



مطالعه فرایند انطباق تداخلی و تاثیر آن بر عمر خستگی در فولاد سخت

سینا صباغی فرشی¹، امیر راستی²، محمدحسین صادقی^{3*}، جواد هاشمی خسروشاهی¹

1- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 14115-143 sadeghim@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 تیر 1396

پذیرش: 14 مهر 1396

ارائه در سایت: 05 آبان 1396

کلید واژگان:

انطباق تداخلی

عمر خستگی

شبیه‌سازی المان محدود

چکیده

در این پژوهش فرایند انطباق تداخلی و تاثیر آن بر عمر خستگی قطعات سوراخ‌داری از جنس فولاد AISI4340 سخت‌کاری شده به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور، پین‌هایی از جنس تنگستن کارباید درون قطعات فولادی جازده شده و تحت آزمون خستگی با نسبت بار صفر و فرکانس 10 هرتز قرار گرفتند. این آزمایش‌ها برای نمونه‌هایی با 5 سطح تداخل و دو بار تکرار صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد که نیروی فشاری لازم برای جازنی پین در سوراخ با افزایش اندازه تداخل بیشتر می‌شود. بیشترین مقدار این نیرو نیز زمانی بود که پین به سطح زیرین نمونه رسیده و بیشترین حجم تغییرشکل انجام گرفت. شبیه‌سازی سه‌بعدی المان محدود فرایند انطباق تداخلی نشان داد که توزیع تنش‌های پسماند ایجاد شده در دیواره سوراخ به صورت فشاری و در فاصله دورتر از آن کششی می‌باشند. همچنین نتایج آزمون‌های تجربی خستگی حکایت از افزایش عمر خستگی نمونه‌ها تا میزان انطباق تداخلی 1.5% داشت. در این سطح، عمر خستگی نسبت به نمونه بدون انطباق، حدود 2.5 برابر است. ولی با افزایش تداخل تا 2%، روند صعودی عمر خستگی متوقف می‌گردد. بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها حاکی از آن بود که ترک‌های خستگی در نمونه‌های دارای انطباق پرسی از لبه سوراخ شروع به جوازنه‌زنی می‌کنند. این در حالی است که در نمونه‌های بدون تداخل، محل آغاز جوازنه‌زنی ترک در صفحه میانی سوراخ می‌باشد.

Investigation of Interference fit and its effect on fatigue life in hardened steel

Sina Sabbaghi Farshi, Amir Rasti, Mohammad Hossein Sadeghi*, Javad Hashemi Khosrowshahi

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 July 2017
Accepted 06 October 2017
Available Online 27 October 2017

Keywords:

Interference Fit
Fatigue Life
Finite Element Simulation

ABSTRACT

In this study, interference fit process and its influence on the fatigue life of holed specimens made of AISI4340 hardened steel were investigated experimentally. For this purpose, tungsten carbide pins were fitted into the steel samples and put under fatigue test with zero load ratio and 10 Hz frequency. These experiments were done for specimens with 5 interference levels and two repetitions. Results revealed that the compressive force required for interference fitting the pin in the hole increases as the interference size goes up. The peak force was observed when the pin reached the bottom of the specimen and maximum plastic deformation occurred. 3D finite element modeling of interference fit showed that distribution of residual stress on the hole wall and far away from it were compressive and tensile respectively. Moreover, results of fatigue experiments showed the specimens fatigue life increased up to 1.5% interference fit. In this level, fatigue life is 2.5 times greater than specimen without fitting. However, by increasing interference up to 2%, increasing trend of fatigue life is stopped. Analysis of the fracture surface of samples showed that the fatigue cracks are initiated from the edge of hole at specimens with press fit. While the crack initiation site was in the middle plane of the hole for specimens without fitting.

1- مقدمه

سرمته‌های حفاری مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سرمته‌ها به منظور انجام فرایند حفاری، تعدادی اینسرت از جنس تنگستن کارباید هستند با الگویی مشخص و توسط فرایند انطباق تداخلی جا زده می‌شوند. سرمته‌های حفاری¹ در شرایط محیطی سخت و تحت بارهای متناوب و ضربه‌ای بالا قرار دارند. لذا حفظ خواصی چون مقاومت به ضربه، ساییش و همچنین عمر خستگی بالا در این قطعات ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. در

انطباق تداخلی روشی مرسوم در اتصال قطعات مکانیکی است که برای انتقال گشتاور به‌کار می‌رود. در این روش، قطعه پین درون سوراخی با قطری کوچکتر از آن جازده می‌شود. این فرایند عمدتاً باعث ایجاد تنش پسماند مماسی در اطراف سوراخ می‌گردد [1]. این تنش‌ها (به ویژه در سطوح بالاتر تداخل) با کاهش دامنه و میانگین تنش (و یا کرنش)، عمر جوازنه‌زنی و رشد ترک خستگی را افزایش می‌دهند. انطباق تداخلی روشی است که در تولید

¹ Drilling bits

Please cite this article using:

S. Sabbaghi Farshi, A. Rasti, M. H. Sadeghi, J. Hashemi Khosrowshahi, Investigation of Interference fit and its effect on fatigue life in hardened steel, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 420-428, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

انطباق تداخلی اغلب در سایه تاثیر فرآیندهای دیگری همچون انبساط سرد یا اتصال پیچی قرار گرفته است. همچنین، در اغلب این پژوهش‌ها آلیاژهای آلومینیوم سری 2000 و 7000 مورد مطالعه قرار گرفته‌اند و گزارشی در زمینه بررسی عمر خستگی فولاد AISI4340 سختی بالا یافت نشد. لذا در این پژوهش، اثر انطباق تداخلی بر عمر خستگی انطباقی پرسی پین‌هایی از جنس تنگستن کارباید با نمونه‌های فولادی از جنس آلیاژ AISI4340 مورد بررسی قرار گرفته است.

2- مواد و تجهیزات مورد استفاده

جنس ماده قطعه‌کار مورد استفاده در این تحقیق، فولاد AISI4340 با سختی 40 راکول سی بود. ترکیب شیمیایی فولاد به دست آمده از آزمایش کوانتومتری در جدول 1 ارائه شده است. برای دستیابی به سختی موردنظر، ابتدا دمای قطعه‌کار توسط کوره خلأ به آرامی تا دمای 870 درجه سانتی‌گراد بالا برده شد و تا آستینیت شدن کامل در این دما نگهداری گردید. سپس با استفاده از حمام روغن، دمای قطعه‌کار تا حدود 100 درجه سانتی‌گراد کاهش یافت. در ادامه برای انجام عملیات بازپخت، قطعه در دمای 260 درجه سانتی‌گراد به مدت 2 ساعت حرارت داده شد و در نهایت در هوا خنک گردید [12]. برای دستیابی به خواص مکانیکی ماده، آزمون کشش روی نمونه‌ای از همین جنس انجام گرفت. "شکل 1" نمودار تنش- کرنش مهندسی ماده را پس از انجام عملیات حرارتی نشان می‌دهد.

برای ایجاد انطباق تداخلی، ده نمونه با ابعاد $8 \times 26 \times 80$ میلی‌متر ماشین‌کاری و سنگ‌زنی شدند (شکل 2 الف)). به همین تعداد نیز پین‌هایی از جنس تنگستن کارباید با سختی 65 راکول سی و قطر اسمی 10 میلی‌متر برای ایجاد تداخل استفاده گردید که در "شکل 2 ب)" نشان داده شده است. جهت تسهیل فرایند جازنی، یک‌طرف پین‌ها توسط دستگاه سنگ سنباده پخ زده شدند. "شکل 3" ابعاد دقیق پین و نمونه‌های آزمایشی به کار رفته را نشان می‌دهد.

