مجله مهندسی مکانیک مدرس، فروردین 1394، دوره 15، شماره 1، ص‌ص 332-338

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مکان هندسی مناسب برای نصب کرنش سنج به منظور تعیین تنش‌های پسماند اطراف سوراخ کارسرد شده

احسان پولادی برج[1]، خلیل فرهنگدوست[2*]

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی 9177948944 ، farhang@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 28 مهر 1393

پذیرش: 29 آبان 1393

ارائه در سایت: 23 آذر 1393

کلید واژگان:

تنش پسماند

کرنش سنج

کار سرد

سوراخ کار سرد شده

چکیده

فرایند کارسرد، تمایل ترک‌های موجود در اطراف سوراخ‌هایی که تحت بار خستگی قرار می‌گیرند را برای جوانه زنی و یا رشد کاهش می‌دهد. این امر بخاطر بوجود آمدن تنش پسماند محیطی فشاری در اطراف سوراخ می‌باشد. تعیین تنش‌های پسماند نتیجه شده از این فرایند با روش‌های غیر مخرب، ساده و کم هزینه، هدف بسیارمهمی در فرایند طراحی قطعات سوراخدار به شمار می‌رود. دراین تحقیق برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند از روش نصب کرنش سنج بهره گرفته و درواقع کرنش‌های سطحی بعنوان شاخص مناسبی برای تعیین میدان تنش‌های پسماند معرفی شده‌اند. تعیین تعداد کرنش سنج‌های مورد نیاز و نیز محل مناسب برای نصب آن‌ها در اطراف سوراخ کار سرد شده موضوع اصلی این تحقیق می‌باشد. نتیجه تحقیق همخوانی خوبی با نتیجه آزمایش کار سرد بر روی نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024 نشان می‌دهد. نتیجه حاصله حاکی ازین است که برای تعیین میدان تنش پسماند، نصب دو کرنش سنج در فاصله شعاعی یکسان از لبه سوراخ در دونقطه مقابل هم یکی بصورت شعاعی و دیگری بصورت محیطی مورد نیاز می‌باشد. همچنین برای حصول نتیجه مناسب، کرنش سنج‌ها می بایست در ناحیه الاستیک نصب گردند. نصب کرنش سنج‌ها در ناحیه پلاستیک منجر به ورود خطا و نتیجه غیر قابل اطمینان خواهد شد.

Proper locus for mounting strain gage around cold worked hole for residual stress determination

Ehsan Pooladi Borj, Khalil Farhangdoost*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.
*P.O.B. 9177948944 Mashhad, Iran,farhang@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 20 October 2014
Accepted 20 November 2014
Available Online 14 December 2014

Keywords:
Residual stress
strain gage
cold working
cold worked hole

ABSTRACT

Cold working a hole decreases the tendency of fatigue crack near the hole to commence or grow. It is due to the creation of some compressive tangential residual stresses around the hole. Determination of the mentioned residual stresses with a non-destructive, simple and non-expensive method is the key step in the design process of holed components. In this article, residual stresses have been determined by mounting some strain gages around the hole and, in fact, surface strains during cold working process have been introduced as a feature for residual stress field. Delineating the numbers of needed strain gages and also proper place for mounting them around the cold worked hole are the main objectives of this research. Results have good agreement with test result of cold working on specimens made of Al2024. According to the results, mounting two strain gages at the same radius on the opposite side of hole edge, inwhich one is in radial and the other in tangential direction is necessary for determining the residual stress field. Also, strain gages should be mounted in elastic zone. Mounting the gages in plastic zone led to errors and unreliable results.

1- مقدمه

ایجاد هدفمند تنش پسماند در مواردی که برای مجموعه مفید می‌باشد، بعنوان یک تکنیک مهندسی در فرایندهای تولید و مونتاژ بکار می‌رود. بعنوان مثال می‌توان به ورق‌های مورد استفاده در بدنه تجهیزات پرنده مانند هواپیما و هلی کوپتر اشاره نمود که با تعداد بسیار زیاد سوراخ مونتاژ وتحت بار قرار می‌گیرند. به منظور برخورداری از اصل حداکثر مقاومت و حداقل وزن در تجهیزات هوا و فضا اقدامی درجهت بالا بردن مقاومت قطعه بدون افزایش ابعاد نظیر ضخامت و غیره مورد علاقه خواهد بود. بدین منظور از فرایند کارسرد استفاده می‌شود. طی این فرایند یک محور با قطری بزرگتر از قطر سوراخ بوسیله نیروی فشاری وارد سوراخ شده؛ که مرحله بارگذاری نامیده شده؛ و از آن خارج می‌گردد؛ که مرحله باربرداری نامیده می‌شود؛ چنانکه دراطراف سوراخ درحین بارگذاری؛ ورود محور؛ ناحیه پلاستیک ایجاد می‌شود. وجود این ناحیه پلاستیک به منظور انجام درست فرایند کارسرد الزامی است. درواقع پس از باربرداری؛ خروج محور از سوراخ؛ نواحی الاستیکی

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
E. Pooladi Borj, Kh. Farhangdoost, Proper locus for mounting strain gage around cold worked hole for residual stress determination, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 332-338, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]

که در فاصله دورتری نسبت به سوراخ قرار دارند بدلیل خاصیت ارتجاعی و تمایل به برگشت به محل قبل از بارگذاری، ناحیه پلاستیک اطراف سوراخ را تحت فشار قرار می‌دهند که این امر منجر به ایجاد تنش‌های پسماند فشاری در اطراف سوراخ شده که عامل مناسبی برای تاخیر در جوانه زنی و یا رشد ترک می‌باشند [1].

