

بررسی تأثیر گشتاور اتصال پیچ و مهره و اصطکاک بر رفتار خستگی اتصال دو لبه برشی به صورت تجربی

هادی ناصری ملکی^۱، تاجبخش نوید چاخرلو^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد عجب شیر، عجب شیر، ایران.

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

چکیده

در مقاله حاضر اثر نیروی پیش بار و اصطکاک بر رفتار خستگی یک اتصال دولبه برشی پیچ و مهره شده با ورق های آلومینیومی 2024-T3 به صورت تجربی بررسی شده است. جهت دستیابی به منحنی های تنش- عمر و مشاهده اثر مستقیم نیروی پیش بار بر استحکام خستگی اتصال، سه گروه نمونه با نیروهای پیش بار متفاوت تحت بارهای سیکلی محوری قرار گرفته اند. نتایج حاصل از تست های خستگی به صورت دیاگرام های تنش- عمر برای نمونه های مختلف رسم شده و تأثیر نیروی پیش بار و همچنین تأثیر اصطکاک بین صفحات بر عمر اتصال نشان داده شده و محل رشد و گسترش ترک های خستگی در اتصال ها مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج عملی بیانگر افزایش استحکام خستگی اتصال پیچ و مهره شده در پیش بارهای بالا به واسطه ایجاد تنش های فشاری ناشی از نیروی پیش بار در اطراف سوراخ و همچنین افزایش نیروی منتقله اصطکاکی بین صفحات می باشد. همچنین نتایج نشان می دهند در پیش بارهای بالا و نیروی سیکلیک پایین وارد بر اتصال عمر نمونه ها بعد از تعداد معینی سیکل افزایش پیدا نمی کند این ناحیه محل وقوع پدیده شکست خستگی سایشی برای نمونه ها می باشد. ولی در نیروهای سیکلیک با دامنه بالا شکست نمونه از سوراخ و به صورت لغزشی اتفاق می افتد. در نیروی پیش بار پایین در تمام رنج نیروهای سیکلیک وارد بر اتصال شکست نمونه ها در خود سوراخ اتصال به صورت لغزشی اتفاق می افتد.

واژه های کلیدی: نیروی پیش بار- تست های خستگی- اتصال دولبه برشی پیچ و مهره شده

مقدمه

اتصال اجزا و قسمت های مکانیکی به همدیگر یکی از مباحث مهم در صنایع مختلف از قبیل صنعت هوافضا می باشد. طراحی یا انتخاب اتصالات به گونه ای صورت می گیرد تا اتصال از لحاظ عمر کارکردی، ایمنی، سادگی و هزینه تولید در حالت بهینه ای قرار بگیرد. این طراحی یا انتخاب در اجزایی که بارهای دینامیکی و سیکلیک به آن ها وارد می شود از اهمیت بیشتری برخوردار می باشد. استفاده از اتصالات مکانیکی نظیر پیچ و مهره، پرچ و یا پین های محافظ در اجزای تحت بار سیکلی و دینامیکی مانند ایرکرافت ها مرسوم می باشد ولی استفاده از این اتصالات به علت ایجاد سوراخ در قطعات باعث تمرکز تنش در آن نقاط شده و زمینه را برای رشد و گسترش هر چه بیشتر ترک های خستگی در اطراف سوراخ را

