مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 307-315

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

اثر هندسه لبه‌های اتصال بر تنش‌های پسماند در جوش‌کاری لوله‌های غیرهمجنس

مهران چرخی [1] ، داود اکبری [2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی: 111-14115، daakbari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 18 اسفند 1395

پذیرش: 08 خرداد 1396

ارائه در سایت: 06 مرداد 1396

کلید واژگان:

تنش‌های پسماند

شکل شیار

گشودگی ریشه

چکیده

در این مقاله رفتار مکانیکی- حرارتی فرایند جوش‌کاری ذوبی برای تعیین میزان اثر هندسه لبه‌ی جوش بر اندازه و توزیع تنش پسماند در اتصالات غیرهمجنس تجزیه و تحلیل شده است. از این رو یک زیربرنامه مؤثر و کارآمد در یک مدل المان محدود تأیید شده جهت در نظر گرفتن اثرات تبدیل فاز در تحلیل عددی توسعه داده شده است. برای تأیید مدل از داده‌های تجربی اتصالات همجنس و غیرهمجنس که با روش کرنش‌سنجی سوراخ 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 برای پیش‌بینی تنش پسماند در اتصالات غیرهمجنس است. اثر ضخامت دیواره لوله، شکل شیار جوش و فاصله گشودگی ریشه روی تنش‌های پسماند جوش‌کاری در لوله‌های جوش داده شده بصورت لب به لب با استفاده از مدل المان محدود حاضر مورد مطالعه قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش ضخامت لوله، تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح داخلی اتصالات غیر-همجنس در طرف فولاد زنگ‌نزن کاهش می‌یابد اما در طرف فولاد کربنی تأثیر قابل توجهی ندارد. با افزایش ضخامت دیواره لوله به‌خصوص در طرف فولاد کربنی تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی افزایش می‌یابند. افزایش زاویه شیار جوش و فاصله گشودگی ریشه تنها در طرف فولاد کربنی منجر به بالا رفتن تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی می‌شوند.

Effect of edge preparation on residual stress of welding in dissimilar joints

Mehran Charkhi, Davood Akbari*

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 08 March 2017
Accepted 29 May 2017
Available Online 28 July 2017

Keywords:
Residual stresses
groove shape
root opening distance

ABSTRACT

In this paper, thermo-mechanical behavior of the welding process was analyzed to determine the effect of edge preparation on the residual stress 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 similar and dissimilar joints, obtained by deep hole drilling 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 residual stress of dissimilar weld joints. The present finite element model was developed in a butt-welded pipe to consider the effect of pipe wall-thickness, groove shape and root opening distance. It was observed that the pipe wall-thickness has important influences on the distribution and magnitude of residual stress. Moreover, By increasing the pipe thickness in the dissimilar butt-welded pipes, tensile axial residual stresses on the inner surface of the dissimilar joint decreased on the stainless steel side, but only a small variation was observed on the carbon steel side. The compressive axial residual stresses on the inner surface and the tensile axial residual stresses on the outer surface increased by increasing the pipe wall thickness, especially on the carbon steel side. Increasing the weld groove shape and root opening distance leads to higher compressive axial stresses on the inner surface and higher tensile axial stresses on the outer surface, only on the carbon steel side.

1- مقدمه

در بسیاری از کاربردهای صنعتی ازجمله صنایع شیمیایی، پتروشیمی، تولید برق و صنعت کاغذ، فولادهای آلیاژی فریتی به فولادهای آستنیتی جوش داده می‌شوند. در ابتدا، اتصالات بایستی ملزومات اولیه استحکام را دارا باشد، در حالیکه خواص ضد خوردگی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. تنش‌های پسماند و اعوجاج در نزدیکی خط جوش به‌علت گرمایش موضعی در طول فرایند جوش‌کاری و خنک شدن سریع پس از آن رخ می‌دهد. در برخی موارد، تنش پسماند جوش می‌تواند اثر منفی روی خواص مکانیکی اتصالات مثل مقاومت به شکست خستگی داشته باشد [1]. در اتصالات غیرهمجنس در بسیاری از موارد شکست در زمانی کوتاه‌تر از عمر مورد انتظار اتفاق می-افتد. بیشتر شکست‌های جوشی در اتصالات فولادهای آستنیتی- فریتی در منطقه متأثر از حرارت فولاد فریتی در مجاورت خط جوش رخ می‌دهد. طی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Charkhi, D. Akbari, Effect of edge preparation on residual stress of welding in dissimilar joints, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 307-315, 2017 (in Persian)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

یک بررسی بعمل آمده در نیروگاه‌ها، تنش پسماند عمده علل ترک خوردگی در طول منطقه HAZ[1] در حین سرویس هستند [2]. بنابراین تعیین اندازه و توزیع تنش پسماند جوش‌کاری در این گونه اتصالات بسیار مهم می‌باشد. همچنین طبقه‌بندی اثر شرایط جوش‌کاری روی تنش پسماند در اتصالات غیرهمجنس مهم می‌باشد.

پارامترهای مختلفی ممکن است در اندازه و توزیع تنش‌های پسماند اثر بگذارند. در فرایند جوش‌کاری پارامترهای مربوط به خواص مواد و عوامل ساختاری اثر قابل توجهی بر اندازه و توزیع تنش پسماند دارند. پارامترهای فرایند شامل نوع فرایند جوش‌کاری، 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 تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی تأثیرگذار باشند. محققان روش‌های مختلفی از جمله عملیات حرارتی، چکش‌کاری، پیشگرم و استفاده از ارتعاشات را جهت کاهش تنش‌های پسماند جوش توسعه داده‌اند [3]. علاوه بر این با کنترل پارامترهای جوش‌کاری در حین انجام عملیات می‌توان، تنش‌های پسماند جوش را کاهش داد. انتخاب پارامترهای مناسب جوش‌کاری و طراحی اتصال، یک راه ساده و کارآمد برای کاهش تنش پسماند ناشی از جوش است. از طرفی کاهش تنش پسماند برای بسیاری از سازه‌های جوش‌کاری شده قابل اجرا نمی‌باشد. از این رو توسعه‌ی پارامترهای موجود برای پیش‌بینی دقیق تنش پسماند 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 تنش پسماند در اتصالات غیرهمجنس شده است [2].

