



بررسی اثر پیش گرم بر روی کاهش اعوجاج در جوش کاری فلزات غیرهمجنس فولاد زنگ- نزن آستنیتی 304 و فولاد کربنی A106-B

مهران چرخي¹، غلامرضا فغانی²، داود اکبری^{3*}، مقصود شلوندی⁴

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

2- مربی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه پدافند هوایی خاتم الانبیا، تهران

3- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز

* تهران، صندوق پستی 146-14115، daakbari@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

در این مقاله رفتار مکانیکی - حرارتی فرایند جوش کاری ذوبی برای تعیین میزان اثر پیشگرم کردن بر اندازه و توزیع اعوجاج و تغییر شکل‌ها در اتصالات غیرهمجنس تجزیه و تحلیل شده است. از این رو یک زیربرنامه مؤثر و کارآمد در یک مدل المان محدود تایید شده جهت در نظر گرفتن اثرات تبدیل فاز در تحلیل عددی توسعه داده شده است. برای تایید مدل از داده‌های تجربی اتصالات غیر-همجنس که با دستگاه اندازه‌گیری CMM بدست آمدند استفاده شده است. ارتباط خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی بدست آمد. نتایج نشان داد روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه یک روش مؤثر جهت پیش‌بینی اعوجاج در اتصالات غیر-همجنس است. اثر پیشگرم کردن بر اعوجاجات جوش کاری در صفحه‌های جوش داده شده بصورت لب به لب با استفاده از مدل المان محدود حاضر مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش دمای پیشگرم، اعوجاج در اتصالات غیرهمجنس در هر دو طرف فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی کاهش قابل توجهی می‌یابد. با افزایش دمای پیشگرم از محدوده دمایی خاصی به بعد، اثر پیشگرم روی کاهش اعوجاج در هر دو طرف اتصال کمتر می‌شود. هر چه دمای پیشگرم در اتصال فلزات غیرهمجنس نامتقارن‌تر می‌شود اثر پیشگرم روی کاهش اعوجاج در طرف فولاد کربنی ناچیز ولی در طرف فولاد زنگ‌نزن اثر مهمی دارد. با افزایش یکنواخت دمای پیشگرم، طرف فولاد کربنی نسبت به طرف فولاد زنگ‌نزن بدلیل دارا بودن ضریب هدایت حرارتی بالا اعوجاج حاصل از جوش کمتری دارد.

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 6 بهمن 1397
پذیرش: 29 فروردین 1398
ارائه در سایت: آبان 1398

کلیدواژگان:

اعوجاج
پیشگرم کردن
تحلیل اجزای محدود

Application of pre-heating in the reduction of distortion in the dissimilar joints welding SS type 304 and carbon steel A106-B

Mehran Charkhi¹, Gholam Reza Faghani², Davood Akbari^{3*}, Maghsoud Shalvandi¹

1- Mechanical Engineering Department, Tabriz University, Tabriz, Iran

2- Mechanical Engineering Department, Khatam-Ol-Anbia (PBU) University, Tehran, Iran

3- Mechanical Engineering Department, Tarbiat modares University, Tehran, Iran

P.O.B. 14115- 146, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 26 January 2019
Accepted 18 April 2019
Available October 2019

Keywords:

Distortion
Preheating
finite element analysis

Abstract

In this paper, thermo-mechanical behavior of the welding process was analyzed to determine the effect of preheating on the distortion magnitude and distribution in dissimilar joints. By using a verified finite element model, an efficient user subroutine was developed to consider the effects of phase transformation. In order to verify the model, experimental data for dissimilar joints, obtained by CMM measuring device method, were utilized. Good agreement was observed between the finite element and experimental data. The results indicated that the developed computational method is an effective tool to predict the distortion of dissimilar weld joints. The present finite element model was developed in a butt-welded plate to consider the effect of the preheating. It was observed that the increasing of the preheating temperature magnitude of distribution decreased on the carbon steel and stainless steel sides. Moreover, by increasing the preheating temperature more than special temperature range the preheating has no meaningful effect on the distortion on the both side of joint. Whatever, the preheating temperature become asymmetric in dissimilar joints, effect of the preheating on the distortion reduction is negligible on the carbon steel side but it has important effect on the stainless steel side. By increasing the preheating temperature invariably the carbon steel side has distortion of welding less than stainless steel side because of that's high thermal coefficient. In addition, it was observed that by increasing the preheating temperature in the welded plates, longitudinal residual stresses on the outer surface of the carbon steel and stainless steel plates decreased 35 and 50 percent, respectively. In general, there is no significant effect on the magnitude and distribution of compressive longitudinal residual stresses on the outer surface of the stainless steel plate and carbon steel plate. Also, high preheating temperatures will have wider distribution of longitudinal residual stresses. The results of effect of preheating on reduction of residual stresses show that the obtained results of our project are true.

Please cite this article using:

M. Charkhi, Gh. R. Faghani, D. Akbari, M. Shalvandi, Application of pre-heating in the reduction of distortion in the dissimilar joints welding SS type 304 and carbon steel A106-B, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 6, No. 6, pp. 51-63, 2019 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

1- مقدمه

در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، نیروگاهی، شیمیایی، پتروشیمی، تولید برق و صنعت کاغذ، اتصال فولادهای آلیاژی فریتی به فولادهای آستنیتی از طریق جوش کاری انجام می‌شود. در ابتدا، اتصالات بایستی ملزومات اولیه استحکام را دارا باشد، در حالیکه خواص ضد خوردگی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. عیوب تنش‌های پسماند و اعوجاج در نزدیکی خط جوش به علت گرم شدن موضعی و غیریکنواخت در طول فرایند جوش کاری و خنک شدن سریع پس از آن رخ می‌دهد. در برخی موارد، اعوجاج جوش می‌تواند اثر منفی و نامطلوبی روی خواص مکانیکی اتصالات مثل مقاومت به شکست خستگی داشته باشد [1]. بیشتر شکست‌های جوشی در اتصالات فولادهای آستنیتی- فریتی در منطقه متأثر از حرارت فولاد فریتی در مجاورت خط جوش رخ می‌دهد. طی یک بررسی بعمل آمده در نیروگاه‌ها، اعوجاج و تنش پسماند عمده علل ترک خوردگی در طول منطقه HAZ¹ در حین سرویس هستند [2]. بنابراین تعیین اندازه و توزیع تنش پسماند و تغییر شکل‌های جوش کاری در این گونه اتصالات بسیار مهم است. همچنین طبقه‌بندی اثر شرایط جوش کاری روی اعوجاج در اتصالات غیرهمجنس مهم است. در فرایند جوش کاری پارامترهای مربوط به خواص مواد و عوامل ساختاری اثر مهمی بر اندازه و توزیع اعوجاج دارند. پارامترهای فرایند شامل نوع فرایند جوش کاری، سرعت حرکت قوس، ولتاژ و جریان می‌باشند. شکل شیار جوش، نوع اتصال جوش، ضخامت و نوع هندسه برخی از فاکتورهای ساختاری هستند که ممکن است روی اندازه اعوجاج در اتصالات جوشی تاثیرگذار باشند. محققان روش‌های مختلفی از جمله عملیات حرارتی، چکش کاری، پیشگرم و استفاده از ارتعاشات را جهت کاهش تغییر شکل‌های ناشی از جوش توسعه داده‌اند [3]. علاوه بر این با کنترل پارامترهای جوش کاری در حین انجام عملیات می‌توان، اعوجاج و تغییر شکل‌های جوش را کاهش داد. انتخاب پارامترهای مناسب جوش کاری و طراحی اتصال، یک راه ساده و کارآمد برای کاهش اعوجاج ناشی از جوش است. از طرفی کاهش اعوجاج برای بسیاری از سازه‌های جوش کاری شده قابل اجرا نیست. از این رو توسعه‌ی پارامترهای موجود برای پیش‌بینی دقیق اعوجاج جوش جهت دستیابی به طراحی مناسب، ضروری است.

تفاوت در خواص مکانیکی در سرتاسر اتصالات غیرهمجنس از جمله اختلاف ضرایب انبساط حرارتی دو نوع فولاد، اختلاف

استحکام در اتصال و تبدیلات فازی، منجر به دشواری تخمین توزیع تغییر شکل در اتصالات غیرهمجنس شده است [2]. بررسی‌های زیادی روی مدل‌سازی و تحلیل حرارتی در جوش انجام گرفته است و محققان به مطالعه اثر برخی از پارامترهای فوق در پیشینه حرارتی جوش پرداخته‌اند. در سال 1984، گلداک [4] یک روش جدید المان محدود جهت تعیین توزیع حرارتی جوش ارائه کرد. او از رویکرد شار حرارتی در مدل‌سازی استفاده کرد. او همچنین تنش‌های حرارتی در سازه‌های جوش کاری شده را نیز مدل‌سازی کرد [5].