فراهم می سازد. تلاش ها و تحقیقات زیادی بر روی انواع اتصالات های مکانیکی همچون اتصال پیچ و مهره ای، پرچ کاری، اتصال چسب کاری شده و اتصال هیبریدی انجام گرفته و روش های بهبود مکانیزم انتقال بار و افزایش عمر این اتصالات از قبیل تداخل و انبساط سرد مورد بررسی قرار گرفته است [1-4]. برای اتصال سازه های اصلی بدنه و بال یک هواپیما از پیچ و مهره ها در سطح وسیعی استفاده می شود زیرا تجربه نشان داده است که پیچ و مهره توانایی زیادی در برقراری اتصال و نگهداری اجزا دارد، به طوری که نتایج تحقیقات قبلی حاکی از آن است که قطعات پیچ و مهره شده در بیشتر موارد از استحکام کششی و خستگی بالاتری نسبت به اجزای متصل شده توسط پرچ ها برخوردار هستند [5]. در اتصالات پیچ و مهره شده در هنگام مونتاژ کردن قطعات روی هم می توان با اعمال گشتاور بر روی پیچ نیروی پیش بار در پیچ ایجاد کرد که وجود این پیش بار باعث خواهد شد که بسته به میزان گشتاور اعمالی، قسمتی از نیروی اعمالی به اتصال به جای ساق پیچ از طریق نیروی اصطکاک بین صفحات منتقل شده و در نتیجه نیروی برشی زیادی به پیچ وارد نشود. تحقیقات قبلی نشان می دهند که مهمترین فاکتور تأثیرگذار بر رفتار خستگی اتصال پیچ شده نیروی پیش بار می باشد که با ایجاد تنش های فشاری مؤثر در اطراف سوراخ باعث افزایش عمر خستگی اتصال می شود [6,7]. با توجه به تحقیق انجام شده [8] روشن می باشد که نیروی پیش بار با ایجاد تنش های فشاری مؤثر در اطراف سوراخ خود یک عامل بسیار مهم در جلوگیری از رشد و گسترش ترک های به وجود آمده می باشد. علاوه بر نیروی پیش بار عوامل دیگری نیز در عمر خستگی اتصالات پیچ و مهره شده دخیل می باشند که از آن جمله می توان به ضخامت و جنس ورق ها و روغن کاری شدن اتصال اشاره نمود [9,10]. مقدار نیروی پیش بار در هنگام بارگذاری اتصال مقدار ثابتی نداشته و بسته به بارگذاری و نوع اتصال مقدار متغیری دارد [11]. پیشگویی در نحوه ایجاد خرابی خستگی می تواند از وقوع حوادث تلخ تا حد امکان جلوگیری کند، بنابراین اهمیت و ضرورت بررسی دقیق تر استحکام خستگی در اتصالات پیچ و مهره ای، روشن و پر واضح می شود. هدف از این تحقیق نیز بررسی رفتار خستگی اتصال دولبه پیچ و مهره شده تحت گشتاورهای سفت کنندگی و پیش بارهای مختلف از روش تست عملی می باشد. برای این کار اتصال دولبه ساده شده ای از آلیاژ آلومینیوم 2024-T3 (آلیاژ پر مصرف در صنایع هوافضا) تحت پیش بارها و بارهای کششی محوری مختلف در دستگاه خستگی گذاشته شده و مورد آزمایش قرار گرفته اند تا منحنی تنش- عمر مربوط به آن ها رسم شود.

۱- مربی، دانشجوی دکتری، ۰۰۹۱۴۳۰۲۱۷۵۳ H.Nasari@tabrizu.ac.ir (نویسنده مخاطب)

۲- پروفسور

روش عملی

در روش عملی ورق‌های اتصال برای تست از ورق بزرگی با ضخامت 3.2mm از آلایژ آلومینیوم 2024-T3 درست شده‌اند که ورق‌های اتصال طوری بریده شده‌اند که جهت طولی آن‌ها در جهت رولینگ ورق قرار گرفته‌اند. قطر سوراخ‌های ایجاد شده برای بستن اتصال با پیچ و مهره 6mm بوده و پیچ‌ها از نوع شش گوش $M6 \times 1$ از گرید 10.9 می‌باشند که مهره و واشر مناسب این پیچ‌ها نیز در اتصال به کار برده شده‌اند. مکان قرارگیری سوراخ نسبت به لبه‌های آزاد ورق‌ها طوری در نظر گرفته شده است که از حالت‌های شکست غیر معمول اتصال (برش صفحات) جلوگیری شود. یک فیکسچر مخصوص برای تست‌های خستگی طراحی شده است که از یک ورق بلند سوراخ شده با دو عدد ورق کوچک نگهدارنده درست شده است. ورق اصلی که مورد مطالعه قرار می‌گیرد دارای راکورد و قسمت باریک می‌باشد تا شکست در اطراف سوراخ صورت گیرد. در شکل (۱) می‌توان اتصال آماده شده برای تست و همچنین ابعاد آن را مشاهده نمود. برای از بین بردن هرگونه عیب سطحی، ورق‌ها با استفاده از کاغذ سمباده صاف شده‌اند.

