



اندازه‌گیری تجربی و اجزاء محدود تنش پسماند حاصل از جوش کاری ورق آلومینیومی و بررسی تأثیر آن بر روی مقادیر فرکانس طبیعی

حسین قره باغی¹، محمدرضا محمدعلیها^{2*}

1- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
2- استادیار، مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی 16846-13114، mrm_aliha@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 05 دی 1396
پذیرش: 09 اسفند 1396
ارائه در سایت: 26 اسفند 1396
کلید واژگان:
شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری
رشد ترک
تنش پسماند
فرکانس طبیعی

چکیده

جوش کاری در صنایع هوافضا از اهمیت بسیاری برخوردار بوده و در اتصالات سازه‌های هوافضایی کاربرد فراوانی دارد. از مشکلاتی که اغلب صنایع کشور با آن مواجه‌اند تنش پسماند ناشی از فرآیند جوش کاری است. تنش پسماند در نواحی اطراف جوش می‌تواند باعث ایجاد و رشد ترک شود به همین علت شناخت و بررسی آن در سازه‌های جوش کاری شده ضروری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری تنش پسماند وجود دارد. در این مقاله به معرفی انواع روش‌های آزمایشگاهی و عددی در جهت تعیین تنش پسماند پرداخته شده است. سپس به کمک فرآیند جوش آرگون دو ورق آلومینیومی از جنس آلیاژ 6061-T6 به یکدیگر متصل شده و تنش‌های پسماند حاصله به روش سوراخ کاری به دست آمده است. جوش کاری به صورت دو پاسه صورت گرفته و توسط جوش نقطه‌ای ابتدا، انتها و وسط خط جوش برای جلوگیری از جابجایی ورق‌ها به یکدیگر متصل شده‌اند. همچنین فرآیند جوش کاری دو ورق آلومینیومی مذکور به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و تنش‌های پسماند استخراج شده است. تمامی شرایط در تحلیل اجزای محدود مشابه شرایط جوش کاری در آزمایشگاه در نظر گرفته شده است. نتایج حاکی از دقت بالا در مدل‌سازی اجزای محدود فرآیند جوش کاری دارد. در نهایت تأثیر حضور تنش‌های پسماند در مقادیر فرکانس‌های طبیعی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

Experimental measurements and finite element residual stress caused by welding aluminum sheets and investigating its effect on natural frequency values

Hussain Gharehbaghi¹, Mohammad Reza Mohammad Aliha^{2*}

1- Department of Aerospace Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
2- Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran
* P.O.B. 16846-13114, Tehran, Iran, mrm_aliha@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 26 December 2017
Accepted 28 February 2018
Available Online 17 March 2018

Keywords:

Simulation of welding process
Crack growth
Residual stress
Natural frequency

ABSTRACT

Welding is very important in the aerospace industry and widely used in aerospace structures. One of the problems that most industries are facing is created residual stress by the welding process. Residual stresses in the surrounding areas of welding can cause cracks and crack growth so identify and evaluate of residual stresses in the welded structures is necessary. There are different methods for determining the residual stress. In this paper, the laboratory and numerical methods were presented for determining the residual stress. Then, the welding process of two aluminum sheets of 6061-T6 alloy has been done and the residual stresses have been obtained by drilling method. Welding is done in two passes and by spot welding the first, the end and the middle of the weld line are connected to prevent the sheets from moving. Also, the welding process of the two aluminum sheets was simulated in 3D in the ABAQUS finite element software and the residual stresses were extracted. All conditions in the finite element analysis are similar to the welding conditions in the laboratory. Results show high accuracy in the modeling of finite element processes in the welding process. Finally, the effect of residual stress in the value of natural frequencies is studied.

1- مقدمه

قطعه، پیش‌بینی تابیدگی و تغییر فرم ناشی از جوش کاری ضروری است [1]. تنش پسماند تنش است که بر اثر انجام عملیات خاصی در جسم باقی می‌ماند و در حالی که جسم تحت هیچ بارگذاری خارجی نیست همچنان در قطعه وجود دارد. فرآیند جوش کاری با توجه به اعمال حرارت شدید، تغییر شکل جسم و تغییر ریز ساختار ماده، یکی از عوامل عمده ایجاد تنش پسماند

در فرآیند جوش کاری، میدان دمایی با گرادیان شدید در قطعات برقرار می‌شود. به‌دست آوردن تغییرات دما در هر نقطه در حین و پس از جوش کاری برای پیش‌بینی پهنای منطقه مؤثر از جوش، به‌دست آوردن توزیع تنش‌های پسماند جوش، پیش‌بینی ساختار ماکروسکوپی مناطق مختلف

Please cite this article using:

H. Gharehbaghi, M. R. Mohammad Aliha, Experimental measurements and finite element residual stress caused by welding aluminum sheets and investigating its effect on natural frequency values, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 04, pp. 164-170, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

به‌شمار می‌رود. وجود تنش پسماند در سازه‌ها می‌تواند منجر به ایجاد اعوجاج، تغییر شکل‌های ناخواسته و غیرمجاز و یا کاهش استحکام و عمر مفید سازه‌های فلزی گردد؛ لذا محاسبه میزان تنش‌های پسماند حاصل از فرآیند جوش کاری بسیار حائز اهمیت است [2].