آنالیز عددی و تجربی اعوجاج و تنش پسماند در اتصالات T شکل توسط لیانگ تنگ و همکاران [6] انجام گرفت. آنها نتیجه گرفتند که توزیع دما در راستای ضخامت فلنج باعث اعوجاج زاویه‌ای در این نوع اتصالات می‌شود. همچنین با افزایش ضخامت فلنج، قیود داخلی ناشی از وزن قطعه افزایش یافته و در نتیجه اعوجاج در نزدیکی خط جوش کاهش می‌یابد. پنگ و هیسانگ [3] تنش پسماند در طول یک پاس جوش کاری قوس الکتریکی در صفحات فولادی را با استفاده از روش المان محدود پیش‌بینی کردند. همچنین آنها اثر سرعت الکتروود، اندازه نمونه، قید و فیکسچر و پیشگرم را روی اندازه و توزیع تنش پسماند، مطالعه کردند. مهم‌ترین نتایج کارشان این بود که نشان دادند تنش پسماند طولی کششی و عرضی کششی بسیار بزرگی در نزدیکی خط جوش و تنش فشاری به دور از منطقه جوش ایجاد می‌شود و در فواصل خیلی دور از منطقه جوش تنش‌ها نزدیک به صفر هستند. همچنین بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرایند جوش کاری در اتصال دو ورق با ضخامت‌های متفاوت از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 توسط نخودچی و همکاران [7] انجام شد. نتایج کارشان نشان داد تنش‌های پسماند طولی در نزدیکی جوش دارای مقادیر کششی و با دور شدن از خط جوش به مقادیر فشاری هم می‌رسد. هم- چنین مقادیر تنش‌های پسماند در ورق 6 میلی‌متری دارای مقادیر بیشتری هستند و ناحیه کششی روی این ورق بزرگ‌تر از ورق با ضخامت 10 میلی‌متر است. اثر حرارت ورودی روی تنش‌های پسماند جوش در اتصالات غیرهمجنس فولاد زنگ‌نزن 304 و فولاد کربنی A106، توسط اکبری و ستاری‌فر [8] بررسی شد. نتایج کارشان نشان داد که با تغییر حرارت ورودی حداکثر تنش‌های پسماند محیطی تفاوت چندانی نمی‌کند. با کاهش حرارت ورودی جوش حداکثر تنش فشاری محوری و محیطی در طرف فولاد زنگ‌نزن کاهش یافتند. با افزایش حرارت ورودی حداکثر تنش پسماند کششی در سطح خارجی فولاد

¹ Heat Affected Zone

2- بررسی های تجربی

در مطالعه حاضر، تغییر شکل ها و اعوجاج در یک اتصال غیر-همجنس با استفاده از دستگاه CMM اندازه گرفته شده است. اطلاعات تجربی جهت بررسی نتایج بدست آمده از روش تحلیل المان محدود برای بررسی اتصال جوش مورد نظر بکار گرفته شده است.

2-1- آماده سازی نمونه

دو صفحه با مشخصات هندسی مشابه شامل: عرض 100 میلی متر، ضخامت 6/18 میلی متر، زاویه پخ 60 درجه، گپ 2/5 میلی متر و طول 250 میلی متر تهیه شدند. جهت بررسی اتصال غیرهمجنس از دو نوع فولاد زنگ نزن A240-TP304 و فولاد کربنی A106-B استفاده شده است. ریزساختار اولیه فولاد زنگ نزن TP304، آستنیت بوده و در حین جوش کاری تبدیل فازی نداشته است، اما در طرف فولاد کربنی تبدیل فازی مارتنزیتی صورت خواهد گرفت. صفحه های آماده شده جهت جوش کاری با هندسه لبه های پخ به صورت V شکل بصورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده اند.

اتصال غیرهمجنس از دو نوع فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی با سه پاس جوش داده شد. پاس اول با استفاده از فرایند جوش کاری قوسی تنگستنی با گاز محافظ و پاس های دیگر بصورت جوش کاری به روش الکتروود دستی انجام گرفت. فولاد زنگ نزن آستنیتی E308L بعنوان فیلر مصرفی استفاده شد. پارامترهای جوش کاری هر پاس در جدول 1 ارائه شده است و در مدل سازی المان محدود نیز همان پارامترها بکار گرفته شدند.

2-2- اندازه گیری اعوجاج و تنش های پسماند

در این بررسی، اعوجاج و تغییر شکل های ناشی از جوش با استفاده از دستگاه CMM اندازه گیری شده است.

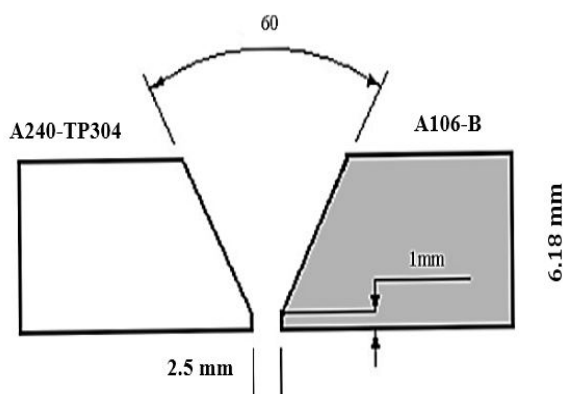


Fig. 1 A schematic of the plates prepared for the welding in this experiment.

شکل 1 شماتیکی از صفحه های آماده شده جهت جوش کاری در این آزمایش.

زنگ نزن افزایش پیدا کرد. در اتصالات غیرهمجنس با کاهش حرارت ورودی توزیع تنش های پسماند در طرف فولاد زنگ نزن نسبت به طرف فولاد کربنی کاهش بیشتری داشتند. جوزف و همکاران [2] یک لایه آلیاژ اینکونل 82 را به منظور کاهش تنش های باقیمانده در اتصال غیرهمجنس بین فولاد فریتی Cr2.25-1Mo و فولاد زنگ نزن 316 نوع AISI بکار گرفتند. در این مطالعه، پروفایل های تنش پسماند در عرض اتصالات جوش با استفاده از روش پراش اشعه ایکس مشخص شدند. نتایج کارشان نشان داد حداکثر تنش پسماند کششی در اتصال غیرهمجنس با لایه آلیاژ اینکونل 82 و بدون لایه با یکدیگر یکسان و تقریباً برابر با 350 MPa بود. تنش پسماند در سطح مشترک بین فولاد فریتی و لایه در اتصال غیرهمجنس که برابر 160 MPa بود بطور قابل توجهی کمتر از تنش در سطح مشترک بین فولاد فریتی و فلز جوش در اتصال بدون لایه که تقریباً 280 MPa بود، مشاهده شد. لانگ و همکاران [9] به پیش بینی اعوجاج در جوش لب به لب صفحات نازک پرداختند. در ادامه به مهم ترین نتایج حاصل از این پژوهش پرداخته شده است. انقباض طولی زیادی در ناحیه جوش نسبت به لبه های بیرونی صفحه ها مشاهده شد. زمانی که سرعت جوش کاری از 1/3 به 0/7 متر بر دقیقه کاهش یافت حداکثر افزایش مقدار انقباض طولی در این سرعت ها به ترتیب 1 و 1/48 میلی متر بود. انقباض عرضی بزرگی در بخش میانی از راستای طولی صفحه ایجاد شد که مقدار این تغییر شکل بتدریج با حرکت به سمت لبه های شروع و پایان خط جوش کاهش یافت. زمانیکه سرعت جوش کاری از 1/3 به 0/7 متر بر دقیقه کاهش یافت، حداکثر افزایش مقدار انقباض عرضی در این سرعت ها به ترتیب 1 و 1/75 میلی متر بود.

با این حال تحقیقات بسیار محدودی اثر پارامتر پیش گرم کردن و پارامترهای فرایند جوش کاری را بر اندازه و توزیع تغییر شکل های ناشی از جوش در نظر گرفته اند.

در این مقاله صفحه های غیرهمجنس از فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ نزن A240 TP304 بوسیله جوش کاری چند پاسه با استفاده از شبیه سازی سه بعدی المان محدود مدل سازی شده و توزیع اعوجاج بدست آمده است. نتایج عددی بدست آمده با استفاده از اندازه گیری اعوجاج، با استفاده از دستگاه CMM تایید شد. با هدف کاهش تغییر شکل های جوش کاری از طریق انتخاب پارامترها و شکل مناسب اتصال، اثر پارامتر پیش گرم کردن، روی اندازه و توزیع اعوجاج مورد بررسی قرار گرفت.



Fig. 2 The measurement of distortion with CMM.

شکل 2 دستگاه CMM جهت اندازه گیری اعوجاج.