اندازه گیری نیروی پیش‌بار

جهت تعیین مقدار نیروی پیش‌بار پیچ ناشی از اعمال گشتاور پیچشی به پیچ و مهره از کرنش فشاری محوری به وجود آمده در سطح جانبی یک بوش فولادی که بین مهره و ورق پایینی قرار می‌گیرد، استفاده شده است. در شکل (۲) ابعاد بوش به کار رفته و همچنین دو عدد کرنش سنج که به صورت محوری در سطح خارجی بوش که در دو طرف مقابل هم چسبانده شده‌اند را می‌توان ملاحظه نمود. کرنش سنج از نوع FLA-2-11 که پوشش آن دارای ابعاد مناسب جهت چسباندن بر روی بوش می‌باشد طول و عرض کرنش سنج‌ها به ترتیب 2 و 1.5 میلی‌متر می‌باشند. بوش به همراه کرنش سنج‌های متصل شده به آن مابین مهره و واشر قرار می‌گیرد که کرنش سنج‌های بکار رفته بر روی بوش توسط دو عدد سیم به اندیکاتورهایی وصل می‌شوند تا در آن بتوان تغییرات کرنش‌ها بر اساس تغییرات نیروی پیش‌بار را دنبال کرد.

با استفاده از گشتاورسنج مقادیر گشتاور 1-7N.m به پیچ و مهره اعمال شده و در هر حالت کرنش‌های محوری ثبت شده‌اند که این آزمایش برای هر گشتاور، سه مرتبه تکرار شده است. سرانجام نیروهای پیش‌بار متناظر با گشتاور اعمالی که معادل نیروی محوری در پیچ می‌باشند با به کارگیری مقدار میانگین کرنش محوری (ϵ_m) در رابطه (۱) تعیین شده‌اند. مدول الاستیسیته بوش با استفاده از آزمون کشش ساده برای فولادی که بوش از آن ساخته شده است 204188MPa به دست آمده است.

$$\sigma_m = E_{bush} \epsilon_m \quad (1)$$

$$F_{cl} = \sigma_m A_{bush}$$

$$A_{bush} = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = \frac{\pi}{4}(10^2 - 6.5^2) = 45.357 \text{ mm}^2$$

$$F_{clamping} = 204188 \times \frac{\pi}{4}(10^2 - 6.5^2) \epsilon_m$$

که در رابطه بالا A_{bush} مساحت مقطع استوانه بوش است. کرنش‌های به وجود آمده در اثر گشتاور سفت‌کنندگی 1-7N.m در بوش در محدوده الاستیک باقی مانده و وارد منطقه پلاستیک نمی‌شود. با محاسبه و

جایگذاری کرنش‌های به وجود آمده نمودار (۳) برای گشتاور سفت‌کنندگی و نیروی پیش‌بار متناظر با آن به دست می‌آید. همان‌طور که ملاحظه می‌شود یک رفتار خطی با تقریب بسیار بالا بین گشتاور سفت‌کنندگی و نیروی پیش‌بار متناظر با آن برقرار می‌باشد، اگر رابطه به دست آمده از نمودار (۳) را با رابطه موجود بین گشتاور سفت‌کنندگی و نیروی پیش‌بار در کتاب‌های طراحی مکانیکی [12] یعنی رابطه (۲) مقایسه شود، ضریب گشتاور (Torque coefficient) برای پیچ و مهره به کار رفته برابر با 0.25 به دست می‌آید.

