



بررسی رشد ترک خستگی ناشی از خمش در استوانه‌های اتوفرتاژ شده با ترک خارجی

رحمان سیفی^{*}، حسین حکیمی^۲

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بولی سینا، همدان

۲- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بولی سینا، همدان

* همدان، صندوق پستی ۰۱۶۵۱۷۵-۴۱۶۱

rseifi@basu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق رشد ترک‌های سطحی خارجی در استوانه‌های اتوفرتاژ شده تحت بارگذاری خستگی خمشی، مورد بررسی قرار گرفته است. اتوفرتاژ فرایندی است که در آن استوانه جدار ضخیم در عرض مقدار معینی فشار داخلی قرار می‌گیرد، به طوری که قسمتی از جداره داخلی آن وارد ناحیه پلاستیک می‌شود. در این حالت برداشت فشار باعث ایجاد تنش پسماند فشاری در جداره داخلی و تنش پسماند کششی در جداره بیرونی استوانه می‌گردد. در این مقاله، ترک‌ها از نوع ترک‌های نیم‌بیضوی، نیم‌بیضوی معکوس و نیم‌دایره‌ای می‌باشند. ماده مورد استفاده آلمونیوم 2024 در نظر گرفته شد و میزان اتوفرتاژ نمونه‌ها 40 و 60 درصد لحاظ گردید. ترک‌ها در جهت محیطی و عمود بر محور طولی استوانه در نظر گرفته شدند. شبیه‌سازی عددی به روش اجزاء محدود انجام شد. در انتها نتایج حاصل از حل عددی و تجزیی با هم مقایسه گردیدند. از بررسی نتایج مشاهده گردید که در اتوفرتاژ 60٪ تعداد سیکل‌های شکست کمتر از اتوفرتاژ 40٪ و آن نیز کمتر از حالت بدون اتوفرتاژ است. توزیع ضریب شدت تنش در پیشانی ترک متفاوت است و ترک در صفحه اولیه خود رشد می‌کند که نشان دهنده غالب بودن رفتار مود اول شکست در طول رشد است. در تمامی نمونه‌ها، ترک بعد از چند مرحله رشد به شکل نیم‌بیضوی درآمده و این حالت را لحظه شکست حفظ می‌کند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۶ مرداد ۱۳۹۵

پذیرش: ۰۳ شهریور ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۱ آبان ۱۳۹۵

کلید واژگان:

اتوفرتاژ

ترک خارجی،

رشد ترک خستگی

خمش

Evaluation of fatigue crack growth due to bending on the autofrettaged cylinders with external crack

Rahman Seifi*, Hossein Hakimi

Department of Mechanical Engineering, Engineering Faculty, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran
* P.O.B 65175-4161, Hamedan, Iran, rseifi@basu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 August 2016

Accepted 24 September 2016

Available Online 22 October 2016

Keywords:

Autofrettage

External crack

Fatigue crack growth

Bending

ABSTRACT

In this study, fatigue growth of external surface cracks on the autofrettaged cylinders under bending is investigated. Autofrettage is a process in which a thick-walled cylinder subjected to internal pressure with known amount, causing some portions on the inner zone of the cylinder deformed plastically. In this case, removing the pressure causes compressive residual stresses on the inner layers and tensile stresses on the outer wall. The goal is increasing the fatigue durability of the product by inducing residual compressive stresses into materials, but along with this, there are adverse tensile stresses which can decrease the life due to the outer defects. In this paper, the external cracks are in the forms of half-elliptical, semi-elliptical and semi-circle. Samples made by aluminum 2024 alloy. The cylinders were autofrettaged up to 40 and 60 percent. Cracks were located in circumferential direction and normal to cylinder axis. The numerical simulations were performed by finite element method. Experimental data and numerical results were compared. Results show that the number of load cycles to fracture, in the 60% autofrettaged cylinders are smaller than those for 40% and also smaller than the state without autofrettage. Distribution of stress intensity factor along the crack front is symmetric and crack grows in its initial plane which indicating the dominance of the first mode of failure during the crack growth. In all samples, after some steps of the growth, crack front transforms to the semi-elliptical shape until complete fracture.

هستند که استفاده بهینه از مواد را در اولویت قرار دهدن. یکی از روش‌های بهینه در تولید استوانه‌های جدار ضخیم، فرایند اتوفرتاژ می‌باشد. اتوفرتاژ فرایندی است که با اعمال فشار داخلی مناسب در استوانه‌های جدار ضخیم و باربرداری می‌تواند تنش‌های پسماند فشاری را در جداره استوانه ایجاد کند. تنش‌های پسماند فشاری باعث افزایش ظرفیت تحمل بار در استوانه‌ها

مخازن تحت فشار و در حالت کلی تر استوانه‌های جدار ضخیم یکی از پر کاربردترین قطعات در صنعت می‌باشند. این استوانه‌ها به طور گسترده‌ای در صنایع نظامی، شیمیایی و هسته‌ای استفاده می‌شوند. به منظور صرفه‌جویی در مواد و کاهش هزینه‌های تولید بسیاری از محققان و مهندسان در صدد

-۱- مقدمه

Please cite this article using:

R. Seifi, H. Hakimi, Evaluation of fatigue crack growth due to bending on the autofrettaged cylinders with external crack, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 35-44, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

R. Seifi, H. Hakimi, Evaluation of fatigue crack growth due to bending on the autofrettaged cylinders with external crack, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 35-44, 2016 (in Persian)

پرداخته است. پارکر و فارو [13] بر اساس توزیع تنش محیطی ناشی از اتوفرتاز یا اعمال دما و وجود فشار داخلی و با استفاده از اصل جمع آثار، رابطه‌ی تقریبی برای محاسبه ضربی شدت تنش در ترک شعاعی ارایه کردند. همچنین شاو و همکاران [14] و آرشه و پول [15] رفتار استوانه اتوفرتاز شده با ترک‌های شعاعی را بررسی نموده و اثرات پارامترهایی مانند ابعاد ترک، ابعاد استوانه و درصد اتوفرتاز را بر ضربی شدت تنش مطالعه نمودند. پول و ناچوم در دو تحقیق جداگانه به بررسی اثر اندازه اتوفرتاز [16] و اثر ترکیبی اتوفرتاز و فشار داخلی [17] بر ترک‌های نیم بیضی داخلی در استوانه‌های ضخیم پرداختند. با توجه به تنش پسماند فشاری در قسمت‌های داخلی استوانه، اتوفرتاز باعث کاهش مقادیر ضربی شدت تنش در ترک می‌شود. پول و استینر [19,18] اثرات مفید اتوفرتاز بر ترک سطحی داخلی در مخزن کروی را مطالعه نمودند. در این تحقیق مشخص شد که در ترک‌های داخلی با عمق زیاد که به سطح بیرونی مخزن و نقاطی با تنش پسماند کششی نزدیک است مقادیر ضربی شدت تنش مقدار مثبتی خواهد داشت. قاجار و سعیدی [20] به بررسی اثر فشار غیر یکنواخت بر توزیع ضربی شدت تنش در پیشانی ترک نیم بیضی طولی در سطح داخلی استوانه اتوفرتاز شده پرداخته‌اند. آنها بر اساس استفاده از روش تابع وزنی نتیجه گرفتند که در این حالت نقاط بحرانی در سطح یا عمق ترک نیستند. سیفی [21] و سیفی و دزم [22] اثر اتوفرتاز مخازن ساخته شده با مواد مدرج تابعی بر تغییرات ضربی شدت تنش در پیشانی ترک سطحی در قسمت داخلی و خارجی دیواره را ارزیابی کردند. مشاهده شد که فرایند اتوفرتاز در این نوع مواد هم مانند مواد یکنواخت بر مشخصات ترک داخلی اثر مفید و ترک خارجی تاثیر مضری دارد. همچنین اثر بارهای مکانیکی (فشار خارجی) و حرارتی بر مخازن با ترک خارجی با استفاده از روش تابع وزنی و اصل جمع آثار محاسبه شده است [23]. مشخص گردید که برای نسبت‌های مختلف ابعاد ترک و نسبت بارهای اعمالی ممکن است نقاط سطحی یا عمقی مهم‌تر باشند. همچنین اثر ترک‌های خارجی مایل نیز با استفاده از روش انتگرال J در استوانه با فشار داخلی محاسبه شد [24].

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود در بیشتر تحقیقات انجام شده، اثر مفید فرایند اتوفرتاز بر رفتار ترک‌های داخلی در مخازن تحت فشار داخلی بررسی شده است. همچنین در بیشتر موارد ذکر شده، ترک خارجی بدون اثر اتوفرتاز و با در نظر گرفتن فشار داخلی مطالعه شده است. از سوی دیگر اثر اتوفرتاز و اعمال خمش بر رشد خستگی ترک خارجی مطالعه نشده است. در این تحقیق سعی شده است که اثر خمش متناوب بر رشد ترک خستگی در مخازن اتوفرتاز شده با وجود ترک سطحی خارجی بررسی شده و اثر پارامترهای مختلف بر آن سنجیده شود.

