

بررسی عددی و تجربی متغیرهای تأثیرگذار در تنش‌زدایی حرارتی ورق آلومینیومی جوشکاری شده

حسین قره باغی^{۱*}، رضا سرخوش^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری هوافضا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
۲- مربی، هوافضا، دانشکده مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، تهران، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۷)

چکیده

جوشکاری قطعات آلومینیومی در اتصالات سازه‌های هوافضایی کاربرد فراوانی دارد و از اهمیت بسیاری برخوردار است. از مشکلاتی که اغلب صنایع کشور با آن مواجه‌اند تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری است. تنش پسماند در نواحی اطراف جوش می‌تواند باعث کاهش عمر کاری قطعات شود به همین علت شناخت، بررسی و کاهش آن در سازه‌های جوشکاری شده ضروری می‌باشد. روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری و کاهش تنش‌های پسماند وجود دارد. در این مقاله به معرفی انواع روش‌های تعیین و کاهش تنش پسماند پرداخته شده است. سپس به کمک فرآیند جوش آرگون دو ورق آلومینیومی از جنس آلیاژ ۶۰۶۱-T6 به یکدیگر متصل شده و تنش‌های پسماند حاصله به روش سوراخ کاری به دست آمده است. همچنین فرآیند جوشکاری 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 جوشکاری در آزمایشگاه در نظر گرفته شده است، نتایج حاکی از دقت بالا در مدلسازی اجزای محدود فرآیند جوشکاری دارد. در نهایت به روش اجزای محدود، تنش‌گیری حرارتی مدل‌سازی شده و پارامترهای بهینه برای انجام عملیات فوق استخراج شده است.

واژه‌های کلیدی: شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری، رشد ترک، تنش پسماند، تنش‌گیری حرارتی

Numerical and Experimental Investigation of the variables influencing the thermal relaxation welded aluminum sheet

1st Hussain Gharehbaghi, 2nd Reza Sarkhosh

Abstract

Welding is very important in the aerospace industry and is 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, thus identifying and evaluating residual stresses in the welded structures is necessary. There are different methods for determining residual stress. In this paper, 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 the 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, in the finite element method, thermal stress is modeled and optimal parameters are extracted for the above operations.

Key words: Simulation of welding process, Crack growth, Residual stress, Thermal stress

* نویسنده پاسخگو: رضا سرخوش، تلفن: ۰۲۱۶۶۱۹۳۵۷۲ پست الکترونیک: R.sarkhosh@ssau.ac.ir

این مقاله تحت لایسنس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لایسنس از آدرس <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمایید.



مقدمه

مهم‌ترین دلایل بوجود آمدن تنش‌های پسماند را می‌توان از دیدگاه منشاء حرارتی، مکانیکی و تغییر فاز بررسی نمود. فرآیندهای تولید قطعات مانند نورد، فورج سرد، جوشکاری، ماشین‌کاری و ... هر کدام به نوعی می‌توانند سبب ایجاد تنش‌های پسماند در قطعات شوند [۱]. برای از بین بردن تنش‌های پسماند موجود در قطعات می‌توان از تنش‌زدایی حرارتی، فشاری، ارتعاشی، سرمایش زیر صفر، چکش‌کاری، کششی و پیر کردن طبیعی استفاده نمود. متداول‌ترین روش مورد استفاده برای حذف تنش‌های پسماند، تنش‌زدایی حرارتی می‌باشد [۲].

وجود تنش پسماند در سازه‌ها می‌تواند منجر به ایجاد اعوجاج، تغییر شکل‌های ناخواسته و غیر مجاز و یا کاهش استحکام و عمر مفید سازه‌های فلزی گردد [۳،۴]. در نتیجه می‌توان گفت که حذف تنش‌های پسماند از قطعات حساس و مهندسی امری حیاتی جهت بهبود کارایی آن‌ها می‌باشد. روش‌های متعددی برای کاهش تنش‌های پسماند قطعات وجود دارد که در میان آن‌ها روش تنش‌زدایی حرارتی بیشترین کارایی را در صنعت دارد [۵،۶].

تنش پسماند تنش‌ای 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 جوشکاری با توجه به اعمال حرارت شدید، تغییر شکل جسم و تغییر ریز ساختار ماده، یکی از عوامل عمده ایجاد تنش پسماند به‌شمار می‌رود. وجود تنش‌های پسماند در قطعات جوشکاری شده آثار نامطلوبی دارد. تنش‌های پسماند کششی در اطراف ناحیه جوش می‌توانند باعث ایجاد و رشد ترک، خوردگی و در نهایت شکست سازه شوند [۷]. 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 جوشکاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم می‌شود [۸] که این عامل سبب می‌شود تا قطعه دقت ابعادی خود را از دست بدهد. همچنین تغییر شکل پلاستیک قبل از رسیدن به مقدار تنش تسلیم رخ می‌دهد. عدم ماشین‌کاری مناسب قطعات تنش‌دار مورد بعدی است که می‌توان به آن اشاره کرد [۹،۱۰]. از دیگر موارد می‌توان به کاهش عمر کاری قطعات اشاره نمود.