به‌منظور جا زدن پین درون نمونه‌های فولادی و همچنین انجام تست‌های خستگی روی نمونه‌های انطباق تداخلی، از دستگاه آزمون اونیورسال سنتم مدل SAF50 با ظرفیت 5 تن استفاده شد. این دستگاه مطابق "شکل 4"، دارای یک فک پایینی ثابت و فک بالایی متحرک می‌باشد. سیستم مکانیکی به‌کار رفته جهت بستن فک‌ها و اعمال نیرو به‌صورت هیدرولیکی بوده و مقدار و جهت جابجایی و نیروی اعمالی توسط رایانه کنترل می‌شود.

زبری سطح تمامی سوراخ‌های ایجادشده با استفاده از دستگاه زبری‌سنج

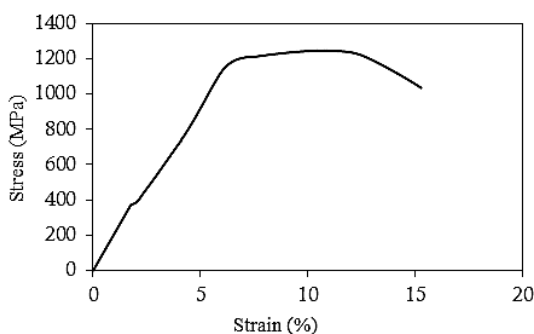


Fig. 1 Stress-strain curve of AISI4340 steel with hardness of 40 HRC
شکل 1 منحنی تنش کرنش مهندسی فولاد AISI4340 با سختی 40 راکول سی

ساخت این قطعات عموماً از فولادهای کم‌آلیاژ استحکام بالا مانند AISI4340 استفاده می‌شود [2].

یکی از دلایل عمده ازکارافتادگی سرمته‌ها، درآمدن اینسرت‌ها است. وجود بارهای متغیر و خمشی ناشی از چرخش سرمته و همچنین تلرانس تداخلی نامناسب، باعث جوانه‌زنی و رشد سریع ترک‌های خستگی در بدنه (به‌ویژه در مواضع تمرکز تنش) می‌گردد. در واقع، این ترک‌ها با تسهیل تغییرشکل پلاستیک دهانه سوراخ، سبب بازشدگی راحت‌تر آن و خروج اینسرت‌ها از بدنه می‌شوند. در چنین مواقعی، حفاری چاه ناقص مانده و حفر چاهی جدید، هزینه‌های بسیار زیادی را تحمیل می‌کند. لذا یکی از مهم‌ترین مسائل در افزایش عمر سرمته‌های حفاری، دستیابی به تداخل انطباقی مناسب بین پین‌های تنگستن کارباید و بدنه فولادی آن است. در ادامه به مرور برخی از پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه پرداخته می‌شود. کرووز [3] تحقیقات گسترده‌ای را برای بررسی تأثیر درصد تداخل بر عمر خستگی صفحات سوراخ‌دار انجام داد. نتایج حاکی از بالاتر بودن عمر خستگی صفحات دارای تداخل نسبت به صفحات بدون تداخل بود. همچنین افزایش درصد تداخل اثر مثبتی روی عمر خستگی داشت.

لانچپوتی و پولس [4] اثر انطباق تداخلی روی عمر خستگی نمونه‌هایی از جنس آلومینیوم Al2024-T351 را در پنج سطح بررسی کردند. مقاومت خستگی در اثر ازدیاد انطباق تداخلی افزایش می‌یافت. همچنین با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی مشخص شد که هرچه درصد انطباق پرسی بیشتر شود، دامنه تنش تقریباً بدون تغییر باقی مانده و تنش میانگین کاهش می‌یابد. زاویه جوانه‌زنی ترک نیز تابعی از اندازه تداخل بود.

چاخارلو و همکاران [5] تأثیر انطباق تداخلی بر عمر خستگی صفحه سوراخ‌دار از جنس آلیاژ آلومینیوم 7075-T6 را به‌صورت تجربی و عددی بررسی کردند. مقایسه مقاطع شکست نمونه‌هایی با تداخل‌های مختلف نشان داد که ایجاد و رشد ترک در نمونه بدون تداخل از صفحه میانی سوراخ بود. این درحالی است که ترک در نمونه‌های با انطباق پرسی از لبه بالایی سوراخ اتفاق افتاد. همچنین، نتایج حاصل از شبیه‌سازی مشخص کرد که انطباق تداخلی، دامنه تنش متناوب را کاهش داده و تنش میانگین را اندکی افزایش می‌دهد.

کروکولو و همکاران [6] پژوهشی را در زمینه تأثیر انطباق تداخلی بر بهبود عمر خستگی ورق‌های سوراخ‌دار از جنس فولاد آهنگری 35 KB2 انجام دادند. نمودار عمر خستگی به‌دست‌آمده نشان از تأثیر انطباق تداخلی بر افزایش استحکام خستگی نمونه‌های سوراخ‌دار داشت. این تاثیر افزایشده تنها در سطوح بالای بارگذاری مشاهده شد و با کاهش سطح بارگذاری، استحکام خستگی و حد دوام برای سطوح مختلف انطباق تقریباً یکسان بود.

براون و اونس [7] به مطالعه تأثیر تغییرات اندازه تداخل بین بوش فولادی و لولای آلومینیومی بر عمر خستگی پرداختند. نتایج به‌دست آمده نشان داد تغییرات هرچند کوچک در میزان تداخل، می‌تواند تأثیر زیادی در عمر خستگی مجموعه انطباقی داشته باشد. این تغییرات در ناحیه کم‌پرچرخه نمودار عمر خستگی، کمتر از ناحیه پرچرخه بود. در نمونه‌های شکست، شواهدی مبنی بر جابه‌جایی بین لولا و بوش وجود داشت که به‌صورت سایش سیاه‌رنگی روی آلومینیوم و فولاد و همچنین خراش‌های جانبی در آلومینیوم ظاهر شدند. بررسی نهایی سطح مقطع شکست قطعات نیز مشخص کرد که با افزایش سطح تداخل، زاویه ناحیه جوانه‌زنی ترک کاهش پیدا می‌کند.

مطالعات دیگری در زمینه تاثیر انطباق تداخلی بر عمر خستگی به صورت تجربی و عددی صورت گرفته است [8-11]. با این حال، تاثیر مستقیم

جدول 1 ترکیب شیمیایی فولاد آلیاژی AISI4340

عنصر	درصد وزنی (%)
کربن	0.316
نیکل	1.770
کروم	1.830
منگنز	0.494
مولیبدن	0.341
سیلیسیوم	0.165
مس	0.159
آهن	پایه

مارسرف¹ مدل PS1 با دقت 0.001 میکرومتر و طول کورس 5.6 میلی‌متر اندازه‌گیری شد. به‌منظور انجام زبری‌سنجی، ابتدا سطح نمونه‌های فرزکاری از هرگونه آلودگی تمیز گردید. سپس زبری‌سنجی با معیار زبری سطح متوسط (R_a) در 5 ناحیه مختلف از سطح سوراخ انجام گرفت.

به‌منظور مطالعه سطوح شکست خستگی و بررسی محل جوانه‌زنی ترک‌های خستگی نیز از دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی مدل XL30 ساخت شرکت فیلیپس با قدرت بزرگنمایی 500000 برابر و قدرت تفکیک کمتر از 20 نانومتر استفاده گردید.