تعیین تنش پسماند در اطراف سوراخ کار سرد شده از جمله موضوعات مورد توجه محققین از ابتدا بوده است. بسیاری از محققین به استخراج روابط ریاضی حاکم بر مسئله کار سرد پرداخته اند که هر یک تحلیل خود را با احتساب فرضیاتی ارائه نموده‌اند. نکته قابل تأمل اینکه، تاکنون هیچ‌یک موفق به ارائه مدل کاملاً دقیق فرایند کارسرد به دلیل پیچیدگی‌های موجود نظیر رفتار الاستوپلاستیک متفاوت در مواد مختلف وغیره نشده اند. دراین خصوص می‌توان به مدل تحلیلی سو و فرمن [2] که تحلیل الاستو-پلاستیک یک ورق سوراخدار با ابعاد بی‌نهایت در ماده‌ای که خاصیت پلاستیک آن با رابطه رامبرگ-اسگود همخوانی دارد، اشاره نمود. جیو [3] حل الاستیک پلاستیک برای میدان تنش پسماند در صفحات دایره‌ای و مستطیلی ارائه و با نتایج مدل‌های اجزای محدود مقایسه نمود.استیسی و وبستر [4] نیز نتیجه گرفتند که استفاده از میانگین دو معیار تسلیم انرژی واپیچشی و بیشترین تنش برشی جواب دقیقتری نسبت به سایر مدل‌ها نتیجه می‌دهد؛ که دراین تحقیق نیز از روش ایشان استفاده شده است. هم‌چنین جاهد و همکارانش[5] نیز روش تحلیلی جزء به جزء شبیه آنچه‌که در روش‌های اجزاء محدود استفاده می‌شود،ارائه نمودند.

علاوه بر روشهای تحلیلی، محققین بسیاری نیز به ارائه راهکار عملی برای اندازه‌گیری تنش پسماند اطراف سوراخ کارسرد شده پرداخته‌اند. دراین خصوص می‌توان به روش‌های مخرب و غیر مخرب بسیاری که تاکنون مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ اشاره کرد. درهریک ازاین روش‌ها یک شاخص برای اندازه‌گیری تنش پسماند معرفی و باکمک روابط موجود مقدار تنش پسماند به‌دست آمده است. روش تفرق اشعه ایکس[1] که توسط پریوی [6] و محققان دیگر بارها استفاده شده است، روشی پر هزینه است که اندازه تنش پسماند را در یک نقطه از سطح جسم نشان می‌دهد. درروش تفرق نوترونی[2] نیز که توسط بسیاری از جمله وانگ و ادوارد [7]، استفانسو و همکارانش [8] مورد استفاده واقع شد نظیر روش قبلی از قانون براگ[3] و زوایای تابش و بازتابش اشعه نوترون کمک گرفته شده است. استفاده از کرنش سنج توسط برخی نظیر گوپالاکریشنا و همکارانش [9] برای اندازه‌گیری تنش پسماند اطراف سوراخ کار سرد شده از طریق اندازه گیری کرنش‌های سطحی پیشنهاد و به-کار بسته شده است. مؤلفین [10] نیز روشی برای بدست آوردن میدان تنش پسماند با کمک کرنش‌های پسماند ارائه نموده‌اند. آنچه که در روش استفاده از کرنش‌سنج برای بدست آوردن میدان تنش پسماند مهم است حداقل تعداد مورد نیاز و محل مناسب برای نصب آن‌ها می‌باشد، که درهیچ یک از تحقیقات پیشینیان اشاره‌ای به آن نشده‌است. دراین مقاله با استناد به تحقیقات و نتایج تحلیل اجزای محدود و آزمایش کار سرد بر روی نمونه‌هایی از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024–T351، تعداد و محل مناسب برای نصب کرنش‌سنج‌ها ارائه شده است. براین اساس نصب دو کرنش سنج در یک فاصله شعاعی یکسان نسبت به لبه سوراخ در دو نقطه مقابل هم و در ناحیه الاستیک منجر به حصول توزیع تنش پسماند اطراف سوراخ کارسرد شده می‌گردد.

2- بیان مساله

در تحقیقاتی که تاکنون درخصوص به‌دست آوردن میدان تنش پسماند در اطراف سوراخ کارسرد شده با کمک نصب کرنش‌سنج در اطراف سوراخ انجام گرفته صرفاً مفید بودن روش و همخوانی بین نتایج آزمایش و نتایج تحلیل اجزای محدود ارائه شده و اشاره‌ای به محل نصب ویا تعداد مناسب کرنش‌سنج‌ها نشده‌است. این درحالی‌است که به منظور حصول نتایج قابل اعتماد و امکان بدست آوردن میدان تنش پسماند با کمک کرنش‌های اندازه‌گیری شده و نیز جلوگیری از ایجاد خطا و دوباره‌کاری، وجود اطلاعات فنی مستدل برای استفاده از کرنش‌سنج‌ها شدیداً مورد نیاز خواهد بود. اینگونه اطلاعات فنی و تکنیکی می‌بایست برمبنای منطق علمی برآمده از انجام تحلیل‌ها و محاسبات و همخوانی با نتایج آزمایشگاهی استوار باشند تا قابل استناد بوده و بعنوان دستورالعملی در کاربردهای عملی مورد استفاده قرار گیرند. ازاینرو هدف این تحقیق یافتن حداقل تعداد مناسب کرنش‌سنج‌ها و نیز مکان مناسب برای نصب آن‌ها دراطراف سوراخ کارسرد شده می‌باشد؛ چنانکه با توجه به مقادیر ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها بتوان با دقت مناسب میدان تنش پسماند دراطراف سوراخ کارسرد شده را بدست آورد.