وجود تنش‌های پسماند در قطعات جوش کاری شده آثار نامطلوبی دارد. تنش‌های پسماند کششی در اطراف ناحیه جوش می‌تواند باعث ایجاد و رشد ترک، خوردگی و در نهایت شکست سازه شوند [3]. در زمان خنک‌کاری آلومینیوم و آلیاژهای آن و رسیدن از مرحله مایع به مرحله جامد انقباض حجمی قابل توجهی وجود خواهد داشت. انبساط بزرگ و میزان انقباض در حالت تبدیل به جامد، باعث ایجاد اعوجاج‌های پسماند در سازه‌های جوش کاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم می‌شود. بنابراین مطالعه کنترل تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات جوش کاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم همیشه یک موضوع مهم در مهندسی جوش کاری است [4]. اندازه‌گیری تنش پسماند بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. قبل از انتخاب هر یک از روش‌های اندازه‌گیری باید مزیت‌ها و محدودیت‌های آن روش بررسی تا بهترین نتیجه از تحقیق حاصل شود. در مطالعات گذشته روش‌های مختلفی برای محاسبه تنش پسماند ابداع شده است. با این وجود، این تنش به‌طور مستقیم قابل محاسبه نمی‌باشد و باید به کمک ابزار تعیین کرنش پسماند محاسبه شود. روش‌های مکانیکی لزوماً مخرب هستند و به‌طور مستقیم نمی‌توانند برای اندازه‌گیری متناوب تنش پسماند به‌کار روند.

روش‌های تحلیلی در بسیاری موارد به دلیل پیچیدگی فرآیند جوش کاری غیرقابل اجرا می‌باشند و از روش‌های عملی نیز به علت مخرب و پرهزینه بودن، در نمونه واقعی نمی‌توان استفاده نمود. بنابراین بهترین روش برای محاسبه توزیع تنش‌های پسماند، روش‌های تحلیل عددی نظیر مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود می‌باشد.

اهمیت بالای سازه‌های ساخته شده از آلومینیوم در کاربردهای هوافضایی و سازه‌های دریایی، حصول اطمینان از کیفیت مطلوب و عاری از نواقص و ترک و استحکام مناسب، این قبیل از سازه‌ها را پیش از استفاده عملی از آن‌ها ضروری می‌سازد [2]؛ بنابراین لزوم ابداع یک روش جدید برای تشخیص وجود تنش‌های پسماند حاصل از تولید که آسان، سریع و ارزان باشد بیش از پیش احساس می‌گردد.

در این پژوهش ابتدا با استفاده از جوش آرگون (تیگ) دو ورق آلومینیومی AA6061-T6 به هم جوش کاری شده و با استفاده از روش سوراخ‌کاری مرکزی تنش‌های پسماند طولی و عرضی با فاصله از خط جوش اندازه‌گیری شده و سپس به کمک نرم‌افزار آباکوس این فرآیند شبیه‌سازی شده و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوش کاری به‌دست آورده و در نهایت با مقایسه مقادیر حاصله با نتایج تجربی به‌دست آمده، تاییدی بر شبیه‌سازی عددی خواهد بود. همچنین با توجه به حائز اهمیت بودن مقادیر فرکانس‌های طبیعی سازه‌های هوافضایی، به بررسی تأثیر تنش‌های پسماند در مقادیر فرکانس‌های طبیعی پرداخته شده است. تغییرات فرکانسی سازه می‌تواند دلیلی برای حضور تنش‌های پسماند باشد، بنابراین این موضوع می‌تواند روشی ساده برای تأیید وجود یا عدم وجود تنش‌های پسماند در سازه باشد.

1-1- نحوه انجام جوش کاری

در این پژوهش، جوش کاری ورق آلومینیوم AA6061-T6 با ضخامت 6 میلی‌متر و طول و عرض نمونه نهایی به ترتیب 150 و 150 میلی‌متر مطالعه شده است. جوش کاری با استفاده از فرآیند جوش آرگون انجام شده است. این

فرآیند بر روی آلومینیوم و آلیاژهای بسیار متداول است [5]. قوس الکتریکی بین الکترود غیرمصرفی تنگستن و سطح کار ایجاد می‌شود. نوک الکترود، حوضچه‌ی مذاب و منطقه‌ی گرم اطراف آن توسط گاز خنثی (آرگون، هلیوم یا مخلوط آن‌ها) که از اطراف الکترود خارج شده محافظت می‌شود، فلز جوش عموماً از فلز قطعه‌کار و در بعضی موارد آمیزه‌ای از فلز و مفتول پرکننده است. این جوش کاری روی آلیاژ AA6061 به‌صورت مشابه انجام شد. پارامترهای جوش از قبیل زاویه الکترود با قطعه‌کار 45 درجه و در امتداد مسیر اتصال، سرعت پیشروی 10 سانتی‌متر بر دقیقه، جریان 120 آمپر، دبی گاز 15 لیتر بر دقیقه در نظر گرفته شده و نوک تنگستن نیز با زاویه 60 درجه تراشیده شده است.

2- روش‌های آزمایشگاهی تعیین تنش پسماند

روش‌های آزمایشگاهی تعیین تنش پسماند به سه دسته عمده روش‌های مخرب، نیمه‌مخرب و غیرمخرب تقسیم‌بندی می‌شوند. از روش‌های مخرب می‌توان به آهن‌بری و کانتور و از روش‌های غیرمخرب می‌توان به مته‌کاری، مته‌کاری عمیق و هسته حلقوی اشاره نمود. به‌دلیل مخرب و نیمه‌مخرب بودن، این روش‌ها در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