امروزه روش‌های عددی در محاسبه تنش پسماند سازه‌های جوش‌کاری شده می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند. 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 جوش‌کاری شده را نیز مدل‌سازی کرد [5].

آنالیز عددی و تجربی توسط موچیزوکی و همکاران [6] به منظور پیش‌بینی تنش پسماند در لوله‌های فولاد کربنی انجام گرفت. آنها برای صحت سنجی مدل‌های عددی، اندازه‌گیری تنش پسماند را با استفاده از روش پراش اشعه نوترونی انجام دادند. آنها نتیجه گرفتند که این روش برای اندازه‌گیری تنش پسماند داخلی بصورت غیرمخرب برای قطعات کوچک مناسب است. پنگ و هیسانگ [3] تنش پسماند در طول یک پاس جوش‌کاری قوس الکتریکی در صفحات فولادی را با استفاده از روش المان محدود پیش‌بینی کردند. هم‌چنین آنها اثر سرعت الکترود، 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 جوش‌کاری 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. هم‌چنین مقادیر تنش‌های پسماند در ورق 6 میلی‌متری دارای مقادیر بیشتری هستند و ناحیه کششی روی این ورق بزرگ‌تر از ورق با ضخامت 10 میلی‌متر می‌باشد. 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 زنگ‌نزن افزایش پیدا کرد. در اتصالات غیرهمجنس با کاهش حرارت ورودی توزیع تنش‌های پسماند در طرف فولاد زنگ‌نزن نسبت به طرف فولاد کربنی کاهش بیشتری داشتند. هم‌چنین حداکثر تنش‌های پسماند در طرف فولاد زنگ‌نزن ایجاد شدند که این باعث توزیع نامتقارن تنش‌ها شد. جوزف و همکاران [2] یک لایه آلیاژ اینکونل 82 را به منظور کاهش تنش‌های باقیمانده در اتصال غیرهمجنس بین فولاد فریتی Cr2.25-1Mo و فولاد زنگ نزن 316 نوع AISI بکارگرفتند. در این مطالعه، پروفایل‌های 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 تقریبا برابر با 350 MPa بود. تنش‌های پسماند کوچک‌تری در منطقه HAZ طرف فولاد فریتی با لایه آلیاژی نسبت به حالتی که فولاد فریتی بدون لایه بود، مشاهده شد. 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 تقریبا 280 MPa بود، مشاهده شد. کریم‌نیا و ستاری‌فر [9] به بررسی اثر پارامترهای مؤثر بر تنش‌های پسماند ناشی از جوش محیطی استوانه‌های جدار نازک از جنس آلیاژ آلومینیوم سری 5000 پرداختند. در ادامه به مهم‌ترین نتایج حاصل از این پژوهش پرداختیم. افزایش قطر خارجی، ضخامت، نرخ انرژی ورودی و استحکام تسلیم ماده باعث افزایش تنش پسماند محیطی و محوری می‌شود. عوامل خطی طول استوانه، تعداد خال جوش و ترتیب جوش‌کاری اثر معنی‌داری روی روی بیشینه تنش پسماند محیطی و محوری ندارد. هم‌چنین اثر قطر خارجی بر روی تنش پسماند محوری و محیطی یکسان ولی اثر عوامل ضخامت و نرخ انرژی ورودی بر روی تنش پسماند محوری بترتیب در حدود سه برابر و دو برابر اثر آنها بر روی تنش پسماند محیطی است.

با این حال تحقیقات بسیار محدودی اثر پارامتر هندسه اتصال جوش و پارامترهای فرایند جوش‌کاری را بر اندازه و توزیع تنش‌های پسماند در نظر گرفته‌اند.

در این مقاله لوله‌های غیرهمجنس از فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ‌نزن A240 TP304 بوسیله جوش‌کاری چند پاسه با استفاده از شبیه‌سازی سه بعدی المان محدود مدل‌سازی شده و توزیع تنش پسماند بدست آمده است. نتایج عددی بدست آمده با استفاده از اندازه‌گیری تنش پسماند، به روش سوراخکاری تایید شد. با هدف کاهش تنش‌های پسماند جوش‌کاری از طریق انتخاب پارامترها و شکل مناسب اتصال، اثر پارامترهای هندسی ضخامت دیواره، گشودگی ریشه و زاویه شیار، روی اندازه و توزیع تنش

[1] Heat Affected Zone

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

پسماند مورد بررسی قرار گرفت.

2- بررسی‌های تجربی

در مطالعه حاضر، تنش‌های پسماند در یک اتصال غیرهمجنس با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ 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 لوله با مشخصات هندسی مشابه شامل: قطر اسمی 8 اینچ، قطر خارجی 219.1 میلی‌متر، ضخامت 8.18 میلی‌متر و طول 220 میلی‌متر تهیه شدند. جهت بررسی اتصال غیرهمجنس از دو نوع فولاد زنگ‌نزن A240- TP304 و فولاد کربنی A106-B استفاده شده است. ریزساختار اولیه فولاد زنگ‌نزن TP304، آستنیت بوده و در حین جوش‌کاری تبدیل فازی نداشته است، اما در طرف فولاد کربنی تبدیل فازی مارتنزیتی صورت خواهد گرفت.

لوله‌های آماده شده جهت جوش‌کاری با هندسه لبه‌های پخ به‌صورت V شکل بصورت شماتیک در شکل 1 نشان داده شده‌اند.

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

2-2- اندازه‌گیری تنش‌های پسماند

در این بررسی، تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه‌گیری شدند، که بعنوان یک روش استاندارد در استاندارد ASTM E837 معرفی شده است [10]. اندازه‌گیری تنش پسماند در اتصال مورد نظر در یازده نقطه، یک نقطه در مرکز جوش و پنج نقطه متقارن در دو طرف اتصال انجام گرفت. کرنش‌سنج‌ها روی سطح خارجی لوله‌ها چسبانده شدند.

