ابعاد بر حسب میلی‌متر است.

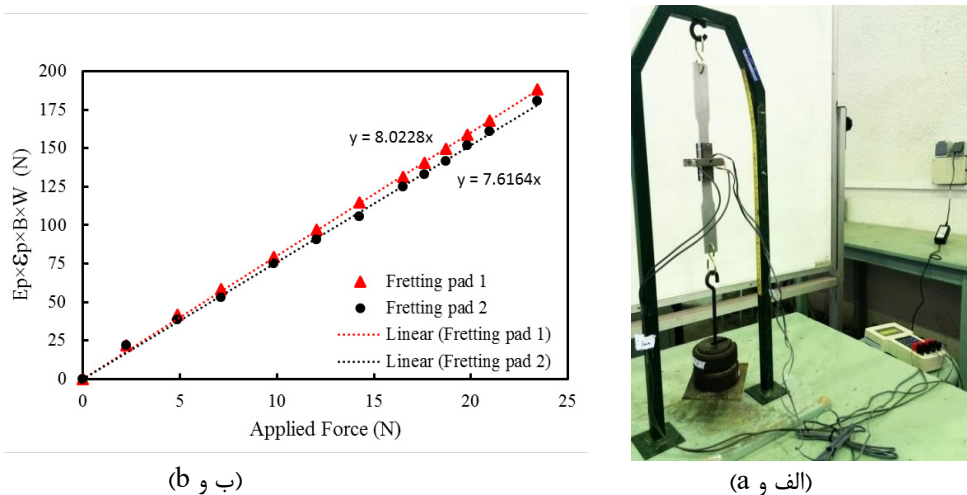
Fig. 6: Dimensions of the fretting pads (Right) and loading pads (Left) in millimeter

نیرو ساچمه‌های استوانه‌ای شکل بکار رفته است تا اثر اصطکاک میان این دو را در حد امکان کاهش دهد. این ساچمه‌ها دقیقاً در بالای پای پدهای تماسی و در وسط پایه بکار رفته‌اند تا نیروی فشاری (عمودی) انتقالی دقیقاً بر مرکز پایه پد وارد شود. همچنین مابین پدهای انتقال نیرو و پیچ تنظیم فشار از ساچمه کروی شکل استفاده شده است تا نحوه اعمال بار بر روی پد به صورت نقطه‌ای باشد.

برای اندازه‌گیری نیروی اصطکاک مابین پدهای تماسی و قطعه اصلی، از کرنش‌سنج‌هایی استفاده می‌شود که به سطح پایینی پدهای تماسی وصل شده‌اند. این کرنش‌سنج‌ها کرنش را بر روی مرکز سطح پایینی پد نشان می‌دهند که در اثر نیروی اصطکاک وارد بر پدها بر روی آن‌ها ایجاد شده است. در این حالت رابطه بین تغییرات

که باعث ایجاد خطا در انجام آزمایش می‌شود. به منظور جلوگیری از ایجاد خمش از پدهای انتقال نیرو^۱ بر روی پدهای تماس استفاده می‌شود تا نیروی فشاری بصورت غیرمستقیم و دقیقاً از روی پایه پدهای تماسی بر آن‌ها اعمال شود. پدهای تماسی از ورق آلومینیوم ۲۰۲۴-تی ۳ بکار رفته برای تولید نمونه‌های سوراخ‌دار و در راستای نورد ورق‌ها بریده شده‌اند. همچنین پایه پدها توسط سنباده‌های بکار رفته برای نمونه‌های سوراخ‌دار و به همان ترتیب سنباده زده شده‌اند. پدهای انتقال نیرو نیز از جنس فولاد سی.کا ۴۵ بوده و به گونه‌ای طراحی شده‌اند که در اثر اعمال نیروی فشاری و خمش دچار تغییر شکل پلاستیک نشوند. شکل ۶ ابعاد نهایی مربوط به پدهای تماسی و پدهای فشاری را نشان می‌دهد. مابین پدهای تماسی و پدهای انتقال

1 Loading Pads



شکل ۷: نحوه بدست آوردن فاکتور خمش C_B (ب) نمودار کالیبراسیون پدهای تماسی

Fig. 7: Bending factor evaluation method (Right) and calibration chart of the fretting pads (Left)

جدول ۲: خلاصه نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی

Table 2: Summary of the test results

Q_{max}/P صفحه خروجی	Q_{max}/P صفحه ورودی	نیروی اصطکاکی پایدار شده بر صفحه خروج Q_{max} (N)	نیروی اصطکاکی پایدار شده بر صفحه ورودی Q_{max}^1	عمر N_f (Cycles)	نیروی عمودی P (N)	بیشینه تنش ریموت (MPa)	درصد انبساط سرد
۰/۱۸۱	۰/۱۸۴	۷۲/۴	۷۳/۶	۲۴۰۰۰	۴۰۰	۱۰۴	۰
۰/۱۸۲	۰/۱۸۰	۷۲/۹	۷۲/۲	۲۶۳۶۰۰	۴۰۰	۱۰۴	۰
۰/۱۷۵	۰/۱۷۷	۷۰/۰	۷۰/۸	۴۱۵۰۰۰	۴۰۰	۱۰۴	۱/۵
۰/۱۵۱	۰/۱۹۰	۶۰/۴	۷۶/۰	۲۳۹۳۰۰	۴۰۰	۱۰۴	۴/۷
۰/۳۹۱	۰/۳۹۱	۱۱۶/۴	۱۱۶/۴	۴۱۲۰۰	۴۰۰	۱۷۰	۰
۰/۳۸۷	۰/۳۸۲	۱۱۴/۸	۱۱۲/۸	۴۹۹۰۰	۴۰۰	۱۷۰	۱/۵
۰/۳۴۶	۰/۳۹۸	۹۸/۴	۱۱۹/۲	۳۹۵۰۰	۴۰۰	۱۷۰	۴/۷

تقسیم شده و به جای قطعه اصلی مابین پدهای تماس قرار می‌گیرد. بطوری که هر کدام از پایه‌های پد بر روی یک قسمت قرار گرفته و آن دو قسمت را در کنار هم نگه می‌دارند. با فشردن پدها بر روی قطعه تنها نیروی نگه‌دارنده دو قسمت جدا شده، نیروی اصطکاک ناشی از پدها می‌باشد. حال اگر یک طرف قطعه بر روی دستگاه کشش ثابت نگه داشته شود و از طرف دیگر قطعه وزنه‌هایی آویزان گردد، می‌توان گفت تا زمانی که قطعه مابین پدها نلغزد و دو قسمت قطعه از هم جدا نشوند، نیروی اصطکاک میان پدها و قطعه برابر نیروی وزن وارد شده می‌باشد. در این حالت می‌توان با اندازه‌گیری کرنش پدها و در دست داشتن مشخصات فیزیکی پدها، فاکتور خمش را با توجه به رابطه (۲) محاسبه نمود. میانگین فاکتور خمش به دست

کرنش‌های اندازه‌گیری شده بر روی پدها و تغییرات نیروی اصطکاک مطابق رابطه (۲) برابر است با [۱۵]:

$$E_p \times \Delta \varepsilon_p = \frac{\Delta F_t}{B \times W} \times C_B \quad (2)$$

در این معادله ΔF_t تغییرات نیروی اصطکاک و $\Delta \varepsilon_p$ تغییرات کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج، E_p مدول الاستیسیته پد، B ضخامت، W عرض پد و C_B فاکتور خمش می‌باشند. C_B از خمش پد در اثر نیروی اصطکاک ناشی شده و از کالیبراسیون استاتیکی فیکسچر به روش دو نیم کردن قطعه بدست می‌آید [۱۵]. بدین صورت که ابتدا یکی از قطعات مورد آزمایش از وسط به دو قسمت

بارگذاری مختلف قرار گرفته و نتایج بدست آمده برای تغییرات نیروی اصطکاک و عمر قطعات ثبت می‌شوند. برای سادگی در تحلیل نتایج، نمونه‌ها به صورت ۰٪، ۱/۵٪، ۴/۷٪ انبساط سرد نام‌گذاری می‌شوند. لازم به ذکر است که به منظور اطمینان از صحت نتایج، علاوه بر انجام آزمایشات اولیه به منظور رفع ایرادات و خطاهای محتمل، تست خستگی سایشی برای یکی از نمونه‌ها (۰٪ انبساط سرد تحت بار ۶ کیلو نیوتن) تکرار شده است که نتیجه آن به همراه نتایج بدست آمده از سایر تست‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه نتیجه حاصل از تکرار آزمایش نشان‌دهنده خطای ۹/۸٪ برای عمر خستگی و خطای پایین‌تر از ۲٪ برای نیروی اصطکاک می‌باشد (جدول ۲).