پرتو ایکس، سینکروترون و نوترون از روش‌های غیرمخرب می‌باشند. تکنیک پرتو ایکس به‌طور گسترده‌ای در میدان‌های عملی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. انکسار پرتو ایکس به‌دلیل انرژی پایینی که دارد بیشتر برای اندازه‌گیری‌های سطحی به‌کار می‌رود. در روش سینکروترون از دستگاهی استفاده می‌شود که باعث تقویت و تسریع ذرات باردار الکترونی می‌شود. قابلیت نفوذ و جریان یافتن پرتو ایکس حاصل از سینکروترون باعث اندازه‌گیری کرنش در محدوده وسیع‌تری شده است. در روش سینکروترون می‌توان نقشه‌های دو بعدی از کرنش را تهیه نمود بنابراین بهترین روش برای اندازه‌گیری کرنش‌های ناحیه نزدیک سطح قطعات می‌باشد. روش نوترون از نظر شناسایی و تحلیلی بسیار نزدیک به روش پرتو ایکس می‌باشد. از آنجایی که نوترون دارای اثرات متقابل بین پرتو ایکس و هسته الکترون می‌باشد، قدرت نفوذ نوترون در حدود 1000 برابر بیشتر از پرتو ایکس است. محاسبه تنش در قسمت‌های درونی قطعه، محاسبه تنش به‌صورت سه بعدی، کاربرد در حجم‌های پایین و کاربرد در قطعات ضخیم در حد چند سانتی‌متر از خصوصیات این روش می‌باشد [6].

2-1- اصول روش سوراخ‌کاری مرکزی

روش سوراخ‌کاری مرکزی پرکاربردترین روش در اندازه‌گیری تنش پسماند است. هزینه پایین، آسانی و در دسترس بودن و سریع بودن این روش از مزایای این روش می‌باشد. گام‌هایی که به ترتیب برای انجام روش سوراخ‌کاری مرکزی بکار برده می‌شود به‌صورت استاندارد [7] درآمده است که عبارتند از: قرار دادن کرنش‌سنج 3 عضوی بر روی نمونه، اتصال کرنش‌سنج‌ها به دستگاه داده‌برداری و تنظیم آن، قرار دادن یک دستگاه برای سوراخ‌زنی در وسط روز و انجام عملیات سوراخ‌زنی، ثبت و تبدیل نتایج به تنش‌های پسماند از طریق روابط موجود می‌باشد.

این روش با توجه به اندازه سوراخ و همچنین عمق آن در دسته روش‌های نیمه مخرب قرار می‌گیرد. (قطر و عمق سوراخ معمولاً 0.8 تا 3.2 میلی‌متر است) در سال 1956 کلسی [8] برای اولین بار مسئله تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت را به کمک این روش مطالعه کرد. شاجر [9] در سال 1981 برای اولین بار روش المان محدود را در سوراخ‌زنی مرکزی ارائه و

که ε ها کرنش‌های آزاد شده از روزت هستند. سپس با استفاده از معادلات به‌دست آمده توسط شاجر [10] ترکیب تنش‌های P ، Q و T که مطابق معادلات (4-6) به‌دست می‌آیند با استفاده از ضرایب کالیبراسیون مطابق معادلات (7-9) به کرنش‌های خوانده‌شده مرتبط می‌شوند.

$$P = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} \quad (4)$$

$$Q = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{2} \quad (5)$$

$$T = \tau_{13} \quad (6)$$

$$\bar{a}P = \frac{Ep}{1 + \nu} \quad (7)$$

$$\bar{b}Q = Eq \quad (8)$$

$$\bar{b}T = Et \quad (9)$$

که در آن E مدول یانگ و ν ضریب پواسون قطعه موردنظر می‌باشند. \bar{a} و \bar{b} ضرایب کالیبراسیون، σ و τ هم به ترتیب تنش نرمال و برشی در صفحه می‌باشند. با استفاده از تنش‌های به‌دست‌آمده و روابط الاستیسیته تنش‌های اصلی در هر لایه به‌صورت معادله (10) به‌دست می‌آید. که در آن اندیس k مربوط به هر لایه است.

$$(\sigma_{\max})_k, (\sigma_{\min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \\ = E \left[\frac{p}{\bar{a}(1 + \nu)} \pm \frac{\sqrt{q^2 + t^2}}{\bar{b}} \right] \quad (10)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{T_k}{Q_k} \right) = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{t}{q} \right) \quad (11)$$

3- روش‌های عددی تعیین تنش پسماند

در سال 1978 اندرسون [15] با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی توزیع تنش پسماند را در سطوح بالا و پایین صفحه‌ی پایه در نزدیکی جوش طی فرآیند جوش کاری قوسی زیرپودری بررسی کرد. دنگ و همکارانش [16] ابتدا با روشی تجربی توزیع تنش پسماند در ناحیه جوش را با استفاده از کرنش‌سنج‌هایی که در نزدیکی ناحیه جوش کاری نصب نمودند اندازه‌گیری کرده و سپس با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و مدل‌سازی تقارن محوری توزیع تنش پسماند را پیش‌بینی نمودند. تحقیقات انجام شده در زمینه مدل‌سازی فرآیند جوش کاری آلایزهای آلومینیوم نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. فریگارد و همکارانش [17] مدل المان محدود حرارتی با منبع حرارتی متحرک ایجاد کردند و پروفیل دمایی پیش‌بینی شده خود را با استفاده از پروفیل‌های تجربی به‌دست آمده برای آلایزهای 6082-T6 و 7108-T79 تصحیح کردند. خاندکار و همکارانش [18] مدل کامل‌تری از حرارت ورودی براساس گشتاور ابزار جوش کاری ارائه کردند و از آن برای مدل کردن تاریخچه دمایی آلایز آلومینیوم 6061-T651 استفاده کردند. در سال 2004 چن و همکارش [19] با استفاده از نرم‌افزار آنسیس توزیع دمایی حین جوش کاری ورق آلومینیوم 6061-T6 را به‌دست آوردند و با نتایج تجربی خود مقایسه کردند. حاک زرگر و همکاران [20] تأثیر پارامترهای جوش کاری زیرپودری از قبیل شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوش کاری بر روی راندمان قوس فرآیند جوش کاری به کمک روش اجزای محدود بررسی کردند. نخودچی و همکاران [21] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توزیع دما و تنش‌های پسماند را در جوش کاری دو ورق فولادی با ضخامت غیریکسان بررسی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. کریم‌نیا و ستاری‌فر [22] تنش‌های پسماند حاصل از شبیه‌سازی المان محدود استوانه جدار نازک آلومینیوم سری 5000 را با داده‌های تست تجربی که از روش