بدیهی است که عمر کاری قطعات را با بحث مقاومت خستگی آنها اندازه‌گیری می‌کنند و هر چه مقاومت یک ماده در برابر پدیده خستگی بیشتر باشد، عمر کاری مفید آن نیز بیشتر است. در مورد پدیده خستگی باید گفت، هرچه تنش‌های پسماند موجود در سطح قطعه بیشتر باشند عمر خستگی قطعه کمتر خواهد بود [۱۱،۱۲]؛ بنابراین مطالعه کنترل تنش‌های پسماند و اعوجاج قطعات جوشکاری شده از جنس آلیاژهای آلومینیوم همیشه یک موضوع مهم در مهندسی جوشکاری است [۱۳].

روش‌های مختلفی برای تعیین و محاسبه تنش‌های پسماند وجود دارد، بهترین روش برای محاسبه توزیع تنش‌های پسماند، روش‌های تحلیل عددی نظیر مدل‌سازی و تحلیل اجزاء محدود می‌باشد [۸]. بررسی پارامترهای موثر بر تنش‌زدایی حرارتی برای مواد و هندسه‌های مختلف به کمک روش اجزای محدود به ندرت مورد توجه قرار گرفته است؛ با یک رویکرد نوآورانه می‌توان با استفاده از ابزار قدرتمند اجزای محدود، بهینه‌ترین پارامترهای تنش‌زدایی حرارتی را برای هر قطعه جوشکاری شده و دارای تنش پسماند انتخاب نمود. بنابراین در این پژوهش ابتدا با استفاده از جوش آرگون (تیگ) دو ورق آلومینیومی AA6061-T6 به هم جوشکاری شده و با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی تنش‌های پسماند طولی با فاصله از خط جوش اندازه‌گیری شده و سپس به کمک نرم‌افزار آباکوس این فرآیند شبیه‌سازی شده و توزیع تنش‌های پسماند ناشی از جوشکاری را به دست آورده و در نهایت با مقایسه مقادیر حاصله با نتایج تجربی به دست آمده، تاییدی بر شبیه‌سازی عددی خواهد بود. همچنین با توجه به حائز اهمیت بودن کاهش تنش‌های پسماند در سازه‌های هوافضایی، به بررسی پارامترهای تأثیرگذار در کاهش تنش‌های پسماند در روش تنش‌زدایی حرارتی پرداخته شده است. بالا بودن هزینه‌های فرآیند تجربی امکان بررسی پارامترهای موثر بر تنش‌زدایی حرارتی را صلب می‌نماید؛ بنابراین با شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری و عملیات تنش‌زدایی حرارتی به سادگی می‌توان فرآیند بهینه تنش‌زدایی حرارتی را برای مواد و آلیاژهای مختلف بدست آورد.

حرارتی ورق آلومینیومی جوشکاری شده

نحوه انجام جوشکاری

در این پژوهش، جوشکاری ورق آلومینیوم AA6061-T6 با ضخامت ۶ میلی‌متر و طول و عرض نمونه نهایی به ترتیب ۱۵۰ و ۱۵۰ میلی‌متر مطالعه شده است. جوشکاری با استفاده از فرایند جوش آرگون انجام شده است. این فرآیند بر روی آلومینیوم و آلیاژهای بسیار متداول است [۱۴]. قوس الکتریکی بین الکترود غیر مصرفی 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 قطعه کار و در بعضی موارد آمیزه‌ای از فلز و مفتول پرکننده است. پارامترهای جوش از قبیل زاویه الکترود با قطعه کار ۴۵ درجه و در امتداد مسیر اتصال، سرعت پیشروی ۱۰ سانتی‌متر بر دقیقه، جریان ۱۲۰ آمپر، دبی گاز ۱۵ لیتر بر دقیقه در نظر گرفته‌شده و نوک تنگستن نیز با زاویه ۶۰ درجه تراشیده شده است.

اصول روش سوراخکاری مرکزی

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 غیر مخرب می‌توان به مته‌کاری، مته‌کاری عمیق و هسته حلقوی اشاره نمود. به دلیل مخرب و نیمه‌مخرب بودن، این روش‌ها در صنایع هوافضا مورد استفاده قرار نمی‌گیرند.

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 به صورت استاندارد [۱۵] درآمده است که عبارتند از: قرار دادن کرنش‌سنج ۳ عضوی بر روی نمونه، اتصال کرنش‌سنج‌ها به دستگاه داده‌برداری و تنظیم آن، قرار دادن یک دستگاه برای سوراخ زنی در وسط روزت و انجام عملیات سوراخ زنی، ثبت و تبدیل نتایج به تنش‌های پسماند از طریق روابط موجود می‌باشد.