۴-۲- نتایج تست‌های آزمایشگاهی

۴-۲-۱- عمر خستگی و محل شکست نمونه‌ها

خلاصه نتایج بدست آمده برای عمر خستگی نمونه‌های مختلف و نوع واماندگی آن‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. در جدول ارائه شده دقت نیروی‌های اندازه‌گیری شده برابر ۰/۱ نیوتن و دقت سیکل‌های شمارش شده ۱۰۰ می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان مشاهده نمود که نمونه‌های دارای انبساط سرد ۱/۵٪ در حالت کلی دارای عمر بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها در شرایط بارگذاری یکسان می‌باشد. همچنین با مقایسه عمر نمونه‌های مختلف می‌توان مشاهده نمود که درصد انبساط سرد بالاتر نه تنها عمر نمونه‌ها را افزایش نداده است بلکه باعث کاهش عمر خستگی نیز گردیده است. همچنین با توجه به جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود که بسته به اندازه نیروی متناوب اعمالی بر روی نمونه‌ها نوع مکانیزم واماندگی آن‌ها متفاوت می‌باشد. در حالتی که میزان بار اعمال شده ۱۰ کیلونیوتن باشد نوع واماندگی تمامی نمونه‌ها خستگی ساده می‌باشد. این در حالی است که با کاهش مقدار بار اعمالی به ۶ کیلونیوتن مکانیزم واماندگی از خستگی ساده به خستگی سایشی در نمونه‌های دارای انبساط سرد تبدیل شده است. این مورد نشان می‌دهد که انجام انبساط سرد باعث فعال شدن مکانیزم خستگی سایشی می‌شود.

۴-۲-۲- تغییرات ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک از تقسیم نیروی اصطکاک بیشینه در طول یک دوره بارگذاری بر نیروی عمودی وارد بر جسم بدست می‌آید. مقدار



شکل ۸: دستگاه تست خستگی دارتک

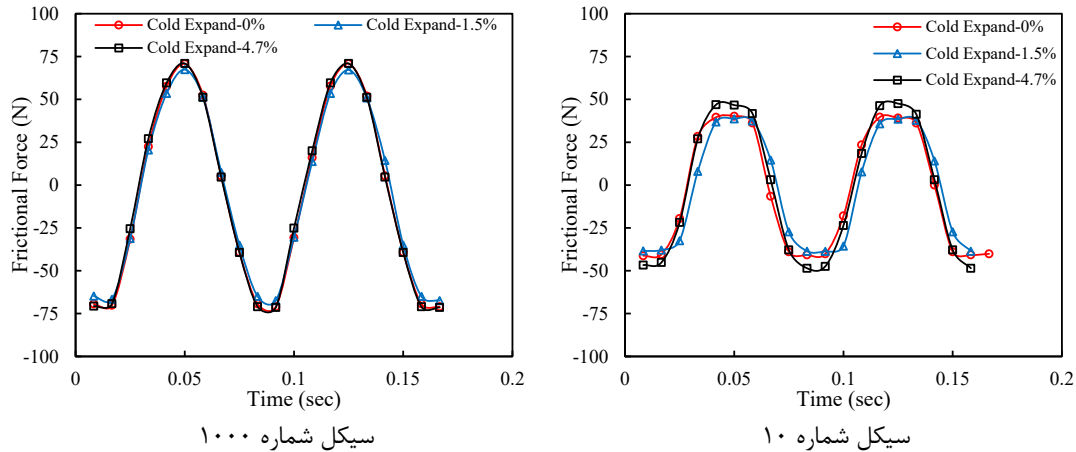
Fig.8: Dartec fatigue testing machine

آمده برای پدها برابر ۷/۸۲ می‌باشد که از آن برای محاسبه نیروی اصطکاک در طول تست‌های خستگی سایشی استفاده خواهد شد. شکل ۷ مرحله کالیبراسیون پدهای تماسی به روش دو نیم کردن و نمودارهای بدست آمده برای تعیین فاکتور خمش را نشان می‌دهند.

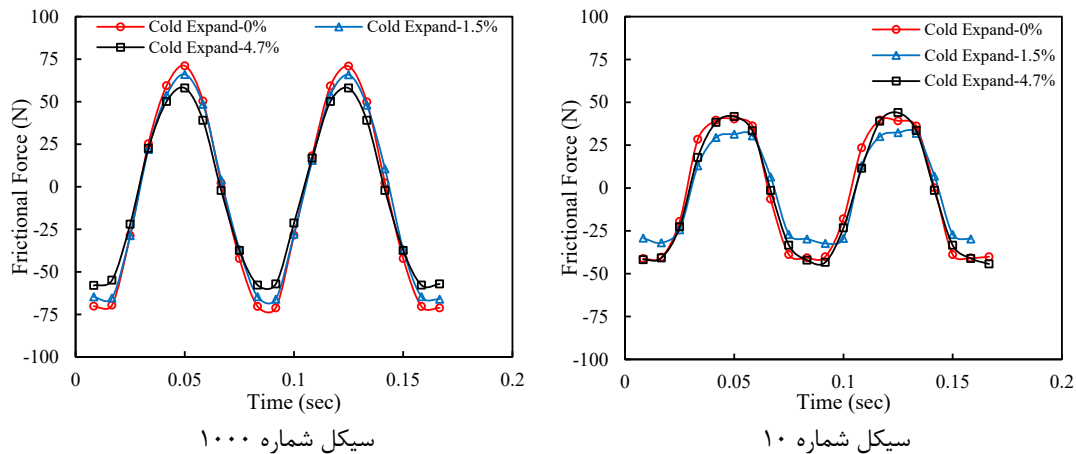
۴-۲-۳- انجام تست‌های خستگی

برای انجام تست‌های خستگی از دستگاه هیدرولیکی دارتک^۱ با ظرفیت ۵۰ کیلونیوتن استفاده شده است (شکل ۸). بارگذاری اعمالی از نوع سینوسی با نسبت بار ۰/۱ می‌باشد. تست‌ها در دمای اتاق با فرکانس ۱۲ هرتز انجام شده‌اند. کرنش‌سنج‌های بکار رفته برای اندازه‌گیری نیروی اصطکاک از نوع مناسب برای قطعات آلومینیومی بوده و با دقت 10^{-6} (mm/mm) قابلیت اندازه‌گیری کرنش تا (mm/mm) ۰/۰۵ را دارا می‌باشند. لازم به ذکر است که داده‌برداری از کرنش‌سنج‌ها به گونه‌ای انجام شده است که تعداد نقاط داده در هر سیکل ۱۰ نقطه باشد. دو نیرو با مقدار ماکزیمم ۶ کیلونیوتن و ۱۰ کیلونیوتن بر قطعات با درصد انبساط سردهای مختلف اعمال شده است. همچنین نیروی عمودی ۴۰۰ نیوتن بر روی هر یک از پایه‌های پد با سفت کردن پیچ تنظیم نیرو اعمال می‌گردد. بنابراین سه گروه نمونه با درصد انبساط سردهای ۰٪ و ۱/۵٪ و ۴/۷٪ تحت دو شرایط

1 Dartec



(الف و ا) صفحات ورودی نمونه‌ها



(ب و ب) صفحات خروجی نمونه‌ها

شکل ۹: موج سینوسی نیروی اصطکاک در سیکل‌های ۱۰ و ۱۰۰۰ بر روی الف) صفحات ورودی و ب) صفحات خروجی نمونه‌های مختلف تحت بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و بار متناوب ۶ کیلونیوتن.

Fig. 9: Sinusoidal wave of frictional force in cycles of 10 and 1000 on the a) Entrance & b) Exit plane of different specimens at 400 N normal load and 6 kN axial load

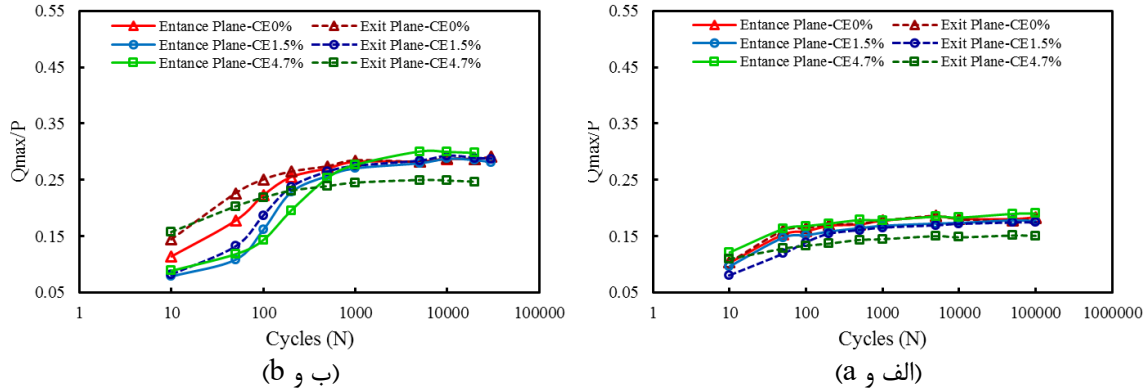
همچنین با توجه به جدول ۲ می‌توان مشاهده نمود که در یک نیروی عمودی مشخص با افزایش بار محوری (تنش بالک) مقدار ضریب اصطکاک پایدار شده افزایش می‌یابد. زیرا هرچه تنش محوری افزایش می‌یابد، لغزش نسبی میان سطوح افزایش یافته و آسیب ناشی از ساییدگی و حجم آن افزایش پیدا می‌کند. در نتیجه میزان ناهمواری‌های سطوح بیشتر شده و ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود.