ضرایب کالیبره A و B را معرفی کرد. وی در سال 1988 [10] ضرایب خود را تصحیح کرد و ضرایب a^- و b^- که مستقل از جنس قطعه هستند را ارائه داد. همچنین صدیقی و همکاران [11] ابتدا روابط حاکم بر کالیبره کردن تنش پسماند در سوراخ کاری را ارائه و سپس ضرایب کالیبره کردن را به روش المان محدود محاسبه نمودند. هنر پیشه و زندیان [12] در مقاله خود تنش‌های پسماند در نمونه‌های تنش‌زدایی شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک به کمک روش سوراخ کاری مرکزی بررسی نموده‌اند.

در این پژوهش با استفاده از روش سوراخ کاری مرکزی مطابق استاندارد ASTM (E837) [7] و به کمک کرنش سنج نوع روزت با مدل FRS-2-23 شرکت TML تغییرات تنش پسماند در عمق 1 میلی‌متری از سطح برای هر نمونه و در سه نقطه مطابق "شکل 1" اندازه‌گیری شده است. نقاط انتخابی به ترتیب در مرکز خط جوش، 15 و 30 میلی‌متری از مرکز خط جوش قرار دارند.

براساس مطالعات انجام شده توسط فلامان [13] در سرعت‌های پایین فرآیند سوراخ زنی، در کناره‌های سوراخ ایجاد تنش پسماند می‌شود، بنابراین سرعت سوراخ زنی در این آزمایش 300000 دوربردقیقه در نظر گرفته شده است که توسط دستگاه SINT MTS 3000 با دقت بالا انجام شده است (شکل 2). البته ایجاد تنش پسماند در کناره‌های سوراخ به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده در فرآیند سوراخ زنی، غیرقابل اجتناب است [14]. براساس روش تعیین تنش پسماند غیریکنواخت در استاندارد، 20 مرحله سوراخ زنی با عمق هر مرحله 0.05 میلی‌متر انجام شده است. در ابتدا با استفاده از کرنش‌های خوانده شده از هر کرنش‌سنج متغیرهای جدید p ، q و t تعریف می‌گردند.

$$p = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2} \quad (1)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (2)$$

$$t = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (3)$$

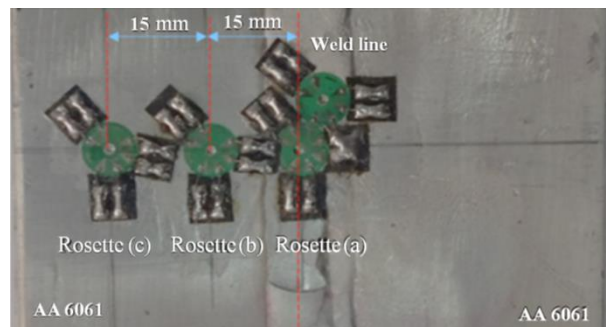


Fig. 1 Strain gauges on a welded sample

شکل 1 نقاط کرنش سنجی روی نمونه جوش کاری شده



Fig. 2 The device used for high-precision stage punching

شکل 2 دستگاه استفاده شده برای سوراخ زنی مرحله‌ای با دقت بالا

سخت‌شوندگی را با یک ضریب ثابت تقریب می‌زند، ضریب سخت‌شوندگی سینماتیک خطی، C ، از رابطه (12) تعیین می‌گردد.

$$C = \frac{\sigma_y - \sigma_0}{\epsilon^{pl}} \quad (12)$$

که در آن σ_0 تنش تسلیم، σ_y تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر، ϵ^{pl} مقدار کرنش پلاستیک محدوده است. این مدل بنا به اصول فیزیکی نتایج معقولی برای نسبت کرنش‌های کوچک دارد (کمتر از 5 درصد). مدل سینماتیک/ایزوتروپیک غیرخطی عموماً سخت‌شوندگی را خیلی بهتر پیش‌بینی می‌کند، اما برای محاسبات و آزمایشات نیاز به کالیبراسیون مفصل‌تر و دقیق‌تری دارند؛ بنابراین با توجه به مقادیر کرنش تعریف شده در تحقیق حاضر از سخت‌شوندگی سینماتیک خطی استفاده شده است.

کلیه خواص حرارتی و مکانیکی ماده ورق تابع دما فرض شده و جهت مدل‌سازی ماده پرکننده از روش تولد و مرگ المان استفاده شده است. به‌منظور استفاده از این تکنیک کلیه المان‌های فلز پایه و المان‌های فلز جوش که بایستی در اثر رسوب مواد متولد گردند، در ابتدا ایجاد شده سپس المان‌های مربوط به فلز جوش با ضرب کردن ماتریس سختی آن المان‌ها در یک عدد خیلی کوچک غیرفعال (مرده) می‌شوند. به‌صورت مشابه، وقتی المان‌ها دوباره فعال (متولد) می‌شوند و پس از عبور منبع حرارت و رسوب ماده پرکننده، در حقیقت به مدل اضافه نمی‌شوند، بلکه فعال شدن مجدد المان‌ها به معنی بازگشت مقادیر ماتریس‌های سفتی، جرم، بارهای المان و غیره به مقدار اولیه خود می‌باشد.