برای تحلیل اعوجاج‌ها از یک مدل سه بعدی کامل حرارتی و مدل هندسی با تقارن محوری² مکانیکی و از روش مدل سازی غیرکوپل برای شبیه سازی رفتار مکانیکی حرارتی قطعات بهم جوش خورده، استفاده شده است. بنابراین برای مشاهده پیشینه حرارتی فرایند جوش کاری، هم تحلیل حرارتی و هم تحلیل مکانیکی بطور مستقل از یکدیگر و با المان‌هایی که درجه آزادی حرارتی دارند، انجام شد. در طول هر پاس جوش، تنش‌های حرارتی از اعمال توزیع درجه حرارت تعیین شده توسط مدل حرارتی به مدل مکانیکی محاسبه شد.

برای به روز کردن رفتار مدل مکانیکی قبل از اینکه نمودی کوتاه³ بعدی اضافه شود، اعوجاج‌های محاسبه شده در هر نمو کوتاه، به گره‌ها اضافه شدند. بدلیل غیرخطی بودن تحلیل مکانیکی فرایند جوش کاری، از روش نیوتن-رافسون استفاده شد. تمامی خواص بصورت وابسته به دما در فلزات پایه در شبیه سازی بکار گرفته شده است [11]. در مطالعه حاضر جهت شبیه سازی پرشدن فلز جوش در حین جوش کاری از روش تولد و مرگ المان‌ها استفاده شده است. در این روش، المان‌های اولیه فلز پیرکننده با اعمال یک ضریب خیلی کوچک به ماتریس سفتی‌شان، غیر فعال می‌شوند. المان‌های غیر فعال شده دوباره در حین جوش کاری با حرکت منبع حرارت جوش کاری و به صورت مرحله به مرحله فعال می‌شوند.

تحلیل حساسیت اندازه‌های شبکه‌بندی اجزای محدود برای اطمینان از مناسب بودن شبکه و اطمینان از عدم وابستگی نتایج به درجه شبکه‌بندی انجام پذیرفت. مدل المان محدود استفاده شده در این مدل سازی در شکل 3 نشان داده شده است.

² Axisymmetric

³ Increment

جدول 1 پارامترهای فرایند جوش کاری

Table 1 Welding process parameters

شماره پاس	ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	فیلر	روش جوش کار	سرعت جوش کاری (mm/s)
1	16-18	110±5	ER 308L	GTAW	4/16
2	22-24	120±5	E308L-16	SMAW	2/9-3/7
3	25-28	135±5	E308L-16	SMAW	2/6-2/8

اندازه گیری اعوجاج در اتصال مورد نظر در هفت نقطه، یک نقطه در مرکز جوش و سه نقطه متقارن در دو طرف اتصال انجام گرفت.

با استفاده از اندازه اعوجاج و کرنش‌های ایجاد شده در صفحات می‌توان تنش‌های پسماند را نیز محاسبه کرد. تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه گیری می‌شوند، که بعنوان یک روش استاندارد در استاندارد ASTM E837-08 معرفی شده است [10]. سوراخکاری با سرعت بالا برای سوراخ کردن نقطه مرکزی بین کرنش‌سنج‌ها انجام می‌گیرد و کرنش‌های آزاد شده در حین سوراخکاری اندازه گیری می‌شوند.

سپس تنش‌های پسماند اصلی در قطعات، با جایگذاری کرنش‌های آزاد شده در روابط (1) و (2)، محاسبه می‌شوند [10]:

$$\sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{\min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (2)$$

که در آن ε_1 و ε_2 و ε_3 کرنش‌های اندازه گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها هستند، A و B ضرایب وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه می‌باشند. در اندازه گیری تنش پسماند برای جلوگیری از تاثیر تنش‌های مربوط به نقاط شروع و پایان جوش کاری قوس الکتریکی، اندازه گیری‌ها در دورترین نقاط از محل اتصال انجام می‌گیرد.

شکل 2 دستگاه CMM جهت اندازه گیری اعوجاج‌های مورد نظر را نشان می‌دهد [10].

3- شبیه سازی المان محدود جوش

در مطالعه حاضر، روش المان محدود برای اندازه گیری توزیع درجه حرارت در حین فرایند جوش کاری و هم چنین توزیع تغییر شکل در اتصال جوش مورد نظر استفاده شده است.

$$q_f(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{a_f b c \pi^{3/2}} e^{-3x^2/a_f^2} e^{-3y^2/b^2} \quad (4)$$

$$q_r(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{a_r b c \pi^{3/2}} e^{-3x^2/a_r^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3z^2/c^2} \quad (5)$$

روابط (4) و (5) به ترتیب بخش‌های جلویی و انتهایی منبع گرمایی هستند. در این معادلات x و y و z بترتیب مختصات مکان منبع حرارتی و f_f و f_r بیانگر کسر حرارت ورودی در نواحی جلویی و پشتی می‌باشند. Q توان منبع حرارتی جوش کاری است که می‌توان آن را از اطلاعات فرایند جوش کاری تجربی بدست آورد. اگر ابعاد سطح مقطع حوضچه جوش موجود نباشند، می‌توان از داده‌های تجربی ارائه شده توسط گلداک و همکاران استفاده کرد، که طبق این داده‌ها فاصله در مقابل منبع حرارت برابر با نیمی از عرض جوش و فاصله از پشت منبع حرارت برابر با دو برابر عرض جوش است [13]. پیشنهادات مذکور در این مقاله استفاده شدند و جهت مدل کردن حرکت منبع حرارتی یک زیربرنامه در مدل المان محدود نوشته شد. ابعاد مقطع منبع حرارتی جوش کاری که با a و b و c نام‌گذاری شده‌اند، در شکل 4 نشان داده شده است.

پارامترهای جوش کاری استفاده شده در این تحلیل که مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری شده تجربی می‌باشند، در جدول 1 ارائه شده است.

انتقال حرارت صورت گرفته با محیط در طول فرایند جوش کاری، بصورت تابشی و همرفت در نظر گرفته شده است که ضریب انتقال حرارت کل α_h بصورت روابط (6) و (7) قابل بیان است [11، 12]:

$$\alpha_h = 0.0668 T \text{ (W/m}^2\text{)} \quad 0 < T < 500^\circ\text{C} \quad (6)$$

$$\alpha_h = 0.231 T - 82.1 \text{ (W/m}^2\text{)} \quad 500 < T^\circ\text{C} \quad (7)$$

این روش با اعمال یک زیربرنامه توسعه یافته برای شبیه سازی المان محدود اعمال می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی ناحیه ذوب جهت شبیه سازی نفوذ جریان حوضچه جوش دو برابر شد [14]. برای مدل کردن اثرات حرارتی انجماد در حوضچه جوش، گرمای نهان ذوب در نظر گرفته شده است. از روش آنتالپی حرارتی جهت بکاربردن گرمای نهان در تجزیه و تحلیل شبیه سازی المان محدود استفاده شد [15]. نوع المانی که برای مدل سازی حرارتی استفاده شد، قابلیت هدایت حرارتی سه بعدی دارد. این المان دارای هشت گره می‌باشد که هر گره دارای یک درجه آزادی (دما) و خواص مواد یکسان است. در مدل المان محدود تعداد 17892 المان

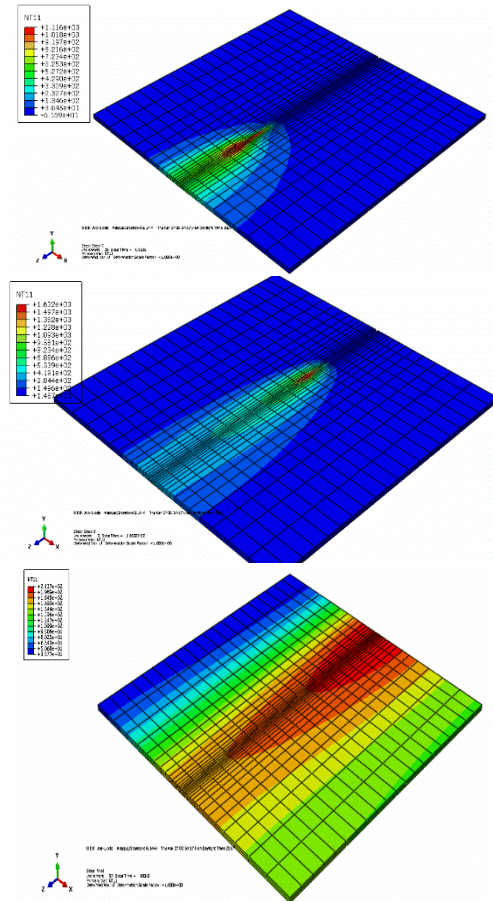


Fig. 3 FEM meshes for welded plates and temperature contour in different times of welding.

شکل 3 مش‌های المان محدود برای صفحه‌های جوش داده شده و توزیع دما در زمان‌های مختلف جوش کاری.

