مجله مهندسی مکانیک مدرس، بهمن 1394، دوره 15، شماره 11، ص‌ص 105-116

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه اثر هندسه طرح اتصال بر توزیع تنش پسماند و دما در قطعات جوشکاری شده از جنس فولاد زنگ نزن

ابراهیم ناطقی [1]، عبد الحمید گرجی ولوکلا [2*]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد واحد ساری، ساری
2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل
* بابل، صندوق پستی 71167- 47148، hamidgorji@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 22 مرداد 1394
پذیرش: 25 شهریور 1394
ارائه در سایت: 21 مهر 1394

کلید واژگان:
طرح اتصال
تنش پسماند
کرنش‌سنجی سوراخ
المان محدود
روش امواج ماورای صوت عرضی

چکیده

در جوشکاری چند پاسه شیاری، توزیع و مقدار تنش‌های پسماند و اعوجاج حاصل از آن به عوامل متعددی همچون: پارامترهای وابسته به فرآیند جوشکاری، خواص مکانیکی مواد و قید و بند بستگی دارد. در این پژوهش ابتدا توزیع دمای حاصل از فرآیند جوشکاری سه نمونه با طرح‌های هندسی متفاوت توسط ترموکوپل‌هایی ثبت شده است. هر یک از نمونه‌ها شامل دو ورق با ضخامت یکسان از جنس فولاد زنگ‌نزن A316 می‌باشند که به روش جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود تنگستنی با طرح‌های اتصال گوشه شیاری نیم جناقی و جناقی باشکاف و پیشانی ریشه و نیم جناقی بدون شکاف و پیشانی ریشه براساس یک دستورالعمل رویه جوشکاری، جوش شدند. برای یک نمونه تنش پسماند ایجاد شده ابتدا به روش غیرمخرب امواج ماورای‌صوت عرضی و پس از برش قسمت عمودی (ورق بدون شیار) جهت استقرار دریل دستگاه کرنش‌سنج توسط روش نیمه مخرب کرنش‌سنجی سوراخ اندازه‌گیری شد. برای دو طرح هندسی دیگر جهت جلوگیری از تخریب قطعات فقط از روش ماورای صوت استفاده شده است. سپس هر سه طرح در نرم افزار اجزای محدود سیموفکت ولدینگ مدل‌سازی شده و نتایج حاصل از آن با اندازه‌گیری تجربی دما و تنش پسماند مقایسه شده است. مقایسه نشان می‌دهد مقادیر عددی و اندازه‌گیری تجربی تطابق خوبی با یکدیگر دارند و نتایج مدل‌های المان محدود دارای اعتبار می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییر هندسه طرح اتصال موجب تغییرات قابل توجه در توزیع و مقدار بیشینه تنش پسماند عرضی می‌گردد، ولی اثر چندانی در بیشینه تنش پسماند طولی ندارد.

Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel

Ebrahim Nateghi[1], Abdolhamid Gorji Volukola[2*]

1- Department of Engineerig, Islamic Azad University, Sari, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Nooshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 123456789, Babol, Iran, hamidgorji@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 13 August 2015
Accepted 16 September 2015
Available Online 13 October 2015

Keywords:
Joint Configuration
Residual Stress
Holedrilling
Finite element
Ultrasonic transvers wave method

ABSTRACT

In multi-pass groove welding, residual stress distribution, value and associated distortion are dependent on several factors, including the welding process-dependent parameters, mechanical properties of materials and fixtures. In present study, temperature distribution of three welding processes with different geometric designs are registered by the K type thermocouple. Each of the samples contains the same stainless steel plate A316 thickness that was welded based on welding procedure specification with gas tungsten arc welding method, with groove corner joints single bevel without gap and bevel face, single and double bevel with gap and bevel face. Created residual stress on a sample was initially measured by nondestructive ultrasonic transverse waves method. After cutting the vertical part (plate without groove), for hole drilling device installation purposes, the aforementioned stress was measured by the semi-destructive hole drilling method. While for two other geometrical designs only ultrasonic method has been used to prevent parts from being destroyed. All three aformentioned designs were modeled in Simufact.welding finite element code (FE) and results were compared with experimental temperature and residual stress measurements. The comparison shows that experimental measurements and numerical values match with each other well, highlighting a reasonable validation of finite element models resutls. Current research results show that changing the geometry of the weld configuration has a significant effect on changes in the distribution and maximum value of transvers residual stress, but negligible influence on maximum longitudinal residual stress.