مدل المان محدود ساخته شده در این شبیه‌سازی در "شکل 5" نشان داده شده است. جهت تحلیل از المان‌های آجری شکل ایزوپارامتریک مرتبه اول استفاده شده است. در تحلیل حرارتی المان آجری 8 گرهی با یک درجه آزادی دما و 3 درجه آزادی جابجایی در هر گره (C3D8T) بکار رفته است. به دلیل بالا بودن گرادیان‌های دمایی در نزدیکی ناحیه مذاب و ناحیه متأثر از حرارت از المان‌های ریزتری در این ناحیه تا فاصله 10 میلی‌متری از خط جوش استفاده شده، اما با دور شدن از خط جوش اندازه المان‌ها افزایش یافته است. تعداد کل المان‌ها در این مدل‌سازی حدود نه هزار المان می‌باشد که با توجه به غیرخطی بودن حل زمان طولانی برای تحلیل لازم بود، بنابراین از بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در مدل‌سازی فرآیند جوش کاری چشم‌پوشی گردید.

گرمای ویژه، ضریب هدایت حرارتی ماده، چگالی، دمای ذوب و دمای انجماد ماده خواص مهمی از ماده می‌باشند که دانستن آن‌ها برای شبیه‌سازی حرارتی فرآیند جوش کاری لازم است. خواص مکانیکی مواد نیز شامل مدول یانگ، ضریب پواسون، تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی است که در

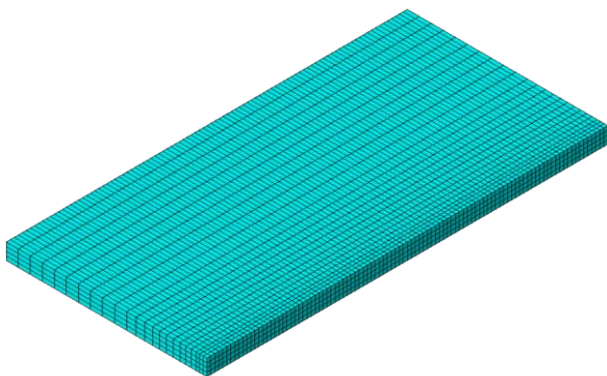


Fig. 5 Three-dimensional finite element model of aluminum sheet
شکل 5 مدل المان محدود سه بعدی ورق آلومینیومی

کرنش‌سنجی سوراخ به‌دست آمده اعتبارسنجی نمودند. شاخصی و همکارانش [23] در پژوهش خود به بررسی توزیع دما، تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از جوش کاری تیگ در یک مخزن کرومی تیتانیومی بررسی نموده‌اند.

4- مدل‌سازی المان محدود فرآیند جوش کاری ورق آلومینیومی

در "شکل 3" مدل دو ورق آلومینیومی به طول 150 میلی‌متر، عرض 75 میلی‌متر و ضخامت 6 میلی‌متر را نشان می‌دهد که توسط جوش کاری با درز جوش طولی تولید شده است.

فرض می‌شود که فرآیند جوش کاری به‌صورت دو پاسه و به روش جوش آرگون بوده و همان‌طور که در "شکل 3" نیز نشان داده شده، اتصال به‌صورت لب به لب مربعی می‌باشد. جنس لوله از آلیاژ آلومینیوم 6061-T6 فرض شده و برای کاهش حجم مدل و تعداد المان‌ها تنها نیمی از ورق در نظر گرفته شده است. در این تحقیق از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس 14.2 برای مدل‌سازی فرآیند جوش استفاده شده است.

شبیه‌سازی فرآیند جوش کاری با انجام تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی به‌صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. برای این منظور یک تحلیل مکانیکی-حرارتی گذرای سه‌بعدی انجام شده و با استفاده از مدل الاستو-پلاستیک، معیار تسلیم فون مایزس و سخت‌شوندگی سینماتیک صورت می‌پذیرد. توزیع میدان‌های دما و تنش به‌دست می‌آیند. برای مدل‌سازی منبع حرارتی از مدل دو بیضی‌گون گلداک [24] استفاده شده که این مدل در "شکل 4" نشان داده شده است.

در نرم‌افزار آباکوس، دو مدل برای سخت‌شوندگی سینماتیک برای مدل‌سازی بارگذاری چرخه‌ای فلزها وجود دارد. مدل سینماتیک خطی رفتار

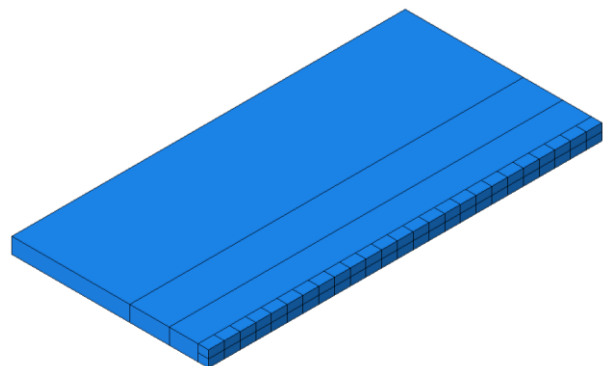


Fig. 3 Model plate with longitudinal weld seam

شکل 3 مدل ورق با درز جوش طولی

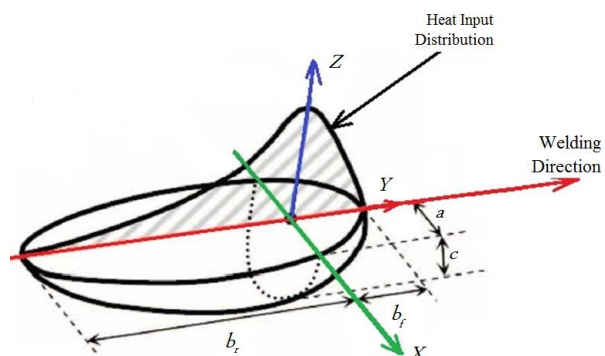


Fig. 4 Goldak's double ellipsoid model [24]