3-1- تحلیل حرارتی

تحلیل حرارتی برای تعیین توزیع دمای قسمت‌های جوش داده شده استفاده شده است. توزیع دمایی وابسته به دما با استفاده از رابطه انتقال حرارت گذرا (3) در این فرایند بدست می‌آید [12]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t}(x, y, z, t) = -\nabla \cdot \vec{q}(x, y, z, t) + Q(x, y, z, t) \quad (3)$$

که در آن T ، t ، Q و \vec{q} به ترتیب بردار شار حرارتی، زمان، دما و نرخ تولید حرارت داخلی می‌باشند. هم‌چنین ρ و c به ترتیب چگالی و ظرفیت گرمای ویژه هستند و دلتا عامل گرادیان مکانی است. x و y و z مختصات می‌باشند.

در این مطالعه برای مدل کردن منبع حرارت حجمی فرایند جوش کاری قوس الکتریکی، توزیع حرارتی دو بیضی‌گون پیشنهاد شده توسط گلداک، استفاده شده است. توزیع منبع حرارتی گلداک که در شکل 4 نشان داده شده است، توسط معادلات (4) و (5) بیان می‌شود [12، 13]:

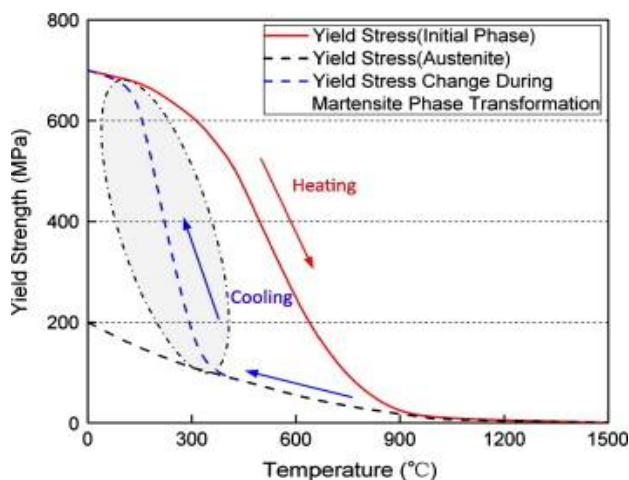
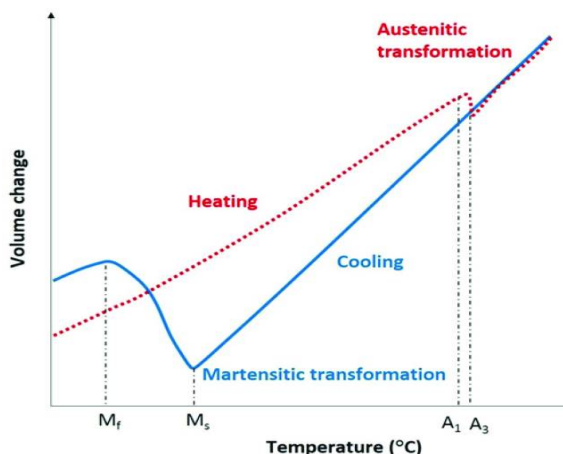


Fig. 5 Volume change (a) and Yield stress (b) due to martensite transformation

شکل 5 نمودار تغییرات حجمی (a) و تغییرات استحکام تسلیم (b) در نتیجه تبدیل مارتنزیتی.

کرنش‌هایی که در نتیجه تغییرات حجمی ایجاد شده بودند، با تغییر ضریب انبساط حرارتی با استفاده از یک زیربرنامه توسعه یافته در مدل اجزای محدود مدل‌سازی شدند.

3-3- تایید المان محدود

برای تأیید صحت مدل‌سازی المان محدود انجام شده، اتصال غیرهمجنس جوش داده شده که قبلاً شرح داده شد، آماده گردید و تغییر شکل‌ها با استفاده از دستگاه CMM اندازه‌گیری شد. همچنین توزیع تغییر شکل در اتصال جوش داده شده غیرهمجنس با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شد. در این مطالعه بدست آمد، با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد. تغییر شکل‌های کلی که با استفاده از دستگاه CMM در نمونه‌های مورد نظر اندازه‌گیری شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است.

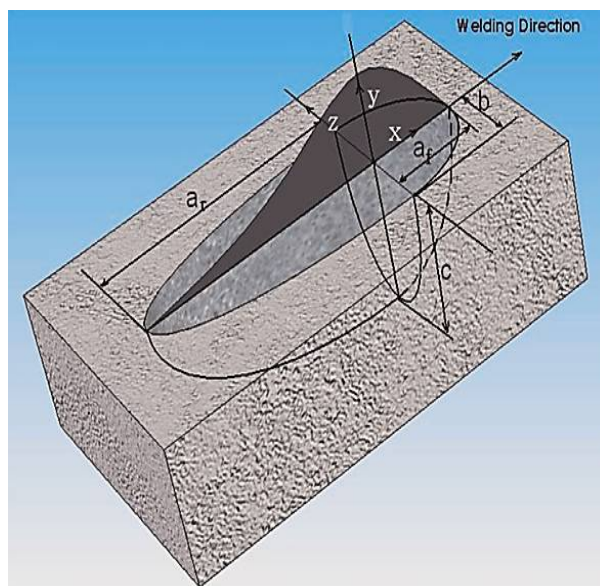


Fig. 4 Dimensional symmetric two elliptical thermal source.

شکل 4 ابعاد مقطعی منبع حرارتی دو بیضی‌گون.

3-2- تحلیل مکانیکی

برای تحلیل مکانیکی به روش غیرکوپل، المان‌های حرارتی با المان‌های مکانیکی جایگزین شدند و تاریخچه دمایی محاسبه شده در تحلیل حرارتی بعنوان یک بار حرارتی در هر گام زمانی تحلیل مکانیکی اعمال شد. بنابراین در هر گام زمانی، تنش‌ها و کرنش‌های حرارتی محاسبه شدند.

تبدیل فاز مارتنزیتی در طرف فولاد کربنی با تغییر در استحکام تسلیم فلز پایه و با توجه به تغییرات حجمی در نتیجه تبدیل فاز مدل‌سازی شد. کسر حجمی از مارتنزیت حین تحلیل حرارتی با استفاده از رابطه کوپستینن-ماربورگر بدست آمد [16]. تبدیل مورد نظر در تحلیل مکانیکی با استفاده از یک زیربرنامه توسعه یافته در این مطالعه بررسی شد. در شکل 5 تغییرات حجمی و تغییرات استحکام تسلیم در نتیجه تبدیل مارتنزیتی بر حسب دما نشان داده شده است [17].

کرنش کل در فرایند جوش‌کاری مجموع کرنش‌های الاستیک، پلاستیک و حرارتی و کرنش‌هایی که در نتیجه تغییرات حجمی ناشی می‌شوند، است.

در تحلیل مکانیکی، خواص مکانیکی وابسته به دمای ماده مثل مدول یانگ، نسبت پواسون و ضریب انبساط حرارتی جهت محاسبه کرنش‌های حرارتی و الاستیک استفاده شدند. همچنین، استحکام تسلیم وابسته به دما با معیار فون میسز برای محاسبه کرنش‌های پلاستیک استفاده شد [18].

انتقال فازی) از طریق کدنویسی و همچنین کرنش‌هایی که در نتیجه تغییرات حجمی ایجاد شده بودند، با تغییر ضریب انبساط حرارتی با استفاده از یک زیربرنامه توسعه یافته در مدل اجزای محدود مدل‌سازی شدند.

می‌توان نتیجه گرفت مدل المان محدود توسعه داده شده، پیش‌بینی قابل اطمینانی از تغییر شکل‌های حاصل از جوش سربه‌سر غیرهمجنس ارائه کرده است. از این رو مطالعات پارامتریک می‌تواند با استفاده از این مدل معتبر انجام شود.

4- بحث و نتایج

4-1- اثر پیش‌گرم کردن

تغییرشکل‌های حاصل از جوش چند پاسه اتصالات غیرهمجنس برای صفحه‌هایی با شش دمای پیش‌گرم مختلف اندازه‌گیری شد که در جدول 2 ارائه شده است. همه صفحه‌ها مشخصات هندسی مشابهی دارند. تحلیل المان محدود در همه نمونه‌ها با استفاده از مدلی که قبلاً شرح داده شد، انجام گرفته است. از آنجا که محدوده ضخامت مدل‌ها یکسان است، اندازه المان در راستای ضخامت در هر مدل برابر در نظر گرفته شد تا اندازه شبکه یکسانی برای تمامی مدل‌ها حاصل شود. با توجه به ضخامت، طول و عرض یکسان صفحه‌ها در هر مدل، پارامترهای جوش کاری مانند جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکترود ثابت در نظر گرفته شدند.