هم‌چنانکه در روابط تحلیلی که تاکنون ارائه شده مشاهده می‌شود، علاوه بر فرض صلبیت برای محور؛ فرض تقارن محوری که منجر به صفرشدن مولفه‌های تنش برشی می‌گردد درکلیه روش‌های تحلیلی به‌چشم می‌خورد. بدین‌معنا که اندازه تنش در دونقطه مقابل هم نسبت به سوراخ، مقداری یکسان خواهد بود، که نتایج نیز مؤید همین امر می‌باشند. نوع رفتار الاستوپلاستیک ماده و رفتار سخت‌شوندگی آن که تأثیر مستقیم در مسیر باربرداری ماده دارد منجر به ارائه راه حل‌های متفاوت برای حل مسأله شده است. هریک از محققین بااحتساب فرضیاتی خاص به حل مسأله پرداخته‌اند که دراین تحقیق از راه حل ارائه‌شده توسط استیسی و وبستر[3] که اثر-باشینگر[4] را در مسیر باربرداری لحاظ نموده و همخوانی خوبی با رفتار ماده مورد بررسی دارد، استفاده شده‌است.

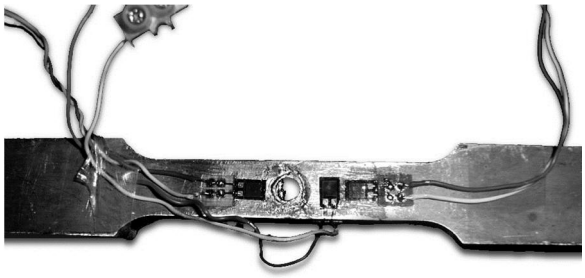
برای کنترل نتایج محاسبات تحلیلی، آزمایش کارسرد برروی دو نمونه انجام شده‌است. نمونه‌های مورد بررسی، نمونه‌ای دمبلی شکل؛ شبیه آنچه که در آزمایش کشش ساده استفاده می‌شود؛ بوده که در قسمت گلویی آن یک سوراخ با قطر 5 میلیمتر تعبیه شده است. جنس نمونه‌ها از آلیاژ آلومینیوم 2024 می‌باشد. درنمونه اول سه کرنش سنج مطابق شکل1 نصب شده‌اند. دوکرنش سنج در فاصله شعاعی 7/5 میلیمتر یکی در زاویه صفر درجه نسبت به افق بصورت شعاعی، دیگری در زاویه 180 درجه نسبت به افق و بصورت محیطی و کرنش سنج سوم در فاصله شعاعی 14/5 میلیمتری بصورت شعاعی نصب شده‌اند. برروی نمونه دوم دو کرنش‌سنج در فاصله شعاعی 10/5 میلیمتر یکی در زوایه صفر درجه بصورت شعاعی و دیگری در زاویه 180 درجه بصورت محیطی نصب شده‌اند؛ که در شکل 2 رویت می‌گردد. شکل 3 نیز انجام فرایند کارسرد را نشان می‌دهد.

کرنش‌سنج‌های مورد استفاده از نوع 350 اهمی مدل اچ-بی-ام[5] ساخت کشور آلمان می باشند ودستگاه ثبات کرنش درهرثانیه یکبار مقدار کرنش را ثبت می‌نماید. نمونه اول برای بدست آوردن محل مناسب نصب کرنش‌سنج و

1- X-Ray diffraction
2- Neutron Diffraction
3- Bragg's law

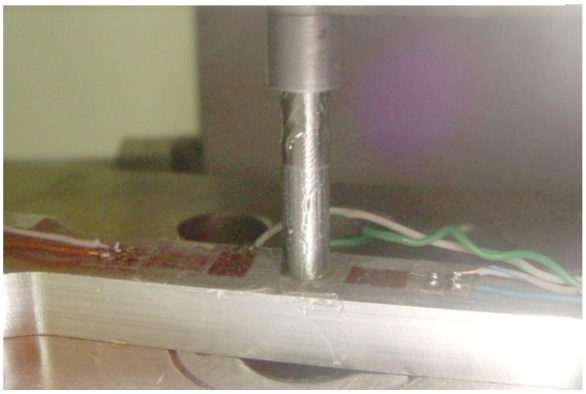
4- Baucshinger effect
5- HBM

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]



شکل 1 نصب سه کرنش سنج بر روی نمونه اول

شکل 2 نصب دو کرنش‌سنج بر روی نمونه دوم



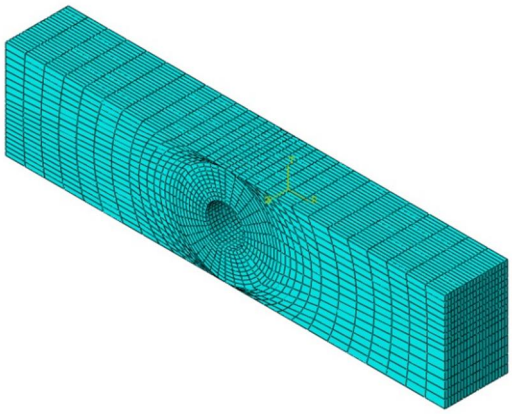
شکل 3 فرایند کارسرد برروی نمونه اول

نمونه دوم برای تعیین تعداد کرنش‌سنج‌های مورد نیاز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. هردو نمونه تحت فرایند کارسرد (مشتمل بر ورود و خروج محور) با سرعت ثابت 2میلیمتربردقیقه بامحوری از جنس فولاد اسپیکا[1] بوسیله دستگاه زوییک250[2] واقع شده‌اند. کرنش‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج‌ها درطول آزمایش کارسرد با نتایج تحلیل اجزای محدود مقایسه شده‌اند. همچنین باتوجه به روش تحلیلی ارائه شده توسط استیسی‌ووبستر با استناد به مقدار کرنش قرائت شده در هنگام ورود کامل محور درون سوراخ توزیع تنش پسماند نسبت به فاصله از لبه سوراخ بدست آمده است؛ که نتایج در بخش مربوطه ارائه خواهندشد.