1- مقدمه

تنش‌های پسماند حاصل از جوشکاری و برشکاری به علت گسترش غیریکنواخت حرارتی که سبب به‌وجود آمدن یک گرادیان تنش حرارتی و انبساط و انقباض بر روی قطعه می‌شود، ایجاد می‌گردند. علاوه بر این تفاوت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

E. Nateghi, A. Gorji Volukola, Study on the effect of weld configuration geometry to distribution of residual stress and temperature in the welded parts of stainless steel, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 11, pp. 105-116, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]

خواص مکانیکی اعم از الاستیک و پلاستیک در فلز جوش، فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت نیز می‌تواند موجب تشدید تنش پسماند و اعوجاج گردد. تنش پسماند موجب عدم مونتاژ صحیح و کارکرد مناسب به سبب تغییرات دائمی شکل و ابعاد و کاهش استحکام خستگی، شکست ترد و ترک تنش خوردگی[1] قطعات حاصل از جوشکاری می‌گردد. عوامل متعددی مانند خواص مواد، شدت جریان، ولتاژ، قطر الکترود یا فیلر، مشخصات هندسی طرح اتصال، ترتیب و تعداد پاس‌ها، حالت جوشکاری، دمای پیش‌گرم و بین پاسی، وجود و نوع قید و بند بر تنش‌های پسماند در جوش‌های چند پاسه اثرگذار است [1].

استفاده از مدل‌سازی المان محدود و اعتبارسنجی آن با روش‌های تجربی به منظور پیش‌بینی توزیع دما، تنش پسماند و اعوجاج ناشی از جوشکاری برای طراحی و ساخت قطعات متداول می‌باشد [2-6]. بررسی مقدارهای تنش پسماند قطعات صنعتی به علت ابعاد و وزن بالا و بعضا آثار مخرب برخی آزمون‌ها روی قطعات که سبب هزینه هنگفت بازسازی و تعمیر آن‌ها می‌شود، محدودیت‌هایی دارد. به این منظور از قطعات آزمایشگاهی که شرایط جوشکاری آن‌ها تا حدود زیادی مشابه قطعه اصلی باشد و همچنین مشخصات دما و تنش پسماند مورد نیاز در طراحی قطعه اصلی در مورد آن‌ها قابل اندازه‌گیری باشد، استفاده می‌شود. متناظر کردن نتایج نمونه‌های آزمایشگاهی به قطعه صنعتی جوشکاری شده در شرایط واقعی مرحله نهایی ارزیابی و طراحی قطعات خواهد بود [7]. از سه روش مخرب، نیمه مخرب و غیرمخرب برای اندازه‌گیری تنش پسماند استفاده می‌شود. روش‌های ایجاد شکاف[2] و کانتور[3] از نوع مخرب هستند. کرنش‌سنجی سوراخ[4] روشی نیمه مخرب است. روش‌های انکسار اشعه نوترونی، اشعه ایکس و امواج ماورای صوت غیرمخرب هستند. روش ماورای صوت جهت مقاصد آزمایش‌های کیفتی، بازبینی و اندازه‌گیری به کار می‌رود [8-10]. در این روش یک مولد امواج ماورای صوت را با فرکانس بالا ایجاد کرده و در محیط مورد نظر منتشر می‌کند. این امواج مسیری را طی کرده و توسط یک دریافت کننده که ممکن است همان مولد موج باشد، موج برگشتی دریافت می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان تنش‌های موجود قطعه را در راستاهای گوناگون بررسی نمود [11-14]. طرح اتصال گوشه شیاری در مراحل نصب و مونتاژ نهایی قطعات به صورت گسترده استفاده می‌شود و با توجه به تنش‌های اعمالی در این حالت، اهمیت بررسی تنش پسماند و همچنین اعوجاج دو چندان می‌شود. در پژوهش‌های گذشته اندازه‌گیری تنش پسماند با روش امواج ماورای صوت عمدتا با استفاده از امواج طولی شکسته بحرانی[5] روی اتصالات لب به لب انجام شده است [11-16]. استفاده از حداقل دو پراب که مستلزم عبور از روی خط جوش به منظور اسکن مناطق فلز جوش و متاثر از حرارت می‌باشد و همچنین دسترسی به دو طرف قطعه‌کار برای اندازه‌گیری تنش در کل ضخامت آن در تکنیک امواج طولی ضروری است. همچنین ابعاد پراب‌های موجود از محدودیت‌هایی است که عملا استفاده از این روش را در طرح اتصال گوشه شیاری غیرممکن می‌سازد. در روش کرنش‌سنجی سوراخ که برای اندازه‌گیری تنش پسماند در عمق‌های مختلف به کار می‌رود نیز محدودیت فضای این طرح اتصال مانع نزدیک شدن دریل به خط جوش و نواحی اطراف آن برای سوراخ‌کاری شده و در نتیجه این تکنیک را نیز غیرکاربردی می‌سازد و استفاده از امواج عرضی در روش ماورای صوت را اجتناب ناپذیر می‌کند.