3- روش انجام آزمایش

هدف از این پژوهش، بررسی اثر انطباق تداخلی بین فولاد سخت و پین‌های تنگستن کاربردی بر عمر خستگی نمونه‌ها می‌باشد. به‌همین منظور و با توجه به ثابت بودن قطر پین‌ها، سوراخ‌هایی با قطرهای مختلف توسط فرایند فرزکاری ماریچ (جهت ایجاد اندازه‌های تداخل متفاوت) روی نمونه‌های آزمایش ایجاد گردید. در روش فرزکاری ماریچ، با استفاده از حرکت ماریچ ابزار فرز انگشتی می‌توان سوراخی با هر اندازه اسمی را ایجاد کرد. از ابزار فرزی با قطر 6 میلی‌متر برای ایجاد سوراخ‌هایی با اندازه اسمی نزدیک به 10 میلی‌متر استفاده شد. شرایط برشی در تمامی فرایندهای ایجاد سوراخ به‌صورت یکسان در نظر گرفته شد و زبری سطح در تمامی سوراخ‌ها کمتر از $R_a = 0.4 \mu\text{m}$ بود.

به‌منظور بررسی اثر انطباق تداخلی بر استحکام خستگی، 5 سطح تداخل در نظر گرفته شد (جدول 2) و آزمون‌های خستگی با فرض دو بار تکرار در هر سطح صورت گرفت (در مجموع 10 نمونه). اندازه انطباق تداخلی به صورت معادله (1) تعریف می‌شود.

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

که در آن D قطر پین و d قطر سوراخ نمونه فولادی می‌باشد.

برای ایجاد انطباق تداخلی و جازدن پین‌های کاربردی درون سوراخ نمونه‌ها مطابق "شکل 5"، ابتدا سطح داخلی سوراخ و سطح خارجی پین، با استفاده از روغن مخصوص فرم‌دهی روان‌کاری شدند. سپس بالای پین در داخل فک فوقانی و قطعه‌ای مسطح با سوراخ به قطر 14 میلی‌متر (به‌صورت هم‌مرکز با سوراخ نمونه)، روی فک پایینی و زیر نمونه قرار گرفت. در نهایت، با حرکت گیره بالایی به سمت پایینی، پین درون سوراخ جازده شد و تغییرات نیروی فشاری لازم برای جازنی پین درون نمونه‌ها توسط دستگاه ثبت گردید. به‌منظور اعمال نیروی متناوب به نمونه‌ها از طریق پین جازده شده، فیکسچری مطابق "شکل 6 (الف)" طراحی و ساخته شد. این فیکسچر به شکلی طراحی گردید تا بار سیکی اعمالی را به پین وارد کرده و شکست خستگی نیز داخل نمونه اتفاق بیفتد (شکل 6 (ب) و (ج)). "شکل 4" نحوه بستن فیکسچر بین فک‌های دستگاه و نحوه اعمال بار به قطعه از این طریق را نشان می‌دهد. در حین آزمایش خستگی، انتهای فیکسچر داخل فک پایینی دستگاه و انتهای قطعه در فک متحرک بالایی مهار گردید. پین پرس شده نیز داخل سوراخ فیکسچر مهار شد. با اعمال نیروی سیکی، این نیرو به‌صورت خمشی به پین وارد شده و از طریق آن به نمونه انتقال می‌یابد. آزمون‌های خستگی تحت بار متناوب سینوسی با اندازه بار ماکزیمم 40000 نیوتن، نسبت بار صفر ($R = P_{\min}/P_{\max} = 0$) و فرکانس 10 هرتز انجام گرفت.

علاوه بر این، جهت درک هرچه بهتر فرایند انطباق تداخلی و دستیابی به توزیع تنش‌های پسماند ناشی از آن، شبیه‌سازی این فرایند در نرم‌افزار تجاری

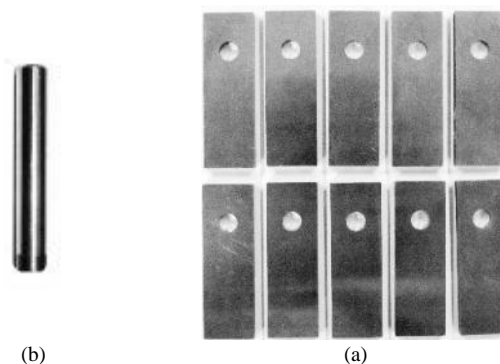


Fig. 2 a) AISI4340 fatigue test specimens and b) tungsten carbide pins used in the experiments

شکل 2 الف) نمونه‌های مکعب مستطیلی از جنس آلیاژ AISI4340 و ب) پین تنگستن کاربردی مورد استفاده در آزمایش‌ها

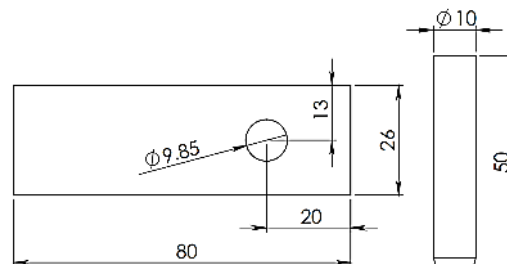


Fig. 3 Dimensions of pin and fatigue test specimens

شکل 3 ابعاد نمونه‌های آزمایش خستگی و پین

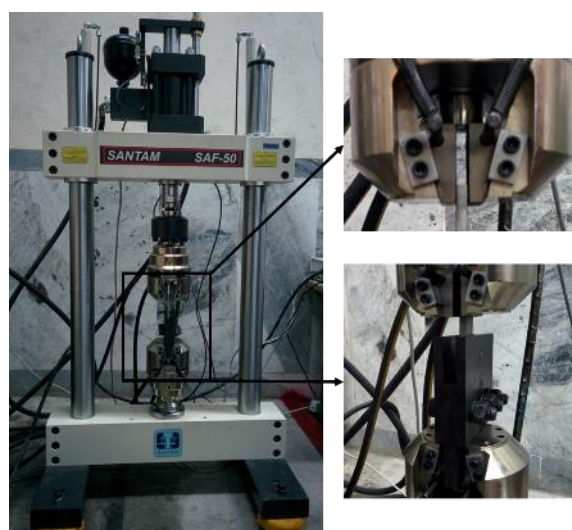


Fig. 4 Fatigue test machine used in experiments

شکل 4 دستگاه تست خستگی به کار رفته در انجام آزمایش‌ها

¹Marsurf

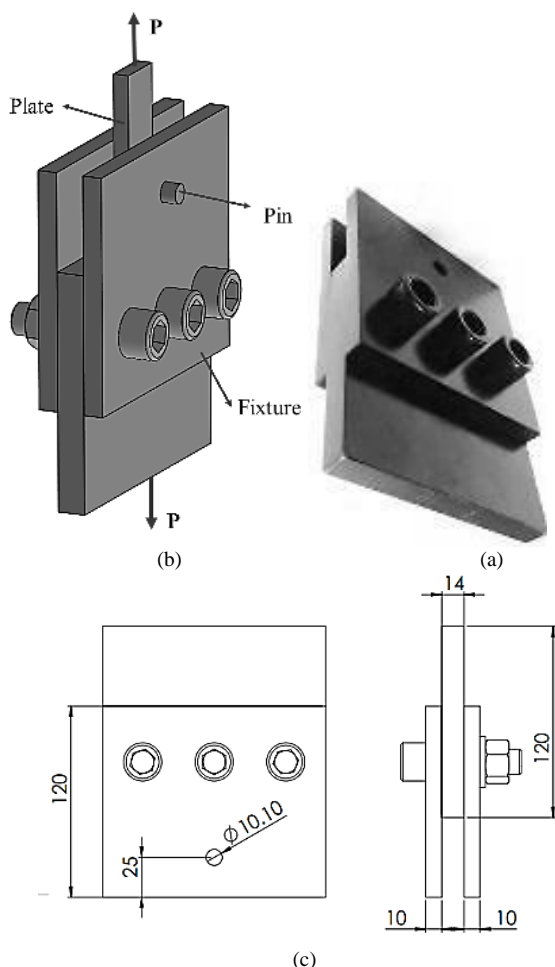


Fig. 6 a) Fixture used in fatigue experiments b) schematic of applying cyclic load on it and c) its dimensions