برای شبیه‌سازی فرایند جوش کاری صفحه‌های با دمای پیش‌گرم مختلف در سه پاس، حرارت ورودی هر پاس متناسب با حجم پاس در نظر گرفته شد. حرارت ورودی در نمونه‌های تجربی برای هر پاس با استفاده از پارامترهای جوش کاری اندازه‌گیری شده و فهرست شده در جدول 1 و معادله (8) محاسبه شد.

$$Q = \eta U / v \quad (8)$$

که η ضریب راندمان قوس، U ولتاژ قوس، I شدت جریان جوش کاری و v سرعت جوش کاری است. ضریب راندمان برای فرایند جوش کاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ آرگون، 0/6 و برای فرایند جوش کاری الکترود دستی، 0/7 در نظر گرفته شد.

برای بررسی اثر پیش‌گرم کردن بر روی کاهش اعوجاج حاصل از اتصال غیرهمجنس مورد نظر، چهار خط بصورت عرضی روی صفحه‌ها به فاصله 70 میلی‌متر از یکدیگر طوری که فاصله خط اول و چهارم از لبه‌های بالایی و پایینی 20 میلی‌متر بود، روی هر خط متناظر هفده نقطه (یک نقطه روی خط جوش که با نقطه صفر در نمودارها نشان داده شده و هشت نقطه روی هر

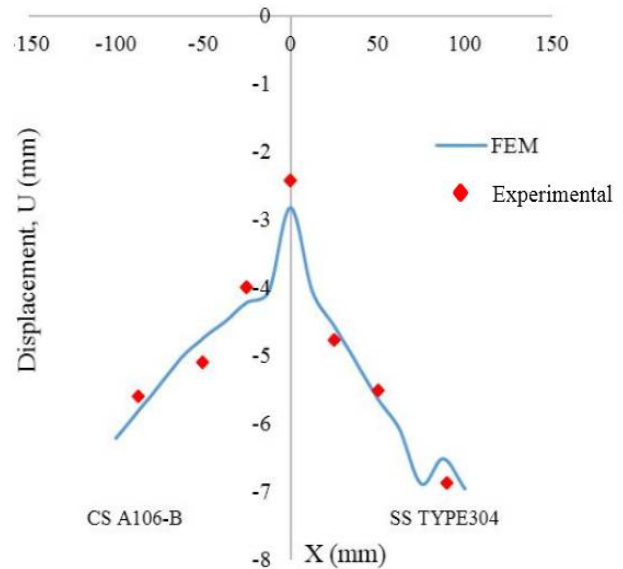


Fig. 6 Distortion in outer surface of carbon steel without preheating and stainless steel without preheating.

شکل 6 اعوجاج در سطح خارجی صفحه‌ها فولاد کربنی بدون پیش‌گرم و فولاد زنگ‌نزن بدون پیش‌گرم.

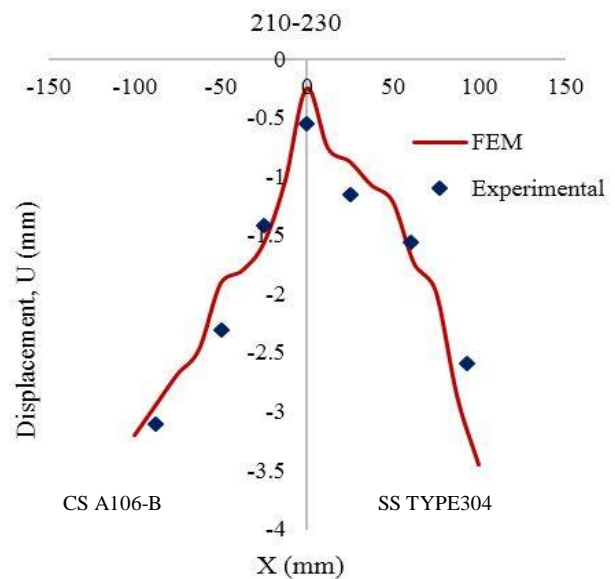


Fig. 7 Distortion in outer surface of carbon steel with preheating 210 and stainless steel with preheating 230.

شکل 7 اعوجاج در سطح خارجی صفحه‌ها فولاد کربنی با پیش‌گرم 210 درجه سانتی‌گراد - فولاد زنگ‌نزن با پیش‌گرم 230 درجه سانتی‌گراد.

بین نتایج عددی و تجربی ارتباط خوبی مشاهده شد. توزیع نامتقارن اعوجاج بدلیل تفاوت در خواص مواد، در هر طرف از اتصال جوش غیرهمجنس مشاهده شد. استتال‌های فازی که در حین جوش کاری در مناطق جوش و متأثر از حرارت ایجاد می‌شوند با توجه به تغییرات حجمی صورت گرفته و تنش‌های تسلیم فازهای فریت و آستنیت در دماهای مختلف (و دماهای

یک از صفحه‌ها) در نظر گرفته شدند.

کربنی از 1/85 میلی متر تا 4/3 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 4/8 میلی متر تا 8 میلی متر و روی خط جوش از 0/08 میلی متر تا 3/45 میلی متر متغیر است.

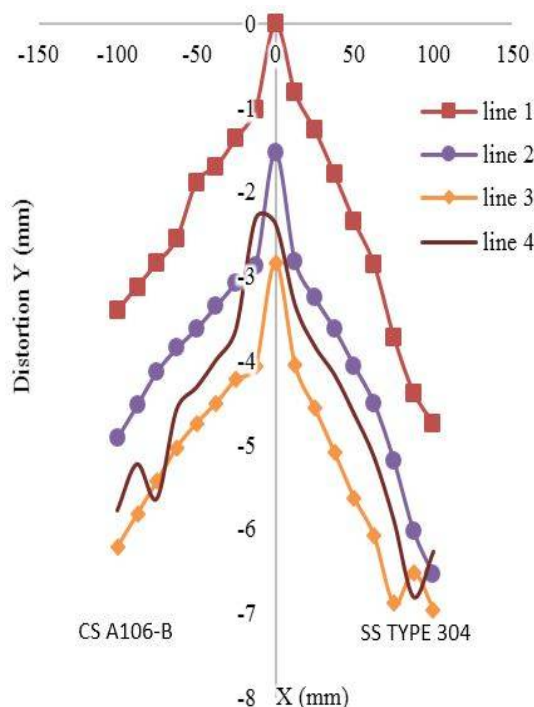


Fig. 8 Distortion for joints of carbon steel without preheating and stainless steel without preheating.

شکل 8 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی بدون پیش گرم - فولاد زنگ نزن بدون پیش گرم.

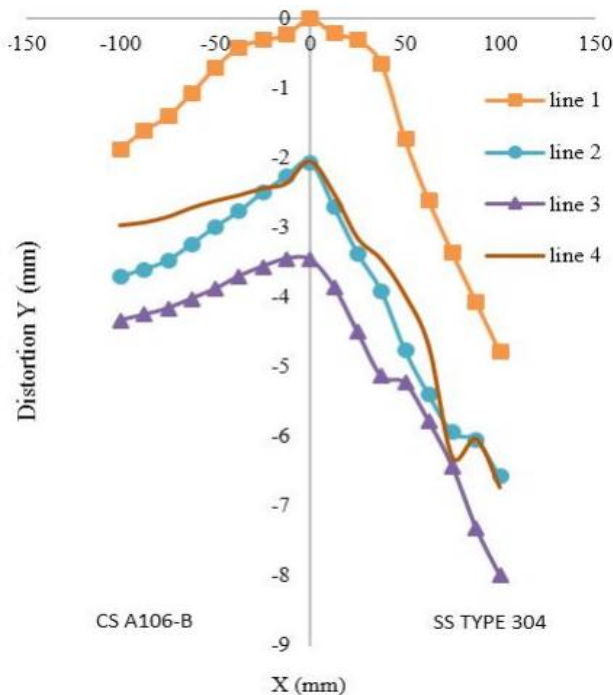


Fig. 9 Distortion for joints of carbon steel without preheating and stainless steel with preheating 80.

شکل 9 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی بدون پیش گرم - فولاد زنگ نزن با پیش گرم 80 درجه سانتی گراد.

جدول 2 دماهای پیش گرم صفحه‌ها در آنالیز عددی

Table 2 The preheating temperatures of plates in FEM

شماره قطعه	ضخامت (mm)	دمای پیش گرم فولاد کربنی (°C)	دمای پیش گرم فولاد زنگ نزن (°C)
1	6/18	20	20
2	6/18	20	80
3	6/18	20	140
4	6/18	100	230
5	6/18	210	230
6	6/18	300	350

شکل 8 تغییر شکل‌ها را برای حالتی که فولاد کربنی و فولاد زنگ نزن بدون پیش گرم به یکدیگر جوش داده شدند را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که، بیشترین اعوجاج در طرف فولاد کربنی 6/2 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن 7 میلی متر است. تغییر شکل‌ها در هر دو طرف با فاصله گرفتن از نقطه شروع جوش کاری تقریباً افزایش پیدا می‌کنند.