ستاری‌فر و فراهانی اثر شکل شیار و تعداد پاس‌های جوشکاری را روی بیشینه و توزیع تنش پسماند در اتصالات لب به لب لوله‌های فولادی به کمک مدل المان‌محدودی که با روش تجربی کرنش‌سنجی سوراخ اعتبارسنجی شده، بررسی کردند نتایج آن‌ها نشان داد پارامترهای فوق روی مقادیر و توزیع تنش-های پسماند محوری و محیطی اثرگذار است [1]. نخودچی و همکاران توزیع تنش پسماند و دما را در فرآیند جوشکاری چند پاسه ورق‌های فولاد زنگ نزن با ضخامت‌های غیریکسان، به روش عددی المان محدود و روش تجربی کرنش-سنجی سوراخ بررسی کردند نتایج تطابق قابل قبولی را بین روش‌های عددی و تجربی نشان داد [5]. کریم‌نیا و ستاری‌فر اثر عوامل موثر بر تنش پسماند ناشی از جوش محیطی استوانه‌های جدار نازک از جنس آلومینیوم سری 5000 را که با مدل المان محدودی که با روش کرنش‌سنجی سوراخ اعتبارسنجی شده بود، جهت طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتیجه بررسی آن‌ها نشان داد استحکام تسلیم ماده تاثیر گذارترین عامل بر بیشینه تنش پسماند محوری و محیطی است [6]. جوادی و همکاران در پژوهش‌های مختلف تنش پسماند را به کمک روش ماورای صوت امواج طولی شکسته در زاویه بحرانی اول در اتصال جوشی لب به لب لوله‌های غیر هم‌جنس جوشکاری شده با الکترود تنگستنی [12]، لوله‌های هم‌جنس فولاد زنگ نزن جوشکاری شده با روش زیرپودری [13] و ورق‌های هم‌جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده به روش زیرپودری [14] اندازه‌گیری کردند و با مدل المان محدودی که قبلا با روش کرنش‌سنجی سوراخ تائید شده بود، اعتبارسنجی نمودند. در مورد لوله-های غیرهم‌جنس جوشکاری شده با الکترود تنگستنی به این نتیجه رسیدند که انطباق نسبی بین نتایج روش امواج ماورای صوت و المان محدود وجود داشته و بیشترین اختلاف‌ها مربوط به ناحیه متاثر از حرارت است. در مورد لوله‌های هم جنس فولاد زنگ نزن جوشکاری شده با روش زیرپودری نشان داده شد که حداکثر تنش پسماند کششی در جوش پشت کمتر از جوش اصلی است. با بررسی‌های مربوط به ورق‌های هم‌جنس فولاد زنگ نزن آستنیتی جوشکاری شده به روش زیر پودری به این نتیجه رسیدند که؛ به دلیل تفاوت اندک در مشخصات جوشکاری لوله با صفحه مورد استفاده برای اندازه‌گیری ثابت آکستوالاستیک خطای نسبتا بالایی در ارزیابی تنش فلز جوش و ناحیه متاثر از حرارت به وجود آمده است.