شکل 6 الف) فیکسچر مورد استفاده در آزمایش‌های خستگی ب) نحوه اعمال بار متناوب به آن و ج) ابعاد فیکسچر

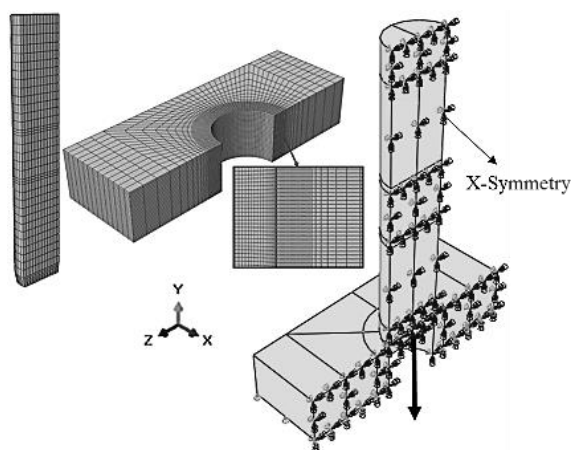


Fig. 7 Boundary conditions and mesh of finite element model used to simulate interference fitting

شکل 7 شرایط مرزی و مش‌بندی مدل المان محدود مورد استفاده جهت شبیه‌سازی انطباق تداخلی

1-4- نیروی جازنی پین

همان‌طور که اشاره گردید، جازنی پین‌ها با استفاده از دستگاه اونیورسال

جدول 2 قطر سوراخ‌های ایجاد شده روی نمونه‌های فولادی در سطوح مختلف انطباق تداخلی

Table 2 Drilled holes diameters of steel specimens in various levels of interference fits

شماره	اندازه انطباق تداخلی IF (%)	قطر سوراخ (mm)
1	0	10
2	0.5	9.95
3	1	9.90
4	1.5	9.85
5	2	9.80



Fig. 5 Setup of press fitting the pin into the steel specimen hole

شکل 5 چیدمان مربوط به جازدن پین درون سوراخ نمونه فولادی

المان محدود آباکوس¹ نسخه 6.14.1 صورت گرفت. مطابق "شکل 7"، با توجه به تقارن مدل نسبت به صفحه Z-Y، شرط مرزی تقارن برای نمونه و پین استفاده شد. همچنین با توجه به قرار گرفتن قطعه تقویتی با سوراخی به قطر 14 میلی‌متر زیر نمونه، این قسمت از سطح زیرین نمونه (با فاصله شعاعی 2 میلی‌متر از دیواره سوراخ تا انتهای ورق) در راستای Y مقید شد. جهت اعمال انطباق تداخلی، جابه‌جایی در جهت منفی Y به نقطه مرجع² پین وارد گردید. سپس در گام بعدی، بار خارجی برابر با آزمایش تجربی صورت گرفته به پین اعمال گردید.

المان به‌کار رفته از نوع خطی با 8 گره و یک نقطه انتگرال‌گیری (C3D8R) بود که هر گره در یک رأس مکعب قرار گرفته و دارای سه درجه آزادی می‌باشد. به‌دلیل تاثیر ناچیز فرآیند تداخل بر توزیع تنش نواحی دورتر از سوراخ و همچنین به منظور کاهش زمان حل مسئله، اندازه المان در ناحیه نزدیک سوراخ کوچک‌تر از سایر نواحی در نظر گرفته شد. مش‌زنی پس از انجام آنالیز حساسیت مش، صورت گرفته و با تعداد 52000 المان با کوچکترین اندازه المانی برابر با 0.25 در نظر گرفته شد. "شکل 7" شرایط مرزی و مش‌بندی مدل المان محدود مورد استفاده جهت شبیه‌سازی فرایند انطباق تداخلی را نشان می‌دهد.

برای تعیین خواص مکانیکی، نتایج به‌دست آمده از آزمون کشش (شکل 1) در مدل موادی الاستیک-پلاستیک نرم‌افزار لحاظ گردید. همچنین با توجه به سختی بالا و اختلاف قابل‌توجه مدول الاستیسیته با جنس مورد مطالعه، پین تنگستن کارباید به‌صورت جسم صلب تعریف شد.

4- نتایج و بحث

در ادامه نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی المان محدود و همچنین آزمون‌های تجربی انجام شده روی نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

¹ Abaqus 6.14.1

² Reference point

آباکوس شبیه‌سازی گردید. به‌منظور بررسی بهتر تنش‌های دیواره سوراخ، پین در این تصاویر حذف گردیده است. در ادامه، توزیع تنش‌های پسماند در دستگاه مختصات استوانه‌ای آمده است (شکل 10 و 11).

مشاهده می‌شود که تنش‌های پسماند شعاعی ایجاد شده در جداره سوراخ به‌صورت فشاری بوده و با افزایش درصد تداخل، مقدار آن افزایش می‌یابد. علاوه بر این، با فاصله گرفتن از جدار سوراخ و با توجه به ماهیت خودتعدالی، تنش‌های پسماند فشاری تبدیل به کششی می‌شوند. همان‌طور که قبلاً نیز اشاره گردید، تنش‌های شعاعی به‌صورت مستقیم روی نیروی جازنی پین تاثیر گذاشته و با افزایش آن، نیروی جازنی بیشتر می‌شود (شکل 10).

همچنین با توجه به "شکل 11" ملاحظه می‌شود که با افزایش اندازه تداخل، بزرگی تنش‌های محیطی فشاری تا اندازه تداخل 1.5% روندی افزایشی دارد و پس از آن تغییر محسوسی ندارد. این در حالی است تنش کششی در ناحیه لبه خروجی سوراخ با افزایش اندازه تداخل تا 2%، افزایش می‌یابد.

برای بررسی دقیق‌تر توزیع تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند تداخل در اطراف سوراخ سه مسیر در لبه بالایی، میانی و پایینی سوراخ در کمترین سطح مقطع پلیت در نظر گرفته شدند (شکل 12 الف) و توزیع تنش‌های پسماند محیطی در این سه مسیر متفاوت برحسب فاصله از لبه سوراخ برای نسبت تداخل 1.5% ارائه شد. همان‌گونه که ملاحظه می‌شود توزیع تنش ناشی از تداخل در اطراف سوراخ کاملاً غیریکنواخت بوده و مقدار آن در صفحه بالایی کششی و در صفحه پایینی فشاری می‌باشد.