2- فرایند اتوفرتاز

در یک استوانه جدار ضخیم، تحت فشار داخلی، بیشینه تنش موثر در سطح داخلی رخ می‌دهد. با افزایش فشار داخلی، تغییر شکل پلاستیک از سطح داخلی آغاز و سپس در جداره گسترش می‌یابد تا اینکه تمامی استوانه به حالت تسلیم درآید. اگر فشار داخلی طوری کنترل شود که استوانه تا شعاع معینی پلاستیک گردد، آنگاه استوانه دارای دو ناحیه خواهد شد: ناحیه الاستیک خارجی و ناحیه پلاستیک داخلی. اگر فشار داخلی استوانه برداشته شود، ناحیه الاستیک به علت وجود ناحیه پلاستیک داخلی نمی‌تواند به حالت اولیه برگردد، بنابراین این ناحیه را تحت فشار قرار داده و سبب ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در آن می‌گردد. البته این فرایند باعث ایجاد تنش کششی در لایه‌های بیرونی جداره می‌شود. تنش‌های فشاری قسمتی از

می‌شود. تحلیل رفتار استوانه‌های جدار ضخیم در شرایط کاری مختلف اهمیت زیادی دارد.

در بیشتر موارد وجود ترک در دیواره استوانه جدار ضخیم محتمل است که ضرورت بررسی و تحلیل از دیدگاه مکانیک شکست را ایجاب می‌کند. ترک‌ها می‌توانند ناشی از خوردگی، برخورد جسم خارجی، عیوب به وجود آمده در حین فرایند تولید و غیره باشند. رشد ترک‌ها، از مهم‌ترین عوامل گسیختگی در بسیاری از قطعات مهندسی است. گسیختگی ناشی از بارگذاری تکراری و خستگی است، بیش از نیمی از شکست‌ها را شامل می‌شود. با توجه به کاربرد وسیع استوانه‌های جدار ضخیم در صنعت، بررسی رفتار این نوع سازه‌ها با وجود ترک و تحت بار خستگی موضوع تحقیقات و گزارش‌های متعددی بوده است. ترک‌هایی که برای مدل‌سازی توسط محققان استفاده شده است، در بیشتر مواقع ترک‌های نیم بیضوی می‌باشد که مرکز آن بر روی محیط جسم قرار گرفته است. این شکل ترک بر اساس مشاهدات آزمایشگاهی و تحلیل‌های عددی مختلف بدست آمده است [2,1]. در مجموعه تحلیل‌هایی که لین و اسمیت [3-1] انجام دادند، مشخص شد که ترک‌ها با هر شکل اولیه دلخواه پس از چند مرحله بارگذاری به سرعت به ترک نیم بیضوی تبدیل خواهند شد. برای این کار آن‌ها 9 نقطه مختصه در قرأت گرفته اند. این شکل ترک از 200 مدل المان محدود برای روی خط ترک در نظر گرفته شد و با استفاده از 200 مدل المان محدود برای ترک سه بعدی، تغییر شکل نقاط در نظر گرفته شده را بررسی نمودند. آن‌ها نشان دادند که ترک‌های نیم بیضوی اولیه در طول رشد ترک با انحراف کمتر از 5% به شکل نیم بیضوی باقی می‌مانند و ترک‌های بی‌قاعده به سرعت به شکل نیم بیضوی در می‌آیند. کارپینتری و همکاران [4] و نیز کارپینتری و بریگنتی [5] مسأله رشد ترک سطحی در یک میله استوانه‌ای تحت بار خستگی خمشی و ترکیبی از خمش و کشش با دامنه ثابت را مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که برای هر عمق نسبی ترک با افزایش نسبت منظر ترک، محل بیشینه ضربی شدت تنش از نقطه عمق ترک به گوشه‌ها منتقل خواهد شد. کرونیو و رویر [6] به بررسی ترک خستگی در میله استوانه‌ای تحت کشش و خمش پرداختند. آنها نشان دادند که مدل سه درجه آزادی ترک که در آن مرکز بیضی ترک بر امتداد شعاع استوانه حرکت کند، باعث پهلوود قابل توجهی حاصل نمی‌شود. فونته [7] مسأله ترک سطحی نیم بیضوی را در استوانه‌ای تحت گشتاور پیچشی و خمشی بررسی نمود. به منظور تعیین درستی نتایج، ابتدا مسأله ترک سه بعدی را برای بار خمشی متناوب در کنار بار پیچشی بررسی نمود. او مشاهده کرد که برای نقاطی که ترک با سطح خارجی میله تقاطع دارد با وجود اعمال گشتاور پیچشی خالص، در کنار مود III، مود II نیز وجود دارد ولی برای عمق‌ترین نقطه فقط مود III موجود است. شاهانی و شاهحسینی [8]، شاهحسینی و شاهانی [10,9] و نیز شاهانی و حبیبی [11] به تحلیل رشد ترک خستگی در استوانه‌های جدار ضخیم تحت اعمال همزمان بار محوری، خمشی و پیچشی پرداختند. آن‌ها از معادله پاریس جهت محاسبه عمر خستگی استفاده کردند و رشد ترک‌های سطحی در نسبت منظرهای مختلف بر حسب رابطه عمق نسبی را بررسی نمودند. مقایسه نتایج با داده‌های آزمایشگاهی نشان داد که تحت تاثیر بار خمشی ترک به صورت متقابل رشد می‌کند.

در بیشتر مطالعات انجام شده در مورد مخازن اتوفرتاز شده، تاثیر وجود تنش پسماند و فشار داخلی بر رفتار ترک بررسی شده است. به همین دلیل در بیشتر منابع، ترک‌ها به صورت شعاعی یا طولی و در قسمت داخلی مخزن منظور شده است. پارکر [12] به بررسی تجربی و عددی اثر اتوفرتاز بر ضربی شدت تنش و رشد ترک خستگی در استوانه‌های ضخیم با چند ترک شعاعی

اتوفرتأز و همچنین کاهش تمرکز تنش در بخش طولی نمونه‌ها، ابعاد و شکل قطعه به صورت نشان داده شده در شکل 2 در نظر گرفته شد. تعدادی از نمونه‌های ساخته شده نیز در شکل 3 آورده شده‌اند. فشار اتوفرتأز مورد نیاز به کمک پمپ دستی فشار بالا از نوع اینپریک P-2282 به همراه آداپتور مخصوص تامین شد. این پمپ قادر است فشاری حدود 280 MPa را اعمال نماید. در این تحقیق اثرات اتوفرتأز 40% و 60% بررسی شده است. این مقادیر تحت فشاری در حدود 157 و 169 مگاپاسکال ایجاد می‌گردند.

بعد از ساخت نمونه‌ها و اتوفرتأز نمودن تعداد مورد نظر، ترک نیم بیضی در سطح خارجی آنها به صورت محیطی با عمق و پهنای لازم ایجاد گردید. این کار به روش اسپارک و استفاده از ورق‌های نازک مسی انجام شد. ابعاد و مشخصات ترک ایجاد شده به صورت شماتیک در شکل 4 نشان داده شده است.

در شکل 4، a عمق ترک (شعاع بیضی) و c پهنای ترک مجازی در موقعیت عمود بر شعاع دیگر بیضی می‌باشد. مقدار δ نیز نصف طول محیطی ترک در سطح خارجی استوانه است. دو نمونه از استوانه‌های اتوفرتأز که ترک در آنها ایجاد شده، در شکل 5 آورده شده است.

در بررسی اثر ابعاد ترک، برای نسبت عمق ترک به ضخامت استوانه، مقادیر $\xi = a/t$ و 0.4 و 0.6 و برای نسبت منظر ترک، $\alpha = a/c$ از مقادیر $\xi = a/t$ و 0.6 و 0.4 و $\alpha = a/c$ از مقادیر 1.0، 2/3 و 3/2 استفاده شده است.

جدول 1 ترکیب شیمیایی آلیاژ آلومینیوم 2024 بر حسب درصد وزنی

Table 1 Chemical compositions of Al 2024 (%wt.)							
Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni
Base	0.56	0.47	4.6	0.26	1.4	0.03	0.05
Zn	Ti	Pb	Sn	V	Co	Zr	B
0.23	0.14	0.043	0.023	0.008	0.005	0.007	0.004

جدول 2 خواص مکانیکی آلومینیوم

Table 2 Mechanical properties of Aluminum			
ضریب پواسون	ضریب پواسون	مدول الاستیک	استحکام تسلیم

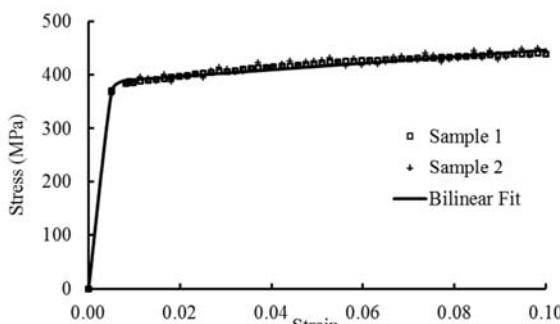


Fig. 1 منحنی تنش-کرنش واقعی آلومینیوم 2024 با دو نمونه.