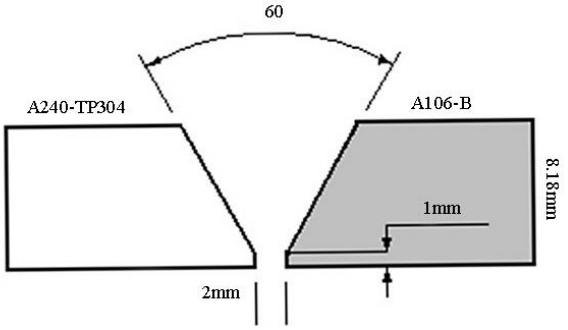

Fig. 1 Schematic view of the specimen used in this experiment

شکل 1 شماتیکی از لوله‌های آماده شده جهت جوش‌کاری در این آزمایش

جدول 1 پارامترهای فرایند جوش‌کاری

Table 1 List of the welding process parameters.

شماره پاس	ولتاژ (V)	شدت جریان (A)	فیلر	روش جوش‌کاری	سرعت جوش‌کاری (mm/s)
1	9	95±5	ER 308L	GTAW	0.55
2	27-28	115±5	E308L-16	SMAW	3.4-4.1
3	25-28	145±5	E308L-16	SMAW	2.7-2.8

سوراخکاری با سرعت بالا برای سوراخ کردن نقطه مرکزی بین کرنش‌سنج‌ها انجام گرفت و کرنش‌های آزاد شده در حین سوراخکاری اندازه‌گیری شدند. سپس تنش‌های پسماند اصلی در قطعات، با جایگذاری کرنش‌های آزاد شده در روابط (1) و (2)، محاسبه شدند:

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

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

که در آن ε_3 و ε_2 و ε_1 کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها هستند، A و B ضرایب وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه می‌باشند. شکل 2 تنش‌های پسماند اندازه‌گیری شده بوسیله روش کرنش‌سنجی سوراخ را نشان می‌دهد [10]. برای جلوگیری از تأثیر تنش‌های مربوط به نقاط شروع و پایان جوش‌کاری قوس الکتریکی در محاسبات تنش پسماند، اندازه‌گیری‌ها در دورترین نقاط از محل اتصال دو لوله انجام گرفته است.

3- شبیه سازی المان محدود جوش

در مطالعه حاضر، روش المان محدود برای اندازه‌گیری توزیع درجه حرارت در حین فرایند جوش‌کاری و هم‌چنین توزیع تنش پسماند در اتصال جوش مورد نظر استفاده شده است.

برای تحلیل تنش‌های پسماند از یک مدل سه بعدی کامل حرارتی و مدل هندسی با تقارن محوری[1] مکانیکی و از روش مدل‌سازی غیرکوپل برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی-حرارتی قطعات بهم جوش خورده، استفاده شده است. بنابراین جهت مشاهده پیشینه حرارتی فرایند جوش‌کاری، 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. جهت به‌روز کردن رفتار مدل مکانیکی قبل از اینکه نموی کوتاه[2] بعدی اضافه شود، تنش‌های محاسبه شده در هر نمو کوتاه، به گره‌ها اضافه شدند. به‌دلیل غیرخطی بودن تحلیل مکانیکی فرایند جوش‌کاری، از روش نیوتن-رافسون استفاده شد. خواص وابسته به دما در فلزات پایه در شکل 3 ارائه شده است. در مطالعه حاضر جهت شبیه‌سازی پرشدن فلز جوش در حین جوش‌کاری از روش تولد و مرگ المان‌ها استفاده

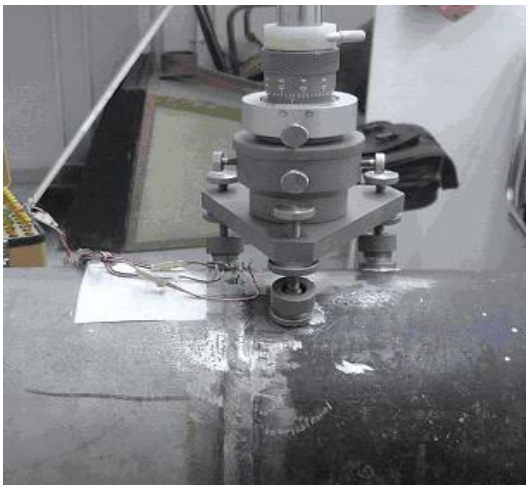

Fig. 2 Residual stress measurement by the hole drilling technique

شکل 2 اندازه گیری تنش پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ

[1] Axisymmetric
[2] Increment

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

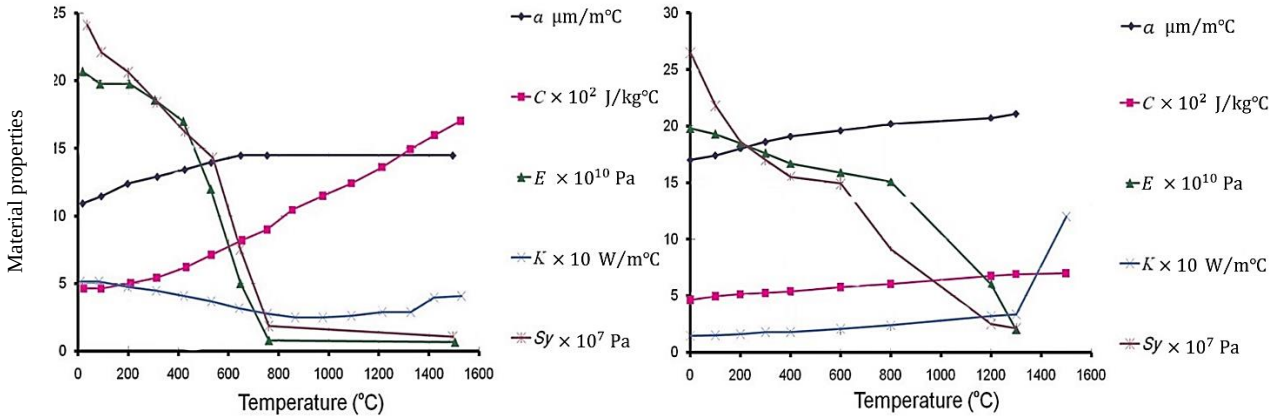

Fig. 3 Material properties of A106-B carbon steel and A240 TP 304 stainless steel [11]

شکل 3 خواص فولاد کربنی A106-B و فولاد زنگ‌نزن A240 TP 304 [11]

شده است. در این روش، المان‌های اولیه فلز پرکننده با اعمال یک ضریب خیلی کوچک به ماتریس سفتی‌شان، غیر فعال می‌شوند. المان‌های غیر فعال شده دوباره در حین جوش‌کاری با حرکت منبع حرارت جوش‌کاری و به‌صورت 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 مدل‌سازی در شکل 4 نشان داده شده است.