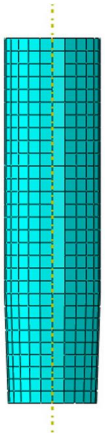
3- مدل اجزای محدود

درتحقیقات انجام گرفته تاکنون عمدتاً مدل دو بعدی فرایند بصورت ورود محور به درون سوراخ و یا جابجایی شعاعی لبه سوراخ بصورت مدل یک چهارم بدلیل تقارن ارائه گردیده‌اند. دراین تحقیق مدل سه بعدی فرایند شامل بخش گلویی نمونه دمبلی شکل و محور توسط نرم افزار آباکوس 6-11[3] تحلیل شده‌است. فرایند کار سرد در این تحقیق نظیر تحقیق چاخرلو و واگول [11] و سایرین، بصورت ورود محور از یک طرف سوراخ و خروج از طرف دیگر مدلسازی شده‌است. نمونه بر روی یک صفحه تخت قرار گرفته و نیروی وارد بر محور باتوجه به فیکسچر طراحی شده صرفاً بصورت محوری می‌باشد. ازاینرو شرایط مرزی تعریف شده شامل صفر شدن جابجایی نقاط سطح زیرین نمونه در امتداد عمود بر صفحه (راستای z) و جابجایی محوری محور باندازه ورود و خروج کامل از سوراخ می‌باشند. مطابق شکل 4 ،مدلسازی نمونه در یک صفحه مستطیلی به ابعاد 560x25mm با ضخامت 8 میلیمتر با یک سوراخ مرکزی به قطر 5 میلیمتر متشکل از 16800 المان نوع C3D8R که بیانگر المان‌های پیوسته سه بعدی با هشت گره انجام شده‌است. لازم به تذکر است که تعداد مزبور به لحاظ دقت و همگرایی جواب مقدار بهینه است. محور نیز بصورت صلب و از جنس فولاد اسپیکا با ضریب پؤاسون 0/3 و ضریب الاستیک 210 گیگا پاسکال و به منظور انجام کارسرد بادرجه 4% با قطر 5/2 میلیمتر مطابق شکل 5 مدل شده‌است. مونتاژ محور و سوراخ که بصورت هم مرکز و با سطح تماسی با ضریب اصطکاک 0/1 مدل شده‌اند نیز در شکل 6 نشان داده شده‌است. مشخصات آلومینیوم 2024–T351 مطابق مشخصات داده شده توسط مولفین [1]، جاهد و همکارانش [12] ، [13] و پوسارد و همکارانش [14]؛ مشتمل بر ضریب الاستیسیته برابر 77/5 گیگاپاسکال، ضریب پواسون 0/28 ،تنش تسلیم 367/88 مگاپاسکال و ضریب اثر باشینگر 0/5 وارد تحلیل اجزای محدود و محاسبات تحلیلی بر مبنای روش استیسی و وبستر [4] شده‌اند. درضمن سرعت ورود و خروج محور در مدل برابر همان سرعت انجام آزمایش لحاظ شده است.

کانتور تنش‌های تولید شده توسط مدل اجزای محدود در مرحله ورود محور و نیز پس از خروج محور مطابق شکل‌های شماره 7 و 8 می‌باشند.



شکل 4 مدل اجزای محدود نمونه متشکل از 16800 المان

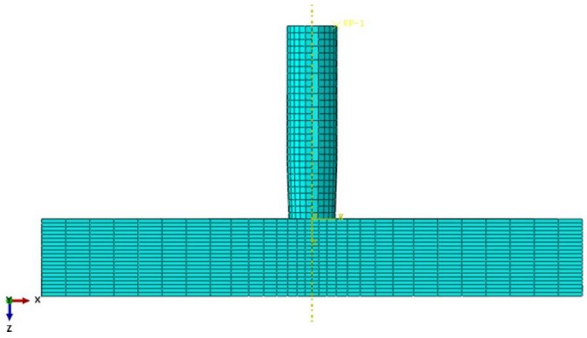


شکل 5 محور مدل شده در اجزای محدود

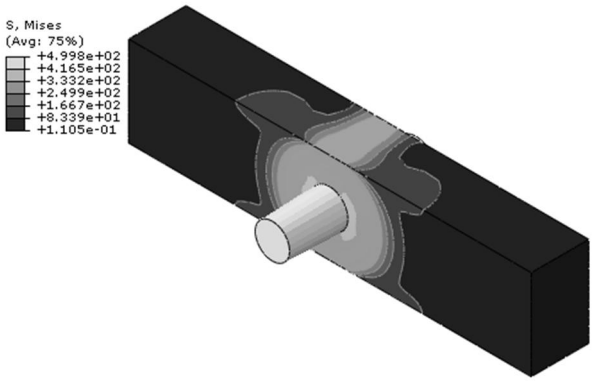
1- SPK
2- Zwick250
3- ABAQUS6-11

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

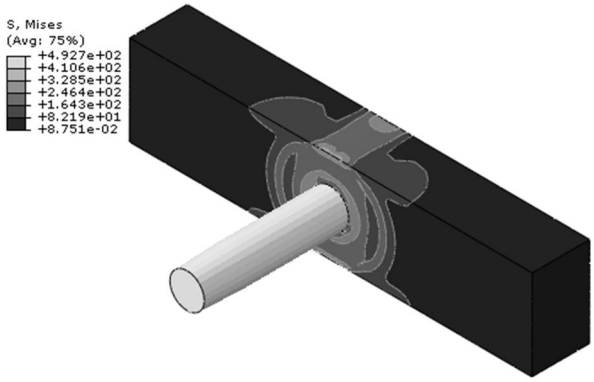
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]