شکل 4 شکل شماتیک منبع حرارتی، مدل دو بیضی‌گون گلداک [24]

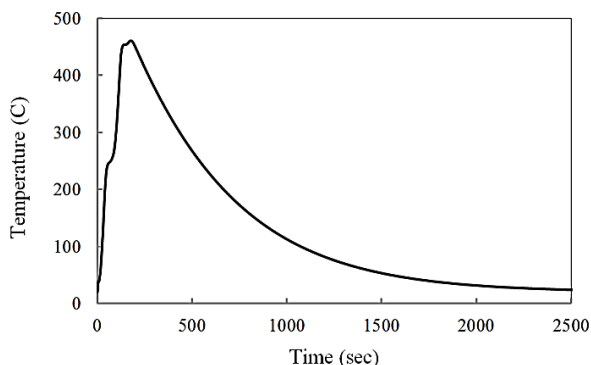


Fig. 6 Results of temperature history for the welding process

شکل 6 نتایج تاریخچه دمایی برای فرآیند جوش کاری

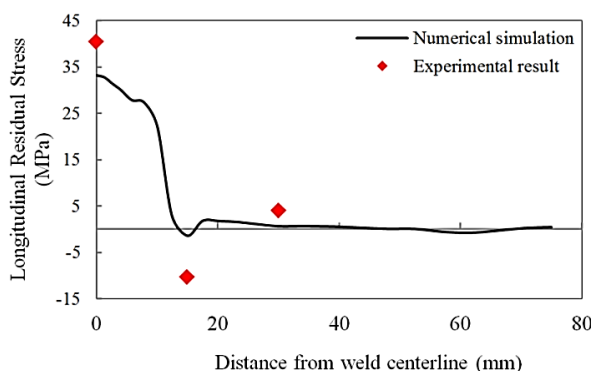


Fig. 7 The results of longitudinal residual stress of the welding analysis sheet

شکل 7 نتایج تنش پسماند طولی در ورق تحلیل شده حاصل از فرآیند جوش کاری

6- تحلیل فرکانسی

تحلیل فرکانسی بر روی ورق با حضور تنش‌های پسماند حاصل از جوش کاری و بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند صورت پذیرفته است. برای در نظر گرفتن تنش‌های پسماند حاصل از جوش کاری بعد از آخرین گام (خنک شدن) در تحلیل مذکور، گام مربوط به تحلیل فرکانسی تعریف شده است. شکل مودهای مربوط به ورق در "شکل 8" نشان داده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از این است که جوش کاری باعث افزایش سختی ورق می‌شود که در نتیجه فرکانس‌های طبیعی افزایش می‌یابد، مقادیر مربوط به فرکانس‌های اول تا سوم را در جدول 2 مشاهده می‌نمایید. در حقیقت با توجه به مباحث مودال غیرخطی، تنش پسماند همانند پیش‌بار کششی در نظر گرفته شده که می‌تواند فرکانس‌های طبیعی قطعات و سازه‌هایی که دارای تنش پسماند هستند تحت تأثیر قرار دهد. بنابراین می‌توان از مقایسه فرکانس‌های طبیعی سازه، به وجود تنش پسماند پی برد [28].

تحلیل ترموالاستیک و ترموپلاستیک فرآیند جوش کاری تأثیرگذار می‌باشند. از آنجا که خواص مواد به‌طور واقعی و متغیر با دما اعمال می‌شوند، تحلیل المان محدود به‌صورت غیرخطی و حل به‌صورت تکراری خواهد بود [25]. جابجایی گره‌ها در صفحه تقارن در جهت عمود بر خط جوش برای اعمال شرایط مرزی مقید شده‌اند. علاوه بر آن جهت جلوگیری از حرکت صلب‌وار سیستم نقاط ابتدایی و انتهایی خط جوش نیز مقید شده‌اند. اندازه المان‌ها برای ناحیه مذاب و نزدیکی ناحیه مذاب به‌صورت مکعبی با ابعاد $1 \times 1 \times 1$ (mm) در نظر گرفته شده است. سطح تقارن آدیاباتیکی و دمای اولیه ورق برابر دمای محیط (20°C) فرض شده‌اند. در جدول 1 خواص مکانیکی و حرارتی آلومینیوم آلیاژ 6061-T6 وابسته به دما که در این مدل‌سازی استفاده گردیده، آورده شده است. همچنین گرمای نهان ویژه ذوب 384 کیلوژول بر کیلوگرم و دمای سیال شدن 652 درجه سانتی‌گراد و دمای انجماد 582 درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

5- نتایج مدل‌سازی فرآیند جوش کاری

در "شکل 6" نتایج تاریخچه دمایی پس از گذشت 2500 ثانیه از فرآیند جوش کاری در نقطه‌ای که در فاصله 30 میلی‌متری از وسط خط جوش و 150 میلی‌متری از ابتدای جوش کاری قرار گرفته است مشاهده می‌شود. در "شکل 7" نیز نتایج مربوط به تنش‌های پسماند طولی نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این فرآیند تنش‌های اطراف خط جوش به‌صورت کششی بوده و در فاصله 13 میلی‌متری از مرکز خط جوش تنش پسماند کششی به تنش پسماند فشاری تبدیل می‌شود. در نتایج تحلیل اجزای محدود بیشینه مقدار تنش پسماند کششی در حدود 34 مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج تجربی در عمق 0.1 میلی‌متری از سطح ارائه شده‌اند، بیشینه تنش کششی در مرکز خط جوش در حدود 40 مگاپاسکال به‌دست آمده است. کوچک بودن قطعه جوش کاری شده، آزاد بودن قطعه، حرارت بالای وارد شده و دو پاس بودن جوش کاری را می‌توان به‌عنوان دلایل کمتر شدن تنش پسماند کششی در تحقیق حاضر دانست. در حقیقت با انجام پیش گرم قبل از جوش کاری تنش پسماند کاهش می‌یابد [27] و پاس اول در جوش کاری دو پاسه به نوعی پیش گرم پاس دوم می‌باشد؛ بنابراین تنش پسماند در جوش دو پاسه کمتر از جوش کاری تک پاس می‌شود. باید توجه داشت که در صورت مقید نمودن ورق‌ها در فرآیند جوش کاری مقدار تنش‌های پسماند کششی در نزدیکی خط جوش افزایش قابل ملاحظه‌ای خواهند داشت (طبیعتاً درصد قابل توجهی از استحکام تسلیم ماده‌ی آلومینیومی). این مقدار تنش پسماند بدون شک تأثیر بسیاری بر روی رفتار رشد ترک‌های احتمالی ایجاد شده در این محدوده خواهد داشت و باعث تسریع رشد ترک‌ها و شکست فاجعه‌آمیز ترک در نواحی اطراف جوش می‌شود.