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 روابط انتقال حرارت گذرا (3) در این فرایند بدست می‌آید [12]:

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

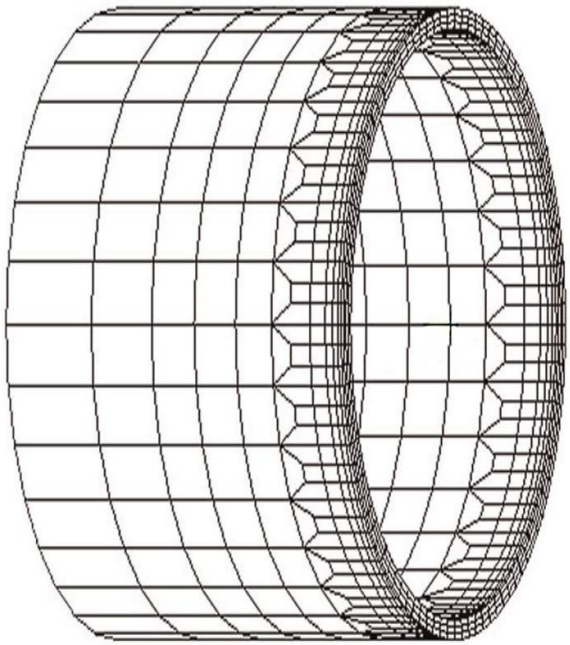

Fig. 4 Half of the finite element meshes for the welded pipes

شکل 4 نصف مش‌های المان محدود برای لوله‌های جوش داده شده

که در آن $\vec{q}$، t، T و Q به‌ترتیب بردار شار حرارتی، زمان، دما و نرخ تولید حرارت داخلی می‌باشند. هم‌چنین ρ و c به‌ترتیب 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 جوش‌کاری قوس الکتریکی، توزیع حرارتی دو بیضی‌گون پیشنهاد شده توسط گلداک، استفاده شده است.

توزیع منبع حرارتی گلداک که در شکل 5 نشان داده شده است، توسط معادلات (4) و (5) بیان می شود [13,12]:

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

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

معادله‌های (4) و (5) به‌ترتیب 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 جوش‌کاری است که می‌توان آن را از اطلاعات فرایند جوش‌کاری تجربی بدست آورد. اگر ابعاد سطح مقطع حوضچه‌ی 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 می‌باشد [13]. پیشنهادات مذکور در این مقاله استفاده شدند و جهت مدل کردن حرکت منبع حرارتی یک زیربرنامه در مدل المان محدود نوشته شد.

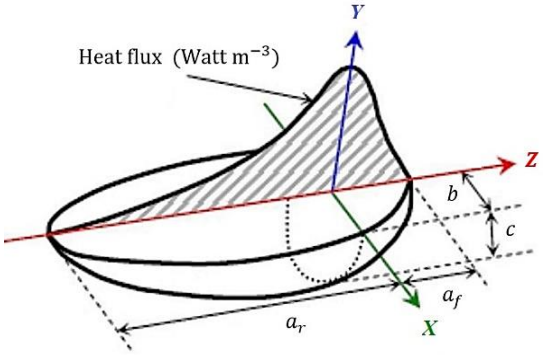

Fig. 5 Double ellipsoid heat source configuration

شکل 5 ابعاد مقطعی منبع حرارتی دو بیضی‌گون

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

ابعاد مقطع منبع حرارتی جوش‌کاری که با a و b و c نامگذاری شده‌اند، در شکل 5 نشان داده شده است.

پارامترهای جوش‌کاری استفاده شده در این تحلیل که مبتنی بر داده‌های اندازه‌گیری‌شده تجربی می‌باشند، در جدول 1 ارائه شده است. انتقال حرارت صورت گرفته با محیط در طول فرایند جوش‌کاری، بصورت تابشی و همرفت در نظر گرفته شده است که ضریب انتقال حرارت کل α_h بصورت فرمول‌های (6) و (7) قابل بیان است [12,11]:

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

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

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

ضریب هدایت حرارتی ناحیه ذوب جهت شبیه‌سازی 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 شبیه‌سازی المان محدود استفاده شد [15]. نوع المانی که برای مدل‌سازی 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 19392 المان Solid70 و 23400 گره وجود دارد.

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 کویستینن-ماربورگر بدست آمد [16]. تبدیل مورد نظر در تحلیل مکانیکی با استفاده از یک زیر برنامه توسعه یافته در این مطالعه بررسی شد [17].

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

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].

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.

با توجه به تقارن هندسه در اتصال لوله هم‌جنس، فقط نیمی از اتصال جوش مدل‌سازی شد و شرایط مرزی متقارن در سطح اتصال جوش در نظر گرفته شد و برای مدل اتصال غیرهمجنس هر دو سمت اتصال بطور کامل مدل شدند. بعلت اینکه نیروها و تنش‌های پسماند داخلی در تعادل هستند، نیازی به استفاده از هیچ قید و شرایط مرزی خارجی در مدل نیست و تنها یک گره جهت جلوگیری از حرکت صلب، ثابت شد.

3-3- تایید المان محدود

برای تأیید صحت مدل‌سازی المان محدود انجام شده، اتصال غیرهمجنس جوش داده شده که قبلا شرح داده شد، آماده گردید و تنش‌های پسماند با روش کرنش‌سنجی سوراخ اندازه‌گیری شد. هم‌چنین توزیع تنش پسماند در اتصال جوش داده شده غیرهمجنس با استفاده از شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شد. نتایج المان محدود لوله‌های جوش داده شده غیرهمجنس که در این مطالعه بدست آمد، با داده‌های اندازه‌گیری شده مقایسه شد. تنش‌های پسماند محیطی و محوری که با استفاده از روش کرنش‌سنجی سوراخ در نمونه مورد نظر اندازه‌گیری شده‌اند، به ترتیب در شکل‌های 6 و 7 نشان داده شده است.