شکل 1 منحنی تنش-کرنش واقعی آلومینیوم 2024 با دو نمونه.

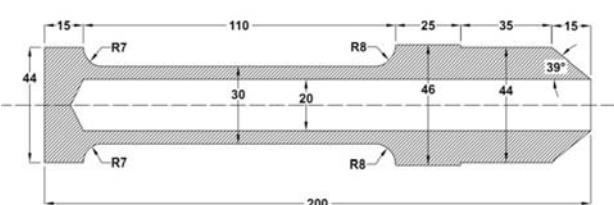


Fig. 2 ابعاد نمونه‌های آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

شکل 2 ابعاد نمونه‌های آزمایش (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

تنش‌های کششی ناشی از بارگذاری مجدد مخزن را خنثی نموده و بدین ترتیب، ظرفیت تحمل بار مخزن و عمر خستگی را افزایش می‌دهد. این افزایش ظرفیت در مراحل ایجاد و رشد ترک خستگی و نیز شکست نهایی مهم است. برای محاسبه فشار لازم برای ایجاد استوانه الاستیک-پلاستیک فرض می‌شود، استوانه تا شعاع $r = \rho$ پلاستیک گردد. در این صورت، استوانه به شعاع خارجی r و شعاع داخلی r_i کاملاً پلاستیک و به شعاع خارجی r_0 و شعاع داخلی r_i یک استوانه الاستیک است. نسبت اتوفرتأز، $AF = r_0/r_i$ به صورت نسبت ضخامت ناحیه پلاستیک شده به ضخامت کل جدار استوانه تعريف می‌شود. البته نسبت اتوفرتأز معمولاً به درصد به صورت رابطه (1) بیان می‌شود:

$$(1) \quad \%AF = \frac{\frac{\rho}{r_i} - 1}{\frac{k}{k - 1}}$$

که در آن $k = r_0/r_i$ است. اگر استوانه مذکور از ماده‌ای با رفتار الاستیک-پلاستیک خطی با مدول الاستیسیته E ، مدول مماسی H پواسون ν و تنش تسلیم S_Y ساخته شده باشد، مقادیر تنش‌های پسماند شعاعی، σ_{rr} و $\sigma_{\theta\theta}$ با فرض کرنش صفحه‌ای از روابط (2) به دست می‌آید [25]:

در ناحیه پلاستیک، $\rho \leq r \leq r_0$

$$(2)-الف) \quad \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{\frac{r_o^2}{r^2} - 1}{\frac{k^2}{k^2 - 1}} F(r_i) - F(r) \\ \sigma_{\theta\theta} &= -\frac{\frac{r_o^2}{r^2} + 1}{\frac{k^2}{k^2 - 1}} F(r_i) + G(r) \end{aligned}$$

و در ناحیه الاستیک، $\rho \leq r \leq r_0$

$$(2)-ب) \quad \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{(r_o^2 - 1)(\frac{F(r_i)}{k^2 - 1} - \frac{\rho^2}{2r_o^2})}{2} \\ \sigma_{\theta\theta} &= -\frac{(r_o^2 + 1)(\frac{F(r_i)}{k^2 - 1} - \frac{\rho^2}{2r_o^2})}{2} \end{aligned}$$

که در آنها توابع $F(r)$ و $G(r)$ با روابط (3) داده می‌شود:

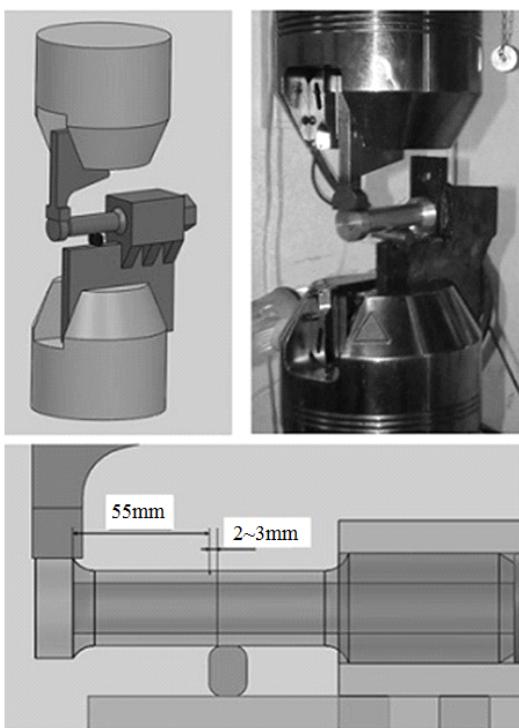
$$(3) \quad \begin{aligned} F(r) &= \frac{1 - \frac{\rho^2}{r_o^2} + 2\ln\frac{\rho}{r} + (1 - \nu^2)\frac{H}{E}\left(\frac{\rho^2}{r^2} - \frac{\rho^2}{r_o^2}\right)}{2\left[1 + (1 - \nu^2)\frac{H}{E}\right]} \\ G(r) &= \frac{1 + \frac{\rho^2}{r_o^2} - 2\ln\frac{\rho}{r} + (1 - \nu^2)\frac{H}{E}\left(\frac{\rho^2}{r^2} + \frac{\rho^2}{r_o^2}\right)}{2\left[1 + (1 - \nu^2)\frac{H}{E}\right]} \end{aligned}$$

بدیهی است بر اساس فرض ذکر شده، مقدار تنش محوری، σ_{zz} از رابطه $\sigma_{zz} = \nu(\sigma_{rr} + \sigma_{\theta\theta})$ به دست می‌آید. روابط (1) تا (3) از مرجع [25] بازنویسی شده‌اند. با اعمال بار خارجی مانند فشار داخلی یا خمش، تنش‌های نهایی بر اساس اصل جمع آثار برابر مجموع تنش‌های اعمالی و تنش‌های پسماند خواهد بود.

3- مواد و آزمایش

برای ساخت نمونه‌های اتوفرتأز از فلز آلومینیوم 2024 استفاده شد. این آلیاژ به دلیل استحکام بالا دارای کاربردهای وسیعی در صنایع خودرو، هواپما و نظامی می‌باشد. برای به دست آوردن ترکیب شیمیایی و تعیین استاندارد آلیاژ معادل از آزمون کوانتمتری استاندارد ASTM E1251-07 استفاده شد. ترکیب شیمیایی آلیاژ در جدول 1 آورده شده است. منحنی تنش-کرنش از آزمون کشنش استاندارد ASTM E8M-09 برای دو نمونه استاندارد استخراج شده و در شکل 1 و خواص مکانیکی آن در جدول 2 ارایه شده است.

برای ایجاد تنش پسماند در نمونه‌ها با توجه به فشار مورد نیاز برای

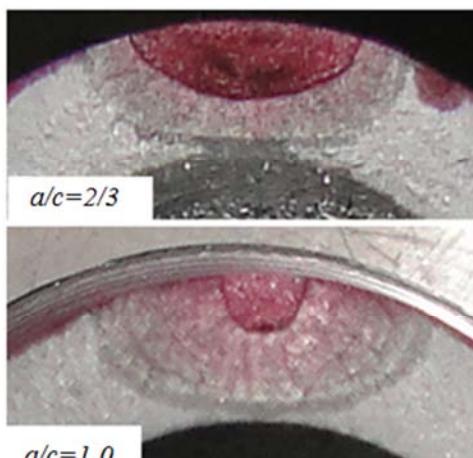
**Fig 6.** Built Jigs and fixtures with assembled sample

شکل 6 قید و بست ساخته شده به همراه نمونه نصب شده و 11 هم بدون اتوفرتاژ با ترکی به ترتیب مشابه با نمونه 1 و 4 تحت بارگذاری قرار گرفتند.

4- مدل سازی و تحلیل عددی

در این تحقیق از روش اجزاء محدود در نرم‌افزار تجاری آباکوس برای تعیین مقادیر پارامترهای مورد نظر مانند توزیع تنش پسماند و ضربی شدت تنش استفاده شده است.