صادقی و همکاران [15] توزیع تنش پسماند را با روش آنالیز المان محدود در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصال لب به لب ورق‌های آلومینیومی شبیه‌سازی کردند. صحت نتایج شبیه‌سازی آن‌ها با روش کرنش‌سنجی سوراخ تائید شد. آن‌ها همچنین تنش‌های پسماند را به کمک روش ماورای صوت امواج طولی شکسته اندازه‌گیری کردند و به کمک نتایج آنالیز المان محدود اعتبار نتایج روش ماورای صوت تایید شد. آن‌ها دریافتند با استفاده از پراب‌های فرکانس بالا تطابق بین نتایج ماورای‌صوت و المان‌محدود افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از تنش پسماند مدل المان‌محدود در 2 میلی‌متری از سطح دارای خطای کمتری نسبت به نتایج به دست آمده از روش کرنش‌سنجی سوراخ است. آذری و همکاران [17] تنش پسماند را به کمک روش امواج ماورای صوت عرضی برای ورق‌های غیر-هم‌جنس فولاد زنگ نزن و فولاد کربنی جوشکاری شده سنجیده و با نتایج المان محدود مقایسه کردند. بررسی نشان داد، به علت عدم در نظر گرفتن تغییرات فازی (تشکیل مارتنزیت) در مورد نمونه فولاد کربنی انطباق مناسبی بین نتایج روش ماورای صوت با نتایج مدل المان‌محدود وجود ندارد و در مورد فولاد زنگ نزن یافته‌های روش ماورای صوت انطباق مناسبی با نتایج روش المان محدود دارد.

1- Stress Corrosion Cracking(SCC)
2- Slitting
3- Contour
4- Hole driling
5- Longitudinal critical refracted

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]

واسانتهجرا و همکاران [18] اثر دو فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ مخلوط و خالص را بر توزیع تنش پسماند و اعوجاج ورق‌های فولادی زنگ نزن در سه طرح هندسی اتصال لب به لب شیاری بررسی کردند. آن‌ها برای اندازه‌گیری تنش پسماند از روش امواج ماورای صوت طولی استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در حالتی که طرح اتصال بدون پخ و فرآیند جوشکاری با الکترود تنگستنی و گاز محافظ مخلوط باشد کمترین مقدارهای تنش پسماند کششی، اعوجاج، اندازه دانه و مقدار فریت حاصل خواهد شد.