در شکل 8 مشاهده می‌شود که خود خط جوش نیز دارای اعوجاج می‌باشد که بیشترین میزان اعوجاج 2/85 میلی متر است.

میزان اعوجاج در ناحیه لبه صفحه در طرف فولاد کربنی از 3/5 میلی متر تا 6/2 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 4/8 میلی متر تا 7 میلی متر و روی خط جوش از 0/1 میلی متر تا 2/85 میلی متر متغیر می‌باشد. با بررسی نتایج می‌توان فهمید که میزان تغییر شکل‌ها در نقاط نزدیک خط جوش کمتر و در لبه‌ها بیشترین مقدار را دارد. همچنین اعوجاج حاصل از جوش در طرف فولاد زنگ نزن بیشتر از طرف فولاد کربنی است. دلیل این امر به علت زیاد بودن ضریب انبساط حرارتی فولاد زنگ نزن نسبت به فولاد کربنی می‌باشد.

این تغییر شکل‌ها و اعوجاج نتیجه انقباض محیطی بعد از انجماد قطعات جوش داده شده به هم هستند که با پروفایل خمش در سراسر ضخامت صفحه مطابقت دارد.

در بررسی بعدی مطابق شکل 9 تغییر شکل‌ها برای حالتی که فولاد کربنی بدون پیش گرم و فولاد زنگ نزن با پیش گرم 80 درجه سانتی گراد به یکدیگر جوش داده شدند را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که، بیشترین اعوجاج در طرف فولاد کربنی 4/3 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن 8 میلی متر و روی خط جوش نیز 3/4 میلی متر است.

علاوه بر این، میزان اعوجاج در ناحیه لبه صفحه در طرف فولاد

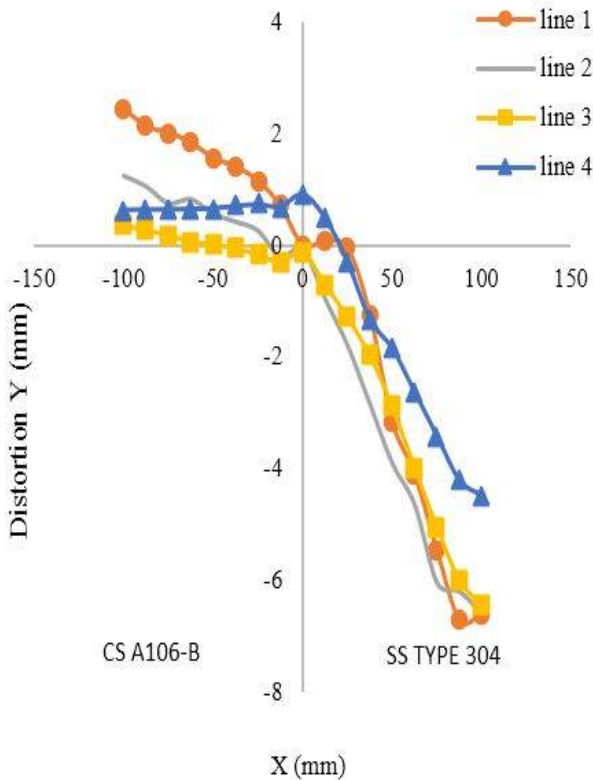


Fig. 10 Distortion for joints of carbon steel without preheating and stainless steel with preheating 140.

شکل 10 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی بدون پیشگرم - فولاد زنگ نزن با پیشگرم 140 درجه سانتی گراد.

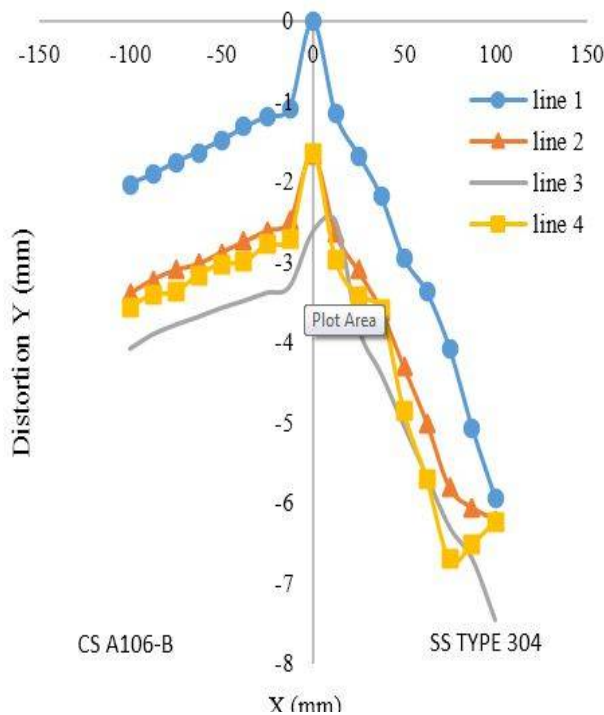


Fig. 11 Distortion for joints of carbon steel with preheating 100 and stainless steel with preheating 230.

شکل 11 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی با پیشگرم 100 درجه سانتی گراد - فولاد زنگ نزن با پیشگرم 230 درجه سانتی گراد.

میزان اعوجاج در قسمت لبه‌ها بیشتر از نواحی نزدیک به خط جوش است. علت کاهش اعوجاج در این بررسی در طرف فولاد کربنی نسبت به حالت قبلی این است که فولاد کربنی ضریب هدایت گرمایی بالایی نسبت به فولاد زنگ نزن دارد با افزایش دما و پیشگرم کردن طرف فولاد زنگ نزن، حرارت با سرعت بیشتری در طرف فولاد کربنی نسبت به فولاد زنگ نزن انتقال می‌یابد و در نهایت میزان اعوجاج طرف فولاد کربنی کمتر می‌شود [1].

از طرفی به علت بالا بودن ضریب انبساط حرارتی فولاد زنگ نزن نسبت به فولاد کربنی، اعوجاج حاصل از اتصال غیرهمجنس مورد نظر در طرف فولاد زنگ نزن بیشتر از فولاد کربنی است [11].

شکل 10 اعوجاج‌ها برای حالتی که فولاد کربنی بدون پیشگرم و فولاد زنگ نزن با پیشگرم 140 درجه سانتی گراد به یکدیگر جوش داده شدند را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از تحلیل المان محدود، جهت تغییر شکل در طرف فولاد کربنی معکوس سایر حالت‌ها است. همچنین بیشترین اعوجاج در طرف فولاد کربنی 2/5 میلی‌متر و در طرف فولاد زنگ نزن 6/8 میلی‌متر و روی خط جوش نیز 0/9 میلی‌متر است.

تغییر شکل‌ها در طرف فولاد کربنی از 0/45 میلی‌متر تا 2/5 میلی‌متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 4/6 میلی‌متر تا 6/8 میلی‌متر و روی خط جوش از 0/2 میلی‌متر تا 0/9 میلی‌متر متغیر می‌باشد.

به وضوح مشاهده می‌شود که با افزایش دمای طرف فولاد زنگ نزن تا 140 درجه سانتی گراد میزان اعوجاج‌ها متقارن تر و کمتر شده است.

توزیع اعوجاج و تغییر شکل روی سطح خارجی اتصال غیر-همجنس برای حالتی که فولاد کربنی با پیشگرم 100 درجه سانتی گراد و فولاد زنگ نزن با پیشگرم 230 درجه سانتی گراد است در شکل 11 نشان داده شده است. هر چند که برای تغییرات ارتفاع نقاط مختلف در صفحات روند مشابهی مشاهده می‌شود اما مقادیر حداکثر تغییر شکل در طرف فولاد کربنی 4 میلی‌متر و در طرف فولاد زنگ نزن 7/4 میلی‌متر و روی خط جوش نیز 2/5 میلی‌متر است.

نتایج نشان می‌دهند میزان تغییر شکل‌ها در طرف فولاد کربنی از 2/1 میلی‌متر تا 4 میلی‌متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 5/9 میلی‌متر تا 7/4 میلی‌متر و روی خط جوش از صفر تا 2/5 میلی‌متر متغیر است.

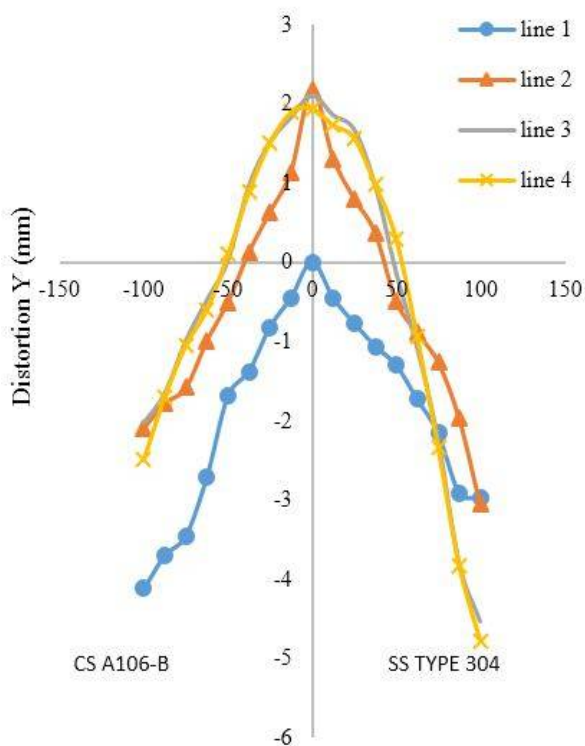


Fig. 13 Distortion for joints of carbon steel with preheating 300 and stainless steel with preheating 350.