بین نتایج عددی و تجربی ارتباط خوبی مشاهده شد. توزیع نامتقارن تنش پسماند بدلیل تفاوت در خواص مواد، در هر طرف از اتصال جوش غیرهمجنس مشاهده شد. می‌توان نتیجه گرفت مدل المان محدود توسعه داده شده، پیش‌بینی قابل اطمینانی از تنش‌های پسماند 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 ضخامت دیواره

تنش‌های پسماند حاصل از جوش چند پاسه اتصالات غیرهمجنس برای لوله‌هایی با چهار ضخامت دیواره مختلف اندازه‌گیری شد که نتایج در جدول 2

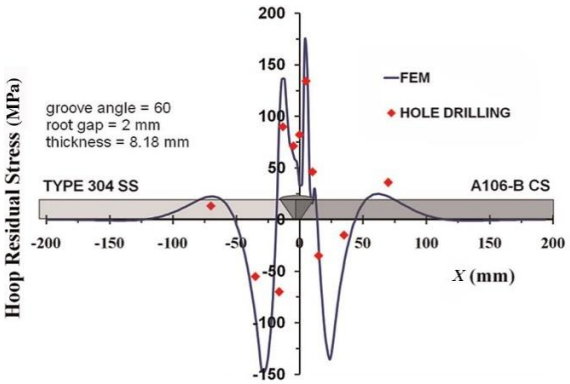

Fig. 6 Hoop residual stresses on the outer surface of pipes in axial direction

شکل 6 تنش‌های پسماند محیطی در سطح خارجی لوله‌ها در جهت محوری

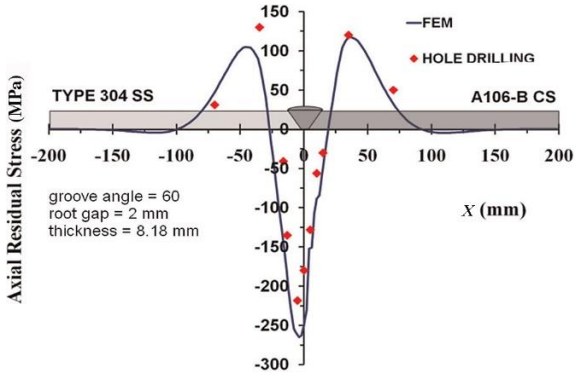

Fig. 7 Axial residual stresses on the outer surface of pipes in the axial direction

شکل 7 تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی لوله‌ها در جهت محوری

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

جدول 2 ضخامت‌های دیواره لوله در آنالیز عددی

Table 2 Pipe wall thicknesses used in FE analysis.

شماره قطعه	استاندارد	قطر خارجی (mm)	اندازه اسمی لوله (in)	ضخامت دیواره (mm)
1	SCH.20	219.1	8	6.35
2	SCH.40s	219.1	8	8.18
3	SCH.80	219.1	8	12.70
4	SCH.100	219.1	8	15.09

ارائه شده است. همه لوله‌ها قطر اسمی یکسان اما ضخامت متفاوت دارند. تحلیل المان محدود در همه نمونه‌ها با استفاده از مدلی که قبلا شرح داده شد، انجام گرفته است. از آنجا که محدوده ضخامت مدل‌ها متنوع است، اندازه المان در راستای ضخامت در هر مدل تغییر داده شد تا اندازه شبکه یکسانی برای تمامی مدل‌ها حاصل شود. با توجه به ضخامت‌های مختلف لوله‌ها در هر مدل، پارامترهای جوش‌کاری مانند جریان، ولتاژ و سرعت حرکت الکترود ثابت درنظرگرفته نشدند.

برای شبیه‌سازی فرایند جوش‌کاری لوله‌های با ضخامت مختلف در سه پاس، حرارت ورودی هر پاس متناسب با حجم پاس در نظر گرفته شد. حرارت ورودی در نمونه تجربی برای هر پاس با استفاده از پارامترهای جوش‌کاری اندازه‌گیری شده و فهرست شده در جدول 1 و معادله شماره (8) محاسبه شد.

$$Q = \eta UI / v \tag{8}$$

که **η** ضریب راندمان قوس، U ولتاژ قوس، I شدت جریان جوش‌کاری و **v** سرعت جوش‌کاری است. ضریب راندمان برای فرایند جوش‌کاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ آرگون، 0.6 و برای فرایند جوش‌کاری الکترود دستی، 0.7 درنظرگرفته شد.

شکل 8 تنش‌های پسماند محوری در سطح داخلی چهار لوله مختلف مورد استفاده در این مطالعه را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که بطور کلی، نزدیک خط جوش برای همه نمونه‌ها، تنش‌های پسماند کششی بزرگ مشاهده می‌شود. تنش‌های پسماند کششی محوری در نقاط دور از خط جوش کاهش یافته و بعلت ماهیت خود تعادلی به تنش‌های پسماند فشاری تبدیل شدند.

در شکل 8 مشاهده می‌شود که افزایش ضخامت لوله اثر قابل توجهی بر تنش بیشینه در طرف فولاد کربنی ندارد اما حداکثر تنش در طرف فولاد زنگ‌نزن با افزایش ضخامت دیواره کاهش می‌یابد. تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی با افزایش ضخامت دیواره بخصوص در طرف فولاد کربنی افزایش می‌یابد. این تنش‌ها نتیجه انقباض محیطی بعد از انجماد قطعات جوش داده شده به هم هستند که با پروفایل خمش در سراسر ضخامت لوله مطابقت دارد.

همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است، حداکثر تنش‌های فشاری از 100- مگاپاسکال در ضخامت 6.35 میلی‌متر تا 150- مگاپاسکال در ضخامت 15 میلی‌متر در طرف فولاد کربنی تغییر می‌کند.

علاوه بر این، لوله های ضخیم‌تر، توزیع تنش‌های پسماند فشاری محوری وسیع‌تری دارند.در طرف فولاد کربنی، تنش پسماند فشاری به بزرگی 60- مگاپاسکل در فاصله 50 میلی‌متر از مرکز جوش لوله‌های با ضخامت 6.35 میلی‌متر ایجاد شدند، در حالیکه در لوله‌هایی با ضخامت 15 میلی‌متر این تنش‌ها در فاصله 80 میلی‌متری از مرکز جوش مشاهده می‌شوند.