نمونه‌ها به صورت کامل و با وجود ترک در نرم‌افزار مدل‌سازی و المان بندی می‌گردند. در مرحله اول که فشار اتوفرتاژ اعمال می‌گردد، سطح ترک به هم چسبیده فرض می‌شوند. در مرحله اعمال بار خمشی، قید سطوح ترک برداشته شده و این سطوح به صورت سطح آزاد رفتار می‌کنند. در شکل 8 نمونه‌ای از مدل المان محدود با وجود شرایط مرزی و بارگذاری در مرحله

**Fig. 7** Two samples of the fatigue fractured surfaces

شکل 7 دو نمونه از سطوح شکست خستگی

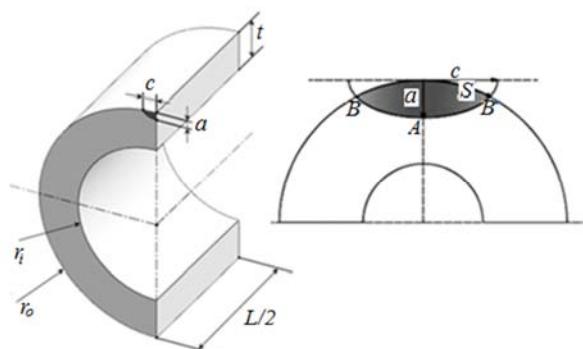
**Fig. 3** A numbers of the built samples

شکل 3 تعدادی از نمونه‌های ساخته شده

برای بارگذاری خستگی خمشی روی نمونه‌ها از دستگاه کشش-فشار اینسترون 8502 اسفاده شد. برای این که گشتاور خمشی معینی در محل ترک ایجاد شود و با توجه به هندسه نمونه‌ها و گیره‌های دستگاه سنتام، مجموعه قید و بست مناسبی طراحی و ساخته شد. شکل شماتیک و نمونه ساخته شده قید و بست در شکل 6 نشان شده است.

نیروی متناوب وارد بر انتهای نمونه با توجه به شکل 6 بین 1kN تا 10kN نوسان می‌کند. فرکانس دستگاه نیز بر روی 3 Hz تنظیم شد. نتیجه آزمایش براساس تعداد سیکل‌ها و طول محیطی دهانه ترک تا زمان شکست نمونه ثبت شد. برای اینکه در طول آزمایش رشد ترک در سطح خارجی نمونه مشاهده شود از تست رنگ نفوذی، PT استفاده شد.

دو حالت از سطوح شکست ایجاد شده در نمونه‌ها در شکل 7 آورده شده است. همچنین مشخصات کامل نمونه‌ها در جدول 3 ارایه شده است. در این جدول، نمونه 8 تکرار نمونه 1 و نمونه 9 تکرار نمونه 5 می‌باشد. دو نمونه 10

**Fig. 4** Specifications and dimensions of semi-elliptical external crack

شکل 4 مشخصات و ابعاد ترک خارجی نیم بیضی

**Fig. 5** Two samples of cracked specimens with $\xi = 0.4$

شکل 5 دو نمونه از قطعات ترکدار با $\xi = 0.4$

می‌باشد. نمونه‌ای از نحوه المان بندی در اطراف پیشانی ترک نیز در شکل 9 آورده شده است.

آنچه در رشد ترک تحت بار خستگی اهمیت دارد، تعیین تعداد سیکل لازم برای رسیدن طول ترک از مقداری اولیه، a_i به طول مورد نظر یا نهایی، a_f است.

معمولًا در مکانیک شکست، رابطه‌ای بین نرخ رشد ترک و تغییرات ضربی شدت تنش، هندسه و بارگذاری برای بررسی رشد ترک خستگی استفاده می‌گردد. ساده‌ترین ولی پرکاربردترین معادله، معادله پاریس است که با رابطه (4) بیان می‌شود [26]:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

که در آن ΔK گستره تغییرات ضربی شدت تنش به ازای تغییرات بار از مقدار کمینه تا بیشینه است. و m ثابت‌های مادی معادله هستند که از طریق برآش منحنی بر نتایج تجربی به دست می‌آید. برای آلمونیوم 59648 ۰.۲۰۲۴ معادله نرخ رشد ترک در سیستم متریک به صورت $\times 10^{-11}$ خواهد بود [26].

با انتگرال‌گیری از معادله (4) می‌توان تعداد سیکلهایی که باعث رشد ترک از مقدار اولیه‌ای مانند a_i به مقدار نهایی a_f می‌شود را به دست آورد. به منظور به دست آوردن تغییرات ΔK بر حسب a در یک بارگذاری با دامنه ثابت، برای طول ترک a به ازای بار بیشینه، P_{\max} مقدار K_{\max} و نیز به ازای بار کمینه، P_{\min} مقدار K_{\min} تعیین می‌شود. مقدار ΔK برابر اختلاف این مقادیر است و از رابطه $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ محاسبه می‌شود. سپس ترک را به میزان مقادیر کوچک Δa و به صورت مجازی رشد داده و در طول ترک جدید ΔK جدید محاسبه گردد. به این ترتیب مقادیر ΔK بر حسب a به دست خواهند آمد و می‌توان با تقریبی از معادله (4) به صورت معادله (5) تعداد سیکلهای مورد نیاز ΔN را محاسبه نمود:

$$\frac{\Delta a}{\Delta N} = C(\Delta K)^m \Rightarrow \Delta N = \frac{\Delta a}{C(\Delta K)^m} \quad (5)$$

هرچه مقدار Δa کوچکتر باشد دقت رابطه 4 بیشتر خواهد بود. در پیشانی ترک، این فرایند فقط برای موقعیتی که ΔK آن بیشینه است مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای رشد نقاط دیگر بر اساس نسبت مقدار ΔK آن به مقدار ماکریزم، میزان رشد تعیین می‌گردد. به عنوان نمونه در نقطه‌ای مانند i برای محاسبه رشد ترک Δa_i می‌توان از رابطه (6) استفاده نمود:

$$\frac{\Delta a_i}{\Delta a} = \left(\frac{\Delta K_i}{\Delta K} \right)^m \Rightarrow \Delta a_i = \Delta a \left(\frac{\Delta K_i}{\Delta K} \right)^m \quad (6)$$

رابطه (6) نشان می‌دهد که رشد نقاط مختلف پیشانی ترک به ازای تعداد سیکل معین بارگذاری، ΔN به یک اندازه نیست و لذا شکل ترک با رشد آن تغییر خواهد کرد.

5- نتایج، بحث و بررسی

5-1- تغییرات ضربی شدت تنش

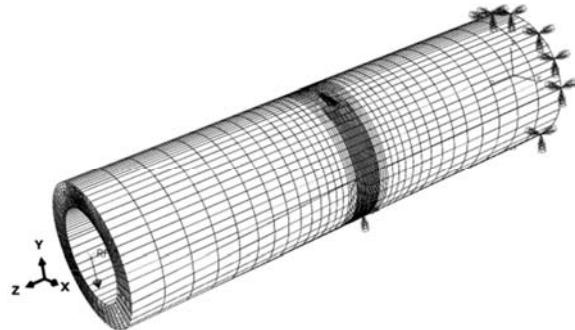
در این قسمت، ابتدا نتایج تحلیل‌های عددی برای تعیین مقادیر شدت تنش و ضربی شدت تنش در استوانه‌های اتوفرتاژ آورده شده و در ادامه به مقایسه نتایج تجربی و عددی پرداخته خواهد شد.

با توجه به شکل 1 مشاهده می‌شود که ناحیه پلاستیک منحنی تنش-کرنش نیز تقریباً خطی است. با برآش بهترین خط بر این قسمت، شبیه آن که مدول مماسی، H است برابر ۶۱۴ مگاپاسکال به دست می‌آید. با داشتن این پارامتر و سایر متغیرهای معادله (2) می‌توان شدت تنش پسمند را به صورت

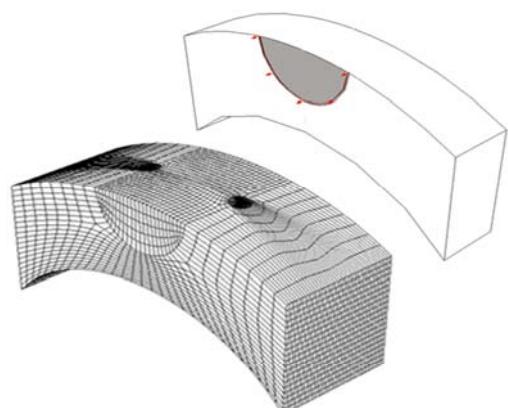
جدول 3 مشخصات کامل نمونه‌ها

شماره نمونه	درصد اتوفرتاژ	$\alpha = a/c$	$\xi = a/t$
1 , 8	40%	2/3	0.4
2	40%	2/3	0.6
3	40%	1.0	0.4
4	40%	3/2	0.4
5 , 9	60%	2/3	0.4
6	60%	1.0	0.4
7	60%	3/2	0.4
10	0	2/3	0.4
11	0	3/2	0.4

اعمال بار خمشی آورده شده است. در انتهای استوانه، شرایط مرزی گیردار منظور شده است. در نزدیکی ترک و در نقطه مقابل آن حرکت در راستای y محدود می‌شود. بار خمشی در انتهای دیگر استوانه با استفاده از نقطه مرجع متصل به سطح مقطع اعمال شده است. این مدل از ۶۵۱۶۵ گره و ۷mm کوچکترین بزرگترین بعد المان در نقاط دور از ترک برابر ۰.۰۱mm حدود ۰.۰۱mm و کوچکترین آن در نزدیک پیشانی ترک حدود ۷mm خواهد بود.