شکل 13 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی با پیشگرم 300 درجه سانتی گراد - فولاد زنگ نزن با پیشگرم 350 درجه سانتی گراد.

علاوه بر این، میزان اعوجاج در ناحیه لبه صفحه در طرف فولاد کربنی از 2 میلی متر تا 4/1 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 3 میلی متر تا 4/8 میلی متر و روی خط جوش از صفر تا 2/2 میلی متر متغیر است.

اعوجاجها در قطعات مورد نظر بعد از دمای پیشگرم 300 درجه سانتی گراد برای فولاد کربنی و دمای پیشگرم 350 درجه سانتی گراد برای فولاد زنگ نزن تغییرات قابل توجهی پیدا نکردند. با بررسی کلی نتایج می توان دریافت که بهترین شکل قطعه از لحاظ اعوجاجها در دو حالت آخر که بالاترین دماهای پیشگرم بوده حاصل گشته است ولی کاهش اعوجاج و تغییر شکل قطعات شماره 5 و 6 نسبت به قطعات و حالت های قبلی کمتر است.

جهت بررسی بیشتر و صحت سنجی نتایج و بحث های بالا اثر پیشگرم بر روی کاهش تنش های پسماند نیز مورد بررسی قرار گرفت. اثر پیشگرم بر روی تنش های طولی در صفحه های فولاد کربنی و فولاد زنگ نزن بترتیب در شکل های 14 و 15 نشان داده شده است. شکل 14 توزیع تنش های پسماند طولی در سطح خارجی صفحه فولاد کربنی با چهار دمای پیشگرم مختلف را نشان می دهد.

در بررسی بعدی صفحه فولاد کربنی 210 درجه سانتی گراد و فولاد زنگ نزن 230 درجه سانتی گراد پیشگرم شدند و تاثیر آن بر روی میزان اعوجاج در شکل 12 نشان داده شده است. واضح است که بیشترین تغییر شکل در طرف فولاد کربنی 3/3 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن 3/9 میلی متر و روی خط جوش نیز 0/85 میلی متر است. میزان اعوجاجها در طرف فولاد کربنی از 2/95 میلی متر تا 3/3 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن از 3 میلی متر تا 3/9 میلی متر و روی خط جوش از 0/02 میلی متر تا 0/85 میلی متر متغیر می باشد.

واضح است که هر چقدر دماهای پیشگرم در دو طرف اتصال غیرهمجنس یکنواخت تر می شود میزان تغییر شکل های ناشی از جوش نیز در نقاط مختلف قطعات متقارن تر می شود و میزان اعوجاجها بطور قابل توجهی نسبت به حالت های قبلی کاهش می یابد. شکل 13 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی با پیشگرم 300 درجه سانتی گراد و فولاد زنگ نزن با پیشگرم 350 درجه سانتی گراد را نشان می دهد.

مشاهده می شود بیشترین اعوجاج در طرف فولاد کربنی 4/1 میلی متر و در طرف فولاد زنگ نزن 4/8 میلی متر و روی خط جوش نیز 2/2 میلی متر است. خود خط جوش در این حالت در جهت مخالف سایر حالت ها تغییر شکل پیدا کرده است.

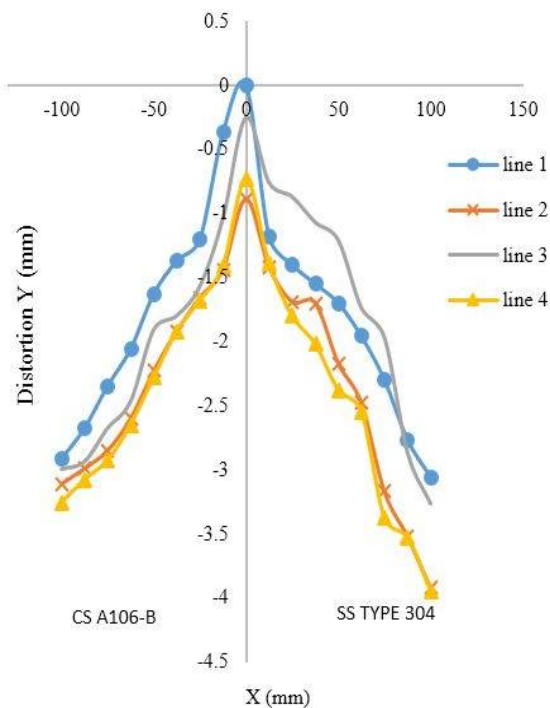
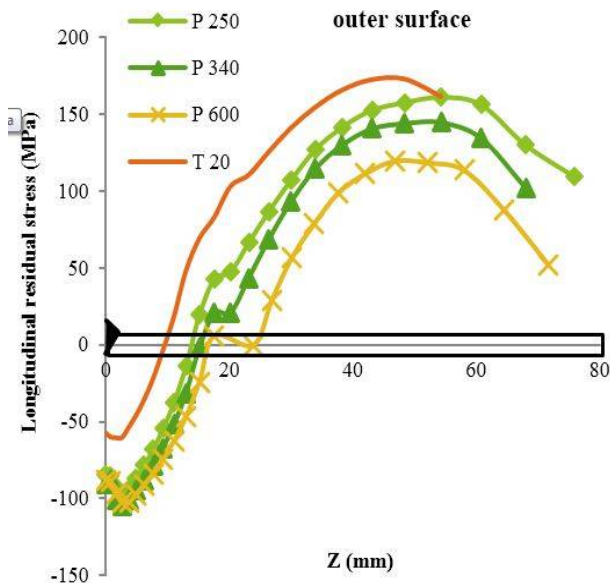


Fig. 12 Distortion for joints of carbon steel with preheating 210 and stainless steel with preheating 230.

شکل 12 اعوجاج برای اتصالات فولاد کربنی با پیشگرم 210 درجه سانتی گراد - فولاد زنگ نزن با پیشگرم 230 درجه سانتی گراد.

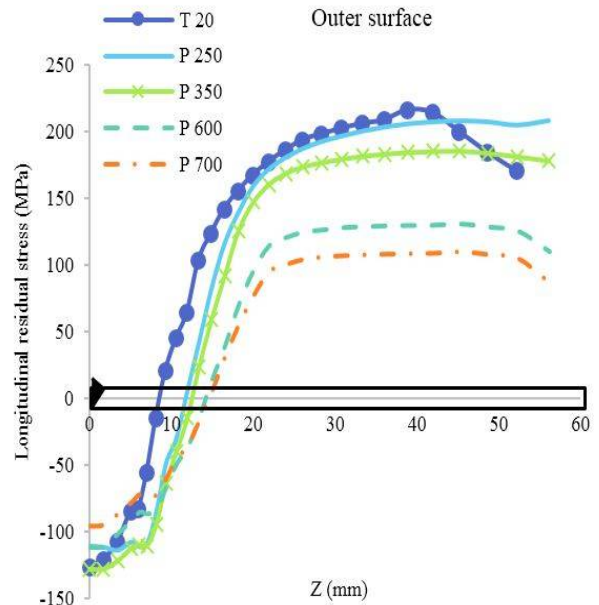


شکل 15 تنش پسماند طولی در سطح خارجی برای صفحه فولاد زنگ‌نزن با دماهای پیشگرم مختلف.

Fig. 15 Longitudinal residual stress on outer surface for stainless steel plate with different preheating temperature.

بزرگ بودن تنش‌های طولی کششی در صفحه فولاد کربنی احتمالاً به دلیل بالا رفتن نرخ سرد شدن قطعه و وارد شدن نیروهای بزرگ‌تر به علت انقباض موضعی ناشی از جوش کاری است. بطور کلی اثر پیشگرم در کاهش تنش‌های پسماند در لوله فولاد زنگ‌نزن نسبت به لوله فولاد کربنی احتمالاً به علت پایین بودن ضریب هدایت حرارتی فولاد زنگ‌نزن، کمتر است. همچنین با توجه به خواص مکانیکی و حرارتی دو نوع فولاد، فولاد کربنی زودتر از فولاد زنگ‌نزن دچار تسلیم ناشی از کاهش استحکام در دماهای بالا شده و تغییر شکل پلاستیک شدیدتر با افزایش دمای پیشگرم موجب کاهش بیشتر تنش‌های پسماند در لوله فولاد کربنی می‌شود. با توجه به خواص مکانیکی و حرارتی وابسته به دمای متفاوت فولادهای کربنی و زنگ‌نزن می‌توان دریافت که با افزایش دما که در جوش کاری تقریباً دما تا 1700 درجه سانتی‌گراد بالا می‌رود مدول استحکام فولاد کربنی با زیاد شدن دما کاهش پیدا کرده و کرنش‌های پلاستیک مربوط به آن با نرخ بالایی افزایش می‌یابد [1].