شکل 6 مونتاژ محور و سوراخ برای انجام کارسرد



شکل 7 کانتور تنش درمرحله ورود کامل محور درون سوراخ



شکل 8 کانتور تنش درمرحله خروج کامل محور از سوراخ

4- روابط حاکم و روش حل مسأله

باتوجه به روابط تحلیلی موجود برای فرایند کارسرد، توزیع تنش پسماند اطراف سوراخ در دوناحیه الاستیک و پلاستیک بصورت جدا محاسبه می‌گردد که البته روابط مزبور در مرز ناحیه پلاستیک شرط پیوستگی را ارضا خواهند نمود. هم‌چنین تحلیل درقالب دو بخش بارگذاری (ورود محور) و باربرداری (خروج محور) انجام که مقادیر پسماند تنش از اختلاف مقادیر تنش در بخش بارگذاری و باربرداری بدست می‌آید. دربخش باربرداری حل در دو ناحیه الاستیک با کمک روابط هوک و ناحیه پلاستیک با توجه به رفتار ماده انجام و در مرحله باربرداری نیز باتوجه به رفتار باربرداری ماده مورد نظر تحلیل صورت می‌گیرد. رفتار بارگذاری براساس نتایج حاصل از آزمایش کشش انجام شده توسط مؤلفین [15] و رفتار ماده در مسیر باربرداری، براساس نتایج آزمایش انجام گرفته توسط پوسارد و همکارانش [14] در مدل اجزای محدود و نیز روابط تحلیلی منظور شده‌اند.

در مرحله بارگذاری، شعاع مربوط به مرز پلاستیک و فشار شعاعی ناشی از جازنی محور درون سوراخ در لبه داخلی سوراخ دو مجهول اصلی مسأله برای حل تحلیلی می‌باشند. مسأله مطرح شده دراین بخش از تحقیق بدین شرح است که آیا بااستفاده از دو کرنش‌سنج می‌توان به توزیع تنش پسماند نائل شد؟

راه حل پیشنهادی برای بدست آوردن تنش پسماند باکمک کرنش‌های ثبت شده بدین‌ترتیب است که باجایگذاری مقدار کرنش پس از اتمام بارگذاری، در روابط هوک مقدار تنش در آن نقاط و نیز شعاع پلاستیک بدست می‌آید. بابدست آمدن شعاع پلاستیک، فشار جازنی و نهایتاً میدان تنش پسماند محاسبه خواهد شد. بعنوان مثال کرنش‌های اندازه‌گیری شده در شعاع 10/5 میلیمتر؛ در نمونه های تحت آزمایش با سوراخ مرکزی به شعاع 2/5 میلیمتر؛ درامتداد شعاعی 0/00128 و درامتداد محیطی 0/000403- بوده که مقدار تنش‌های ناشی از بارگذاری بااستفاده از روابط هوک برابر 98/7 مگاپاسکال درامتداد شعاعی و 1/62- مگاپاسکال درامتداد محیطی محاسبه می‌گردند. این مقادیر با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود که بترتیب برای تنش‌های شعاعی و محیطی برابر 99 و 2- مگاپاسکال می‌باشند قابل مقایسه و مبین دقت روش می‌باشند. همچنین براین اساس شعاع پلاستیک برابر 5/71 میلیمتر بدست می آید و مقدار فشار شعاعی در لبه داخلی سوراخ برابر 333/72 مگاپاسکال بدست می آید. هم‌چنین باکمک روابط ارائه شده توسط استیسی و وبستر[4] برای داده‌های حاصل از آزمایش برروی نمونه ای از جنس آلیاژ آلومینیوم 2024-T351 که ضریب اثر باشینگر آن بطور متوسط 0/5می‌باشد [14] ،مقدار شعاع پلاستیک در مسیر باربرداری برابر 3/15mm بدست‌آمده و نمودار توزیع تنش پسماند محیطی مطابق نمودار شکل 9 به‌دست می‌آید. البته درابتدا می‌بایست شعاع پلاستیک مشخص گردد تاپس از اطمینان از قرارگرفتن کرنش‌سنج‌ها در ناحیه الاستیک، از روابط هوک بتوان استفاده کرد. دراین خصوص ذکر این نکته مفید است که برای شروع آزمایش باتوجه به معلوم نبودن اندازه شعاع پلاستیک می‌توان به نتیجه تحلیل اجزای محدود و یا نتیجه تحقیقات پیشینیان ازجمله استیسی و وبستر [4] اشاره نمود.

تنش‌های پسماند شعاعی نیز به‌طریق مشابه بدست می‌آیند که باتوجه به غالب بودن سهم تنش‌های پسماند محیطی در ایجاد ناحیه فشاری دراطراف سوراخ و جلوگیری از رشد ترک خستگی، به منظور کنترل نتایج آزمایشگاهی و مقایسه با مدل اجزاء محدود فقط به محاسبه تنش‌های پسماند محیطی اکتفا نموده است. روابط کلی مربوط به تنش‌های پسماند مطابق روابط (1) الی (3) می‌باشند [4].