۳- شبیه‌سازی عددی

۳-۱- مدل المان محدود

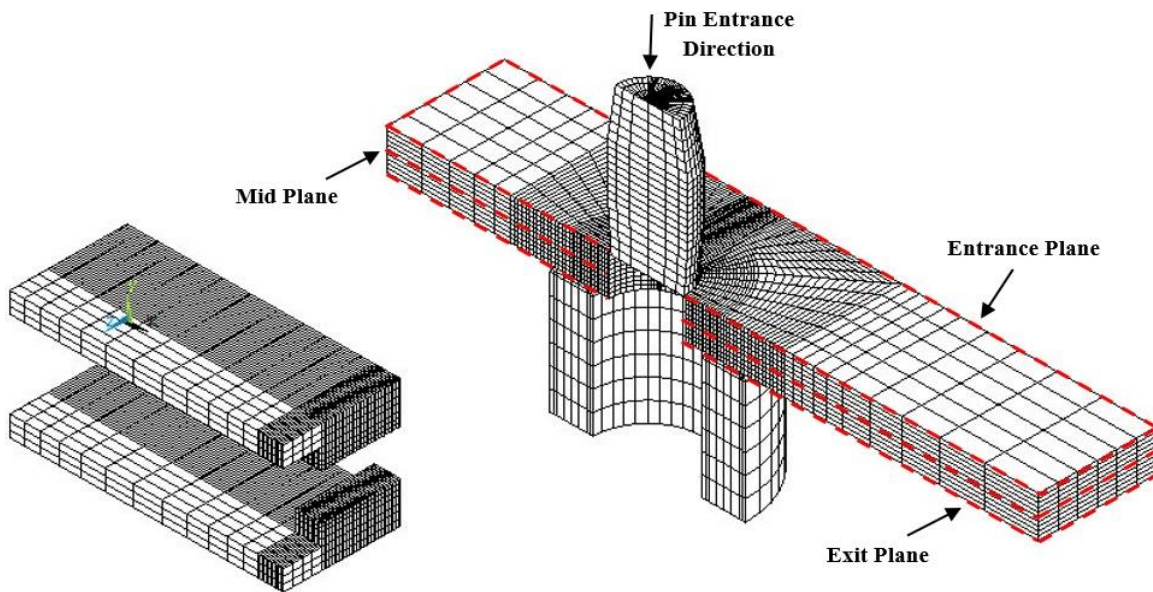
در این بخش شبیه‌سازی عددی انبساط سرد، اعمال فشاری بر روی سطح و بارگذاری متناوب شرح داده می‌شود. شبیه‌سازی عددی

نیروی اصطکاک در طول یک دوره بارگذاری به صورت متناوب تغییر می‌کند (شکل ۹). همچنین ضریب اصطکاک در طول تست‌ها از یک مقدار معین شروع شده و در طی چند سیکل (حدود ۱۰۰۰ سیکل) به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود (شکل ۱۰). مقدار ضریب اصطکاک در حالت پایدار بر روی صفحات ورودی و خروجی تمامی نمونه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به این جدول می‌توان مشاهده نمود که در یک بارگذاری مشخص میزان ضریب اصطکاک بر روی صفحه خروجی نمونه $4\%CE$ از صفحات ورودی و خروجی سایر نمونه‌ها کمتر است که علت آن به تغییر شکل ناشی از انبساط سرد بر روی صفحه خروجی بر می‌گردد. توضیحات بیشتر در این زمینه در مرجع [۱۶] ارائه شده است.



شکل ۱۰: تغییرات ضریب اصطکاک در طول تست بر روی صفحات ورودی و خروجی در نمونه‌های مختلف تحت الف) بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و بار متناوب ۶ کیلو نیوتن و ب) بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و بار متناوب ۱۰ کیلو نیوتن

Fig. 10: Variation of the friction coefficient during the tests on the entrance and exit plane of the different specimens subjected to a) 400 N normal load and 6 kN axial load, b) 400 N normal load and 10 kN axial load



شکل ۱۱: مدل المان محدود

Fig. 11: Meshed finite element model

پدهای تماسی در مدل‌سازی هندسی شبیه‌سازی شده است. برای شبیه‌سازی رفتار آلیاژ آلومینیم ۲۰۲۴-تی^۳، مدل خطی الاستیک^۲ و پلاستیک با سخت‌شوندگی سینماتیک چند خطی^۳ استفاده شده است. مدل سینماتیک چند خطی توانایی در نظر گرفتن اثرات پوشینگر^۴ را دارد. به این منظور نمودار تنش- کرنش بدست آمده از تست کشش (شکل ۱) و داده‌های جدول ۱ در نظر گرفته شده است. پین‌های مورد استفاده در مرحله انبساط سرد و بوش نگهدارنده از

به منظور تخمین توزیع تنش‌های پسماند ناشی از انبساط سرد، بررسی تداخل میدان تنش‌های پسماند با بارگذاری متناوب و هم چنین بررسی رفتار خستگی معمولی و خستگی سایشی و پیش‌بینی محل شروع ترک خستگی انجام شده است. برای این منظور از نرم افزار المان محدود انسیس^۱ استفاده شده است.

با توجه به تقارن هندسی مدل نسبت به صفحات $X-Y$ و $Y-Z$ و هم‌چنین تقارن بارگذاری، جهت صرفه‌جویی در مدت زمان تحلیل و حجم حافظه، نصف ورق، پین و بوش انبساط سرد و یک چهارم

2 Linear Elastic
3 Multi-Linear Kinematic Hardening
4 Bauschinger Effect

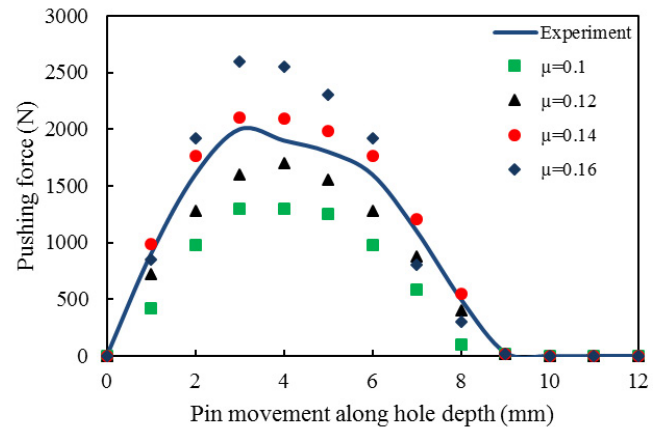
1 Ansys

از اندازه مشبندی باشند. این المان‌ها به تدریج در نزدیکی سوراخ که نرخ تغییرات تنش زیاد است، ریزتر شده است.

تحلیل المان محدود با شبیه‌سازی مرحله انبساط سرد آغاز می‌شود. برای این منظور پین به صورت هم‌مرکز با سوراخ قرار می‌گیرد به طوری که سطح آن در آستانه تماس با لبه سوراخ باشد. سپس با اعمال جابجایی به سطح بالایی، پین به تدریج به درون سوراخ هدایت می‌شود. در این مرحله مجموعه پدها در هر سه جهت مقید شده‌اند. در مرحله بعد پین و بوش از ورق دور می‌شوند. بدنبال آن مجموعه پدها با قطعه اصلی مونتاژ می‌شوند به نحوی که پدها دقیقاً در لبه سوراخ قرار می‌گیرند. سپس نیروی فشاری از روی یکی از پدها اعمال شده و قطعه میان دو پد فشرده می‌شود. در ادامه، بارگذاری متناوب در طی سه مرحله که به ترتیب عبارتند از بارگذاری با نیروی کششی، برداشتن نیروی کششی و اعمال مجدد نیروی کششی، به ورق اصلی اعمال می‌شود.

۳-۲- انتخاب ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک بین سطح پین و دیواره سوراخ در حین عملیات انبساط سرد تابع عوامل متعددی از جمله جنس قطعات، نوع روان‌کار، سرعت حرکت پین داخل سوراخ، دمای محیط، اندازه فشار بین پین و سطح سوراخ و ... است. نکته‌ای که باعث مشکل‌تر شدن تخمین ضریب اصطکاک می‌شود این است که اندازه فشار بین پین و سطح سوراخ در مدت زمان حرکت پین متغیر است و از صفر تا مقدار معینی افزایش می‌یابد و با عبور کامل پین از داخل سوراخ مقدار آن دوباره صفر می‌شود. از طرف دیگر اندازه ضریب اصطکاک تاثیر قابل ملاحظه‌ای در مقدار تنش‌های پسماند ایجاد شده در تست‌های تجربی و شبیه‌سازی عددی دارد [۱۸]. برای این منظور نیروی فشاری وارد از طرف دستگاه به پین در حین عملیات انبساط سرد ثبت شده است. سپس در مدل المان محدود با روش سعی و خطا مقادیر مختلفی برای ضریب اصطکاک بین پین و سطح سوراخ انتخاب شده است و مرحله ورود پین به داخل سوراخ شبیه‌سازی شده و نمودار تغییرات نیروی فشاری وارد بر پین محاسبه شده است. در نهایت نمودارهای بدست آمده با نمودار تجربی مقایسه شده است (شکل ۱۲). ضریب اصطکاک مربوط به نزدیک‌ترین نمودار به نمودار تجربی به عنوان بهترین تخمین انتخاب شده است. ضرایب اصطکاک بدست آمده برای



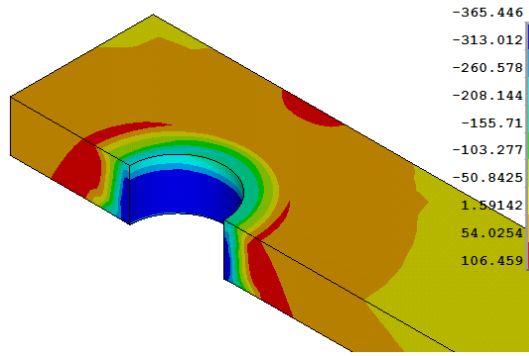
شکل ۱۲: نیروی وارد به پین در مرحله انبساط سرد به صورت تجربی و مقایسه آن با نیروی‌های بدست آمده از شبیه‌سازی عددی به ازای ضرایب اصطکاک مختلف