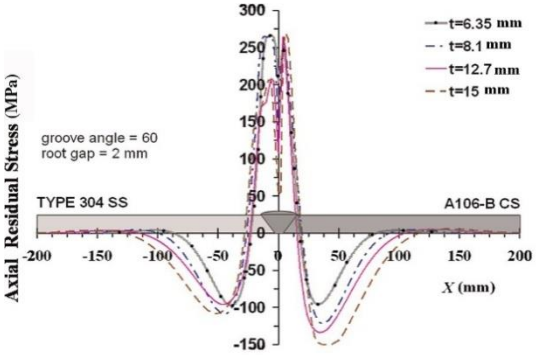

Fig. 8 Axial residual stress on the inner surface for joints with different wall thicknesses

شکل 8 تنش پسماند محوری در سطح داخلی برای اتصالات با ضخامت‌های مختلف

در طرف فولاد زنگ‌نزن با ضخامت‌های کم، تنش‌های پسماند محوری حول منطقه جوش ایجاد می‌شوند. این تنش در سطوح داخلی و خارجی در نتیجه انقباض محیطی بعد از انجماد قطعات جوش داده شده به هم هستند که با پروفایل خمش در سراسر ضخامت لوله مطابقت دارد. مشاهده شد که تطابق خوبی بین نتایج المان محدود و نتایج تجربی بدست آمده توسط دنگ [12] وجود دارد.

توزیع تنش پسماند محیطی روی سطح داخلی اتصال غیرهمجنس در شکل 9 نشان داده شده است. هر چند که برای تنش‌های محیطی نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود اما مقادیر حداکثر تنش پسماند محیطی از تنش محوری بیشتر است. هم‌چنین مشاهده شد که خواص مواد مختلف در دو طرف اتصال باعث توزیع نامتقارن تنش‌های محیطی در اتصال جوش غیر-همجنس می‌شود. همان‌طور که در شکل 9 نشان داده شده است، حداکثر تنش‌های کششی محیطی با افزایش ضخامت دیواره لوله تغییرات کمی دارد، اما تنش‌های فشاری محیطی در سطح داخلی با افزایش ضخامت دیواره لوله، افزایش می‌یابد.

شکل 10 تنش‌های پسماند محوری در سطح خارجی اتصالات غیرهمجنس در طول راستای محوری را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که توزیع تنش‌های محوری در سطح خارجی تقریباً معکوس توزیع تنش‌های محوری در سطح داخلی هستند. در جوش‌کاری لوله ها ترکیب تنش‌های محوری و محیطی به گونه‌ای است که منطقه جوش شده متمایل به خمش به سمت داخل است. از این رو با بررسی المانی در سطح خارجی لوله از نظر تعادل نیرویی، تنش‌های حاصله نزدیک خط جوش فشاری و المان‌های داخلی تحت کشش خواهند بود این موضوع در منابع نیز به همین شکل مشاهده و گزارش شده است [19]. هم‌چنین مشاهده می‌شود در سطح خارجی طرف فولاد زنگ‌نزن ضخامت دیواره لوله اثر ناچیزی بر حداکثر تنش‌های پسماند کششی محوری دارد. البته، در طرف فولاد کربنی تنش‌های پسماند کششی بزرگ‌تری برای لوله‌های ضخیم مشاهده می‌شود. در این نمونه، حداکثر تنش-های پسماند محوری از 85 مگاپاسکال در ضخامت 6.35 میلی‌متر تا 150 مگاپاسکال در ضخامت 15 میلی‌متر متغیر است. علاوه بر این، زمانیکه ضخامت دیواره لوله افزایش پیدا می‌کند، توزیع وسیع‌تری از تنش پسماند مشاهده می‌شود. بزرگ بودن تنش‌های محوری کششی در طرف فولاد کربنی برای لوله‌های ضخیم احتمالاً به دلیل بالا رفتن نرخ سرد شدن قطعه در ضخامت‌های بیشتر و وارد شدن نیروهای بزرگ‌تر بعلت انقباض موضعی ناشی از جوش است. همچنین همان‌گونه که در شکل 3 عنوان شد، فولاد کربنی

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

زودتر از فولاد زنگ نزن دچار تسلیم ناشی از کاهش استحکام در دماهای بالا شده و تغییر شکل پلاستیک شدیدتر موجب افزایش بیشتر تنش پسماند در بخش فولاد کربنی می‌گردد.

در همه‌ی نمونه‌ها، در خط مرکزی جوش تنش‌های پسماند محوری فشاری به بزرگی تقریباً 90 تا 100 درصد استحکام تسلیم قطعات بهم جوش خورده حاصل شد، که با تغییر در ضخامت دیواره لوله تغییر محسوسی نمی‌کند.

4-2- اثر زاویه شیار جوش

در این پژوهش، از یک شیار V شکل با زوایای 45 و 70 و 90 درجه که متداول‌ترین نوع شکل شیار است، استفاده شد. سایر پارامترهای هندسی و جوش‌کاری در این تحلیل ثابت باقی ماندند.

در شکل‌های 11 و 12، توزیع تنش پسماند محوری اتصالات غیرهمجنس به ترتیب در سطوح داخلی و خارجی لوله‌ها نشان داده شده است. به وضوح مشاهده می‌شود که در سطوح داخلی و خارجی اتصال جوش، زاویه شیار روی تنش‌های پسماند محیطی اثر قابل توجه و مهمی ندارد. در روند مشاهده شده تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده با نتایج گزارش شده توسط ستاری‌فر و فراهانی [19] مشاهده می‌شود.