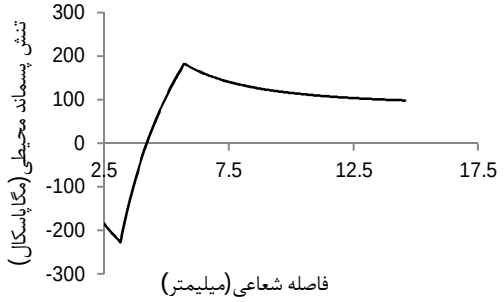
$a < r < d$:

$$\sigma_\theta^{\text{res}} = -\alpha\sigma_y\left[1 + \ln\left(\frac{r}{a}\right)\right] \tag{1}$$

$d < r < c$:

$$\sigma_\theta^{\text{res}} = \sigma_y \cdot \left[\ln\left(\frac{r}{c}\right) + \frac{k^2 + (c/a)^2}{2k^2}\right] - (1+\alpha)\sigma_y\left[1 + \frac{k^2}{(r/a)^2}\right]\frac{(d/a)^2}{2k^2} \tag{2}$$

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]



شکل 9 توزیع تنش پسماند محیطی با روش تحلیلی (مدل استیسی و وبستر) براساس کرنش‌های ثبت شده در شعاع 10/5 میلیمتر

$c < r < b$:

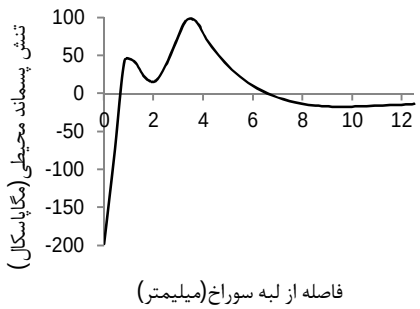
$$\sigma_\theta^{\mathrm{res}} = \frac{\sigma_y}{2k^2}\left[1 + \frac{k^2}{(r/a)^2}\right]\cdot \left[\left(\frac{c}{a}\right)^2 - (1+\alpha)\left(\frac{d}{a}\right)^2\right] \quad (3)$$

5- نتایج آزمایش و تحلیل‌ها

دراین بخش ابتدا نتیجه تحلیل اجزای محدود ارائه می‌شود. تحلیل اجزای محدود توسط نرم افزار آباکوس 6-11[1]انجام شده است. شکل 10 توزیع تنش پسماند محیطی؛ که تأثیر اصلی بر جلوگیری از جوانه زنی و رشد ترک دارد؛ در صفحه بالایی جسم که محل ورود محور می‌باشد را نشان می‌دهد. ناپیوستگی نشان داده شده در تنش پسماند محیطی در صفحه ورودی تا فاصله حدود 4 میلیمتر از لبه سوراخ در نمودار شکل 10، بخاطر وجود تغییر شکل‌های خارج از صفحه[2] نواحی اطراف سوراخ است. دی آکویستو و پاستا [16] نیز نشان دادند که در مدل سه بعدی تنش های پسماند،اثر این تغییر شکل‌ها را نباید نادیده گرفت. درواقع در صفحه ورودی دراثر ورود محور و جریان محوری مواد در امتداد محور سوراخ، بخشی از اطراف سوراخ تحت فشار قرار گرفته و لذا ضخامت جسم هم کمی تغییر می‌نماید که دی آکویستو و پاستا [16] میزان تغییر ضخامت ورق در اطراف سوراخ را محاسبه نمودند. هم‌چنین تغییرات کرنش بر حسب زمان انجام فرایند در نقاطی که کرنش سنج در آن‌ها نصب شده‌است نیز در نمودارهای زیر دیده می‌شود. همانگونه که در بخش قبل ارائه توضیح شد ابتدا به منظور یافتن محل مناسب برای نصب کرنش‌سنج‌ها، بر روی یک نمونه سه کرنش سنج یکی در شعاع 7/5 میلیمتر (فاصله 5 میلیمتر ازلبه سوراخ) و امتداد صفر درجه بصورت شعاعی، یکی در شعاع 7/5 میلیمتر (فاصله 5 میلیمتر از لبه سوراخ) و امتداد 180 درجه بصورت محیطی و دیگری در شعاع 14/5 میلیمتر (فاصله 12 میلیمتر از لبه سوراخ) و امتداد 180 درجه بصورت شعاعی و در صفحه ورودی (صفحه بالایی نمونه) نصب شده‌اند. متأسفانه در فاصله شعاعی 7/5 میلیمتر اختلاف فاحشی بین نتایج حاصل از ثبت کرنش سنج‌ها و نتایج تحلیل اجزای محدود دیده‌شد. کرنش ثبت شده توسط هر کرنش سنج در واقع میانگین کرنش در نقاط تحت پوشش کرنش‌سنج می‌باشد و علیرغم تهیه کوچکترین کرنش‌سنج موجود، به هرحال یک سطح کوچک با ابعاد حدود 2 در 3 میلیمتر توسط یک کرنش‌سنج اشغال و کرنش نشان داده شده میانگین کرنش‌های نقاط تحت پوشش می‌باشد. همانگونه که در نمودار شکل 10 نیز دیده می‌شود، تغییرات کرنش در محدوده شعاعی 7/5 میلیمتر دارای شیب تند بوده و لذا مقدار میانگین کرنش‌ها در آن محدوده با اندازه واقعی کرنش در مرکز آن اختلاف فاحش داشته که خطای مشاهده شده بین نتایج کرنش‌سنج‌ها و نتایج اجزای محدود مؤید این مطلب است. نمودار شکل 11 تغییرات کرنش شعاعی بر حسب زمان انجام آزمایش که توسط کرنش سنج شعاعی نصب شده در شعاع 7/5 میلیمتر در نمونه اول، ثبت شده را نشان می‌دهد که اختلاف یاد شده قابل رویت است؛ چنانکه حداکثر خطای بین نتایج آزمایش با نتایج تحلیل اجزای محدود تا 700% نیز به دست آمده‌است. این درحالیست که کرنش های ثبت شده در فاصله شعاعی 14/5میلیمتر در همان نمونه، توسط کرنش‌سنج شعاعی، همخوانی خوبی با نتایج تحلیل اجزای محدود را نشان می‌دهد که دراین خصوص می‌توان به شیب کند تغییرات کرنش و یکنواختی تقریبی کرنش در محدوده شعاعی مزبور اشاره نمود. خطای موجود بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در مرحله بارگذاری کامل 10/64% و در مرحله باربرداری کامل (پسماند) 2/6% به دست آمده‌اند. شکل 12 مقایسه بین نتایج ثبت شده توسط کرنش‌سنج و نتایج تحلیل اجزای محدود در شعاع مذکور را نشان می‌دهد. بنابراین کرنش‌سنج‌ها می‌بایست در ناحیه الاستیک نصب گردند تا نوسان‌های شدید کرنش و جابجایی‌های خارج از صفحه که قبلاً درخصوص آن‌ها ارائه توضیح شد، تأثیری بر نتایج آزمایش نگذارند. درخصوص تعداد کرنش‌سنج‌های مورد نیاز به منظور بدست آوردن توزیع تنش‌های پسماند مطابق توضیحات بخش قبل ، با نصب دو کرنش‌سنج می‌توان دو مجهول اصلی مسأله؛ شعاع پلاستیک در مسیر بارگذاری و فشار جازنی؛ را محاسبه و به توزیع تنش‌های پسماند دست یافت.