2- روش تحقیق

در این پژوهش اثر هندسه طرح اتصال بر تنش پسماند اتصال گوشه شیاری سه نمونه جوشکاری شده که در مخازن ذخیره مایعات و مخازن تحت فشار در صنایع غذایی و دریایی و پتروشیمی به کار می‌رود، مورد بررسی قرار گرفت. هر کدام از نمونه‌ها شامل دو پلیت فولادی زنگ نزن آستنیتی A316 با ابعاد 200×200×10و200×300×10 میلی‌متر می‌باشند. نمونه‌ها با طرح‌های اتصال نیم جناقی بدون پیشانی و فاصله ریشه و نیم جناقی و جناقی با پیشانی و فاصله ریشه 1 میلی‌متر و زاویه پخ 45 درجه که در دو پاس با فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با الکترود تنگستنی تحت محافظت گاز آرگون[1] به هم جوش شدند. جوشکاری مطابق یک دستورالعمل که براساس استاندارد انجمن مهندسان مکانیک آمریکا[2] [19] نوشته شده است، انجام شد (جدول 1). جهت سهولت در نگارش، طرح‌های هندسی نیم جناقی بدون شکاف و پیشانی ریشه با نام طرح 1 و نیم جناقی با شکاف و پیشانی ریشه طرح 2 و جناقی با شکاف و پیشانی ریشه به نام طرح 3 شناخته خواهند شد (شکل 1). منظور از محور جوش در این پژوهش، محور X می‌باشد، ابعاد نمونه‌ها مطابق شکل 2 می‌باشد. برای طرح 1 علاوه بر اندازه-گیری تنش با روش ماورای صوت از روش کرنش‌سنجی سوراخ نیز استفاده شده است. جهت جلوگیری از ایجاد آثار مخرب برش قطعه جهت انجام کرنش‌سنجی و آثار نیمه مخرب سوراخ‌کاری پس از آن، روی طرح‌های 2 و 3 کرنش‌سنجی سوراخ انجام نشده و فقط از روش ماورای صوت برای سنجش تنش پسماند استفاده شده است. با توجه به این‌که عدم جفت‌شدگی یکی از عوامل اصلی به‌وجود آمدن خطا در اندازه‌گیری زمان در روش ماورای صوت می‌باشد، لایه رسوب باقی مانده از فرآیند تولید ورق فولاد زنگ نزن از روی آن به کمک سمباده‌زنی بسیار نرم و پرداخت‌کاری به‌گونه‌ای که حداقل برداشت از فلز ورق صورت گیرد، انجام شد [10]. برای صحت‌سنجی نتایج حرارتی مدل المان محدود، دما از ابتدای فرآیند جوشکاری تا 3600 ثانیه پس از آن به کمک چهار ترموکوپل در نقاط مشخص شده برای هر سه طرح اندازه‌گیری می‌شود (شکل 3). اثر هندسه طرح اتصال بر مقدار بیشینه و توزیع تنش پسماند طرح‌ها با استفاده از روش غیرمخرب امواج ماورای صوت و المان محدود بررسی می‌شود. به دلیل این‌که سوراخ‌های روش کرنش‌سنجی اثراتی روی ورق باقی می‌گذارد که موجب اختلال در آزمون ماورای صوت می‌شود، روش ماورای صوت قبل از کرنش‌سنجی در مورد طرح 1 انجام شده است.

3- اندازه‌گیری تغییرات دما برحسب زمان

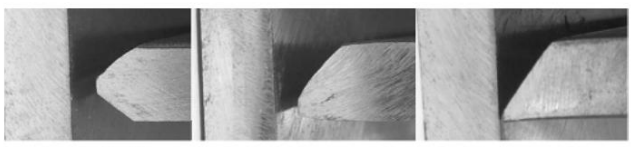
برای اطمینان از درستی عوامل در نظر گرفته شده در بخش حرارتی که ورودی‌های بخش مکانیکی مدل‌سازی المان محدود است، تعیین تغییرات دمای قطعه‌ها براساس زمان بایستی انجام گردد. برای این هدف از ترموکوپل‌های با کارکرد دمایی بالا به همراه یک دستگاه ثبت کننده اطلاعات[3] استفاده می‌شود (در این مورد از ترموکوپل نوع k با غلاف استفاده شد). دستگاه ثبت کننده اطلاعات و محل قرارگیری ترموکوپل‌ها در چهار نقطه روی سطح دو صفحه فولادی در شکل 3 نشان داده شده است.

4- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ

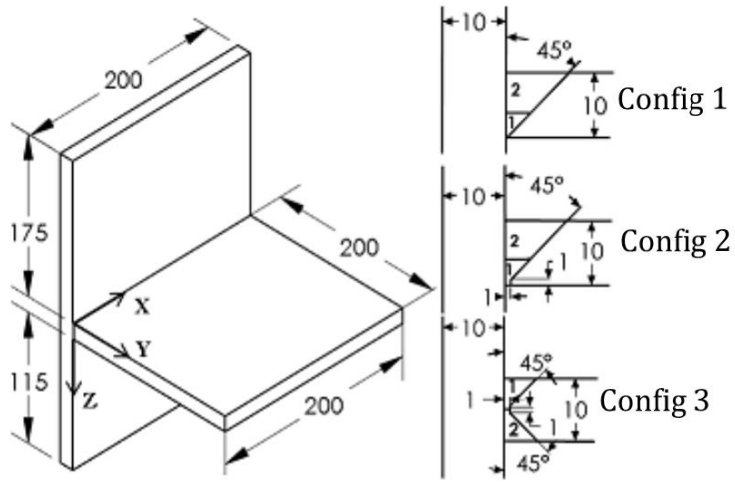
جهت اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند به‌منظور اعتبارسنجی مدل المان - محدود طرح 1 از روش کرنش‌سنجی سوراخ براساس استاندارد شماره ای 837 انجمن تست و مواد آمریکا[4] استفاده شد [20]. کرنش‌سنج مورد استفاده از نوع A بوده و ساخت کمپانی تی‌ام‌ال[5] ژاپن با شماره اف آر اس 11-2[6] می‌باشد. از تکنیک اندازه‌گیری یکنواخت[7] جهت کرنش‌سنجی استفاده می‌شود. در این روش یک سوراخ کوچک با قطر مشخص توسط دریل با سرعت بالا با ابزاری به شکل مخروط برعکس روی سطح قطعه در مرکز کرنش‌سنج با رعایت دستورالعمل‌هایی ایجاد می‌شود (شکل 4). با آزاد شدن تنش‌های اطراف سوراخ، کرنش با حسگرهای اطراف سوراخ سنجیده و ثبت می‌شود. می‌توان در هر مرحله از سوراخ‌کاری تغییرات تنش‌های ماکزیموم و مینیموم و تنش‌های اصلی و زاویه بین آن‌ها را در راستای ضخامت براساس روابط موجود در استاندارد اندازه‌گیری کرد. در این پژوهش کرنش‌سنجی روی صفحه فلزی دارای شیار طرح 1 در سه نقطه انجام شد (شکل 5). جهت دسترسی به مناطق مختلف جوش صفحه بدون شیار در مجاورت پخ برش شد. جهت جلوگیری از اعمال تنش اضافی در هنگام برش‌کاری از اره نواری همراه با خنک‌کاری آب صابون به نحوی که پیشروی ابزار برش در کم‌ترین حالت و سرعت حرکت ابزار بالاترین حالت ممکن باشد (جهت تولید حداقل دما)، استفاده شده است.

جدول 1 دستورالعمل رویه جوشکاری

پارامترجوشکاری	پاس ریشه	پاس پرکن
قطر فیلر (mm)	1.6	2
شدت جریان (A)	90	130
ولتاژ (v)	20	24
سرعت تغذیه ($mm\ s^{-1}$)	5 - 8	8 -10