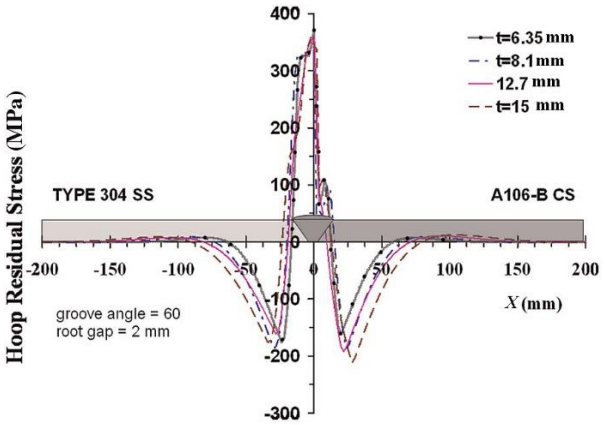

Fig. 9 Hoop residual stress on the inner surface for joints with different wall thicknesses

شکل 9 تنش پسماند محیطی در سطح داخلی برای اتصالات با ضخامت‌های مختلف

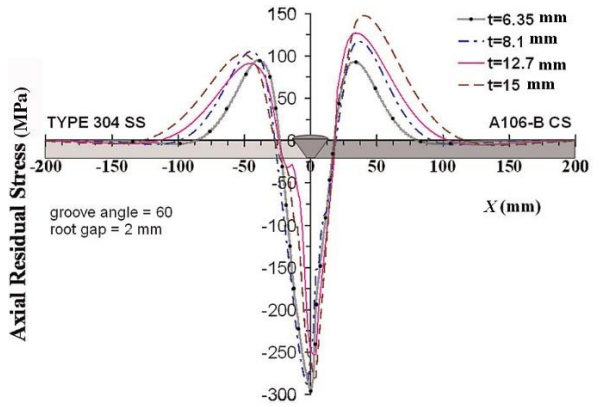

Fig. 10 Axial residual stresses on the outer surface for joints with different wall thicknesses

شکل 10 تنش‌پسماند محوری در سطح خارجی برای اتصالات با ضخامت‌های مختلف

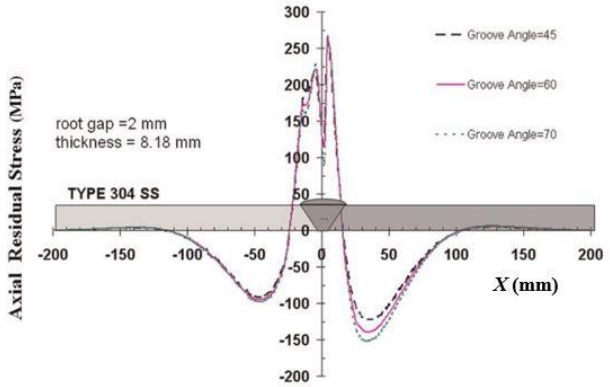

Fig. 11 Axial residual stresses on the inner surface for joints with different weld groove angles

شکل 11 تنش‌پسماند محوری در سطح داخلی برای اتصالات با زاویه شیار جوش مختلف

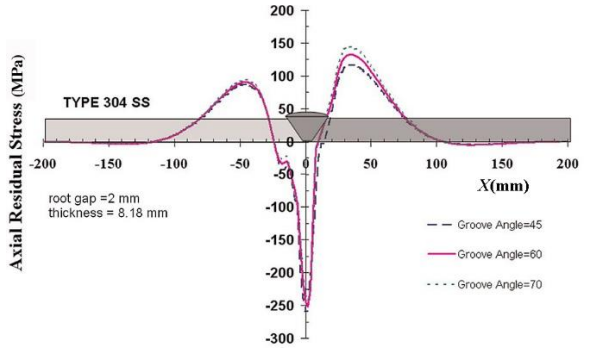

Fig. 12 Axial residual stresses on the outer surface for joints with different weld groove angles

شکل 12 تنش‌پسماند محوری در سطح خارجی برای اتصالات با زاویه شیار جوش مختلف

افزایش زاویه شیار جوش، منجر به تنش‌های پسماند فشاری بیشتری در طرف فولاد کربنی می‌شود، اما اثر خیلی کمی بر تنش‌های محوری طرف فولاد زنگ‌نزن دارد.

در سطح خارجی اتصالات غیرهمجنس، یک روند معکوس در مقایسه با سطح داخلی مشاهده می‌شود. با افزایش زاویه شیار جوش، تنش‌های پسماند کششی در طرف فولاد کربنی افزایش می‌یابد اما در طرف فولاد زنگ‌نزن هیچ تغییری نمی‌کند.

4-3- اثر دهانه ریشه

در این بخش، به منظور مطالعه اثر گشودگی ریشه بر تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی، چهار فاصله گشودگی ریشه (8 و 6 و 4 و 2 میلی‌متر) بررسی شده است.

توزیع تنش پسماند محوری در سطوح داخلی و خارجی لوله‌ها برای فواصل مذکور در شکل‌های 13 و 14 نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود که فاصله باز ریشه اثر ناچیزی بر تنش‌های پسماند محیطی دارد. با افزایش گشودگی ریشه، تغییرات قابل توجهی در طرف فولاد زنگ‌نزن مشاهده نمی‌شود. با این حال افزایش گشودگی ریشه در طرف فولاد کربنی، تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش های پسماند محوری کششی در سطح خارجی را افزایش داده است.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

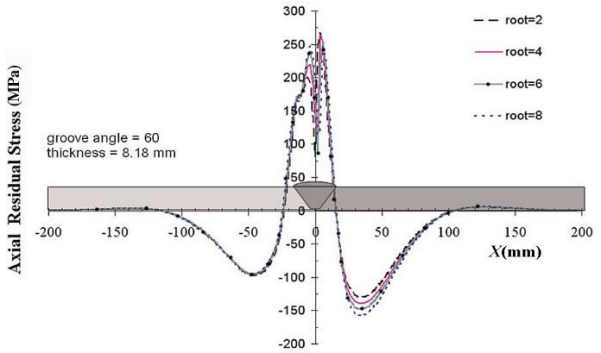

Fig. 13 Axial residual stresses on the inner surface for joints with different root openings

شکل 13 تنش‌پسماند محوری در سطح داخلی برای اتصالات با گشودگی ریشه مختلف

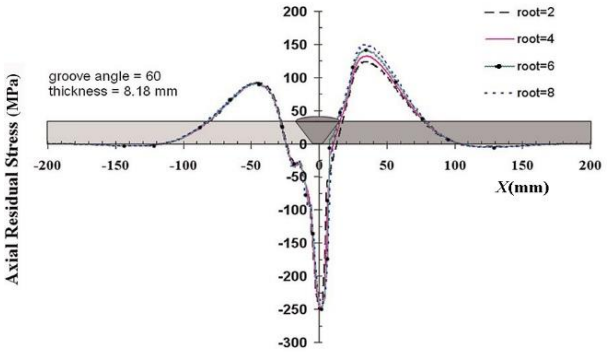

Fig. 14 Axial residual stresses on the outer surface for joints with different root opening distances