شکل 8 مدل المان محدود استوانه ترکدار، شرایط مرزی و بار خمشی

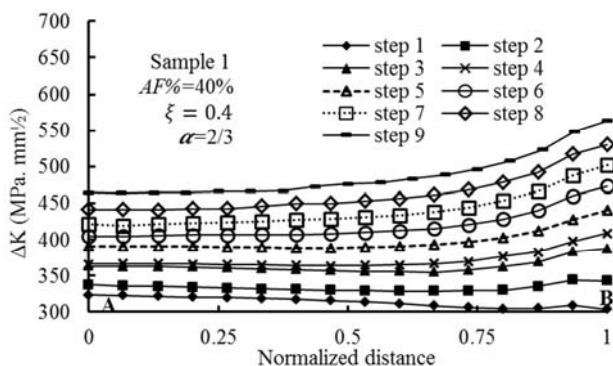


شکل 9 نمونه‌ای از المان بندی در اطراف پیشانی ترک

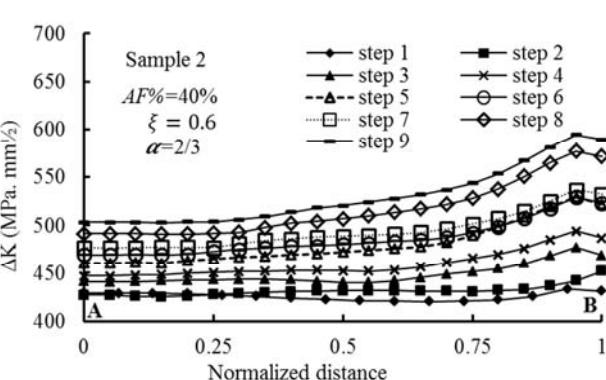
مehندسی مکانیک مدرس، بهمن ۱۳۹۵، دوره ۱۶، شماره ۱۱

تنش پسماند محوری تفاوت زیادی ندارد. با توجه به این عوامل می‌توان نتیجه گرفت که همه مراحل رشد ترک، تغییرات ΔK در نمونه 2 بیشتر از نمونه 1 و عمر آن کمتر می‌باشد.

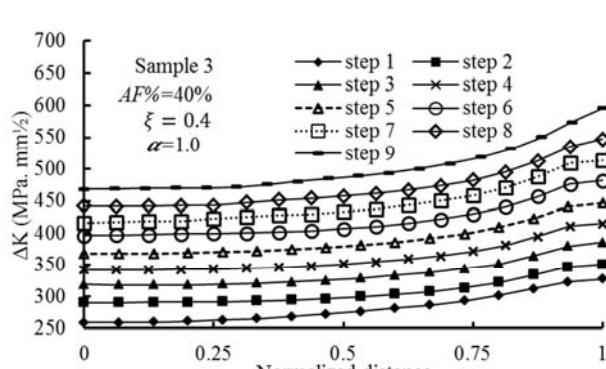
در شکل 13 نتایج برای نمونه 3 آورده شده است. با توجه به اینکه این نمونه نسبت به نمونه 1 پهنهای کمتر و لذا سطح آزاد کوچکتری دارد لذا بنا به علل گفته شده مقادیر ΔK در آن کوچکتر است. با توجه به این که عمق ترک در دو نمونه 1 و 3 یکسان است با وجود عوامل گفته شده، تغییرات مقادیر ΔK در نمونه 3 شدیدتر خواهد بود. در مراحل اولیه رشد، مقادیر ضربی شدت تنش کمتر از نمونه 1 است ولی در مراحل پایانی مقدار آن سرعت‌تر افزایش یافته و در مراحل نهایی مقادیر ΔK نقریباً یکسانی خواهد داشت.



شکل 11 تغییرات ΔK در نمونه 1 در مراحل مختلف رشد ترک



شکل 12 تغییرات ΔK در نمونه 2 به ازای مراحل رشد ترک



شکل 13 تغییرات ΔK در نمونه 3 در مراحل مختلف رشد ترک

تقربی محاسبه نمود. برای تحلیل عددی فرایند اتوفرتاژ، منحنی تنش-کرنش واقعی در نرم افزار المان محدود استقاده شده است. در شکل 10 نتایج روش تحلیلی (با نماد A) و روش عددی (با نماد N) برای محاسبه تنش پسماند ناشی از اتوفرتاژ 40% باهم مقایسه شده است.

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود نتایج عددی مطابقت خوبی با نتایج تحلیلی دارد و می‌توان از آن در مراحل مختلف رشد ترک استفاده نمود.

برای بررسی تغییرات ضربی شدت تنش در پیشانی ترک، در هر هفت حالت جدول 3 تعداد 9 مرحله رشد با $\Delta a = 0.25\text{mm}$ برای $\Delta a = \zeta$ و با $\Delta a = 0.4$ برای $\Delta a = \xi$ در نظر گرفته شد. این مقادیر برای عمیق‌ترین نقطه در پیشانی ترک (نقطه A در شکل 4) منظور شد. در هر مرحله ابتدا با تحلیل عددی مقادیر ضربی شدت تنش در نقاط مختلف پیشانی ترک به دست می‌آید. در ادامه، با توجه به مطالب ذکر شده و مقدار ضربی شدت تنش در نقطه A در هر مرحله، میزان رشد هر نقطه از رابطه (6) تعیین می‌گردد.

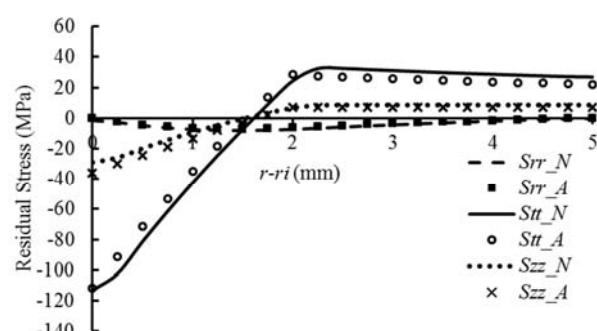
تغییرات ضربی شدت تنش به ازای بار خستگی در مراحل مختلف رشد ترک در نمونه 1 در شکل 11 آورده شده است.

لازم به ذکر است که اعداد محور افقی بر اساس مختصه طولی نقاط پیشانی ترک (در راستای طول c ترک) بی بعد شده است. نقطه A عمیق‌ترین و نقطه B سطحی‌ترین نقاط از پیشانی ترک هستند.

همان‌گونه که دیده می‌شود برای ترک بیضی شکل با عمق کمتر، در ابتدای رشد ترک خستگی، مقادیر ΔK در عمق ترک بیشتر با برابر مقدار آن در نقاط دیگر است. با رشد ترک مقدار آن در نقاط نزدیک به سطح بیشتر افزایش می‌یابد و این به معنی آن است که در مراحل بالاتر در نقاط نزدیک به سطح سرعت و رخ رشد ترک بیشتر می‌شود.

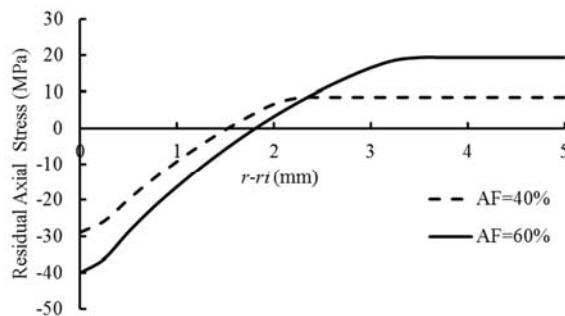
این مطلب در شکل 7 نیز مشخص است و مشاهده می‌شود در لحظه شکست ترد (نواحی با رنگ تیره تر) مقدار رشد در نقاط سطحی بیشتر است.