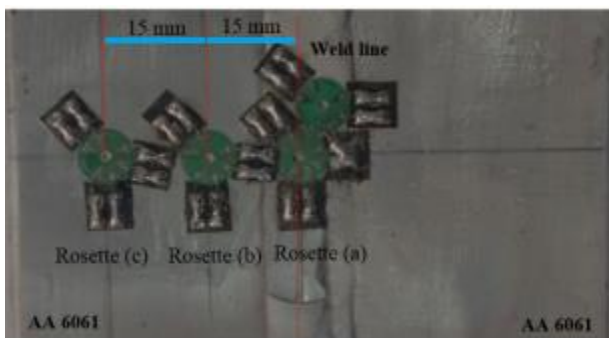
این روش با توجه به اندازه سوراخ و همچنین عمق آن در دسته روش‌های نیمه‌مخرب قرار می‌گیرد. (قطر و عمق سوراخ معمولاً ۰,۸ تا ۳,۲ میلی‌متر است) در سال ۱۹۵۶ کلسی [۱۶]

برای اولین بار مسأله تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت را به کمک این روش مطالعه کرد. شاجر [۱۷] در سال ۱۹۸۱ برای اولین بار روش المان محدود را در سوراخ زنی مرکزی ارائه و ضرایب کالیبره A و B را معرفی کرد. وی در سال ۱۹۸۸ [۱۸] ضرایب خود را تصحیح کرد و ضرایب a و b که مستقل از جنس قطعه هستند را ارائه داد. همچنین صدیقی و همکاران [۱۹] ابتدا روابط حاکم بر کالیبره کردن تنش پسماند در سوراخکاری را ارائه و سپس ضرایب کالیبره کردن را به روش المان محدود محاسبه نمودند. هنر پیشه و زندیان [۲۰] مقاله خود تنش‌های پسماند در نمونه‌های تنش‌زدایی شده به دو روش حرارتی و اولتراسونیک به کمک روش سوراخکاری مرکزی بررسی نموده‌اند.

در این پژوهش با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی مطابق استاندارد ASTM (E837) [۱۵] و به کمک کرنش‌سنج نوع روزت، تغییرات تنش پسماند در عمق ۱ میلی‌متری از سطح برای هر نمونه و در سه نقطه مطابق شکل ۱ اندازه‌گیری شده است. نقاط انتخابی به ترتیب در مرکز خط جوش، ۱۵ و ۳۰ میلی‌متری از مرکز خط جوش قرار دارند.

بر اساس مطالعات انجام‌شده توسط فلامان [۲۱] در سرعت‌های پایین فرآیند سوراخ زنی، در کناره‌های سوراخ ایجاد تنش پسماند می‌شود، بنابراین سرعت سوراخ زنی در این آزمایش ۳۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه در نظر گرفته شده است. البته ایجاد تنش پسماند در کناره‌های سوراخ به دلیل فشار اعمال شده و حرارت تولید شده در فرآیند سوراخ زنی، غیر قابل اجتناب است [۲۲].

بر اساس روش تعیین تنش پسماند غیریکنواخت در استاندارد، ۲۰ مرحله سوراخ زنی با عمق هر مرحله ۰,۰۵ میلی‌متر انجام شده است.



شکل ۱ نقاط کرنش‌سنجی روی نمونه جوشکاری شده

انتخاب روش اصولی فرآیند کنترلی کمک شایانی به اصولی طی شدن روند تنش‌گیری می‌کند [۳۱].

تنش‌گیری حرارتی

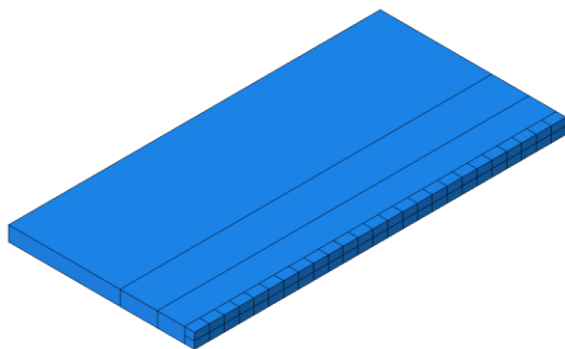
برای انجام عمل تنش‌گیری در این روش، قطعات در کوره قرار داده شده و تا دمای مشخصی، که این دما تابعی از جنس ماده است، حرارت داده می‌شوند. این عمل برای مدت زمانی که تابعی از اندازه قطعه است، انجام می‌گردد. پس از پایان این مراحل، قطعات با تمهیدات خاصی به آرامی سرد می‌شوند تا دوباره در آنها تنش ایجاد نگردد.

با گرم کردن قطعه تنش تسلیم آن کاهش می‌یابد و تنش‌های پسماند داخلی نمی‌توانند بیشتر از تنش تسلیم باشند. در نتیجه در این دماها، تنش‌های پسماند موجود در قطعات از حد تسلیم گذشته و سبب ایجاد تغییر شکل‌های میکرونی و گاهی اوقات ماکروبی می‌گردند. به همین دلیل میزان تنش‌های پسماند در قطعات کاهش می‌یابد، حال اگر قطعه سرد شود اگر چه که تنش تسلیم آن افزایش می‌یابد اما دیگر تنش بصورت پسماند در قطعه وجود نخواهد داشت [۲،۹].

از محدودیت‌های روش تنش‌گیری حرارتی هزینه زیاد، صرف زمان‌های طولانی، ایجاد اعوجاج در قطعات، آلودگی محیط زیست، نیاز به تمیز کاری نهایی، تغییر در خواص مکانیکی و ابعاد قطعات و تجهیزات آن می‌باشد [۳۳،۳۲].

مدل‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری ورق آلومینیومی

در شکل ۲ مدل دو ورق آلومینیومی به طول ۱۵۰ میلی‌متر، عرض ۷۵ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر را نشان می‌دهد که توسط جوشکاری با درز جوش طولی تولید شده است.