نمودار تغییرات کرنش ثبت شده نسبت به زمان انجام کارسرد در نمونه دوم در نقطه‌ای به فاصله شعاعی 10/5 میلیمتر و نتیجه تحلیل اجزای محدود در نقطه مزبور مطابق شکل 13 می‌باشد. لازم به توضیح است که دراین فاصله شعاعی نیز میزان خطای موجود بین نتایج حاصل از آزمایش و نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود در مرحله بارگذاری کامل 9/75% و درانتهای باربرداری (پسماند) حدود 14% می‌باشد.

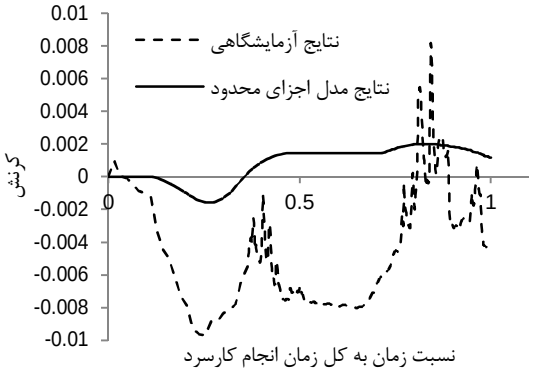
در نمودارهای 11 الی 13 محور افقی مبین زمان انجام کار سرد می‌باشد که البته بصورت نسبی در مقایسه با کل زمان انجام آزمایش درنظر گرفته شده است. باتوجه به هندسه محور و ضخامت نمونه‌ها، مرحله بارگذاری کامل (ورود کامل محور درون سوراخ) درحدود 60% زمان انجام کل آزمایش (نقطه 0/6 از محور افقی) اتفاق می‌افتد و از آن پس عمل خروج محور (باربرداری) رخ می‌دهد. همانگونه که در نمودارها دیده می‌شود نصب کرنش‌سنج در نزدیکی لبه سوراخ منجر به ثبت کرنش‌ها با خطای زیاد می‌شود؛ این



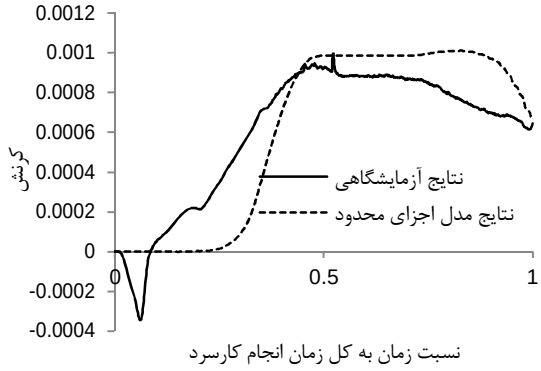
شکل 10 توزیع تنش پسماند محیطی نتیجه شده از تحلیل اجزای محدود در صفحه ورودی محور برحسب فاصله از لبه سوراخ

1- ABAQUS6-11
2- Out-of-plane displacement

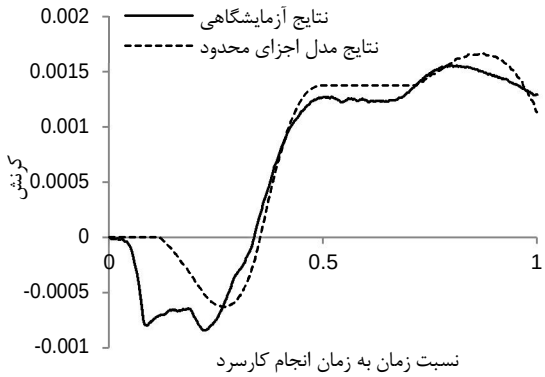
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]



شکل 11 مقایسه کرنش‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج و نتیجه مدل اجزای محدوددرشعاع 7/5میلیمتر در نمونه اول



شکل 12 مقایسه کرنش‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج و نتیجه مدل اجزای محدوددرشعاع 14/5میلیمتر درنمونه اول



شکل 13 مقایسه کرنش‌های ثبت شده توسط کرنش‌سنج و نتیجه مدل اجزای محدود در شعاع 10/5میلیمتر در نمونه دوم

درحالی‌است که درفواصل دور نسبت به لبه سوراخ، کرنش‌های ثبت شده همخوانی خوبی با کرنش‌های نتیجه شده از تحلیل اجزای محدود دارا می‌باشند.