به‌منظور بررسی توزیع تنش ناشی از بار خارجی بر نمونه تداخلی و مقایسه آن با نمونه بدون تداخل، یک سیکل بار خارجی به در شبیه‌سازی لحاظ گردیده و تاریخچه تنش محیطی حاصل از آن در یک نقطه از لبه ورودی (نقطه A در شکل 12-الف) ارائه شد (شکل 13). ملاحظه می‌شود که وجود انطباق تداخلی در نمونه سبب کاهش دامنه تنش نسبت به نمونه بدون تداخل می‌شود. همچنین انطباق تداخلی افزایش تنش میانگین طی بارگذاری متناوب را در پی دارد.

3-4- عمر خستگی

آزمون‌های خستگی روی نمونه‌هایی با 5 سطح تداخل و دو بار تکرار انجام گرفت. "شکل 14" نمونه شکسته‌شده با تداخل 1.5% را همراه با پین پرس‌شده تحت بار خستگی نشان می‌دهد. نتایج به‌دست آمده از آزمون عمر خستگی برای تمامی نمونه‌ها در جدول 3 و "شکل 16" آمده است. بررسی روند تغییرات این نمودار نشان می‌دهد که عمر خستگی تا تداخل 1.5% با روندی تقریباً خطی افزایش یافته و نسبت به نمونه بدون

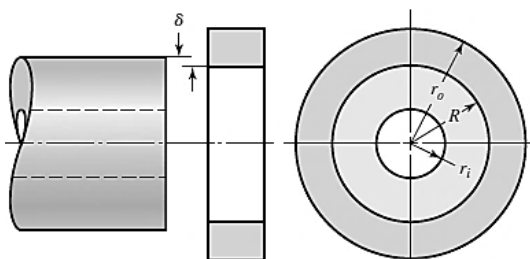


Fig. 9 Schematic of interference fit in thick-walled cylinder [14]

شکل 9 شماتیک انطباق تداخلی در استوانه جدار ضخیم [14]

صورت گرفت. "شکل 8" روند تغییرات اندازه‌گیری شده این نیرو توسط سنسور نیروسنج دستگاه را نسبت به جابه‌جایی در درصدهای تداخل مختلف نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که سرعت جازنی پین‌ها 1 میلی‌متر بر ثانیه در نظر گرفته شد.

این نیروی جازنی با ضریب اصطکاک (بین دیواره سوراخ نمونه و پین) و فشار عمودی وارد به پین از طرف سوراخ رابطه مستقیم دارد. فشار تماسی به وجود آمده در اثر تداخل، به‌صورت تحلیلی از طریق معادله کلاسیک لامه¹ مطابق رابطه (2) به دست می‌آید [13].

$$p = \sigma_r = \frac{E\delta}{2R^3} \left[\frac{(r_o^2 - R^2)(R^2 - r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \right] \quad (2)$$

که در آن p فشار تماسی (σ_r تنش شعاعی)، δ درصد تداخل، E مدول الاستیک و r_o شعاع‌های مربوط به استوانه‌های داخلی و خارجی هستند و در "شکل 9" نشان داده شده‌اند. مشاهده می‌شود که براساس معادله لامه، نیروی فشاری وارده به پین با افزایش تداخل بیشتر می‌گردد. لذا با فرض ثابت بودن ضریب اصطکاک، نیروی موردنیاز برای انجام انطباق پرسی افزایش می‌یابد.

همچنین با توجه به "شکل 8" ملاحظه می‌شود که ابتدا، تغییرات نیروی جازنی پین روندی افزایشی دارد. ولی با رسیدن به نقطه پیک، این روند متوقف می‌شود. نقطه ماکزیمم، موقعیتی را نشان می‌دهد که پین به سطح زیرین نمونه رسیده و بیشترین مقدار تغییرشکل پلاستیک ناشی از تداخل بوجود می‌آید. پس از عبور پین از سوراخ و به‌دلیل اتمام فرایند تغییرشکل پلاستیک، نیروی جازنی کاهش یافته و به مقدار ثابتی میل می‌کند. این مقدار ثابت با فشار شعاعی وارد بر پین و ضریب اصطکاک رابطه خطی دارد. لازم به ذکر است که در نمونه‌های اولیه با تداخل 1.5 و 2 درصد، این تغییر شکل ماکزیمم قبل از رسیدن پین به انتهای سوراخ رخ داد که ناشی از انحراف محور پین در اثر نیروی محوری بالا و ورود مورب پین به داخل سوراخ بود که در این موارد عمل جازنی پین مجدداً تکرار شد.

4-2- توزیع تنش‌های پسماند

به‌منظور درک بهتر انطباق تداخلی، این فرایند در نرم‌افزار المان محدود

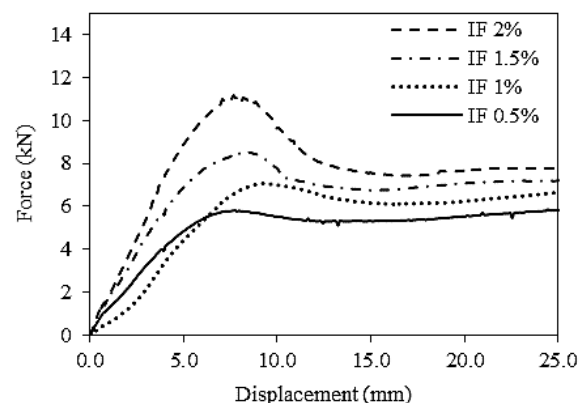


Fig. 8 Variations of Compressive force of press fitting during the process for various interference fits