شکل ۲ مدل ورق با درز جوش طولی

روش‌های عددی تعیین تنش پسماند

در سال ۱۹۷۸ اندرسون [۲۳] با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی توزیع تنش پسماند را در سطوح بالا و پایین صفحه‌ی پایه در نزدیکی جوش طی فرآیند جوشکاری قوسی زیرپودری بررسی کرد. دنگ و همکارانش [۲۴] ابتدا با روشی تجربی توزیع تنش پسماند در ناحیه جوش را با استفاده از کرنش‌سنج‌هایی که در نزدیکی ناحیه جوشکاری 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 جوشکاری آلیاژهای آلومینیوم نیز در سال‌های اخیر مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. خاندکار و همکارانش [۲۵] مدل کامل‌تری از حرارت ورودی بر اساس گشتاور ابزار جوشکاری ارائه کردند و از آن برای مدل کردن تاریخچه دمایی آلیاژ آلومینیوم T651-۶۰۶۱ استفاده کردند. در سال ۲۰۰۴ چن و همکارش [۲۶] با استفاده از نرم‌افزار انسیس توزیع دمایی حین جوشکاری ورق آلومینیوم T6-۶۰۶۱ را بدست آوردند و با نتایج تجربی خود مقایسه کردند. حاکا زرگر و همکاران [۲۷] تاثیر پارامترهای جوشکاری زیرپودری از قبیل شدت جریان، ولتاژ و سرعت جوشکاری بر روی راندمان قوس فرآیند جوشکاری به کمک روش اجزای محدود بررسی کردند. نخودچی و همکاران [۲۸] با استفاده از نرم‌افزار آباکوس توزیع دما و تنش‌های پسماند را در جوشکاری دو ورق فولادی با ضخامت غیریکسان بررسی و با نتایج تجربی مقایسه نمودند. کریم‌نیا و ستاری‌فر [۲۹] تنش‌های پسماند حاصل از شبیه‌سازی المان محدود استوانه جدار نازک آلومینیوم سری ۵۰۰۰ را با داده‌های تست تجربی که از روش کرنش‌سنجی سوراخ بدست آمده اعتبارسنجی نمودند. شاخصی و همکارانش [۳۰] در پژوهش خود به بررسی توزیع دما، تنش‌های پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری تیگ در یک مخزن کروی تیتانیومی بررسی نموده‌اند.

روش‌های مختلفی برای حذف و یا کاهش تنش‌های پسماند استفاده می‌شوند. بطور کلی تنش‌زدایی حرارتی فرآیندی است که در آن باید قطعه از دمای A1 در زمان حداقل t1 به دمای A2 رسیده و به مدت t2 در همان دمای A2 قطعه را نگهداری نمود و در زمان حداقل t3 به دمای A1 بازگشت.

حرارتی ورق آلومینیومی جوشکاری شده

که در آن σ_0 ، تنش تسلیم، σ_y ، تنش تسلیم در کرنش پلاستیک صفر، ϵ_{pl} ، مقدار کرنش پلاستیک محدوده است. این مدل برای نسبت کرنش‌های کمتر از ۵ درصد، نتایج قابل قبولی دارد. مدل سینماتیک/ایزوتروپیک غیر خطی عموماً سخت‌شوندگی را خیلی بهتر پیش‌بینی می‌کنند، 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.

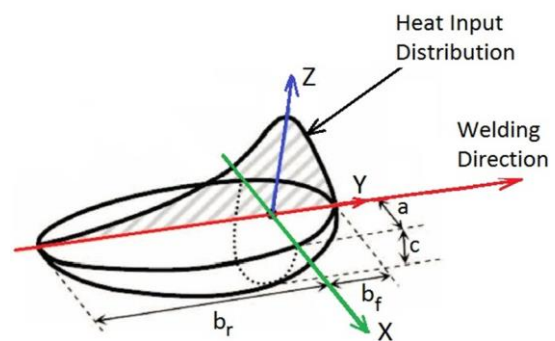
کلیه خواص حرارتی و مکانیکی آلیاژ AL6061-T6 تابع دما فرض شده است. جهت مدل‌سازی ماده پرکننده از روش تولد و مرگ المان استفاده شده است. به منظور استفاده از این تکنیک کلیه المان‌های فلز پایه و المان‌های فلز جوش که بایستی در اثر رسوب مواد متولد گردند، در ابتدا ایجاد شده سپس المان‌های مربوط به فلز جوش با ضرب کردن ماتریس سفتی آن المان‌ها در یک عدد خیلی کوچک غیر فعال (مرده) می‌شوند. پس از عبور منبع حرارت و رسوب ماده پرکننده، المان‌ها دوباره فعال (متولد) می‌شوند، در حقیقت این المان‌ها به مدل اضافه نمی‌شوند، بلکه فعال شدن مجدد المان‌ها به معنی بازگشت مقادیر ماتریس‌های سفتی، جرم، بارهای المان به مقدار اولیه خود می‌باشد.