نتایج اثر پیشگرم روی کاهش تنش‌های پسماند در هر یک از صفحه‌های فولاد کربنی و فولاد زنگ‌نزن در اتصال غیرهمجنس نشان می‌دهند که نتایج حاصل از این پروژه که بررسی اثر پیشگرم بر روی کاهش عیب مکانیکی اعوجاج ناشی از جوش کاری در فلزات غیرهمجنس بوده، منطقی و درست است، زیرا با افزایش دمای پیشگرم از توزیع غیریکنواخت دما در



شکل 14 تنش پسماند طولی در سطح خارجی برای صفحه فولاد کربنی با دماهای پیشگرم مختلف.

Fig. 14 Longitudinal residual stress on outer surface for carbon steel plate with different preheating temperature.

نتایج نشان می‌دهند، تنش‌های پسماند طولی کششی در سطح خارجی صفحه مورد نظر با افزایش دمای پیشگرم کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. اندازه تنش پسماند کششی در دمای محیط برابر 215 مگاپاسکال می‌باشد که این مقدار با پیشگرم 700 درجه سانتی‌گراد به 105 مگاپاسکال می‌رسد که کاهش تقریباً 50 درصدی تنش را نشان می‌دهد. پیشگرم کردن اثر ناچیزی بر روی اندازه تنش‌های طولی فشاری دارد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، فقط در دمای پیشگرم بالا (700 درجه سانتی‌گراد) تنش فشاری کاهش تقریباً 25 درصدی دارد. همچنین با افزایش دمای پیشگرم توزیع تنش‌های پسماند طولی وسیع‌تر می‌شود.

شکل 15 توزیع تنش‌های پسماند طولی در سطح خارجی صفحه فولاد زنگ‌نزن با دماهای پیشگرم مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان فهمید که با افزایش دمای پیشگرم تنش‌های پسماند فشاری تغییر چندانی نمی‌کنند ولی پیشگرم اثر مهمی بر اندازه و توزیع تنش‌های پسماند طولی کششی دارد. با افزایش دمای پیشگرم تنش‌های کششی از 180 مگاپاسکال در دمای محیط به 120 مگاپاسکال با پیشگرم 600 درجه سانتی‌گراد می‌رسد که کاهش 35 درصدی را نشان می‌دهد.

همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش دمای پیشگرم توزیع تنش‌های پسماند طولی وسیع‌تر می‌شود.

تغییر شکل‌ها از دماهای خاصی به بعد دارای شیب نزولی کمتری است.

6- مراجع

- [1] Tso-Liang, T., Peng-Hsiang, C., Wen-Cheng, T., "Effect of welding sequences on residual stresses", Computers and Structures, Vol. 8, Issue 5, pp. 273–286, 2003.
- [2] A. Joseph, K. Raib-Sanjai, T. Jayakumara, et al. "Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 82, Issue 9, pp. 700–705, 2005.
- [3] C. Peng-Hsiang, T. Tso-Liang. "Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the butt-weld joints", Computational Materials Science, Vol. 29, Issue 1, pp. 511–522, 2004.
- [4] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, "A new finite element model for welding heat source", Metallurgical Transaction B, Vol. 15, Issue 2, pp. 299–305, 1984.
- [5] J. Goldak, Modeling thermal stresses and distortions in welds, Ohio: ASM International, pp. 71–82, 1990.
- [6] Tso-Liang Teng, Chin-Ping Fung, Peng-Hsiang Chang, Wei-Chun Yang. "Analysis of residual stresses and distortions in T-joint fillet welds". International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 78, pp. 523–538, 2001.
- [7] S. Nahkodchi, S. Akbari Iraj, A. Skokuhfar and H. Rezazadeh. "Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different thicknesses". Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, Issue 9, pp. 81–89, 2014 (In Persian).
- [8] D. Akbari, I. Sattari-Far, "Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 86, Issue 11, pp. 769–776, 2009.
- [9] H. Long, D. Gery, A. Carlier, P.G. Maropoulos, "Prediction of welding distortion in butt joint of thin plates", Materials & Design, Vol. 30, Issue 10, pp. 4126-4135, 2009.
- [10] E837-08, Standard test method for determining residual stress by the hole drilling strain gauge method, ASTM, 2009.
- [11] B. Brickstad, B. Josefson, "A parametric study of residual stresses in multi-pass butt-welded stainless steel pipes", International Journal of Pressure Vessels and Piping, Vol. 75, Issue 1, pp. 11–25, 1998.
- [12] 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

قطعات جلوگیری و در نتیجه انقباض‌های موضعی و انبساط‌های حرارتی و تغییر شکل‌های پلاستیک کاهش یافته و نهایتاً تنش و نیروی کمتری به المان‌های فلز پایه وارد خواهد شد که این عامل باعث کاهش تغییر شکل و اعوجاج قطعات می‌شود.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر، یک مدل المان محدود با توجه به تبدیل فاز برای محاسبه اعوجاج و تغییر شکل‌های جوش در اتصالات غیرهمجنس از فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ‌نزن A240 TP304 با روش جوش کاری قوس الکتریکی چند پاسه توسعه داده شده است.

نتایج المان محدود برای اتصال جوش غیرهمجنس با داده‌های اندازه‌گیری شده بوسیله دستگاه CMM مقایسه شدند. رابطه خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی مشاهده شد. از این روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه برای پیش بینی اعوجاج و تغییر شکل در صفحه‌های جوش داده شده غیرهمجنس که تبدیل مارتنزیتی دارند، یک روش کارآمد خواهد بود. نتایج زیر را می‌توان بر اساس دستاوردهای این مطالعه بدست آورد.

- عملیات حرارتی پیشگرم با ایجاد بالانس حرارتی و کاهش شیب حرارتی سرد شدن قطعه از میزان تنش‌های ایجاد شده در اثر انبساط حرارتی و انقباض انجمادی و تغییر شکل‌های پلاستیک کاسته و تأثیر زیادی در کاهش عیوب مکانیکی اعوجاج و تنش‌های پسماند دارد.

- در شرایط جوش کاری یکسان، میزان اعوجاج در جوش کاری فلزات غیرهمجنس به علت خصوصیات موادی و مکانیکی متفاوت فلزات پایه و توزیع حرارت نامتقارن در آنها، از میزان اعوجاج در اتصالات همجنس بیشتر است.

- نتایج نشان می‌دهد تغییر شکل‌ها در لبه صفحه‌ها بیشتر و با نزدیک شدن به خط جوش کمتر می‌شود. خود خط جوش نیز دارای اعوجاج است.

- در اتصالات غیرهمجنس، پیشگرم نامتقارن (دماهای پیشگرم متفاوت در دو طرف اتصال)، منجر به کاهش بیشتر اعوجاج‌ها نسبت به حالت متقارن (دماهای پیشگرم یکسان برای دو طرف اتصال) و حالتی که یک‌طرف بدون پیشگرم است، گشته و دماهای بالاتر باعث کاهش بیشتر اعوجاج می‌شوند.

- هر چه دمای پیشگرم بالاتر باشد اعوجاج حاصل از اتصالات غیرهمجنس کمتر می‌گردد، که بستگی به ضخامت فلز پایه و درصد کربن معادل دارد. ولی میزان کاهش این اعوجاج و

- [16] R. C. Sharma, "Principles of Heat Treatment of Steel", pp. 229–243, New Age Publishers, 2007.
- [17] D. Deng, H. Murakawa, "Prediction of welding residual stress in multi-pass butt-welded modified 9Cr–1Mo steel pipe considering phase transformation effects", *Computational Materials Science*, Vol. 37, Issue 3, pp. 207–219, 2006.
- [18] A. Paradowska, J. Price, R. Ibrahim, et al., "The effect of heat input on residual stress distribution of steel welds measured by neutron diffraction", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 17, Issue 1, pp. 385–388, 2006.
- [13] K. Goldak, A. Chakaravarti, M. Bibby, "A new finite element model for welding heat sources", *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15, pp. 299–305, 1984.
- [14] L. Fenggui, "Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool", *Computational Materials Science*, Vol. 29, Issue 2, pp. 371–378, 2004.
- [15] ANSYS User's manual, V10, Swanson analysis system Inc, 2004.