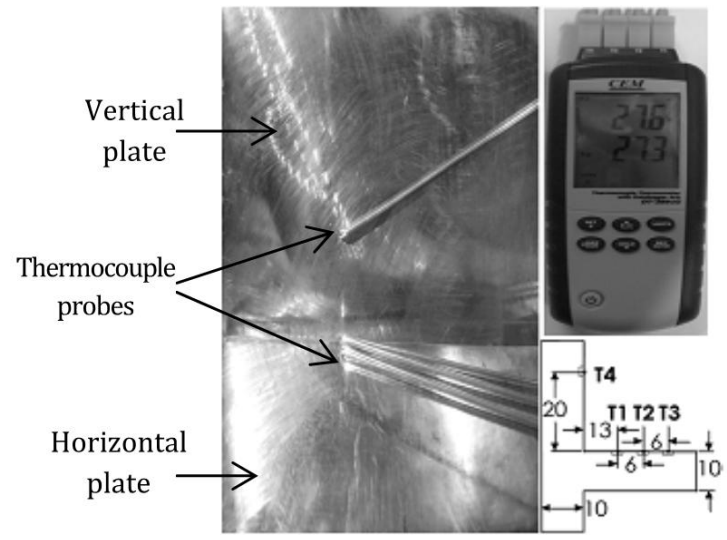
شکل 1 مقاطع نمونه‌های تجربی و روش اتصال آن‌ها



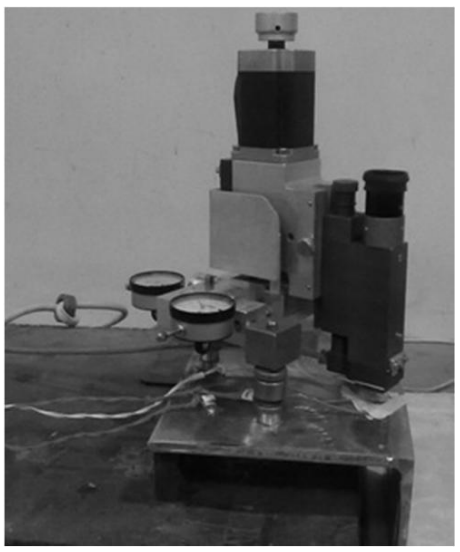
شکل 2 ابعاد نمونه و مقاطع طرح‌های هندسی (ابعاد به میلی‌متر است)

1- Gas Tungsten Arc Welding(GTAW)
2- ASME
3- Data logger
4- ASTM E837
5- TML
6- FRS-2-11
7- Uniform Measurment Method

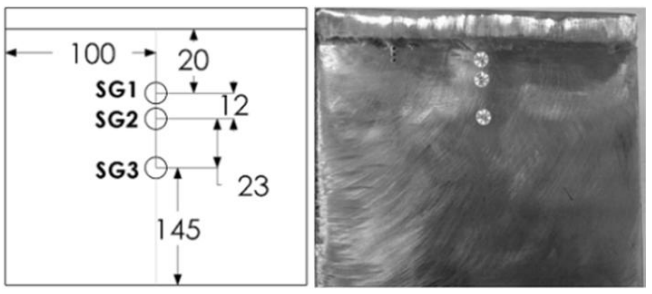
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



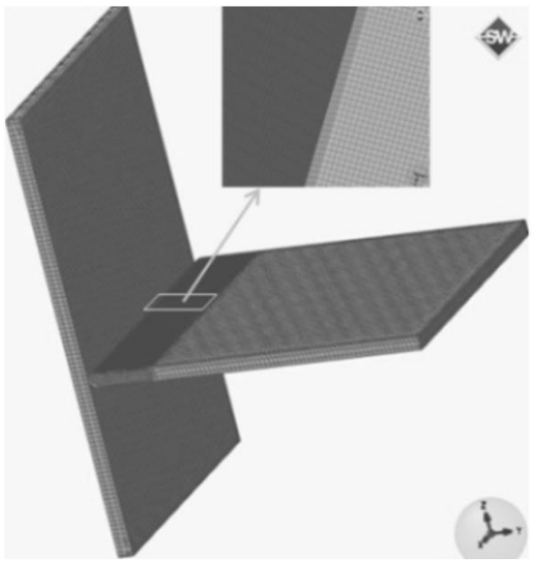
شکل 3 دستگاه ثبت کننده دما و نحوه اتصال ترموکوپل‌ها به صورت تجربی (ابعاد به میلی‌متر است)