Fig.12: The applied force on the pin during the cold expansion process in comparison to the numerically obtained values for different friction coefficients

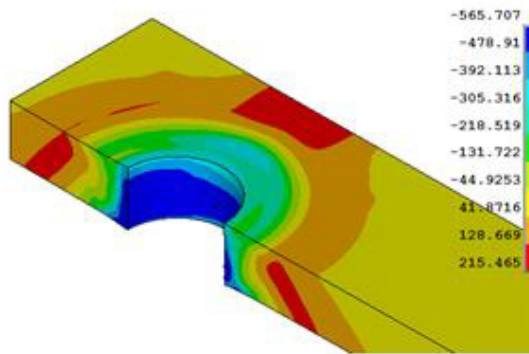
فولاد ساخته شده‌اند و در طی مراحل مختلف بارگذاری تنش‌های وارد بر این قطعات از حد الاستیک تجاوز نمی‌کند. به همین دلیل برای مدل‌سازی رفتار آن‌ها مدل الاستیک خطی، با مدول الاستیسیته ۲۰۰ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

برای مشبندی مدل از المان هشت گرهی و شش وجهی خطی سالیید^۱ ۱۸۵ استفاده شده است. این المان خطی به المان‌های مرتبه بالاتر ترجیح داده شده است زیرا در تحلیل‌های غیرخطی ضمن حفظ دقت مورد نظر، مدت زمان تحلیل را کاهش می‌دهد [۱۷]. برای مدل‌سازی تماس بین قطعات از تماس نوع سطح قابل انعطاف روی سطح قابل انعطاف استفاده شده و اصطکاک بین سطوح از نوع کولمب می‌باشد. بر این اساس از المان چهار گرهی کانتکت^۲ ۱۷۳ و تارگت^۳ ۱۷۰ که قابلیت مدل کردن تماس سطح به سطح را در حالت سه‌بعدی دارند استفاده شده است که به خوبی بر روی وجوه المان‌های حجمی هشت گرهی می‌نشینند و با آن‌ها هماهنگی خوبی دارند. استفاده از این المان‌ها مانع تداخل سطوح تماس با یکدیگر می‌شود و امکان تبادل نیرو ما بین آن‌ها را فراهم می‌آورد. شکل ۱۱ مدل نهایی المان محدود را نشان می‌دهد. المان‌ها در نواحی تماس بین پد و ورق سوراخ‌دار ریزتر شده‌اند. اندازه المان‌ها پس از چند بار کوچک شدن و تحلیل‌های متوالی طوری انتخاب شده است که نتایج نهایی مستقل

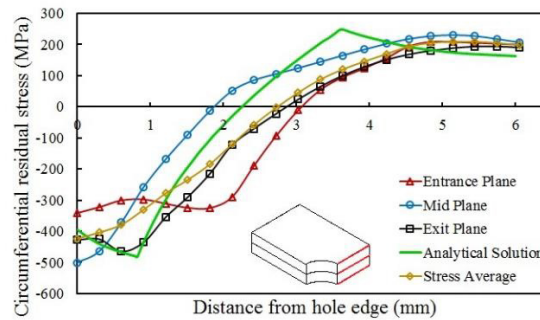
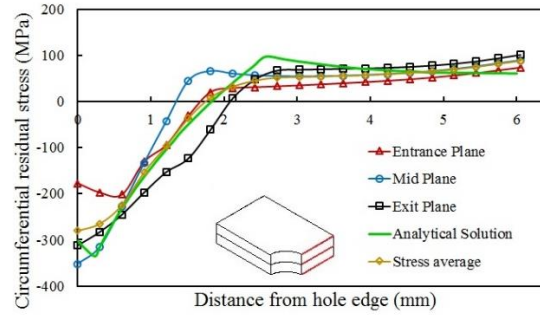
- 1 Solid 185
- 2 Contact 173
- 3 Target 170



(الف و ا)



(ب و ب)



شکل ۱۳: توزیع تنش‌های محیطی ناشی از انبساط سرد بر روی سطح مقطع خالص قطعه و کنتور تنش‌های پسماند محیطی، (الف) نمونه دارای ۱/۵ درصد انبساط سرد و (ب) نمونه دارای ۴/۷ درصد انبساط سرد (تمامی تنش‌ها بر حسب MPa می‌باشند)

Fig.13: Circumferential stress distribution after cold expansion process on the net cross section of the a) 1.5% cold expanded specimens, b) 4.7% cold expanded specimen

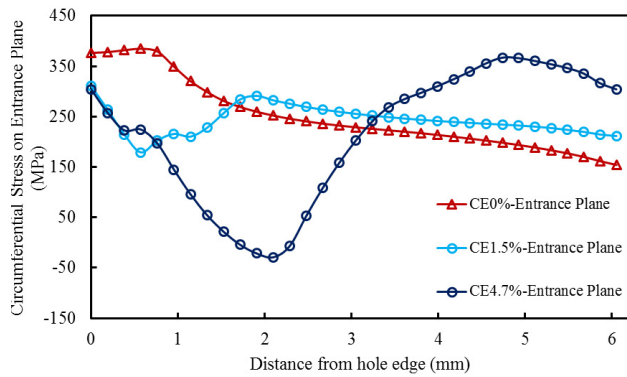
همین دلیل برای بررسی تاثیر عملیات انبساط سرد بر روی توزیع تنش‌ها، تنش‌های محیطی واقعی (تنش کوشی^۱) از مدل المان محدود محاسبه شده‌اند. این تنش‌ها در سطح مقطع خالص و در راستای عرض نمونه در سه صفحه ورودی، میانی و خروجی مشخص شده در شکل ۱۳ از نتایج شبیه‌سازی عددی استخراج شده‌اند. به منظور صحت‌گذاری نتایج المان محدود، تنش‌های پسماند محاسبه شده توسط مدل المان محدود با مدل تحلیلی ارائه شده توسط ژانگ و همکاران [۲۰] مقایسه شده است. این مدل آخرین مدل تحلیلی است که در سال ۲۰۰۵ پیشنهاد شده است. لازم به ذکر است که این مدل مانند تمامی مدل‌های تحلیلی ارائه شده محدود به حالت دوبعدی است و نمی‌تواند تغییرات تنش را در طول ضخامت قطعه محاسبه کند. برای صحت‌گذاری نتایج المان محدود، توزیع تنش‌های پسماند محیطی به روش المان محدود در سه صفحه ورودی، میانی و خروجی

درصد انبساط سرد ۱/۵٪ و درصد انبساط سرد ۴/۷٪ به ترتیب ۰/۱۶ و ۰/۱۴ می‌باشند.

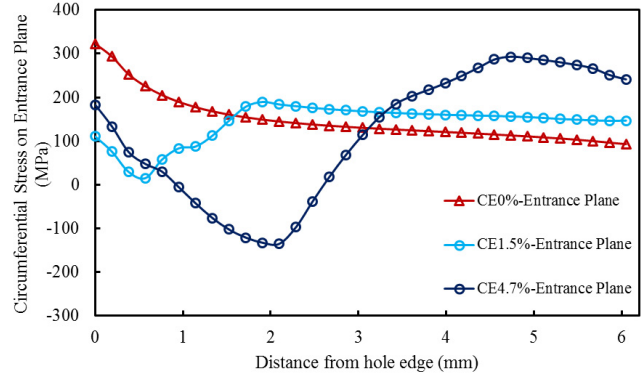
همچنین برای تعیین ضریب اصطکاک بین پدهای تماسی و ورق‌های آلومینیومی از نتایج بدست آمده از تست‌های تجربی استفاده می‌شود. ضریب اصطکاک در طول تست‌ها از یک مقدار معین شروع شده و در طی چند دوره به یک مقدار ثابت همگرا می‌شود. از آنجایی که در اکثر زمان تست مقدار ضریب اصطکاک پایدار حاکم است، لذا از این مقدار برای شبیه‌سازی استفاده شده است. مقدار ضریب اصطکاک در حالت پایدار برای نمونه‌های مختلف در جدول ۲ ارائه شده است.