جدول 1 خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما برای آلومینیوم 6061-T6 [26]

دما (°C)	نسبت پواسون	تنش تسلیم (MPa)	ضریب هدایت حرارتی (W/m°C)	ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg°C)	چگالی (kg/m ³)	مدول یانگ (GPa)	ضریب انبساط حرارتی (μ°C ⁻¹)
37.8	0.33	277.7	162	945	2685	68.54	23.45
93.3	0.33	264.6	177	978	2685	66.19	23.61
148.9	0.33	218.6	184	1004	2667	63.09	25.67
204.4	0.33	-	192	1028	2657	59.16	26.60
260	0.33	159.7	201	1052	2657	53.99	27.56
315.6	0.33	66.2	207	1078	2630	47.48	28.53
371.1	0.33	-	217	1104	2630	40.34	29.57
426.7	0.33	17.9	223	1131	2602	31.72	30.71

جوش کاری موجب افزایش 1 تا 2 درصدی مقادیر فرکانس‌های طبیعی می‌شود. اگر چه تغییر 2 درصدی فرکانس‌های طبیعی قابل توجه نمی‌باشد ولی این تغییر می‌تواند نشان‌گر وجود تنش پسماند در سازه باشد. با توجه به هزینه بالای بررسی وجود تنش‌های پسماند حاصل از فرآیندهای جوش کاری، خم کاری و ماشین کاری (که اغلب موارد مخرب می‌باشند)، بررسی تغییرات فرکانسی سازه می‌تواند دلالتی بر وجود تنش پسماند در سازه باشد.

8- مراجع

- [1] K. Million, R. Datta, Effect of heat input on the microstructure and toughness of the 8 MnMoNi shapewelded nuclear steel, *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 340, No. 1, pp. 25-32, 2005.
- [2] M. R. M. Aliha, H. Gharehbaghi, Fracture parameter determination for a thin walled pressurized cylinder under the influence of residual stress induced by welding process, *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, Vol. 3, No. 2, pp. 77-87, 2015. (in Persian فارسی)
- [3] S. Murugan, S. K. Rai, P. V. Kumar, T. Jayakumar, B. Raj, M. S. C. Bose, Temperature distribution and residual stresses due to multipass welding in type 304 stainless steel and low carbon steel weld pads, *International Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 78, No. 4, pp. 307-317, 2001.
- [4] J. Yang, H. Li, D. Yan, H. Fang, Numerical simulation on bucking distortion of aluminum alloy thin-plate weldment, *Materials Science in China*, Vol. 3, No. 1, pp. 84-88, 2009.
- [5] M. Eftekhary, M. Ahmadi Najafabadi, Evaluation of the capability of ultrasonic method for measuring longitudinal welding residual stress, by validating with X-Ray diffraction method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 9, pp. 1-10, 2015. (in Persian فارسی)
- [6] M. I. Ripley, Residual stress measurement using neutrons, *Australian Nuclear Science And Technology Organization*, Menai, NSW, pp. 22-34, 2006.
- [7] ASTM E837-13a, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [8] R. A. Kelsey, Measuring Non-Uniform residual stresses by the hole drilling method, *Proceedings Society for Experimental Stress Analysis*, Vol. 14, pp. 181-194, 1956.
- [9] G. S. Schajer, Application of finite element calculations to residual stress measurements, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 103, No. 2, pp. 157-163, 1981.
- [10] G. S. Schajer, Measurement of Non-Uniform residual stresses using the Hole-Drilling method, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, No. 4, pp. 338-343, 1988.
- [11] M. Sedighi, M. Khandaei, J. Joudaki, Calibration coefficients for residual stress measurement in incremental hole drilling method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 1, pp. 19-27, 2011. (in Persian فارسی)
- [12] M. Honarpisheh, V. Zandian, Investigation of residual stresses in stress-relieved samples by heat treatment and ultrasonic methods using hole-drilling method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 273-278, 2015. (in Persian فارسی)
- [13] M. T. Flaman, B. E. Mills, J. M. Boag, Analysis of stress variation with depth measurement procedures for the center hole method of residual stress measurement, *Experimental Techniques*, Vol. 11, No. 6, pp. 35-37, 1987.
- [14] M. Zakeri, Evaluation of annealing process of polycarbonate sheet for residual stress removing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, pp. 103-113, 2013. (in Persian فارسی)
- [15] B. A. B. Andersson, Thermal stresses in a submerged arc welded joint condering phase transformations, *Transactions of the ASME*, Vol. 100, No. 4, pp. 356-362, 1978.
- [16] D. Deng, H. Murakawa, Numerical simulation of temperature field and residual stress in multi-pass welds in stainless steel pipe and comparison with experimental measurements, *Computational Materials Science*, Vol. 37, No. 3, pp. 269-277, 2006.
- [17] O. Frigaard, O. Grong, O. T. Midling, A process model for friction stir welding of age hardening aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions*, Vol. 32A, No. 5, pp. 1189-1200, 2001.
- [18] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan, A. P. Reynolds, Predictions of temperature distribution and thermal history during friction stir welding: input torque based model, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 8, No. 3, pp. 165-174, 2003.
- [19] C. M. Chen, R. Kovacevic, Finite element modeling of friction stir welding-thermal and thermomechanical analysis, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, pp. 1319-1326, 2003.
- [20] S. H. Zargar, M. Farahani, M. K. Besharati Givi, Investigation on the effects of welding parameters on the submerged arc welding efficiency, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 12, pp. 79-87, 2014. (in Persian فارسی)
- [21] S. Nakhodchi, S. Akbari Iraj, A. Shokuhfar, H. Rezazadeh, Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding

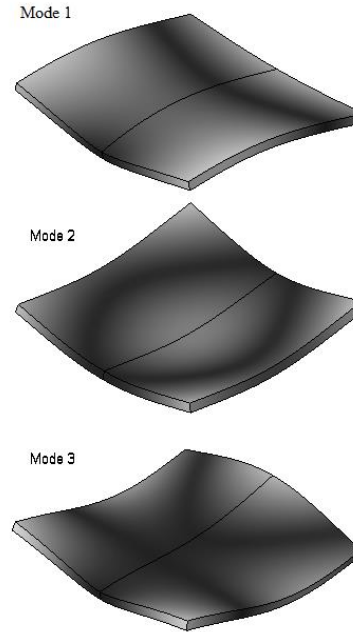


Fig. 8 Mode shapes of welded sheet

شکل 8 شکل مدهای ورق جوش کاری شده

جدول 2 مقایسه فرکانس‌های طبیعی ورق با در نظر گرفتن تنش‌های پسماند حاصل از جوش کاری و بدون در نظر گرفتن تنش‌های پسماند.

Table 2 Comparison of the natural frequencies of the sheet with the residual stresses from the welding and without of the residual stresses.

فرکانس سوم (Hz)	فرکانس دوم (Hz)	فرکانس اول (Hz)	
1833.9	1609.0	736.72	با تنش‌های پسماند
1812.1	1579.5	730.26	بدون تنش‌های پسماند

7- نتیجه‌گیری

به‌دست آوردن و تعیین توزیع تنش پسماند در سازه‌های جوش کاری شده از اهمیت بالایی در زمینه تعیین بارهای خرابی سازه دارد، بنابراین شناخت این نوع تنش و روش‌های تعیین و محاسبه آن بسیار لازم و ضروری می‌باشد. در این مقاله توضیح مختصری درباره انواع روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند ارائه گردید. هر کدام از این روش‌های تعیین تنش پسماند دارای مزیت‌ها و معایبی هستند که باید با شناخت دقیق آن‌ها مورد استفاده مناسب قرار گرفته شود. به‌دلیل پیچیدگی فرآیند جوش کاری، روش‌های تحلیلی در بسیاری موارد غیرقابل استفاده می‌باشند و از روش‌های عملی نیز به علت مخرب و پرهزینه بودن و محدودیت‌های موجود در نمونه واقعی نمی‌توان استفاده نمود. لذا گزینه‌ی قابل استفاده و مطمئن برای محاسبه توزیع تنش‌های پسماند، روش المان محدود می‌باشد که در این مقاله، نحوه مدل‌سازی و محاسبه‌ی تنش‌های پسماند در عملیات جوش کاری یک ورق آلومینیومی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد بررسی قرار گرفت و توزیع تنش پسماند ایجاد شده در ریشه جوش ارائه گردید. همچنین فرآیند جوش کاری به‌صورت تجربی انجام گرفته و سپس با روش مته‌کاری مقدار تنش پسماند در 3 نقطه اندازه‌گیری شده است. نتایج به‌دست آمده حاکی از دقت بالا در مدل‌سازی این فرآیند را دارد. درنهایت به مقایسه مقادیر فرکانس‌های طبیعی ورق با حضور تنش‌های پسماند حاصل از جوش کاری و بدون حضور تنش‌های پسماند پرداخته شده است. تنش پسماند حاصل از

- 4126-4135, 2009.
- [25] X. K. Zhu, Y. J. Chao, Effects of temperature dependent material properties on welding simulation, *Computers and Structures*, Vol. 80, No. 11, pp. 967-976, 2002.
- [26] Y. Chao, X. Qi, Thermal and Thermo-Mechanical modeling of friction stir welding of aluminum alloy 6061-T6, *Journal of Materials Processing & Manufacturing Science*, Vol. 7, No. 2, pp. 215-233, 1998.
- [27] M. Charkhi, D. Akbari, Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-10, 2018. (in Persian فارسی)
- [28] A. H. Majidi Rod, A. A. Jafari, Effect of welding residual stress on natural frequencies using experimental and numerical analysis, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 4, pp. 91-101, 2017. (in Persian فارسی)
- of two stainless steel plates having different, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 81-89, 2014. (in Persian فارسی)
- [22] V. Karimnia, I. Sattari-Far, Investigating the influence of effective parameters on the residual stresses in circumferentially arc welded thin walled cylinders of aluminum alloy series 5000, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 3, pp. 377-386, 2015. (in Persian فارسی)
- [23] S. Shakhesi, Y. Nazari, A. Hatami, M. Noghabi, Temperature and residual stresses distribution due to TIG welding of Ti-6Al-4V titanium alloy spherical shell by finite element analysis, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 143-153, 2016. (in Persian فارسی)
- [24] H. Long, D. Gery, A. Carlier, P. G. Maropoulos, Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates, *Materials & Design* Vol. 30, No. 10, pp.