مدل المان محدود ساخته شده در این شبیه‌سازی در شکل ۴ نشان داده شده است. جهت تحلیل از المان‌های آجری شکل ایزوپارامتریک مرتبه اول استفاده شده است. در تحلیل حرارتی المان آجری ۸ گرهی با یک درجه آزادی دما و ۳ 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 ۱۰ 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 ۹۰۰۰ المان می‌باشد که با توجه به غیر خطی بودن حل زمان طولانی برای تحلیل لازم بود، بنابراین از بررسی تغییرات پارامترهای مختلف در مدل‌سازی فرآیند جوشکاری 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 جوشکاری لازم است. خواص مکانیکی مواد نیز شامل مدول ینگ، ضریب پواسون،

فرآیند جوشکاری به صورت دو پاسه و به روش جوش آرگون بوده و همان‌طور که در شکل ۲ نیز نشان داده شده، اتصال به صورت لب به لب مربعی می‌باشد. جنس ورق از آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱-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 ۱۴.۲ برای مدل‌سازی فرآیند جوش استفاده شده است.

شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری با انجام تحلیل‌های حرارتی و مکانیکی به صورت هم‌زمان انجام می‌گیرد. برای این منظور یک تحلیل مکانیکی-حرارتی گذرای سه بعدی انجام شده و با استفاده از مدل الاستو-پلاستیک، معیار تسلیم فون مایزس و سخت‌شوندگی سینماتیک صورت می‌پذیرد. توزیع میدان‌های دما و تنش به دست می‌آیند. برای مدل‌سازی منبع حرارتی از مدل دو بیضی‌گون گلداک [۳۴] استفاده شده که این مدل در شکل ۳ نشان داده شده است. در تحلیل‌های عددی از اثرات بخش حرارتی و مکانیکی بر تغییر در ریزساختار ماده صرف‌نظر می‌شود. همچنین تغییرات دما حاصل از بخش مکانیکی به دلیل ناچیز بودن آن نادیده گرفته می‌شود. این موارد در پژوهش‌های گذشته [۴] بررسی شده است بنابراین در این پژوهش به آن پرداخته نشده است.



شکل ۳ شکل شماتیک منبع حرارتی، مدل دو بیضی‌گون گلداک [۳۲].

در نرم‌افزار آباکوس، دو مدل برای سخت‌شوندگی سینماتیک برای مدل‌سازی بارگذاری چرخه‌ای فلزها وجود دارد. مدل سینماتیک خطی رفتار سخت‌شوندگی را با یک ضریب ثابت تقریب می‌زند، ضریب سخت‌شوندگی سینماتیک خطی، C ، از رابطه ۱ تعیین می‌گردد.

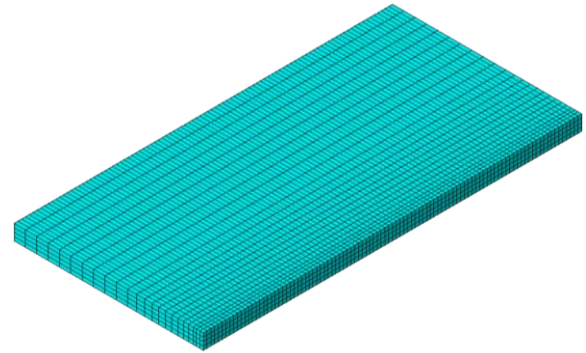
$$C = (\sigma_y - \sigma_0) / \epsilon_{pl} \quad (1)$$

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

نتایج مدل‌سازی فرآیند جوشکاری

در شکل ۵ نتایج تاریخچه دمایی پس از گذشت ۲۵۰۰ ثانیه از فرآیند جوشکاری در نقطه‌ای که در فاصله ۳۰ میلیمتری از وسط خط جوش و ۱۵۰ میلیمتری از ابتدای جوشکاری قرار گرفته است مشاهده می‌شود. همانطور که ملاحظه می‌شود در این نقطه دما حداکثر تا ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌رسد و بعد از گذشت ۲۵۰۰ ثانیه تقریباً به دمای محیط می‌رسد. نتایج مربوط به تنش‌های پسماند طولی در حالتی که قید خاصی برای نگه داشتن ورق‌ها وجود ندارد در شکل ۶ نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در این فرآیند تنش‌های اطراف خط جوش به صورت کششی بوده و در فاصله ۱۳ میلی‌متری از مرکز خط جوش تنش پسماند از کششی به فشاری تبدیل می‌شود. در نتایج تحلیل اجزای محدود بیشینه مقدار تنش پسماند کششی در حدود ۳۴ مگاپاسکال می‌باشد. همچنین نتایج تجربی در عمق ۰.۱ میلیمتری از سطح ارائه شده‌اند، بیشینه تنش کششی در مرکز خط جوش در حدود ۴۰ مگاپاسکال بدست آمده است. نتایج تحلیل اجزای محدود ارائه شده در شکل ۶ نشان می‌دهد که روند توزیع تنش پسماند با دقت قابل قبول پیش‌بینی شده است. کوچک بودن قطعه جوشکاری شده، آزاد بودن قطعه، حرارت بالای وارد شده و دو پاس بودن جوشکاری را می‌توان به عنوان دلایل کمتر شدن تنش پسماند کششی در این حالت دانست. در حقیقت با انجام پیش‌گرم قبل از جوشکاری تنش پسماند کاهش می‌یابد [۳۷] و پاس اول در جوشکاری دو پاسه به نوعی پیش‌گرم پاس دوم می‌باشد؛ بنابراین تنش پسماند در جوش دو پاسه کمتر از جوشکاری تک پاس می‌شود. البته در این حالت به علت مقید نبودن، قطعه دچار اعوجاج زیادی می‌شود که در قطعات مونتاژی یا قطعات حساس و دارای تلورانس بسته، بایستی از اعوجاج پرهیز کرد؛ بنابراین در اغلب فرآیندهای جوشکاری

تنش تسلیم و ضریب انبساط حرارتی است که در تحلیل ترموالاستیک و ترموپلاستیک فرآیند جوشکاری تأثیرگذار می‌باشند. از آنجا که خواص مواد به‌طور واقعی و متغیر با دما اعمال می‌شوند، تحلیل المان محدود به‌صورت غیر خطی و حل به‌صورت تکراری خواهد بود [۳۵].