شکل 14 تنش‌پسماند محوری در سطح خارجی برای اتصالات با گشودگی ریشه مختلف

بیشتر شدن اندازه تنش‌های پسماند در سطوح داخلی و خارجی بدلیل افزایش حجم جوش و ناحیه متاثر از حرارت با افزایش گشودگی ریشه است. از آنجا که فولاد زنگ‌نزن ضریب هدایت حرارتی کمتری نسبت به فولاد کربنی دارد، این پارامتر در طرف فولاد زنگ‌نزن اثر ناچیز اما در طرف فولاد کربنی اثر محسوس‌تری دارد. از طرفی اختلاف خواص مکانیکی در دمای بالا باعث تسلیم شدن زودتر فولاد کربنی و تغییر شکل پلاستیک شدیدتر در این بخش خواهد بود که این امر باعث افزایش بیشتر تنش‌ها در این بخش می گردد. همچنین به دلیل سریع سرد شدن قسمت ریشه جوش، گرمای پاس‌ها درونی بعنوان پیشگرم برای پاس‌های سطح خارجی لوله عمل کرده و تنش‌ها در سطح بیرونی کمی کوچک‌تر از سطح داخلی خواهد بود.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

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

توزیع تنش پسماند به دست آمده در این پژوهش با داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دنگ که برای لوله‌های سربه‌سر جوش داده شده همجنس از فولاد SUS304 ارائه شد، مقایسه شدند. نتایج المان محدود برای اتصال جوش غیرهمجنس با داده‌های اندازه‌گیری شده بوسیله روش کرنش‌سنجی سوراخ مقایسه شدند. رابطه خوبی بین نتایج المان محدود و داده‌های تجربی مشاهده شد. از این رو روش محاسباتی توسعه یافته در این مطالعه برای پیش‌بینی تنش پسماند در لوله‌های جوش داده شده غیرهمجنس جدار نازک که تبدیل مارتنزیتی دارند، یک روش کارآمد خواهد بود. نتایج زیر را می‌توان بر اساس دستاوردهای این مطالعه بدست آورد.

- تفاوت بین خواص مواد در دو طرف اتصالات غیرهمجنس باعث توزیع تنش‌های پسماند نامتقارن می‌شود.
- با افزایش ضخامت لوله، تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح داخلی اتصالات غیرهمجنس در طرف فولاد زنگ‌نزن کاهش یافت، اما در طرف فولاد کربنی تغییر اندکی مشاهده شد.
- با افزایش ضخامت دیواره لوله به‌خصوص در طرف فولاد کربنی تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی افزایش یافتند.
- با افزایش ضخامت دیواره لوله تنش‌های محیطی فشاری در سطح داخلی افزایش یافتند.
- زاویه شیار جوش و فاصله باز ریشه اثر قابل توجهی روی تنش‌های پسماند محیطی در هیچ کدام از سطح داخلی و خارجی اتصال جوش ندارند.
- افزایش زاویه شیار جوش و فاصله باز ریشه تنها در طرف فولاد کربنی منجر به بالا رفتن تنش‌های پسماند محوری فشاری در سطح داخلی و تنش‌های پسماند محوری کششی در سطح خارجی می‌شوند.

6- فهرست علایم

A, B	ضرایب وابسته به قطر سوراخ و خواص مکانیکی فلز پایه
a, b, c	مقاطع منبع حرارتی جوش‌کاری
c	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg.°C)
f	کسر حرارت ورودی
I	شدت جریان الکتریکی (A)
Q	حرارت ورودی (Wm^{-2})
$\vec{q}$	بردار شار حرارتی
q	منبع حرارت حجمی ($Jm^{-3}s^{-1}$)
T	دما (°C)
t	زمان (s)
U	ولتاژ قوس (V)
v	سرعت فرایند جوش‌کاری (ms^{-1})

علائم یونانی

α	ضریب انتقال حرارت (Wm^{-2})
∇	گرادیان
ε	کرنش
ρ	چگالی (kgm^{-3})
σ	تنش پسماند (MPa)
η	ضریب راندمان قوس الکتریکی

زیرنویس‌ها

f	جلو
h	حرارت
r	عقب
max	حداکثر
min	حداقل

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]

7- مراجع

[1] T. Tso-Liang, C. Peng-Hsiang, T Wen-Cheng, Effect of welding sequences on residual stresses, *Computers and Structures*, Vol. 8, No. 5, pp. 273–286, 2003.

[2] A. Joseph, K. Raib-Sanjai, T. Jayakumara, N. Murugan, Evaluation of residual stresses in dissimilar weld joints, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 82, No. 9, pp. 700–705, 2005.

[3] C. Peng-Hsiang, T. Tso-Liang. Numerical and experimental investigations on the residual stresses of the buttweld joints, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 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, No. 2, pp. 299–305, 1984.

[5] J. Goldak, Modeling thermal stresses and distortions in welds, *Ohio: ASM International*, pp. 71–82, 1990.

[6] M. Mochizuki, M. Hayashi, T. Hattori, Numerical analysis of welding residual stress and its verification using neutron diffraction measurement, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 122, No. 1, pp. 98–104, 2000.

[7] S. Nahkodchi, S. Akbari Iraj, A. Skokuhfar, 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, No. 9, pp. 81–89, 2014. (In Persian فارسی)

[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, No. 11, pp. 769–776, 2009.

[9] 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)

[10] ASTM E837, Standard test method for determining residual stress by the hole drilling strain gauge method, 1995.

[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, No. 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 Materials Science*, Vol. 37, No. 1, pp. 269–277, 2006.

[13] K. Goldak, A. Chakaravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical Transaction B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299–305, 1984.

[14] L. Fenggui, Modeling and finite element analysis on GTAW arc and weld pool, *Computational Materials Science*, Vol. 29, No. 2, pp. 371–378, 2004.

[15] ANSYS User's manual, V10, Swanson analysis system Inc, 2004.

[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, No. 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, No. 1, pp. 385–388, 2006.

[19] I. Sattari-Far, M. R. Farahani, Effect of the weld groove shape and pass number on residual stresses in butt-welded pipes, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, No. 11, pp. 723-731, 2009.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.7.54.6]