۴- نتایج و بحث

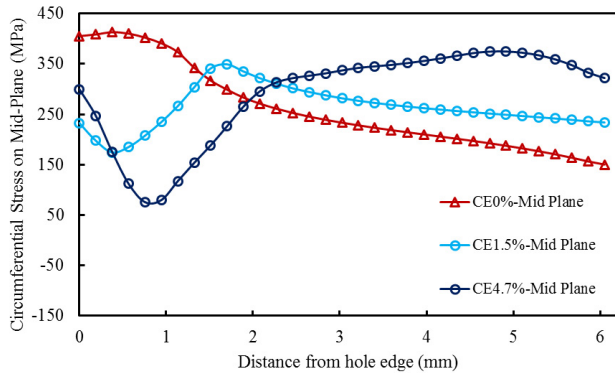
تحقیقات مختلف نشان داده است که از بین تنش‌های ایجاد شده در اطراف سوراخ (شعاعی، محیطی و عرضی)، تنش‌های محیطی موثرترین عامل در ایجاد و رشد ترک خستگی می‌باشند [۱۹]. به



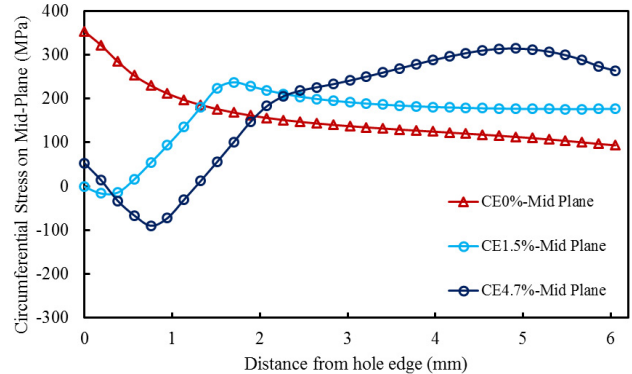
(الف و ا)



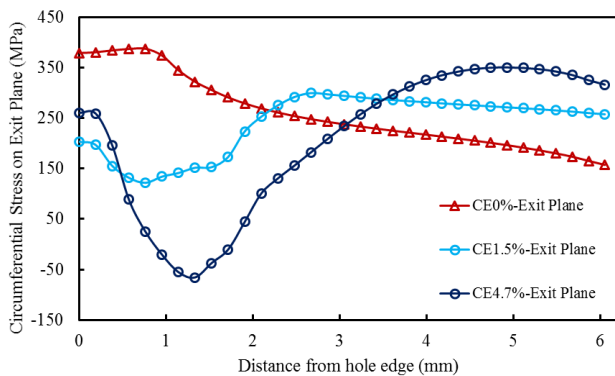
(الف و ا)



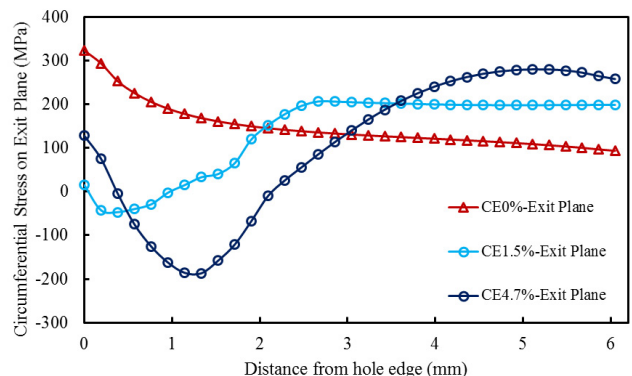
(ب و ب)



(ب و ب)



(ج و ج)



(ج و ج)

شکل ۱۵: توزیع تنش محیطی بر روی (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی نمونه‌های مختلف تحت نیروی محوری ۱۰

Fig. 15: Circumferential stress distribution on a) Entrance, b) Middle, c) Exit plane of the fretting fatigue test specimens at 10 kN axial load

شکل ۱۴: توزیع تنش محیطی بر روی (الف) صفحه ورودی (ب) صفحه میانی (ج) صفحه خروجی نمونه‌های مختلف تحت نیروی محوری ۶

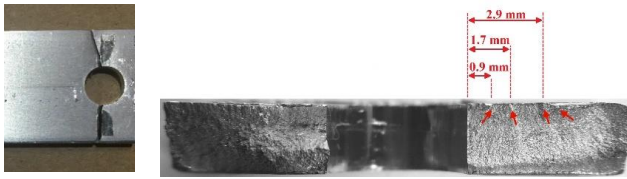
Fig. 14: Circumferential stress distribution on a) Entrance, b) Middle, c) Exit plane of the fretting fatigue test specimens at 6 kN axial load

انبساط سرد افزایش می‌یابند. همچنین بیشترین میزان تنش‌های پسماند بر روی صفحه میانی نمونه‌ها اتفاق می‌افتد که نشان می‌دهد توزیع تنش در راستای ضخامت قطعات یکسان نمی‌باشد. علاوه بر این نحوه توزیع تنش‌های پسماند در راستای سطح مقطع خالص قطعه نشان می‌دهد که تنش پسماند در نواحی نزدیک به لبه سوراخ فشاری بوده و با دور شدن از لبه سوراخ به صورت کششی در می‌آید.

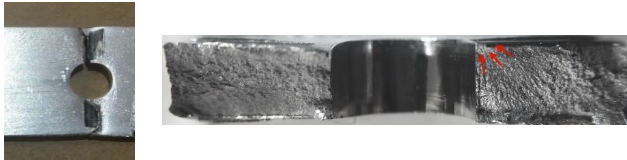
جهت آگاهی از توزیع تنش حاصل از اعمال تنش ماکزیمم،

برای درصدهای انبساط سرد ۱/۵٪ و ۴/۷٪ در سطح مقطع خالص قطعه محاسبه شده و با تنش‌های پسماند محاسبه شده از طریق روش تحلیلی مقایسه شده‌اند (شکل ۱۳). مقایسه نتایج بدست آمده نشان‌دهنده دقت خوب شبیه‌سازی عددی در تخمین توزیع تنش‌های پسماند محیطی ناشی از انبساط سرد می‌باشد.

با توجه به توزیع تنش‌های پسماند می‌توان مشاهده نمود که مقدار تنش‌های پسماند فشاری در نواحی نزدیک به سوراخ با افزایش



(الف و a)



(ب و b)

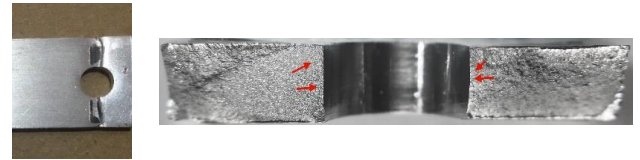
شکل ۱۷: مقاطع شکست برای نمونه ۱/۵٪ انبساط سرد تحت بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و بارهای محوری الف) ۶ کیلو نیوتن ب) ۱۰ کیلو نیوتن

Fig.17: Fractured sections of the 1.5% specimens at 400 N normal load and a) 6 kN, b) 10 kN axial load

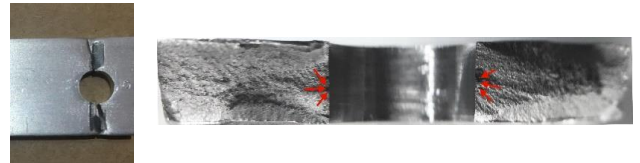
در اطراف سوراخ نسبت به نمونه‌های بدون انبساط سرد می‌شود. مقدار این کاهش برای درصد انبساط سرد ۴/۷٪ قابل ملاحظه‌تر است. از طرف دیگر با مقایسه تنش‌ها بین صفحات مختلف نمونه‌های دارای انبساط سرد می‌توان مشاهده نمود که تنش محیطی در راستای ضخامت قطعه یکنواخت نبوده و مقدار تنش فشاری بر روی صفحه ورودی از دیگر صفحات کمتر است که باعث می‌شود تا صفحه ورودی به عنوان صفحه بحرانی در نمونه‌های دارای انبساط سرد تلقی شده و شروع ترک خستگی نیز از این صفحات باشد.

علت تفاوت در تنش‌ها بر روی صفحات مختلف نمونه‌های دارای انبساط سرد جریان یافتن ماده در هنگام ورود پین انبساط سرد و در جهت حرکت پین می‌باشد که باعث افزایش حجم ماده بر روی صفحه خروجی گشته و مقدار تنش پسماند فشاری را افزایش می‌دهد. بررسی مقاطع شکست نمونه‌ها نیز نشان می‌دهد که ترک خستگی برای نمونه‌های دارای انبساط سرد از صفحه ورودی شروع می‌شود. شکل‌های ۱۷ و ۱۸ محل شروع ترک خستگی را به ترتیب برای نمونه‌های ۱/۵٪ انبساط سرد و ۴/۷٪ انبساط سرد تحت بارهای محوری مختلف نشان می‌دهند.

با توجه به مقاطع شکست بر روی نمونه‌های دارای انبساط سرد و با توجه به محل شروع ترک، می‌توان گفت که تحت بار محوری ۱۰ کیلو نیوتن رشد ترک خستگی از محل سوراخ و تمرکز تنش اتفاق افتاده است، اما در بار محوری کمتر، رشد ترک خستگی به نواحی



(الف و a)



(ب و b)

شکل ۱۶: مقاطع شکست برای نمونه بدون انبساط سرد تحت بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و بارهای محوری الف) ۶ کیلو نیوتن ب) ۱۰ کیلو نیوتن

Fig. 16: Fractured sections of the as drilled specimens at 400 N normal load and a) 6 kN, b) 10 kN axial load

توزیع تنش‌های محیطی بر روی صفحات ورودی، میانی و خروجی نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت بارهای ۶ و ۱۰ کیلو نیوتن به ترتیب در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ نشان داده شده‌اند. در حالت کلی این نمودارها تاثیر مثبت اعمال انبساط سرد را در نمونه‌ها نشان می‌دهند به طوری که مقادیر تنش در نمونه‌های ۴/۷٪ انبساط سرد و ۱/۵٪ انبساط سرد در هر سه صفحه در مقایسه با نمونه‌های ۰٪ انبساط سرد کاهش محسوسی داشته است.