در شکل 12 تغییرات ضربی شدت تنش برای نمونه 2 آورده شده است. در مقایسه با شکل 11 دیده می‌شود که فقط عمق ترک در نمونه 2 بیشتر شده است. ملاحظه می‌شود که مقادیر ΔK در نمونه 2 بزرگتر است ولی تغییرات آن به ازای رشد ترک نسبت به نمونه 1 کمتر است. با توجه به آن که نسبت α دو نمونه یکسان ولی عمق ترک در نمونه 1 کمتر است لذا سطح ترک (سطح بدون تنش با اعمال بار خشمی خارجی) نیز کوچکتر خواهد بود. به همین علت مقدار ممان اینرسی مقطع کاهش کمتر نسبت به نمونه 2 خواهد داشت. به همین ترتیب موقعیت تار خنثی نیز به مقدار کمی جابجا خواهد شد. از طرف دیگر با توجه به شکل 10 به ازای عمق t و $0.6t$ و $0.4t$



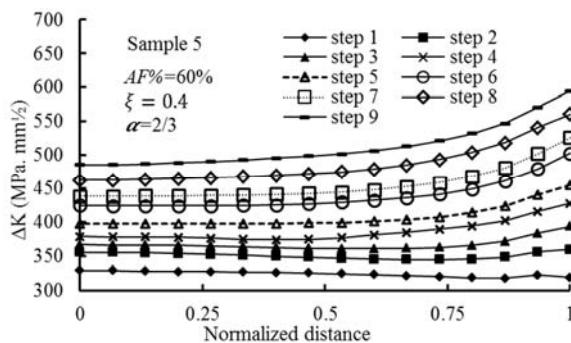
شکل 10 مقایسه نتایج عددی و تحلیلی توزیع تنش پسماند ناشی از اتوفرتاژ 40%

میزان اتوفرتاژ) یکسان است، در لحظه شکست نهایی استاتیکی، هندسه سطح ترک‌ها یکسان خواهد بود.



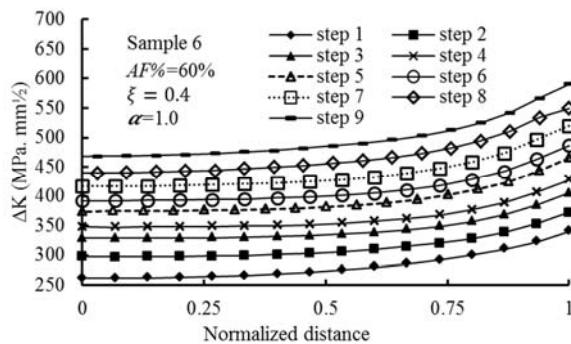
شکل ۱۵ اثر نسبت اتوفرتاژ بر تنش پسماند محوری

شکل ۱۵ اثر نسبت اتوفرتاژ بر تنش پسماند محوری



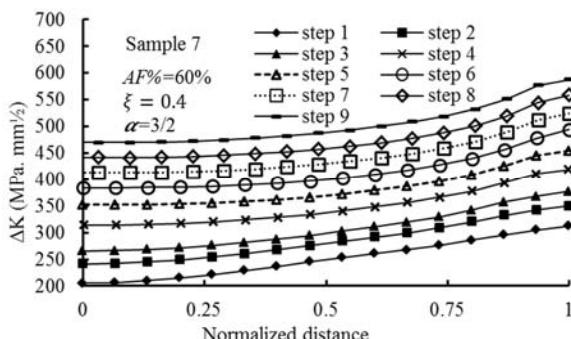
شکل ۱۶ تغییرات ΔK در نمونه ۵ به ازای مراحل رشد ترک

شکل ۱۶ تغییرات ΔK در نمونه ۵ به ازای مراحل رشد ترک



شکل ۱۷ تغییرات ΔK در نمونه ۶ به ازای مراحل رشد ترک

شکل ۱۷ تغییرات ΔK در نمونه ۶ به ازای مراحل رشد ترک



شکل ۱۸ تغییرات ΔK در نمونه ۷ به ازای مراحل رشد ترک

شکل ۱۸ تغییرات ΔK در نمونه ۷ به ازای مراحل رشد ترک

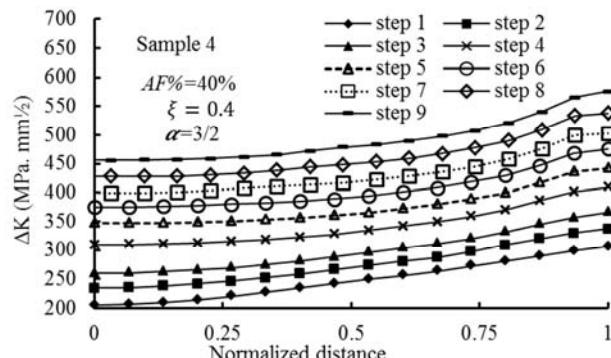
تغییرات ضربیت شدت تنش در نمونه ۴ در شکل ۱۴ ارایه شده است. در مقایسه با نمونه ۱، عمق ترک‌ها برابر است ولی پهنه‌ی ترک در نمونه ۴ کمتر است.

به همین دلیل سطح ترک کوچک‌تر و لذا تنش خمی کمتری در سطح مقطع استوانه وجود خواهد داشت. ولی با رشد ترک، تغییرات ΔK در پیشانی ترک نمونه ۴ شدیدتر شده و در مراحل پایانی، رفتاری همانند نمونه ۱ خواهد داشت.

همان‌گونه که دیده می‌شود به ازای نسبت اتوفرتاژ 40% و عمق ترک برابر، تغییرات ΔK در مراحل آخر رشد ترک خستگی در هر سه نمونه ۱، ۳ و ۴ یکسان می‌شود ولی برای ترک عمیقتر (شکل ۱۲) مقادیر بزرگ‌تر و تغییرات کمتر خواهد بود. می‌توان نتیجه گرفت که به ازای نسبت اتوفرتاژ و عمق برابر برای هر نوع ترک اولیه، در نزدیک لحظه شکست استاتیکی، شکل نهایی ترک برای مقدادر ΔK در پیشانی آن یکسان خواهد بود.

در ادامه به بررسی اثر نسبت اتوفرتاژ بر تغییرات ΔK پرداخته شده است. با افزایش نسبت اتوفرتاژ مقادیر، تنش‌های پسماند نیز تغییر می‌کند. با توجه به این که ترک‌ها به صورت محيطی در نظر گرفته شده‌اند لذا تغییرات تنش محوری مهم خواهد بود. تغییرات این تنش برای دو نسبت اتوفرتاژ 40 و 60% در شکل ۱۵ آورده شده است. مشاهده می‌شود که برای اتوفرتاژ 60% مقدار تنش‌های کششی افزایش یافته ولی ناحیه کششی کوچک‌تر شده است. به همین علت تفاوت تغییرات ΔK در $\xi = 0.4$ و $\xi = 0.6$ بیشتر از ۰.۶ است. در شکل ۱۶ تا ۱۸ به ترتیب تغییرات ضربیت شدت تنش در نمونه‌های ۵ و ۷ نشان داده شده است. در هر سه نمونه نسبت اتوفرتاژ 60% و عمق ترک‌ها نیز یکسان و برابر $\xi = 0.4$ است. مشاهده می‌شود که رفتار ترک در این حالت همانند رفتار آنها در نسبت اتوفرتاژ 40% است و فقط مقدار تغییرات ضربیت شدت تنش بزرگ‌تر شده است. این افزایش به علت افزایش تنش پسماند کششی محوری در اتوفرتاژ 60% می‌باشد. در این حالت برای ترک با عمق یکسان و پهنه‌ی بزرگ‌تر مقدار ΔK بزرگ‌تر است ولی رشد ترک و تغییرات ΔK آهسته‌تر است و مانند اثر اتوفرتاژ 40% در لحظه شکست نهایی، ابعاد ترک‌ها تقریباً یکسان می‌شود.

تقریباً در همه حالات مشاهده می‌شود که مقدار ΔK در نقاط سطحی (نقاط B) بیشتر از سایر نقاط پیشانی ترک است. این به معنی آن است که حتی ترک‌هایی به شکل دایره $\alpha = 1.0$ و بیضی معکوس $\alpha > 1.0$ نیز بعد از چند مرحله رشد، به شکل بیضی مستقیم $\alpha < 1$ درخواهند آمد. مراحل رشد نشان داده شده در شکل ۷ نیز مؤید این موضوع می‌باشد. در حقیقت با توجه به اینکه مشخصات نمونه‌ها (جنس، هندسه، عمق ترک، بارگذاری و



شکل ۱۴ تغییرات ΔK در نمونه ۴ به ازای مراحل رشد ترک

اندازه‌گیری طول ترک نیم‌بیضی و میزان رشد آن وجود نداشت، در این تحقیق به بررسی تغییرات موقعیت نقاط سطحی B در سیکل‌های مختلف بر اساس فاصله محیطی این نقاط (مقدار $2S$ در شکل 4 معادل دهانه ترک) پرداخته شد.