شکل 8 تغییرات نیروی فشاری انطباق پرسی در طول فرایند برای درصدهای تداخل مختلف

¹ Lamé equation

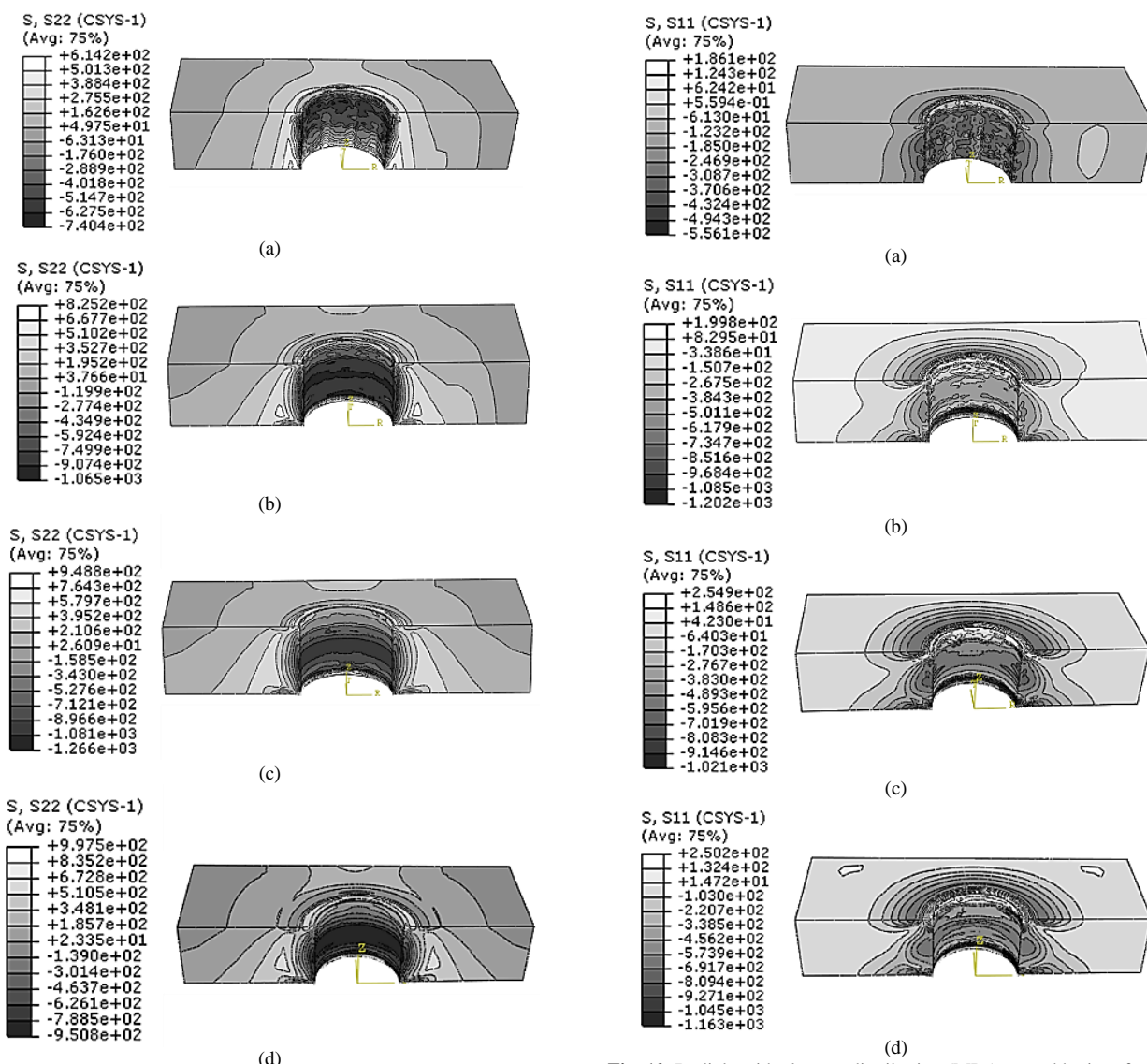


Fig. 10 Radial residual stress distribution (MPa) caused by interference fits of (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 1.5% and (d) 2%

Fig. 11 Circumferential residual stress distribution (MPa) caused by interference fits of (a) 0.5%, (b) 1%, (c) 1.5% and (d) 2%

شکل 11 توزیع تنش‌های پسماند محیطی (MPa) ایجاد شده در تداخل‌های الف) 0.5% (ب)، 1% (ج)، 1.5% (د) و 2%

شکل 10 توزیع تنش‌های پسماند شعاعی (MPa) ایجاد شده در اثر اندازه تداخل‌های (a) 0.5% (ب)، 1% (c)، 1.5% (د) و 2%

جدول 3 داده‌های تجربی مربوط به عمر خستگی برای نمونه‌هایی با درصد‌های تداخل مختلف

Table 3 Experimental data of fatigue life for various interference fits

اندازه تداخل	تعداد سیکل خستگی	
	آزمایش اول	آزمایش دوم
0	125000	118300
0.5	200000	180600
1	297400	284100
1.5	421300	417500
2	397800	401100

تنش در ناحیه داخل سوراخ کاهش می‌یابد. این نکته را می‌توان به خوبی در شکل 15 مشاهده کرد. این شکل تنش محیطی ناشی از فرآیند تداخل و سپس بارگذاری محوری متعاقب را در نمونه با تداخل 1.5% و همچنین تنش حاصل از بارگذاری محوری را در نمونه بدون تداخل نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که مقدار تنش محیطی که صرفاً در اثر بارگذاری محوری در نمونه با تداخل 1.5% به‌وجود می‌آید (اختلاف تنش محیطی در دو مرحله

تداخل، عمر نمونه تا حدود 2.5 برابر افزایش می‌یابد. پس از آن و در تداخل 2%، روند تغییرات ناچیز است. دلیل افزایش عمر خستگی در انطباق‌های تداخلی بالا در سه مورد قابل دسته‌بندی می‌باشند. (1) ایجاد تنش‌های پسماند اطراف سوراخ در اثر انطباق تداخلی، (2) افزایش نیروی تماسی بین قطعه و پین و (3) انتقال نیروی بهتر [4, 15, 16].

همان‌طور که در بخش قبلی نشان داده شد، با افزایش تداخل تا مقدار مشخصی تنش‌های پسماند جدار داخلی سوراخ افزایش می‌یابند. در این پژوهش، تنش‌های محیطی بیشترین تاثیر را روی عمر خستگی دارند. چرا که تحت بارگذاری خمشی نشان داده شده در شکل 6 (ب) و در ضعیف‌ترین مقطع قطعه، تنها مولفه‌های تنش محیطی در راستای بارگذاری خارجی قرار گرفته و اثر کششی آن را می‌کاهند. در صورت ایجاد تنش‌های پسماند فشاری محیطی، هم تنش میانگین و هم تنش متناوب موضعی در ناحیه انطباق تداخلی سوراخ کاهش می‌یابند. لذا عمر خستگی افزایش می‌یابد.

زمانی هم که انطباق تداخلی منجر به ایجاد تنش‌های کششی محیطی می‌شود، میزان تنش حاصل از بارگذاری محوری به دلیل کاهش اثر تمرکز

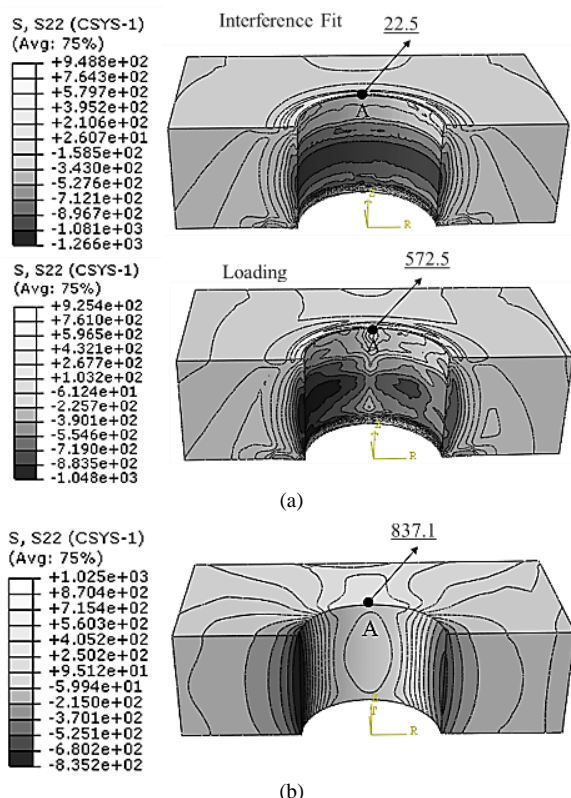


Fig. 15 Circumferential residual stress distribution (MPa) in (a) 1.5% IF specimen caused by interference fit and axial loading and (b) in open hole specimen caused by axial loading

شکل 15 کانتور تنش محیطی (MPa) برای (a) نمونه با تداخل 1.5% در اثر تداخل و بارگذاری محوری و (b) نمونه بدون تداخل در اثر بارگذاری محوری

از سوی دیگر وجود انحراف‌های موضعی می‌تواند سبب از بین رفتن تماس در برخی نقاط بین پین و نمونه شود. بنابراین زمانی که نیروی تماسی بین دو سطح بالاتر باشد، این جدایش کمتر شده و عمر خستگی بهبود می‌یابد. دلیل سوم نیز آن است که انتقال نیرو از طریق نمونه در اثر انطباق تداخلی بیشتر و بهتر می‌شود و از این طریق ضریب تمرکز تنش (K_t) در محل سوراخ و روی نمونه کمتر می‌گردد [18].