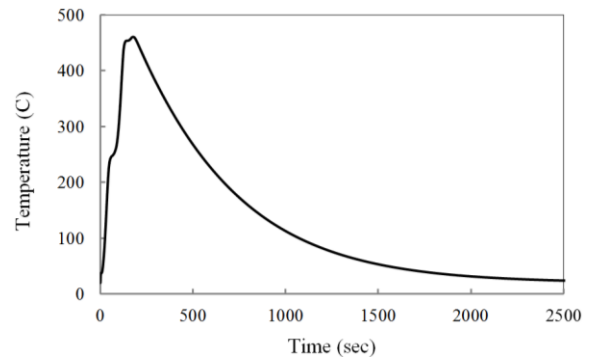
شکل ۴ مدل المان محدود سه بعدی ورق آلومینیومی.

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. جوشکاری در ۲ حالت تکیه‌گاهی مدل‌سازی شده است، در حالت اول قید خاصی برای نگهداری ورق استفاده نشده است و در حالت دوم ورق‌ها از ۴ گوشه توسط فیکسچر نگه داشته شده‌اند. اندازه المان‌ها برای ناحیه مذاب و نزدیکی ناحیه مذاب به صورت مکعبی با ابعاد ۱×۱×۱ (mm) در نظر گرفته شده است. سطح تقارن آدیاباتیکی و دمای اولیه ورق برابر دمای محیط (۲۰ °C) فرض شده‌اند. در جدول ۱ خواص مکانیکی و حرارتی آلومینیوم آلیاژ ۶۰۶۱-T6 وابسته به دما که در این مدل‌سازی استفاده گردیده، آورده شده است. همچنین گرمای نهان ویژه ذوب ۳۸۴ کیلو ژول بر کیلوگرم و دمای سیال شدن ۶۵۲ درجه سانتی‌گراد و دمای انجماد ۵۸۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

جدول ۱ خواص حرارتی و مکانیکی وابسته به دما برای آلومینیوم ۶۰۶۱-T6 [۳۶].

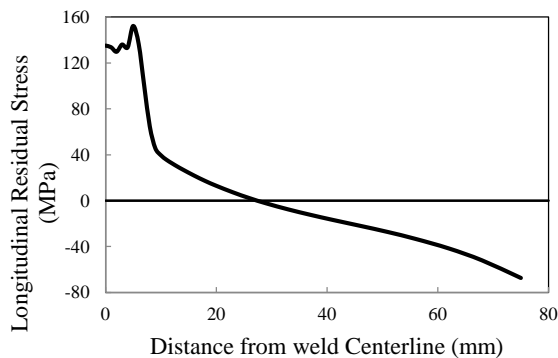
حرارتی ورق آلومینیومی جوشکاری شده

قطعات توسط فیکسچرهایی مقید می‌شوند که این امر باعث افزایش تنش‌های پسماند کششی خواهد شد.

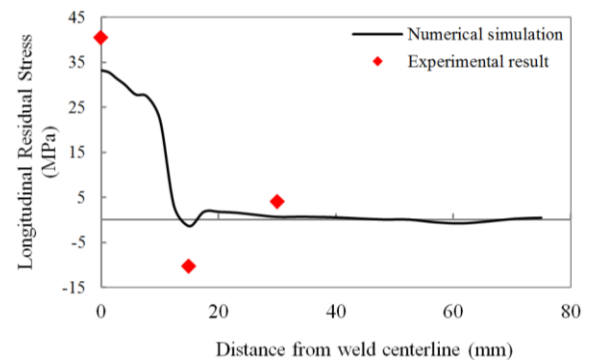


شکل ۵ نتایج تاریخچه دمایی برای فرآیند جوشکاری

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؛ بنابراین عملیات تنش زدایی در این حالت ضروری می‌باشد. در شکل ۸ نتایج مربوط به تنش‌های پسماند طولی در حالتی که ورق‌ها توسط فیکسچر نگه داشته شده‌اند نمایش داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود تنش‌های اطراف خط جوش به صورت کششی بوده و در فاصله ۲۵ میلی‌متری از مرکز خط جوش تنش پسماند از کششی به فشاری تبدیل می‌شود.



شکل ۸ نتایج تنش پسماند طولی حاصل از فرآیند جوشکاری با مهار توسط فیکسچر.