در شکل 21 به مقایسه نتایج عددی و تجربی رشد ترک خستگی در نمونه‌های 1 و 8 (تکرار نمونه 1) پرداخته شده است. مشاهده می‌شود که تکرار آزمایش نتایج تزدیکی با آزمایش اول دارد و اختلاف نتایج قابل قبول است. نتایج عددی نیز همخوانی قابل قبولی با نتایج تجربی نشان می‌دهند. هرچند که عمر خستگی بیشتری با روش عددی محاسبه می‌شود. در مراحل اولیه رشد، همخوانی نتایج بهتر است که علت آن می‌تواند اثر کمتر تغییر شکل‌های پلاستیک و نیز عدم تغییرات تنش پسماند اولیه در مراحل ابتدایی باشد.

در شکل 22 نتایج برای نمونه‌های 5 و 9 (تکرار نمونه 5) آورده شده است. همانند نمونه قبلی نتایج تجربی و تکرار آنها مطابقت قابل قبولی دارند و تحلیل عددی نیز در پیش بینی عمر خستگی دقیق مناسبی را دارا می‌باشد. با توجه به این دو شکل که تفاوت آنها در درصد اتوفرتاژ است، ملاحظه می‌شود که در صد بالاتر اتوفرتاژ باعث کاهش قابل ملاحظه عمر خستگی شده و برای طول محیطی یکسان، تعداد سیکل تقریباً 25% کاهش می‌یابد.

اثر همزمان درصد اتوفرتاژ و هندسه ترک بر عمر خستگی نمونه‌ها در شکل 23 برای $\alpha = 2/3$ و در شکل 24 برای $\alpha = 3/2$ نشان داده شده است.

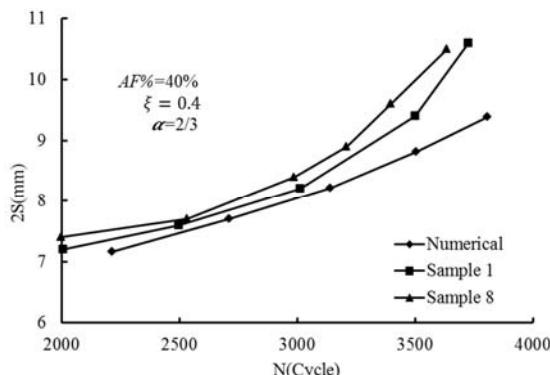


Fig. 21 Comparing the numerical and experimental results in samples 1 and 8(test repeating study)

شکل 21 مقایسه نتایج عددی و تجربی در نمونه‌های 1 و 8 (بررسی تکرار آزمایش)

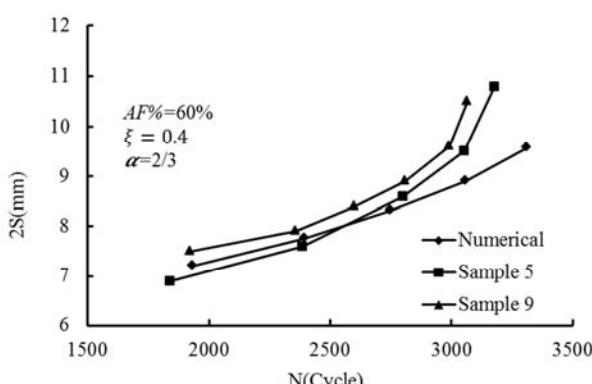


Fig. 22 Comparing the numerical and experimental results in samples 5 and 9(test repeating)

شکل 22 مقایسه نتایج عددی و تجربی در نمونه‌های 5 و 9 (تکرار آزمایش)

تغییرات مقادیر ΔK در نقطه عمقی ترک، ΔK_A در مراحل مختلف رشد در نمونه‌ها در شکل 19 نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که نسبت تنش نقاط سطحی به نقاط عمقی در اتوفرتاژ 60% بیشتر از اتوفرتاژ 40% است. این روند در طول رشد ترک برقرار است. همچنین ملاحظه می‌شود که با افزایش طول ترک در همه نمونه‌ها، مقادیر ΔK به مقدار تقریباً یکسان و برابر نزدیک می‌شوند.

در شکل 20 نسبت مقادیر ضریب شدت تنش در نقاط سطحی به نقاط عمقی در مراحل مختلف رشد ترک در نمونه‌های مورد بررسی، ارایه شده است.

همان‌گونه که دیده می‌شود در ابتدای رشد خستگی برای ترک‌هایی با $\alpha \geq 1$ این نسبت کوچکتر از واحد است ولی با افزایش طول ترک، مقدار آن افزایش پیدا می‌کند.

ترک‌هایی با مقدار اولیه $1 < \alpha$ رفتار متفاوتی دارند یعنی در ابتدا نسبت $\Delta K_B/\Delta K_A$ به مقدار قابل ملاحظه‌ای از مقدار واحد بزرگتر است ولی با رشد ترک این نسبت کوچکتر می‌شود. همچنین با رشد ترک و افزایش قطر کوچک ترک، نسبت تغییرات ضریب شدت تنش به مقدار تقریباً ثابتی همگرا می‌گردد. ملاحظه می‌شود که برای اتوفرتاژ 60% نسبت $\Delta K_B/\Delta K_A$ کوچکتر است.

5- تغییرات عمر خستگی

در این قسمت به بررسی عمر خستگی و رابطه رشد ترک با تعداد سیکل اعمالی باز خارجی در نمونه‌ها پرداخته شده است. با توجه به آنکه امکان

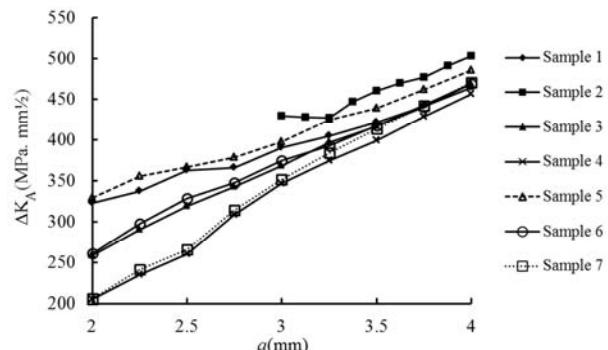


Fig. 19 Variations of ΔK in point A for various steps of the crack growth

شکل 19 تغییرات ΔK در نقطه A در مراحل مختلف رشد ترک

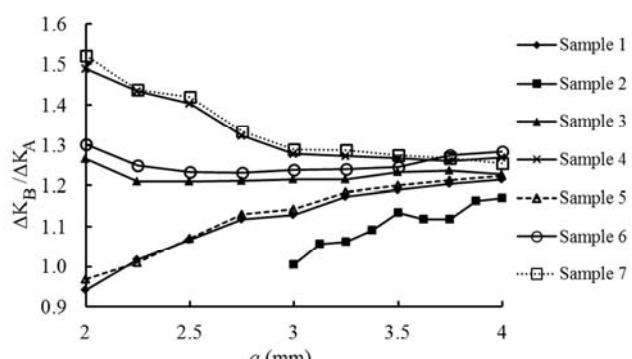


Fig. 20 Ratio of ΔK in point B to A for various steps of the crack growth

شکل 20 نسبت تغییرات ΔK در نقطه A به نقطه B در مراحل مختلف رشد ترک

باهم مقایسه گردید. بر اساس تحلیل‌های انجام شده، از نتایج مهم می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

سطح ترک در نمونه‌هایی که تحت خمش خالص هستند، در طول رشد، شکل نیم‌بیضوی خود را حفظ می‌کنند. در نمونه‌هایی با ترک اولیه نیم‌بیضوی معکوس و نیم‌دایره‌ای، با رشد ترک، ترک به شکل نیم‌بیضوی در می‌آید. سرعت رشد ترک در نقاط سطحی بیشتر از نقاط عمقی است.

تحت بار خستگی و در لحظه شکست استاتیکی، بدون توجه به هندسه اولیه، هندسه نهایی ترک شکل معین و تقریباً ثابتی دارد.

برای هر نوع هندسه اولیه ترک (نیم بیضی مستقیم یا معکوس و نیم‌دایره)، گستره ضربی شدت تنش با تناسب تقریباً خطی بر حسب عمق افزایش می‌یابد. برای هر نوع ترک، نسبت ضربی شدت تنش نقطه سطحی به عمقی، با رشد ترک به مقدار تقریباً ثابتی خواهد رسید.