تابع تغییرات عمر خستگی برحسب اندازه تداخل با استفاده از رگرسیون چندجمله‌ای درجه سه به صورت معادله (3) به دست می‌آید. مقدار مجذور مجموع مربعات خطای این معادله برابر 99.35% است.

$$y = -118593x^3 + 311774x^2 - 9019.8x + 121650 \quad (3)$$

لازم به ذکر است که در این پژوهش، عمر جوانه‌زنی ترک تقریباً با عمر خستگی برابر بوده و عمر رشد ترک بسیار ناچیز است. این موضوع با توجه تعداد سیکل لازم برای انتشار ترک در مقایسه با تعداد سیکل لازم برای جوانه‌زنی آن در "شکل 17" مشخص است که تغییرات جابه‌جایی ثبت شده در حین آزمایش‌های خستگی را براساس سیکل‌های طی شده تا شکست نشان می‌دهد. دلیل این امر، سختی قابل توجه نمونه‌ها و همچنین بارگذاری آن‌ها در خستگی پرچرخه است.

برای مثال در آزمون خستگی نمونه‌ای با انطباق 1.5%، مقدار جابه‌جایی نمونه تا 410000 سیکل تقریباً ثابت می‌باشد. سپس، افزایش ناگهانی در نمودار بوجود آمده و پس از 421000 سیکل شکست قطعه حادث شد. لذا عمر انتشار خستگی در مقایسه با عمر جوانه‌زنی ترک بسیار کم بوده و قابل چشم‌پوشی است. این موضوع برای نمونه‌های دیگر نیز صادق است.

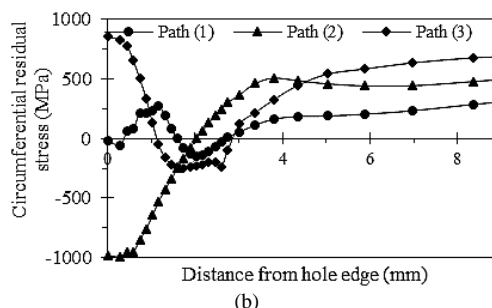
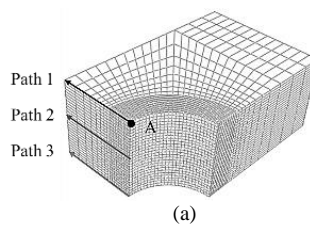


Fig. 12 Variation of Circumferential residual stress versus radial distance from hole edge

شکل 12 تغییرات تنش پسماند محیطی نسبت به فاصله شعاعی از لبه سوراخ برای تداخل 1.5%

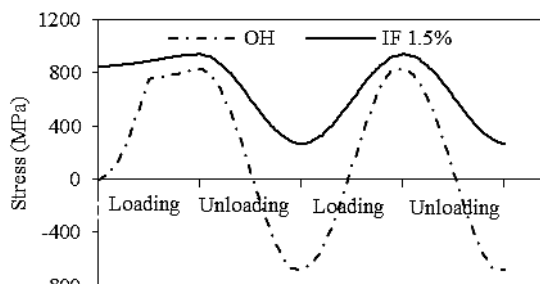


Fig. 13 Comparison of stress history at point A for 1.5% IF and open hole specimens

شکل 13 مقایسه تاریخچه تنش محیطی در نقطه A برای انطباق تداخلی 1.5% و نمونه بدون تداخل

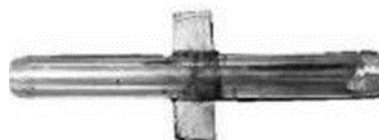


Fig. 14 Fracture surface of specimen with 1.5% interference fit with pressed pin under fatigue load

شکل 14 سطح شکست نمونه با تداخل 1.5% همراه با پین پرس شده تحت بار خستگی

برابر با 550 MPa به طور مثال در نقطه A) کمتر از مقدار آن در حالت بدون تنش (837.1 MPa) است که نشان از کاهش اثر تمرکز تنش دارد. این امر سبب کاهش مقدار تنش متناوب موضعی می‌شود. از طرف دیگر مقدار تنش میانگین موضعی در ناحیه تداخل افزایش می‌یابد [5, 17]. این موضوع در "شکل 13" نیز مشهود است. محرک اصلی جوانه‌زنی ترک خستگی، تنش‌های متناوب هستند. با این وجود، تنش‌های میانگین نیز می‌توانند تا حدی زیاد شوند که اثر کاهشی تنش‌های متناوب را از بین ببرند. توقف روند افزایشی عمر خستگی پس از تداخل 1.5% نیز بر همین اساس و با توجه به تغییرات تنش‌های پسماند کششی و فشاری ارائه شده در "شکل 11" قابل توجیه است.

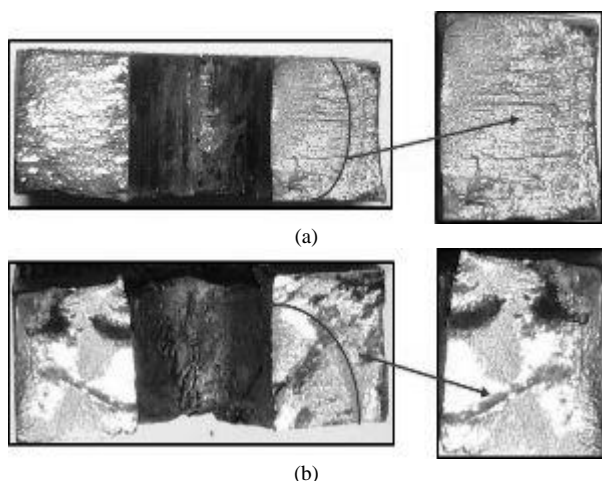


Fig. 18 Fracture surface of specimen with interference of (a) 0 and (b) 1.5%

شکل 18 سطح مقطع شکست نمونه با تداخل (الف) صفر (ب) 1.5%

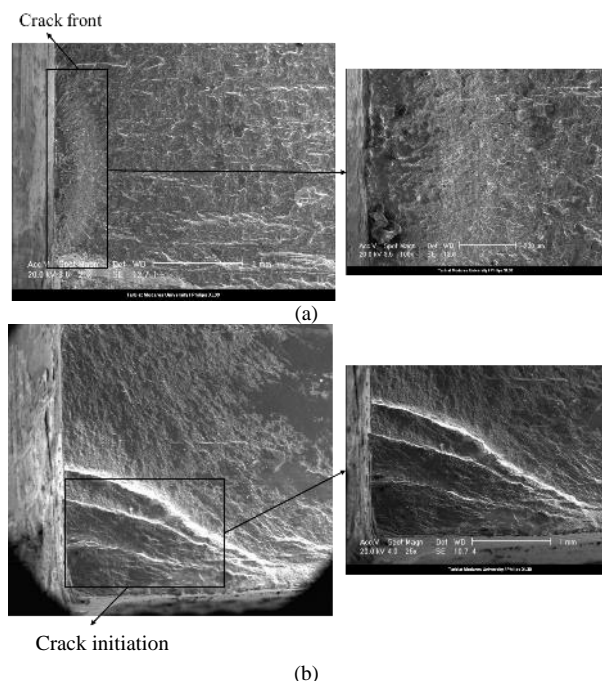


Fig. 19 SEM image of fracture surface of specimen with interference of (a) 0 and (b) 1.5%

شکل 19 تصویر SEM مربوط به سطح مقطع شکست نمونه با تداخل (الف) صفر، (ب) 1.5%

خستگی با روندی تقریباً خطی افزایش یافته و نسبت به نمونه بدون تداخل، عمر نمونه تا حدود 2.5 برابر افزایش می‌یابد. پس از آن و در تداخل 2% روند تغییرات متوقف گردید.