6- نتیجه گیری

هم‌چنانکه در بخش قبل نشان داده‌شد، مناسب‌ترین مکان برای نصب کرنش‌سنج دراطراف سوراخ کارسردشده، در ناحیه الاستیک و درواقع در نقطه‌ای که تغییرات کرنش دارای شیب ملایم است، می‌باشد. نصب کرنش‌سنج در نزدیکی لبه سوراخ و یا درناحیه پلاستیک اطراف آن، به‌دلیل وجود جابجایی خارج صفحه‌ای و نیز شیب تند تغییرات کرنش منجر به ایجاد خطای قابل توجه خواهد شد. هم‌چنین استفاده از دو کرنش‌سنج در یک فاصله شعاعی یکسان نسبت به لبه سوراخ، در دو نقطه مقابل هم یکی بصورت شعاعی و دیگری بصورت محیطی به منظور برخورداری از هردو مولفه کرنش (کرنش شعاعی و کرنش محیطی) دریک شعاع خاص، مطابق روابط تحلیلی موجود، منجر به حصول توزیع تنش پسماند خواهدشد. همخوانی مناسب بین نتایج آزمایشات انجام شده و نتایج محاسبات تحلیلی و نتایج تحلیل اجزای محدود موید صحت و دقت روش پیشنهادی می‌باشد.

7- فهرست علائم

A	شعاع داخلی(m)
B	شعاع خارجی (m)
C	شعاع پلاستیک درمسیر بارگذاری (m)
D	شعاع پلاستیک درمسیر باربرداری (m)
$K=b/a$	نسبت شعاع خارجی به شعاع داخلی
R	شعاع(m)

علایم یونانی

A	ضریب اثر باشینگر
Σ	تنش (MPa)

بالانویس‌ها

res	پسماند

زیرنویس‌ها

y	تسلیم
θ	محیطی

8- مراجع

[1] K. F. E.Pooladi B., "Experimental investigation of residual stress around cold-worked holes and its effect on fatigue life," *Scientia Iranica* vol. Article In Press, 2014.

[2] Y. C. Hsu, and R. G. Forman, "Elastic-Plastic Analysis of an Infinite Sheet Having a Circular Hole Under Pressure," *Journal of Applied Mechanics, Trans. ASME,* vol. 42, pp. 347-352, 1975.

[3] W. Guo, "Elastic-Plastic Analysis of a Finite Sheet with a Cold-Worked Hole," *Engineering Fracture Mechanics,* vol. 46, pp. 465-472, 1993.

[4] G. A. W. A.Stacey, "Determination of residual stress distributions in autofrettaged tubing," *International Journal of Pressure Vessel and Piping,* vol. 31, pp. 205-220, 1988.

[5] S. B. L. H.Jahed, R.N.Dubey, "Variable material property method in the analysis of cold-worked fastener holes," *Journal of Strain Analysis,* vol. 35, pp. 137-142, 2000.

[6] P. S.Prevey, "The measurement of subsurface residual stress and cold work distributions in nickel base alloys," in *ASM's conference on residual stress in design, process and materials selection,* Cincinnati,Ohio,USA, 1987, pp. 11-20.

[7] D. Q. Wang, and L. Edwards, "Neutron Diffraction Determination of the Complete 3D Residual Stress Distribution Surrounding a Cold Expanded Hole," in *Fourth European Conference on Residual Stresses,* 1998, pp. 619-626.

[8] D. Stefanescu, A. Bouzina, M. Dutta, D. Q. Wang, M. E. Fitzpatrick, and L. Edwards, "Comparison of Residual Stress Measurements Using Neutron and X-Ray Diffraction Around Cold Expanded Hole," *Journal of Neutron Research,* vol. 9, pp. 399-405, 2002.

[9] H. N. N. M. H.D. Gopalakrishna *, M. Krishna, M.S. Vinod, A.V. Suresh, " Cold expansion of holes and resulting fatigue life enhancement and residual stresses in Al 2024 T3 alloy – An experimental study," *Engineering Failure Analysis,* vol. 17, pp. 361–368, 2010.

[10] K. F. E.Pooladi, "A new practical-analytical method to determine residual stresses around cold-worked hole based on measured residual strains," *International journal of advances and trends in engineering materials and their applications,* vol. 1, pp. 47-52, 2013.

[11] T. N. Chakherlou, and J. Vogwell, "The Effect of Cold Expansion on Improving the Fatigue Life of Fastener Holes," *Engineering Failure Analysis,* vol. 10, 2003.

[12] R. S. H.Jahed, R.N.Dubey, "A variable material property approach for solving elastic-plastic problems," *International Journal of Pressure Vessel and Piping,* vol. 71, pp. 285-291, 1996.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]

[13] R. N. D. H.Jahed, "an axisymmetric method of elastic-plastic analysis capable of predicting residual stress field," *Journal of pressure vessel technology,* vol. 119, pp. 264-273, 1997.
[14] C. Poussard, M. J. Pavier, and D. J. Smith, "Analytical and Finite Element Predictions of Residual Stresses in Cold Worked Fastener Holes," *Journal of Strain Analysis,* vol. 30, pp. 291-304, 1995.
[15] K. F. E.Pooladi, "Residual strains around cold worked holes from statistical view", Engineering solid mechanics," *Engineering solid mechanics,* vol. 2, pp. 131-138, 2014.
[16] S. P. L.D'Acquisto, "On the measurement and prediction of the out-of-plane displacement surronding cold-expanded holes," *Experimental Mechanics,* vol. 51, pp. 11-22, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.1.2.8]