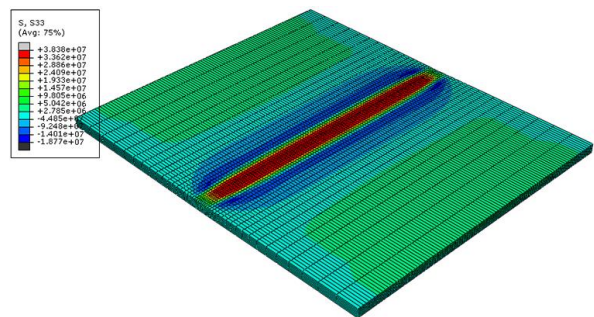
شکل ۶ نتایج تنش پسماند طولی حاصل از فرآیند جوشکاری بدون مهار توسط فیکسچر.

تحلیل تنش زدایی حرارتی

تحلیل تنش زدایی حرارتی در ادامه تحلیل فرآیند جوشکاری بر روی ورق با حضور تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری صورت پذیرفته است. برای در نظر گرفتن تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری بعد از آخرین گام (خنک شدن) در تحلیل مذکور، گام‌های مربوط به تحلیل تنش زدایی حرارتی تعریف شده است.

در تحلیل فرآیند تنش زدایی حرارتی تأثیر تغییرات ۳ متغیر بررسی شده است، متغیر اول دمای کوره می‌باشد که ۲۰۰، ۲۴۰، ۲۸۰، ۳۲۰، ۳۶۰ و ۴۰۰ درجه سانتیگراد فرض شده است، متغیر دوم زمان قرار گرفتن ورق‌ها در دمای کوره می‌باشد که ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۶۰ دقیقه در نظر گرفته شده است، متغیر سوم نرخ کاهش دما و رسیدن به دمای محیط است.

در شکل ۷ توزیع تنش پسماند طولی حاصل از فرآیند جوشکاری بدون مهار توسط فیکسچر را ملاحظه می‌نمایید.



شکل ۷ توزیع تنش پسماند طولی حاصل از فرآیند جوشکاری بدون مهار توسط فیکسچر.

باید توجه داشت که در حالتی که ورق‌ها توسط فیکسچر مقید شده‌اند مقدار تنش‌های پسماند کششی در نزدیکی خط جوش افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته است (طبیعتاً درصد قابل توجهی

این موضوع هم با توجه به صرف نظر از تأثیرات متالورژیکی، تغییر قابل توجهی در کاهش تنش‌های پسماند ملاحظه نگردید.

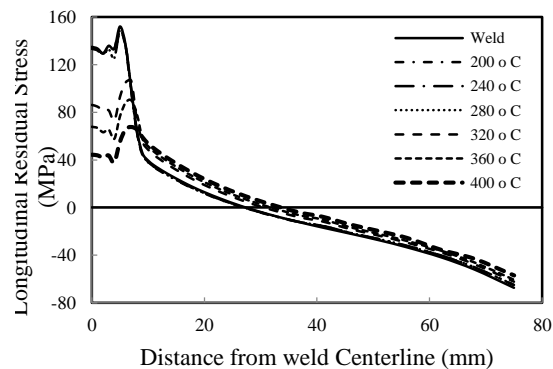
نتیجه‌گیری

بدست آوردن و تعیین توزیع تنش پسماند در سازه‌های جوشکاری شده از اهمیت بالایی در زمینه تعیین بارهای خرابی سازه دارد، بنابراین شناخت این نوع تنش و روش‌های تعیین، محاسبه و کاهش آن بسیار ضروری می‌باشد. در این مقاله توضیح مختصری درباره انواع روش‌های کاهش تنش‌های پسماند ارائه گردید. هر کدام از این روش‌ها دارای مزیت‌ها و معایبی هستند که باید با شناخت دقیق آن‌ها مورد استفاده مناسب قرار گرفته شود. به دلیل پیچیدگی فرآیند جوشکاری، 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 جوشکاری و تنش‌زدایی حرارتی 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 جوشکاری به صورت تجربی انجام گرفته و سپس با روش مته‌کاری مقدار تنش پسماند در ۳ نقطه اندازه‌گیری شده است. نتایج به دست آمده حاکی از دقت بالا در مدلسازی این فرآیند را دارد. در نهایت با مدل‌سازی فرآیند تنش‌زدایی حرارتی، تأثیر ۳ متغیر دمای کوره، زمان قرار گرفتن در کوره و نرخ کاهش دما بررسی شده است. افزایش دمای کوره باعث کاهش بیشتر تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری می‌شود.

منابع

- [1] D. Berglund, H. Alberg and H. Runnemalm, Simulation of welding and stress relief heat treatment of an aero engine component, Finite Elements in Analysis and Design, Vol. 39, No. 9, pp. 865-881, 2003.
- [2] X. C. Zhao, Y. D. Zhang, H. W. Zhang and Q. Wu, Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM, Acta Metallurgica Sinica (English Letters), Vol. 21, No. 4, pp. 289-294, 2008.
- [3] M. R. M. Aliha and 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)

نتایج بدست آمده از تغییرات دمای کوره در شکل ۹ آورده شده است، همانطور که قابل مشاهده است با افزایش دما تنش پسماند کششی کاهش بیشتری خواهد داشت. در نتیجه برای آلومینیوم آلیاژ ۶۰۶۱-T6 دمای پیشنهادی کوره برای فرآیند تنش‌زدایی حرارتی ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد، قابل ذکر است که دماهای بالاتر باعث کاهش خواص مکانیکی قطعه می‌شود. همچنین تا دمای ۲۸۰ درجه سانتی‌گراد مقدار کاهش تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری بسیار کم می‌باشد.