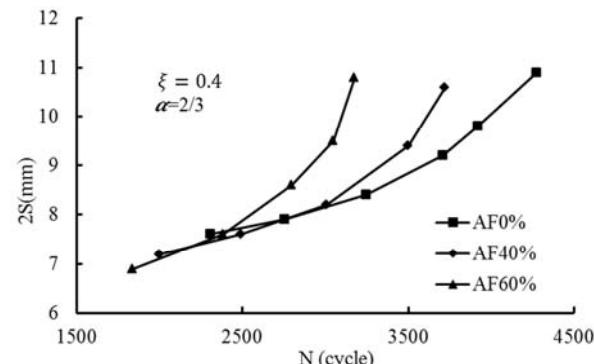
اعمال فرایند اتوفرتأذ باعث ایجاد تنش پسماند کششی محوری در سطح بیرونی استوانه می‌گردد. مقدار این تنش با افزایش درصد اتوفرتأذ، افزایش می‌یابد. به همین علت در نمونه‌های تحت خمش، تعداد سیکل‌ها تا لحظه شکست برای نمونه‌ای با اتوفرتأذ 60% از نمونه‌ای با اتوفرتأذ 40% است. هر دوی آنها از نمونه بدون اتوفرتأذ سیکل کمتری تا لحظه شکست تحمل می‌کنند.

تحت بار خمشی خستگی، هر چه سطح ترک بزرگتر باشد، مقدار ضربی شدت تنش در پیشانی ترک بزرگتر و لذا عمر خستگی آن کمتر خواهد شد.

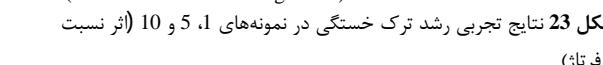
تحلیل عددی عمر خستگی، نتایج قابل قبولی دارد. هرچند در حالاتی عمر را بیشتر از حالت واقعی نشان دهد، ولی می‌توان با ضربی اطمینان مناسبی به نتایج آن اعتماد نمود.

7- مراجع

- [1] X. B. Lin, R. A. Smith, Shape growth simulation of surface crack in tension fatigue round bars, *International Journal of Fatigue*, Vol. 19, No. 6, pp. 461-469, 1997.
- [2] X. B. Lin, R. A. Smith, Fatigue growth prediction of internal surface cracks in pressure vessels, *International Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 120, pp. 17-23, 1998.
- [3] X. B. Lin, R. A. Smith, Finite element modeling of fatigue crack growth of surface cracked plate II: crack shape change, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 63, No. 5, pp. 523-540, 1999.
- [4] A. Carpinteri, R. Brighenti, A. Spagnoli, Part-through cracks in pipes under cyclic bending, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 185, pp. 1-10, 1998.
- [5] A. Carpinteri, R. Brighenti, Part-through cracks in round bars under cyclic combined axial and bending loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 18, No. 1, pp. 33-39, 1996.
- [6] N. Courreau, J. Royer, Simplified model for the fatigue growth analysis of surface cracks in round bars under mode I, *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 10, pp. 711-718, 1998.
- [7] M. Fonte, L. Reis, The effect of steady torsion on fatigue crack growth in shaft, *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, No. 5-6, pp. 609-617, 2005.
- [8] A. R. Shahani, A. Shahhosseini, Finite element analysis and experimental investigation of fatigue crack growth in pipes containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to bending, *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No. 5, pp. 563-573, 2010.
- [9] A. Shahhosseini, A. R. Shahani, Analysis of growth of surface semi-elliptical crack on thick cylinders under alternate bending load, *16th annual ISME conference Kerman, Iran*, 2008.
- [10] A. Shahhosseini, A. R. Shahani, FEM analysis of fatigue crack growth in pipes under mixed loading, *16th annual ISME conference*, Kerman, Iran, 2008. (in Persian)
- [11] A. R. Shahani, S. E. Habibi, Stress intensity factors in a hollow cylinder containing a circumferential semi-elliptical crack subjected to combined loading, *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 128-140, 2007.
- [12] A. P. Parker, stress intensity and fatigue crack growth in multiply-cracked, pressurized, partially autofrettaged thick cylinders, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 4, No. 4, pp. 321-330, 1981.
- [13] A. P. Parker, J. R. Farrow, Stress intensity factors for multiple radial cracks emanating from the bore of an autofrettaged or thermally stressed, thick



شکل 23 نتایج تجربی رشد ترک خستگی در نمونه‌های ۱، ۵ و ۱۰ (اثر نسبت اتوفرتأذ)



شکل 24 نتایج تجربی رشد ترک خستگی در نمونه‌های ۴، ۷ و ۱۱ (اثر نسبت اتوفرتأذ)

مشاهده می‌شود که در هر دو حالت در شروع رشد ترک، در نمونه بدون اتوفرتأذ دیرتر شروع به رشد می‌کند و در ادامه نیز نرخ رشد آن کمتر است. عمق ترک در هر دو حالت یکسان است ولی به علت آن که برای دهانه ترک کوچکتر است، عمر خستگی بزرگتر خواهد بود. در این حالت، اختلاف حالت بدون اتوفرتأذ با حالت وجود اتوفرتأذ بیشتر از حالت $\alpha = 2/3$ است. می‌توان به این نتیجه رسید که تحلیل عددی نتایج قابل قبولی دارد ولی ممکن است در حالاتی عمر را بیشتر از حالت واقعی ارایه دهد. با این وجود می‌توان با ضربی اطمینان مناسبی به نتایج آن اعتماد نمود. وجود اختلاف در نتایج می‌تواند ناشی از عدم دقیق در حین آزمایش نیز باشد؛ که از آن جمله می‌توان به وجود عیوب در ماده مورد آزمایش، نحوه ایجاد اتوفرتأذ، ایجاد ترک به وسیله اسپارک و مواردی از این قبیل اشاره کرد.

6- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی اثر فرایند اتوفرتأذ بر رفتار خستگی ترک‌های سطحی در سطح خارجی استوانه آلومینیومی تحت بار خمشی پرداخته شده است. اثر درصد اتوفرتأذ، بعد از هندسه ترک و نسبت عمق آن به ضخامت استوانه بر عمر خستگی بررسی شده است. تعییرات گستره ضربی شدت تنش در نقاط مختلف پیشانی ترک در مراحل مختلف رشد آن تعیین گردید. رشد ترک خستگی بر حسب تعداد سیکل‌های بار گذاری برای بعد مختلف ترک و درصد اتوفرتأذ شد. نتایج تجربی و عددی در محاسبه عمر خستگی نیز

- two dimensional weight function method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 8, pp. 137-145, 2014. (in Persian)
فارسی
- [21] R. Seifi, Stress intensity factors for internal surface cracks in autofrettaged functionally graded thick cylinders using weight function method, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 113-123, 2015.
- [22] R. Seifi, A. Dejam, Study the effect of autofrettaging of functionally graded cylinder on the surface crack parameters using numerical discretizing of stress fields, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 255-264, 2015. (in Persian)
فارسی
- [23] R. Ghajar, M. Abbaspour Niasani, H. Saeidi Googarchin, Explicit expressions of stress intensity factor for external semi-elliptical circumferential cracks in a cylinder under mechanical and thermal loads, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 90-98, 2014. (in Persian)
فارسی
- [24] C.-Q. Li, G. Fu, W. Yang, Stress intensity factors for inclined external surface cracks in pressurised pipes, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 165, pp. 72-86, 2016.
- [25] G. H. Majzoobi, A. Ghomi, Optimisation of autofrettage in thick-walled cylinders, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 16, No. 1-2, pp. 124-131, 2006.
- [26] E. P. Phillips, The Influence of Crack Closure on Fatigue Crack Growth Thresholds in 2024-T3 Aluminum Alloy, *Mechanics of Fatigue Crack Closure, ASTM STP*, Vol. 982, pp. 505-515, 1988.
- [14] H. M. Shu, J. Petit, G. Bezine, Stress intensity factors for radial cracks in thick walled cylinders—II. Combination of autofrettage and internal pressure, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 49, No. 4, pp. 625-629, 1994.
- [15] R. Arché, M. Perl, Influence of autofrettage on the stress intensity factors for a thick-walled cylinder with radial cracks of unequal length, *International Journal of Fracture*, Vol. 39, No. 1, pp. R29-R34, 1989.
- [16] M. Perl, A. Nachum, 3-D stress intensity factors for internal cracks in an overstrained cylindrical pressure vessel—part i: The effect of autofrettage level, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 122, No. 4, pp. 421-426, 2000.
- [17] M. Perl, A. Nachum, 3-D stress intensity factors for internal cracks in an overstrained cylindrical pressure vessel—part ii: The combined effect of pressure and autofrettage, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 123, No. 1, pp. 135-138, 2000.
- [18] M. Perl, M. Steiner, 3-d stress intensity factors due to full autofrettage for inner radial or coplanar crack arrays and ring cracks in a spherical pressure vessel, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 2, pp. 3625-3646, 2016.
- [19] M. Perl, M. Steiner, The beneficial effect of full or partial autofrettage on the combined 3-D stress intensity factor for an inner radial lunular or crescentic crack in a spherical pressure vessel, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 156, pp. 124-140, 2016.
- [20] R. Ghajar, H. Saeidi, Investigation of pressure gradient effect on stress intensity factor variations in autofrettaged cracked thick-walled tubes using