توزیع تنش محیطی بر روی نمونه بدون انبساط سرد (۰٪) نشان می‌دهد که مقدار تنش بر روی صفحه میانی این نمونه و در لبه سوراخ اندکی بیشتر از صفحات بیرونی آن است که باعث می‌شود تا احتمال رشد ترک خستگی بر روی صفحه میانی در نمونه بدون انبساط سرد بیشتر باشد. علت این امر وجود نیروی اصطکاک میان پدهای تماسی و سطح قطعه می‌باشد که همانند گیره عمل کرده و باعث کاهش دامنه تنش می‌گردد. شکل ۱۶ محل رشد ترک خستگی را بر روی نمونه‌های بدون انبساط سرد نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها رشد ترک خستگی از اطراف سوراخ و در صفحه میانی بوده و نشان می‌دهد که قبل از رشد ترک ناشی از خستگی سایشی ترک ناشی از تمرکز تنش در لبه سوراخ رشد کرده و قطعه دچار واماندگی می‌گردد.

توزیع تنش محیطی در نمونه‌های دارای انبساط سرد از نمونه‌های بدون انبساط سرد پیچیده‌تر است. مقایسه نمودارهای توزیع تنش نشان می‌دهد که اعمال انبساط سرد باعث کاهش تنش‌های محیطی

کافی برای ایجاد و رشد ترک سطحی فراهم شده و قطعات در اثر خستگی سایشی دچار واماندگی گردیده‌اند.

با توجه به اینکه نمونه‌های تحت آزمایش، در شرایط بارگذاری چند محوره قرار گرفته‌اند لذا برای مقایسه مقاومت خستگی و بررسی تاثیر انبساط سرد بر روی مقاومت خستگی سایشی لازم است از معیارهای خستگی چند محوره در کنار بررسی توزیع تنش استفاده شود. یکی از معیارهای مهمی که در تحقیقات مختلف برای نمونه‌های تحت شرایط خستگی سایشی استفاده می‌شود معیار اسمیت واتسون تاپر^۲ [۴، ۲۱، ۲۲] می‌باشد که در ادامه به بررسی آن بر روی صفحات بحرانی نمونه‌های مختلف پرداخته و مقاومت خستگی آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

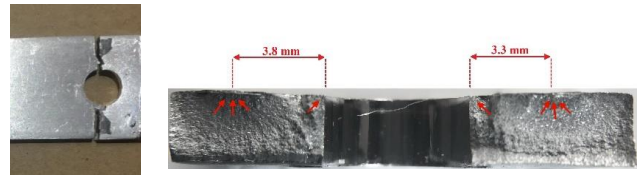
۴-۱- معیار اسمیت-واتسون-تاپر

اسمیت و همکاران [۲۱] پارامتر تجربی تخریبی را معرفی کرده‌اند که بر پایه حاصل ضرب بیشترین تنش عمودی در صفحه بحرانی و دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی هستند. آن‌ها به کمک این پارامتر، معیار اسمیت-واتسون-تاپر را پیشنهاد کرده‌اند. در این مقاله مقدار حاصل ضرب بیشترین تنش عمودی و دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی در گره‌های مختلف موجود در مجاورت مکان‌های بحرانی محور محاسبه شده و گره مربوط به مقدار بیشینه حاصل ضرب به عنوان محل بحرانی محور انتخاب شده است.

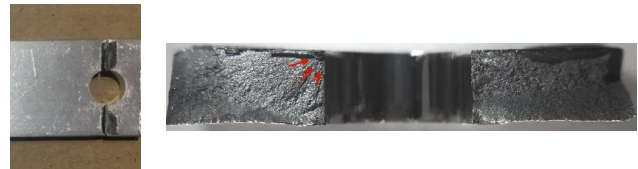
$$SWT = \frac{\sigma_{nmax} \times \Delta \varepsilon_{nmax}}{2} \quad (3)$$

در این رابطه σ_{nmax} مقدار بیشینه تنش عمودی موجود در صفحه بحرانی و $\Delta \varepsilon_{nmax}$ دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی هستند. در این مقاله مقدار پارامتر اسمیت-واتسون-تاپر بر روی نواحی بحرانی نمونه‌های مختلف دارای انبساط سرد محاسبه شده و با توجه به مقدار آن به مقایسه مقاومت خستگی و تاثیر انبساط سرد بر روی رفتار خستگی سایشی پرداخته شده است.

برای تعیین مقدار پارامتر SWT بر روی نمونه‌های مختلف و تعیین صفحات بحرانی در طی یک چرخه بارگذاری، برای گره مورد نظر در محل بحرانی قطعه، صفحه ای با بردار نرمال n در نظر گرفته



(الف و a)

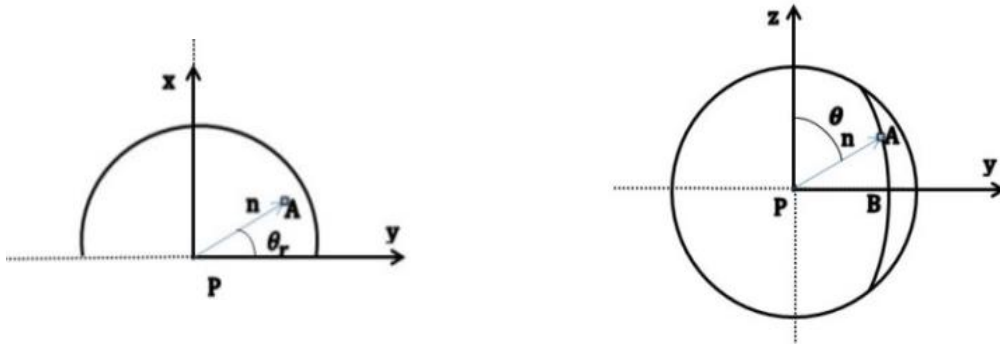


(ب و b)

شکل ۱۸: مقاطع شکست برای نمونه ۴/۷٪ انبساط سرد تحت بار عمودی ۴۰۰ نیوتن و تحت بارهای محوری الف) ۶ کیلو نیوتن ب) ۱۰ کیلو نیوتن
Fig. 18: Fractured sections of the 4.7% specimens at 400 N normal load and a) 6 kN, b) 10 kN axial load

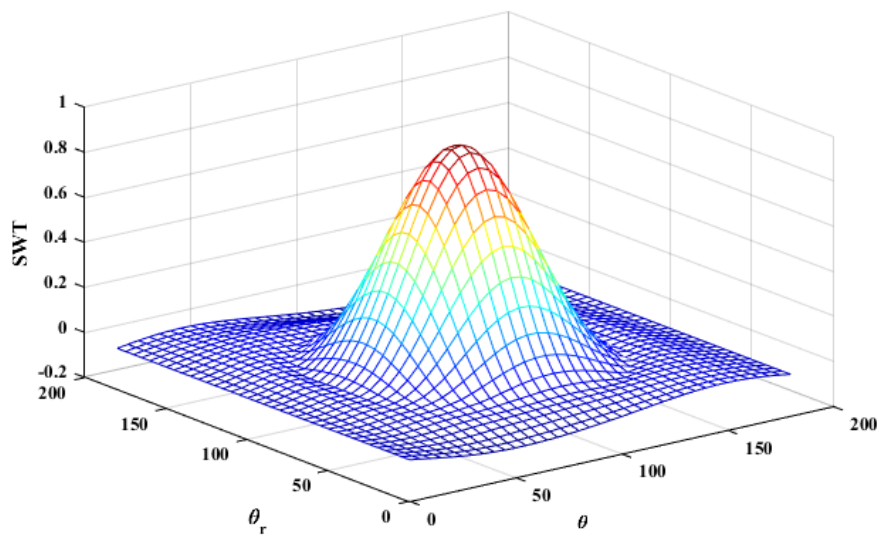
دور از سوراخ انتقال یافته و واماندگی ناشی از خستگی سایشی رخ داده است. همچنین، مقایسه موقعیت شروع ترک نسبت به محل تماس پدهای تماسی با قطعه نشان می‌دهد که در مواقع واماندگی در اثر خستگی سایشی، محل شروع ترک خستگی سایشی از لبه سطح تماس پد با قطعه بوده است (شکل‌های ۱۷-الف و ۱۸-الف)، اما در مواردی که واماندگی قطعه ناشی از خستگی ساده بوده، لزوماً محل شروع ترک از لبه ناحیه تماس نبوده و در برخی موارد از کوچکترین سطح مقطع قطعه رخ داده است (شکل ۱۷-ب).