شکل ۹ نتایج تنش پسماند طولی حاصل از فرآیند جوشکاری با مهار توسط فیکسچر

با افزایش زمان قرار گرفتن قطعه در کوره تغییر قابل ملاحظه‌ای در کاهش تنش‌های پسماند ملاحظه نشد، علت این موضوع صرف نظر کردن از اثرات متالورژیکی در تحلیل‌های کوپل حرارتی-مکانیکی می‌باشد. تحلیل کاملاً کوپله حرارتی-مکانیکی-متالورژیکی عملاً بسیار پیچیده بوده، به ندرت مورد استفاده قرار می‌گیرد. متداول‌ترین و ساده‌ترین روش صرف‌نظر از اثرات تغییر ریزساختار و در نظر گرفتن تابعیت خواص ماده صرفاً از دما می‌باشد [۳۸]. لازم به ذکر است که در تحلیل مذکور زمان قرار گرفتن در دمای کوره بایستی در حدی باشد که تمام قطعه به دمای مذکور برسد؛ بنابراین حداقل دمای پیشنهادی ۳۰ دقیقه است، چون نتایج تحلیل نشان داده که مدت زمان اگر ۲۰ دقیقه باشد کاهش تنش پسماند به خوبی صورت نمی‌گیرد.

تغییرات نرخ کاهش دما در هنگام خروج از کوره، در دمای کوره ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار گرفته شده است.

- [15] ASTM E837-13a, Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] M. Sedighi, M. Khandaei and 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)
- [20] M. Honarpisheh and 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)
- [21] M. T. Flaman, B. E. Mills and 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.
- [22] 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)
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] M. Z. H. Khandkar, J. A. Khan and 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.
- [4] M. R. M. Alih and H. Gharehbaghi, The effect of combined mechanical load/welding residual stress on mixed mode fracture parameters of a thin aluminum cracked cylinder, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 180, pp. 213-238, 2017.
- [5] R. G. Budynas and Keith J. Nishbeth, Shigley's Mechanical Engineering Design, 10th Edition: McGraw-Hill, 2015.
- [6] Z. Guo, R. Bai, Z. Lei, H. Jiang, J. Zou and C. Yan, Experimental and numerical investigation on ultimate strength of laser-welded stiffened plates considering welding deformation and residual stresses, Ocean Engineering, Vol. 234, pp. 109239, 2021.
- [7] E. Barati, M. Kalateh and M. Rashtbarian, Strength analysis of aluminum matting plates welded by TIG welding process for airfield repair, Journal of Aeronautical Engineering, Vol. 20, No. 2, pp. 16-26, 2018. (In Persian)
- [8] H. Gharehbaghi and 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)
- [9] W. F. Hahn, Vibratory Residual Stress Relief and Modification Sin Metals to Conserve Resources and Prevent Pollution, Center of Environmental and Energy Research (CEER), 2002.
- [10] M. A. Golozar, Heat treatment of steels, Isfahan: Isfahan University of Technology, 2016. (In Persian)
- [11] K. Masubuchi and D. W. Hopkins, Analysis of Welded Structures: Residual Stresses, Distortion, and Their Consequences, Pergamon Press, 1980.
- [12] H. R. Zarie, R. Sarkhosh, A. Farrokhbabadi and H. Morshedi, Determination of static strength and fracture of aged aircraft structure using non-destructive quasi-static indentation test, Journal of aeronautical engineering, Vol. 23(1), pp. 33-43, 2021. (In Persian)
- [13] J. Yang, H. L. I., D. Yan and 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.
- [14] M. Eftekhary and 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)

- [36] 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.
- [37] 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)
- [38] L. E. Lindgren, Finite Element Modeling and Simulation of Welding Part 3: Efficiency and Integration, *Journal of Thermal Stresses*, Vol. 24, No. 4, pp. 195-231, 2001.
- [26] C. M. Chen and 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.
- [27] S. H. Zargar, M. Farahani and 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)
- [28] S. Nakhodchi, S. Akbari Iraj, A. Shokuhfar and H. Rezazadeh, Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 81-89, 2014. (In Persian)
- [29] V. Karimnia and 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)
- [30] S. Shakhesi, Y. Nazari, A. Hatami and 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)
- [31] M. Honarposh and 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)
- [32] T. Hebel, 3 Major problems with thermal stress relief and how to overcome them, *Bonal Technologies, Inc.*, 2008.
- [33] R. Dawson and D. G. Moffat, Vibratory stress relief: A fundamental study of its effectiveness, *Engineering Material Technology*, Vol. 102, No. 2, pp. 169-176, 1980.
- [34] A. Hammad, C. Churiaque, J. Mari, S. Amaya and Y. Abdel-Nasser, Experimental and numerical investigation of hybrid laser arc welding process and the influence of welding sequence on the manufacture of stiffened flat panels, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 61, pp. 527-538, 2021.
- [35] X. K. Zhu and Y. J. Chao, Effects of temperature dependent material properties on welding simulation, *Computers and Structures*, Vol. 80, No. 11, pp. 967-976, 2002.