3- شبیه‌سازی المان محدود فرایند انطباق تداخلی حکایت از تشکیل تنش‌های پسماند فشاری محیطی و شعاعی در دیواره سوراخ داشت. این تنش‌ها با کاهش بار متناوب طی بارگذاری خستگی عمر خستگی نمونه را افزایش دادند.

4- بررسی سطح مقطع شکست نمونه‌ها نشان داد که محل جوانه‌زنی در نمونه‌های بدون تداخل، از قسمت میانی بوده و به صورت نیم بیضی انتشار می‌یابد. در حالی که در نمونه‌ای با تداخل، جوانه‌زنی ترک از لبه سوراخ رخ داده و به صورت ربع بیضی انتشار می‌یابد.

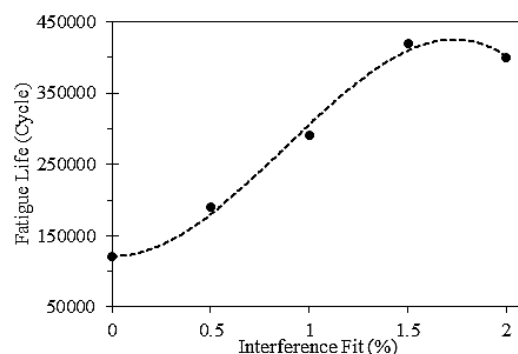


Fig. 16 Fatigue life variations versus interference fit size

شکل 16 تغییرات عمر خستگی با تغییر اندازه تداخل

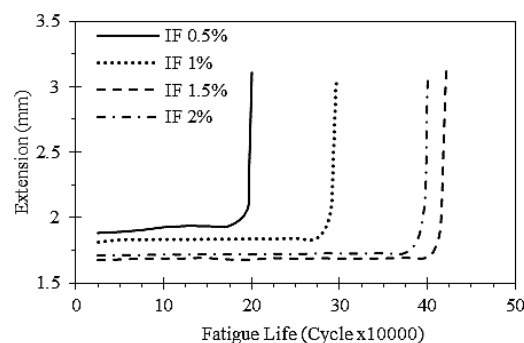


Fig. 17 Variations of extension versus fatigue cycles at different interference sizes

شکل 17 تغییرات جابه‌جایی نسبت به سیکل‌های خستگی در نمونه‌هایی با درصد‌های تداخلی مختلف

4-4- آنالیز سطح مقطع شکست

به منظور بررسی بهتر مکانیزم شکست و بررسی محل جوانه‌زنی ترک‌های خستگی، سطح مقطع شکست خستگی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. "شکل 18 (الف)" نشان می‌دهد که محل جوانه‌زنی در نمونه‌های بدون تداخل، از ناحیه میانی بوده و به صورت نیم بیضی انتشار می‌یابد. این در حالی است که در نمونه‌ای با تداخل 1.5% (شکل 18 (ب))، محل جوانه‌زنی ترک در نزدیکی لبه سوراخ بوده و به صورت زاویه‌دار انتشار پیدا می‌کند. در این حالت نحوه انتشار ترک به شکل ربع بیضی درمی‌آید.

"شکل 19" نیز تصویر SEM¹ سطح مقطع نمونه‌ها را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در مقطع شکست نمونه بدون تداخل (شکل 19 (الف)) جبهه ترک در صفحه میانی تشکیل شده و به صورت مستقیم انتشار یافته است. در مورد نمونه با اندازه تداخل 1.5%، جوانه‌زنی ترک در لبه‌های سوراخ اتفاق می‌افتد (شکل 19 (ب)).

5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تاثیر انطباق تداخلی بر عمر خستگی قطعه‌ای از جنس فولاد AISI4340 سخت‌کاری شده مورد بررسی قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده در این پژوهش در ادامه آمده است.

1- نیروی فشاری لازم برای جازنی پین درون سوراخ نمونه‌های آزمایشی با افزایش اندازه تداخل بیشتر شد. بیشترین مقدار این نیروی جازنی نیز زمانی بود که پین به سطح زیرین نمونه رسیده بود.

2- بررسی نتایج عمر خستگی نشان داد که تا اندازه تداخل 1.5%، عمر

¹ Scanning electron microscope

6- مراجع

- [9] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, K. Saeedi, Fatigue crack growth and life prediction of a single interference fitted holed plate, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 33, No. 10, pp. 633-644, 2010.
- [10] Y. Sun, W. Hu, F. Shen, Q. Meng, Y. Xu, Numerical simulations of the fatigue damage evolution at a fastener hole treated by cold expansion or with interference fit pin, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 107, pp. 188-200, 2016.
- [11] K. Iyer, S. Hu, F. Brittman, P. Wang, D. Hayden, S. Marin, Fatigue of single-and double-rivet self-piercing riveted lap joints, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, No. 11, pp. 997-1007, 2005.
- [12] H. Chandler, *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*, 2nd ed., pp. 12, Metals Park, OH: ASM international, 1995.
- [13] R. Gutkin, B. Alfredsson, Growth of fretting fatigue cracks in a shrink-fitted joint subjected to rotating bending, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 15, No. 5, pp. 582-596, 2008.
- [14] J. E. Shigley, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 9th ed., pp.116, New York: McGraw-Hill Education, 2011.
- [15] M. Ofsthun, When fatigue quality enhancers do not enhance fatigue quality, *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, No. 9, pp. 1223-1228, 2003.
- [16] A. Buch, Fatigue and fretting of pin-lug joints with and without interference fit, *Wear*, Vol. 43, No. 1, pp. 9-16, 1977.
- [17] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, J. Vogwell, Experimental and numerical investigations into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, No. 7, pp. 2066-2080, 2009.
- [18] J. H. Crews Jr, *An elastic analysis of stresses in a uniaxially loaded sheet containing an interference-fit bolt*, Hampton, Virginia: NASA Langley Research Center, 1972.
- [1] N. E. Dowling, *Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue*, pp. 220-280, Harlow, England: Pearson, 2012.
- [2] H. Fukui, J. Okida, N. Omori, H. Moriguchi, K. Tsuda, Cutting performance of DLC coated tools in dry machining aluminum alloys, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 187, No. 1, pp. 70-76, 2004.
- [3] J. H. Crews Jr, *Analytical and experimental investigation of fatigue in a sheet specimen with an interference-fit bolt*, Hampton, VA, United States: NASA Langley Research Center, 1975.
- [4] A. Lanciotti, C. Polese, The effect of interference-fit fasteners on the fatigue life of central hole specimens, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 28, No. 7, pp. 587-597, 2005.
- [5] T. Chakherlou, M. Mirzajanzadeh, B. Abazadeh, K. Saeedi, An investigation about interference fit effect on improving fatigue life of a holed single plate in joints, *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Vol. 29, No. 4, pp. 675-682, 2010.
- [6] D. Crocco, 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*, Vol. 36, No. 7, pp. 689-698, 2013.
- [7] M. A. Brown, J. L. Evans, Fatigue life variability due to variations in interference fit of steel bushings in 7075-T651 aluminum lugs, *International Journal of Fatigue*, Vol. 44, pp. 177-187, 2012.
- [8] K. Iyer, C. Rubin, G. Hahn, Influence of interference and clamping on fretting fatigue in single rivet-row lap joints, *Journal of Tribology*, Vol. 123, No. 4, pp. 686-698, 2001.