وجود نیروی اصطکاک بر روی سطح تماس میان پدها و نمونه‌ها به عنوان عامل سایش و تخریب سطح عمل کرده و می‌تواند باعث کاهش عمر خستگی در اثر خستگی سایشی شود. از طرفی وقوع سایش بر روی سطح و ایجاد ترک خستگی سایشی زمان‌بر بوده و پس از طی چندین هزار سیکل از بارگذاری اتفاق می‌افتد. لذا مقدار بار محوری در طول بارگذاری باید به گونه‌ای باشد که زمان کافی برای وقوع سایش و ایجاد ترک سطحی وجود داشته باشد. بر همین اساس در قطعاتی که تحت بار بیشتری قرار گرفته بودند، قبل از رشد ترک‌های سطحی، ترک ناشی از تمرکز تنش در لبه سوراخ رشد کرده و واماندگی قطعه در اثر خستگی ساده^۱ رخ داده است. اما در قطعاتی که تحت بار کمتری بوده‌اند به علت انجام عملیات انبساط سرد که باعث تاخیر در رشد ترک خستگی در لبه سوراخ می‌شود، فرصت



شکل ۱۹: مشخص کردن زوایای بردار نرمال n با محورهای مختصات

Fig. 19: Angles of normal vector (n) in relation to coordinate axes



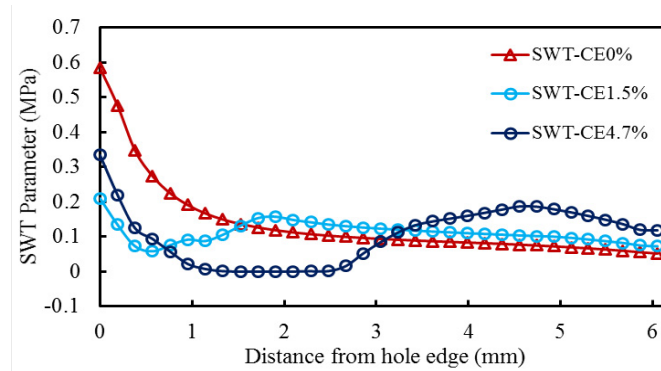
شکل ۲۰: تغییرات پارامتر SWT بر حسب تغییرات زاویه‌های θ و θ_r بر روی نمونه ۱/۵٪ انبساط سرد تحت بار عمودی ۴۰۰ و بار محوری ۱۰ کیلونیوتن
Fig. 20: Variation of the SWT parameter by changes of θ and θ_r angles for 1.5% specimen at 400 normal load and 10 kN axial load

عمودی در یک گام زمانی^۱ مشخص مطابق رابطه‌های (۵) و (۶) محاسبه شده‌اند. با توجه به تغییرات تانسورهای تنش و کرنش در طول یک سیکل، این محاسبات برای گام‌های زمانی بعدی نیز تکرار شده‌اند تا بر روی صفحه انتخاب شده تاریخچه‌ای از تنش‌ها و کرنش‌ها به دست آید. سپس، پارامتر تخریب (رابطه (۳)) بر روی صفحه مورد نظر از حاصل ضرب بیشترین تغییرات کرنش عمودی (رابطه (۷)) در بیشترین تنش عمودی محاسبه شده است. تمامی محاسبات ذکر شده در محل گره بر روی صفحات دیگری که با چرخش زاویه‌های θ و $r\theta$ (بین صفر تا ۱۸۰ درجه) بدست می‌آیند، تکرار شده‌اند. از بین مقادیر

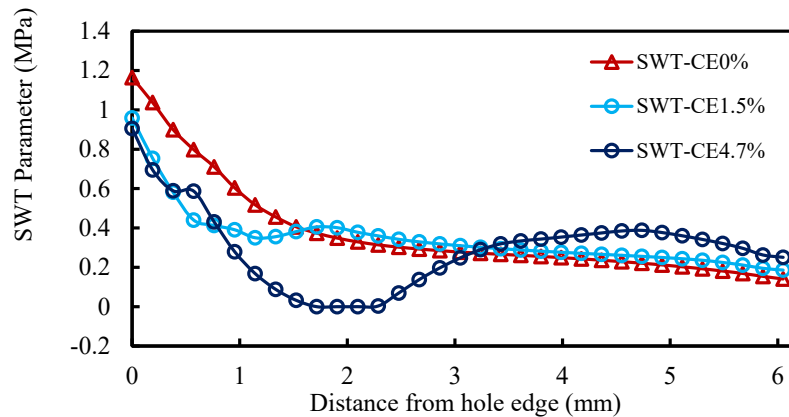
شده است که نسبت به محور z دارای زاویه‌ی θ و در صفحه $x-y$ نسبت به محور y دارای زاویه‌ی θ_r می‌باشد (شکل ۱۹).

$$\begin{aligned} n_x &= \sin\theta\sin\theta_r \\ n_y &= -\sin\theta\cos\theta_r \\ n_z &= \cos\theta \end{aligned} \quad (۴)$$

بر روی صفحه مورد نظر، ابتدا کسینوس‌های هادی بردار نرمال n توسط رابطه (۴) ایجاد شده و با استفاده از آن‌ها، تنش‌ها و کرنش‌های



(الف و ا)



(ب و ب)

شکل ۲۱: توزیع پارامتر SWT بر روی صفحه ورودی نمونه‌های مختلف تحت نیروی عمودی ۴۰۰ نیوتن و نیروهای محوری الف) ۶ کیلونیوتن و ب) ۱۰ کیلونیوتن

Fig. 21: SWT Parameter distribution on the entrance plane of specimens at a) 6 kN & b) 10 kN axial load

مقایسه مقادیر پارامتر اسمیت-واتسون-تاپر برای تمامی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در نمونه‌های دارای انبساط سرد بیشترین مقدار این پارامتر بر روی صفحه ورودی و در گوشه سطح تماس در نزدیکی لبه سوراخ بوده و برای نمونه‌های بدون انبساط سرد بر روی صفحه میانی می‌باشد که مطابق با محل شکست نمونه‌ها در طول تست‌های خستگی است.

برای مقایسه رفتار خستگی تحت شرایط سایش در نمونه‌های مختلف، توزیع مقدار پارامتر SWT بر روی صفحات ورودی نمونه‌ها در سطح مقطع خالص قطعه تحت بارهای ۶ و ۱۰ کیلونیوتن استخراج شده است. در نمونه‌های تحت بارگذاری ۱۰ کیلونیوتن مقدار پارامتر SWT در لبه سوراخ بسیار بیشتر از مقدار آن در نواحی دورتر از سوراخ می‌باشد که نشان‌دهنده بیشتر بودن احتمال وقوع ترک ناشی از تمرکز تنش در لبه سوراخ است (شکل‌های ۱۷-ب و ۱۸-ب). مقایسه مقدار پارامتر SWT میان نمونه‌های انبساط سرد شده در این حالت نشان می‌دهد که مقدار این پارامتر در محل تمرکز تنش

متفاوت پارامتر خستگی که برای صفحات مختلف به دست آمده‌اند، مقدار بیشینه‌ی آن‌ها انتخاب شده و برای مقایسه مقاومت خستگی میان نمونه‌های مختلف به کار رفته است. تمامی روند ذکر شده با کد نویسی در نرم افزار متلب^۱ انجام شده است. نمونه‌ای از تغییرات پارامتر SWT بر حسب تغییرات زاویه‌های θ و $r\theta$ بر روی نمونه ۱/۵٪ انبساط سرد تحت بار عمودی ۴۰۰ و بار محوری ۱۰ کیلونیوتن در شکل ۲۰ ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این نمونه بیشترین مقدار پارامتر SWT در θ برابر ۹۰ درجه و $r\theta$ برابر ۸۵ درجه اتفاق می‌افتد.

$$\sigma_n = n_i \sigma_{ij} n_j \quad (5)$$

$$\varepsilon_n = n_i \varepsilon_{ij} n_j \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_n = \varepsilon_{n \max} - \varepsilon_{n \min} \quad (7)$$

1 MATLAB

با توجه نمودارهای شکل ۲۱ می‌توان مشاهده نمود که مقدار پارامتر SWT بر روی صفحه ورودی نمونه $4/7\%$ در نواحی دورتر از سوراخ بسیار بیشتر از سایر نمونه‌ها می‌باشد، که باعث می‌شود تا احتمال وقوع ترک ناشی از خستگی سایشی در این نمونه بسیار بیشتر از سایر نمونه‌ها باشد. وجود شرایط خستگی سایشی در کنار بیشتر بودن مقدار پارامتر SWT در نمونه $4/7\%$ باعث می‌شود تا عمر این قطعه از نمونه $1/5\%$ کمتر باشد که مطابق با نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی می‌باشد (جدول ۲).

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی تاثیر انبساط سرد بر روی رفتار خستگی سایشی به روش عددی و تجربی پرداخته شده است، نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که در یک بارگذاری مشخص میزان ضریب اصطکاک بر روی صفحه خروجی نمونه $4/7\%$ از صفحات ورودی و خروجی سایر نمونه‌ها کمتر است که علت آن تغییر شکل ناشی از انبساط سرد بر روی صفحه خروجی می‌باشد. بررسی میزان عمر خستگی بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهد که درصد انبساط سرد بالاتر نه تنها عمر نمونه‌ها را افزایش نداده است بلکه باعث کاهش عمر خستگی نیز گردیده است که علت آن فعال شدن مکانیزم خستگی سایشی با افزایش میزان درصد انبساط سرد می‌باشد. علاوه بر این بسته به اندازه نیروی متناوب اعمالی بر روی نمونه‌ها نوع مکانیزم و ماندگی آن‌ها متفاوت می‌باشد. یعنی در حالتی که میزان بار اعمال شده بیشتر باشد نوع و ماندگی خستگی ساده بوده و با کاهش مقدار بار اعمالی مکانیزم و ماندگی از خستگی ساده به خستگی سایشی در نمونه‌های دارای انبساط سرد تبدیل می‌شود. همچنین، بررسی نتایج بدست آمده از روش عددی نشان می‌دهد که عملیات انبساط سرد تنش‌های محیطی را در اطراف سوراخ کاهش می‌دهد اما برای برقراری تعادل استاتیکی در سطح مقطع، تنش‌های محیطی را در نواحی دور از سوراخ افزایش می‌دهد. با افزایش درصد انبساط سرد تنش‌ها در اطراف سوراخ بیشتر کاهش یافته و در مقابل در نواحی دور از سوراخ افزایش بیشتری پیدا می‌کنند. زمانی که نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند، تنش‌های ناشی از نیروی محوری به تنش‌های پسماند ناشی از انبساط سرد اضافه شده و در نتیجه مقدار تنش در نواحی دورتر از سوراخ افزایش می‌دهد. زمانی که نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند، تنش‌های ناشی از نیروی محوری به تنش‌های پسماند ناشی از انبساط سرد اضافه شده و در نتیجه مقدار تنش در نواحی دورتر از سوراخ افزایش می‌یابد که مقدار این افزایش برای نمونه‌های با درصد انبساط بالاتر بیشتر است. بررسی مقدار پارامتر خستگی چند محوره اسمیت-واتسون-تایپر