$$T = K F_{clamping} d \quad (2)$$

$$\frac{1}{6 \times 10^{-3} K} = 662.08 \Rightarrow K \approx 0.25$$

که در رابطه بالا:

K ضریب گشتاور (Torque coefficient)، d قطر نامی پیچ و $F_{clamping}$ نیروی پیش‌بار می‌باشد که ضریب گشتاور به پارامترهای مختلفی از قبیل ضریب اصطکاک رزوه‌ها و وابسته می‌باشد. با توجه به یک سری تست‌های اولیه خستگی که با چند پیش‌بار مختلف انجام گردید در آخر سه گشتاور سفت‌کنندگی برای انجام کامل تست‌های خستگی مد نظر قرار گرفت. گشتاورهای سفت‌کنندگی 0.25 و 2 و 4N.m که گشتاور سفت‌کنندگی 0.25N.m برای اتصال‌های شل در نظر گرفته شد. با توجه به رابطه به دست آمده از شکل (۳) نیروی پیش‌بار در پیچ برای گشتاورهای سفت‌کنندگی 0.25 و 2 و 4N.m به ترتیب برابر با 166 و 1325 و 2649 N به دست می‌آیند.

تست‌های خستگی

به منظور انجام تحقیق و بررسی‌های مورد نظر تعدادی تست خستگی با گشتاورهای سفت‌کنندگی 0.25 و 2 و 4N.m برای اتصال دوبله برشی پیچ و مهره شده انجام گرفت. این نمونه‌ها با وضعیت و پیش‌بار معلوم تحت بارهای کششی محوری مختلف قرار گرفته‌اند تا منحنی‌های تنش-عمر برای هر کدام از نمونه‌ها به دست بیاید. برای هر حالت تعداد کافی تست خستگی با اعمال نیروهای ماکزیمم متفاوت در بازه 10-20kN انجام گرفته‌اند به طوری که نقاط به دست آمده توزیع مناسبی در محدوده عمرهای کم تا عمرهای زیاد داشته باشند. مقادیر نیروهای ماکزیمم (remote stress) اعمالی در بارگذاری سیکلیک طوری انتخاب شده‌اند تا در چند مورد تنش در لبه سوراخ ورق اصلی از تنش تسلیم ورق بزرگتر بوده و باعث وقوع تسلیم موضعی در اطراف سوراخ شود و در سایر موارد بارگذاری به نحوی باشد که کل ماده در حوزه الاستیک باقی مانده و هیچ‌گونه تسلیمی در آن رخ ندهد.

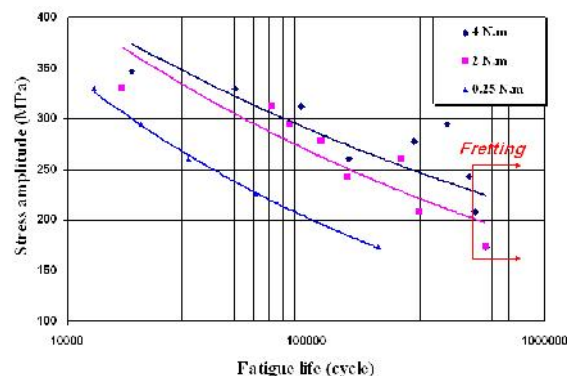
بارهای محوری سیکلی وارد بر اتصال با فرکانس 12Hz و با نسبت تنش R=0 (Stress Ratio) بر نمونه‌ها تا شکست آن‌ها اعمال شده‌اند. در شکل (۴) نمونه بسته شده در دستگاه تست خستگی را می‌توان ملاحظه نمود.