بسیار نزدیک به هم می‌باشد که باعث می‌شود تفاوت چندانی میان عمر نمونه‌ها با درصد انبساط سردهای مختلف در این حالت وجود نداشته باشد (جدول ۲). اما در نمونه‌های تحت بارگذاری ۶ کیلونیوتن می‌توان مشاهده نمود که مقدار پارامتر SWT در لبه سوراخ برای نمونه‌های دارای انبساط سرد از نمونه بدون انبساط سرد کمتر است که نشان می‌دهد احتمال وقوع ترک ناشی از خستگی در این ناحیه در نمونه‌های بدون انبساط سرد از سایر نمونه‌ها بیشتر است. علاوه بر این مقایسه میان نمونه‌های دارای انبساط سرد نشان می‌دهد که در لبه سوراخ مقدار پارامتر SWT در نمونه $4/7\%$ انبساط سرد از نمونه $1/5\%$ انبساط سرد بیشتر است که باعث می‌شود در محل سوراخ، احتمال وقوع ترک خستگی در نمونه $4/7\%$ انبساط سرد از نمونه $1/5\%$ انبساط سرد بیشتر باشد. مقایسه سطح مقطع شکست میان این نمونه‌ها نیز نشان‌دهنده رشد ترک خستگی در لبه سوراخ برای نمونه $4/7\%$ انبساط سرد تحت بار ۶ کیلونیوتن می‌باشد (شکل ۱۸-الف). این در حالی است که در نمونه $1/5\%$ انبساط سرد نشانی از رشد ترک خستگی در لبه سوراخ مشاهده نمی‌شود (شکل ۱۷-الف).

از طرف دیگر با توجه به نمودارهای شکل ۲۱ می‌توان مشاهده نمود که انجام انبساط سرد باعث افزایش مقدار پارامتر SWT در نواحی دورتر از سوراخ شده است. برای توضیح این پدیده باید نحوه توزیع تنش‌های پسماند ناشی از عملیات انبساط سرد مورد توجه قرار گیرد. همانگونه که از روی نمودارهای شکل ۱۳ مشخص است، عملیات انبساط سرد، تنش‌های محیطی را در اطراف سوراخ کاهش می‌دهد اما برای برقراری تعادل استاتیکی در سطح مقطع، تنش‌های محیطی را در نواحی دور از سوراخ افزایش می‌دهد. با افزایش درصد انبساط سرد تنش‌ها در اطراف سوراخ بیشتر کاهش یافته و در مقابل در نواحی دور از سوراخ افزایش بیشتری پیدا می‌کنند. زمانی که نمونه‌های دارای انبساط سرد تحت بارگذاری خستگی قرار می‌گیرند، تنش‌های ناشی از نیروی محوری به تنش‌های پسماند ناشی از انبساط سرد اضافه شده و در نتیجه مقدار تنش در نواحی دورتر از سوراخ افزایش یافته و در نواحی نزدیک به سوراخ کاهش می‌یابد (شکل‌های ۱۴ و ۱۵). بر این اساس در صورت وجود شرایط سایش و خستگی سایشی (وجود سطح تماس بر روی قطعه دارای انبساط سرد و لغزش میان سطوح تماس) احتمال وقوع ترک ناشی از خستگی سایشی در نمونه‌های دارای انبساط سرد در نواحی دورتر از سوراخ افزایش می‌یابد.

failure analysis, 44 (2014) 299-305.

- [6] M. Zehsaz, P. Shahriary, Studying the Effect of Fillet on Fretting Fatigue Strength in the Press-Fitted Axle Assembly using Different Multiaxial Fatigue Criteria and Fretting Fatigue Damage Parameter, Journal of Computational Methods In Engineering, 34(2) (2016) 159-175.
- [7] Y.-l. Wang, Y.-l. Zhu, S. Hou, H.-x. Sun, Y. Zhou, Investigation on fatigue performance of cold expansion holes of 6061-T6 aluminum alloy, International journal of fatigue, 95 (2017) 216-228.
- [8] A. Benhamena, A. Talha, N. Benseddiq, A. Amrouche, G. Mesmacque, M. Benguediab, Effect of clamping force on fretting fatigue behaviour of bolted assemblies: Case of couple steel-aluminium, Materials Science and Engineering: A, 527(23) (2010) 6413-6421.
- [9] D. Crococolo, M. De Agostinis, L. Ceschini, A. Morri, A. Marconi, Interference fit effect on improving fatigue life of a holed single plate, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 36(7) (2013) 689-698.
- [10] A. Özdemir, R. Hermann, Effect of expansion technique and plate thickness on near-hole residual stresses and fatigue life of cold expanded holes, Journal of materials science, 34(6) (1999) 1243-1252.
- [11] T. Chakherlou, M. Razavi, B. Abazadeh, Finite element investigations of bolt clamping force and friction coefficient effect on the fatigue behavior of aluminum alloy 2024-T3 in double shear lap joint, Engineering failure analysis, 29 (2013) 62-74.
- [12] T. Chakherlou, M. Shakouri, A. Akbari, A. Aghdam, Effect of cold expansion and bolt clamping on fretting fatigue behavior of Al 2024-T3 in double shear lap joints, Engineering failure analysis, 25 (2012) 29-41.
- [13] N.E. Dowling, Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue, Pearson, 2012.
- [14] ASTM, E2789-10(2015), in: Standard Guide for Fretting Fatigue Testing, West Conshohocken, ASTM

نیز نشان‌دهنده افزایش احتمال وقوع ترک ناشی از خستگی سایشی بر روی صفحه ورودی نمونه دارای انبساط سرد بالا در نواحی دورتر از سوراخ می‌باشد. بعلاوه، این پارامتر در تعیین محل شکست نمونه‌ها نیز تطابق مناسبی با نتایج بدست آمده از تست‌های آزمایشگاهی دارد و می‌تواند به عنوان معیاری برای بررسی مقاومت خستگی سایشی در آلیاژهای آلومینیومی مورد استفاده قرار گیرد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت، m^2
D	قطر ساچمه، mm
d	قطر سوراخ، mm
E	مدول الاستیسیته، N/m^2
N_f	عمر خستگی

علائم یونانی

$\Delta \varepsilon_{n \max}$	دامنه بیشترین کرنش عمودی روی صفحه بحرانی
$\Delta \sigma_n$	بازه تنش عمودی روی صفحه بحرانی، MPa
ε_n	کرنش عمودی
μ	ضریب اصطکاک
σ_n	تنش عمودی، MPa

مراجع

- [1] T. Lindley, Fretting fatigue in engineering alloys, International journal of fatigue, 19(93) (1997) 39-49.
- [2] J. Dobromirski, Variables of fretting process: are there 50 of them?, ASTM Special Technical Publication, 1159 (1992) 60-60.
- [3] C. Ruiz, P. Boddington, K. Chen, An investigation of fatigue and fretting in a dovetail joint, Experimental mechanics, 24(3) (1984) 208-217.
- [4] C. Jiménez-Peña, R.H. Talemi, B. Rossi, D. Debruyne, Investigations on the fretting fatigue failure mechanism of bolted joints in high strength steel subjected to different levels of pre-tension, Tribology international, 108 (2017) 128-140.
- [5] F. Xue, Z.-X. Wang, W.-S. Zhao, X.-L. Zhang, B.-P. Qu, L. Wei, Fretting fatigue crack analysis of the turbine blade from nuclear power plant, Engineering

- [19] M.W. Ozelton, T.G. Coyle, Fatigue life improvement by cold working fastener holes in 7050 aluminum, in: Fatigue in mechanically fastened composite and metallic joints, ASTM International, 1986.
- [20] Y. Zhang, M.E. Fitzpatrick, L. Edwards, Analysis of the Residual Stress around a Cold-expanded Fastener Hole in a Finite Plate, *Strain*, 41(2) (2005) 59-70.
- [21] K. Smith, P. Watson, T. Topper, A Stress-Strain Function for the Fatigue of Metals, *J. Mater.*, 5(4) (1970) 767-778.
- [22] C.D. Lykins, S. Mall, V.K. Jain, Combined experimental-numerical investigation of fretting fatigue crack initiation, *International journal of fatigue*, 23(8) (2001) 703-711.
- International.
- [15] J. Pape, R. Neu, Influence of contact configuration in fretting fatigue testing, *Wear*, 225 (1999) 1205-1214.
- [16] P. Shahriary, T. Chakherlou, Investigating the effect of cold expansion on frictional force evolution during fretting fatigue tests of AL2024-T3 plates, *International journal of mechanical sciences*, 135 (2018) 146-157.
- [17] Ansys release 13.0, in: Documentation, ANSYS Inc.
- [18] L. Yongshou, S. Xiaojun, L. Jun, Y. Zhufeng, Finite element method and experimental investigation on the residual stress fields and fatigue performance of cold expansion hole, *Materials & Design*, 31(3) (2010) 1208-1215.