نتایج

بعد از انجام تست‌های خستگی بر روی انواع نمونه‌ها با نیروی پیش‌بار مختلف، تقریباً تمامی شکست‌ها در سوراخ قطعه اصلی و یا در اطراف آن صورت می‌گیرد که محل شکست به مقدار نیروی پیش‌بار و میزان ماکزیمم تنش سیکلیک بستگی دارد. عمر نمونه‌های شکسته شده بر روی دیاگرام تنش-عمر نمایش داده شده و با هم مقایسه گشته‌اند.

مراجع

1. Chakherlou T.N., Vogwell J., The effect of cold expansion on improving the fatigue life of fastener holes. Eng Fail Anal 10, 2003, pp. 13–24.
2. Chakherlou T.N., Mirzajanzadeh M., Vogwell J., Experimental and numerical investigation into the effect of an interference fit on the fatigue life of double shear lap joints. Engineering Failure Analysis. 16, 2009, pp. 2066–2080.
3. Chakherlou T. N., Vogwell J., A novel method of cold expansion which creates near-uniform compressive tangential residual stress around a fastener hole. Fatigue Fract Eng Mater Struct 27, 2004, pp. 343–51.
4. Abazadeh B., Chakherlou T.N., Alderliesten René C., Effect of interference fitting and/or bolt clamping on the fatigue behavior of Alalloy 2024T3 double shear lap joints in different cyclic load ranges. Int. J. of Mech. Sci. 72, 2013, pp. 2–12.
5. Valtinant G., Hadrych I., Huhn H., Strengthening of riveted and bolted steel constructions under fatigue loading by preload fasteners- experimental and theoretical investigations, Published on conference: connections in steel structures IV, AISC and ECCS, Roanoke/USA, 2000.
6. Wagle S., Kato H., Ultrasonic detection of fretting fatigue damage at bolt joints of aluminum alloy plates, 2009.
7. Chakherlou T.N., Oskouei R.H., Vogwell J., Experimental and numerical investigation of the effect of clamping force on the fatigue behaviour of bolted plates. Eng Fail Anal 15(5), 2008, pp. 563–574.
8. Chakherlou T.N., Abazadeh B., Vogwell J., The effect of bolt clamping force on the fracture strength and the stress intensity factor of a plate containing a fastener hole with edge cracks. Eng Fail Anal 16, 2009, pp. 242–253.
9. Shankar K., and Dhamari R., Fatigue behaviour of aluminium alloy 7075 bolted joints treated with oily film corrosion compounds. Materials and Design 23, 2002, pp. 209–216.
10. Minguez J.M., Vogwell J., Effect of torque tightening on the fatigue strength of bolted joints. Engineering Failure Analysis 13, 2006, pp. 1410–1421.
11. Oskouei R.H, Chakherlou T.N. , Reduction in clamping force due to applied longitudinal load to aerospace structural bolted plates , Aerospace Science and Technology, 13, 2009, pp. 325–330.
12. Shigley J.E., Mischke C.R., Budynas R.G., Mechanical Engineering Design. 7th Edition. McGraw-Hill. 2004, pp. 422–424.



شکل ۵: نمودار تنش - عمر برای نمونه‌های تست شده

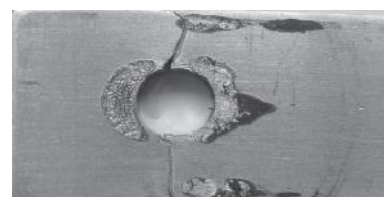


T=4 N.m

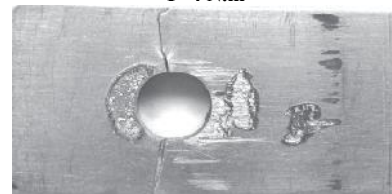
T=2 N.m

T=0.25 N.m

شکل ۶: نمونه‌های شکسته شده در تنش اعمالی پایین $S_{max}=173.61\text{MPa}$



T=4 N.m



T=2 N.m

T=0.25 N.m

شکل ۷: نمونه‌های شکسته شده در تنش اعمالی بالا $S_{max}=312.5\text{MPa}$