شکل 4 استقرار دریل کرنش‌سنجی



شکل 5 اتصال کرنش‌سنج‌ها به ورق دارای شیار طرح 1 (ابعاد به میلی‌متر است)



شکل 6 مش‌بندی المان‌محدود، (بزرگ‌نمایی مش‌بندی در ناحیه مشخص شده)

5- شبیه‌سازی المان محدود فرآیند جوشکاری

برای شبیه‌سازی جوشکاری طرح‌های 1، 2 و3 مطابق شکل 6 مدل سه بعدی در نرم‌افزار سیموفکت‌ولدینگ[1] وارد شده است. فرآیندهای ترمومکانیکال جوشکاری به کمک آنالیز غیرکوپل شبیه‌سازی می‌شوند. در آنالیز غیرکوپل، ابتدا تغییرات دما برحسب زمان تعیین می‌گردد و این نتایج به عنوان بار حرارتی ورودی آنالیز مکانیکال خواهد بود. به علت وجود گرادیان‌های شدید حرارتی در مناطق جوش و متاثر از حرارت، تا ناحیه 25 میلی‌متری محور جوش از المان‌های ریزتری استفاده شده است و در نواحی دورتر از این مناطق به ابعاد المان‌ها افزوده می‌شود (شکل 6). برای تعیین ابعاد مش مناسب از پارامتر دمای حداکثر جوشکاری بر روی مرکز خط جوش استفاده شد. تا زمانی که ابعاد المان‌ها به ترتیب در جهات طول، عرض و ارتفاع 0.7، 1 و 0.8 میلی‌متر انتخاب شد در حالی که تعداد المان‌های طرح‌های1، 2 و3 به ترتیب برابر 51674، 50836 و 49952 بود، دمای حداکثر تغییر بیشتر از 3 درصد نداشت. این ابعاد المان برای هردو آنالیز مکانیکال و حرارتی انتخاب شد. در صورت فعال‌سازی آنالیز مکانیکال، همان مش‌بندی حرارتی به عنوان ورودی آنالیز مکانیکال خواهد بود. علاوه بر این در نمونه‌های آزمایشگاهی از دو خال جوش در اتصال صفحه شیار زده به صفحه بدون شیار و یک گیره نگه‌دارنده در صفحه فولادی بدون شیار استفاده شده است. خال جوش‌ها و گیره نگه‌دارنده مدل‌سازی شده و به عنوان سه جزء به شبیه‌سازی المان محدود وارد شده و تا پایان زمان آنالیز جوشکاری روی سطح قطعه باقی می‌مانند. برعکس المان‌های جوش اصلی که فقط در زمان مربوط به خود فعال می‌شوند، المان‌های خال جوش از ابتدا تا انتها فعال باقی می‌مانند. همچنین المان‌های مربوط به گیره قابل زمان‌بندی برای فعال‌سازی می‌باشد که در این پژوهش مانند المان‌های خال جوش از ابتدا تا انتهای فرآیند فعال است. در این شبیه‌سازی المان‌های هشت نقطه‌ای بریک[2] مورد استفاده قرار گرفت. از حل‌گر نیوتن رافسون تکرار شونده و گام‌های زمانی کاملا مشابه برای هر سه هندسه استفاده شده است.

خواص فولاد زنگ نزن A316 که به عنوان فلز پایه و ER316 به عنوان فلز جوش در حالت جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی است، در شکل 7 نشان داده شده است [21-23]. چگالی و گرمای ذوب و به ترتیب برابر 7966 (kgm^{-3}) ، (Jkg^{-1}) 256400 و محدوده ذوب ماده 1400-1450درجه سانتی‌گراد است که در طول آنالیزهای حرارتی و مکانیکال ثابت می‌باشند.

برای شبیه‌سازی عددی تنش پسماند حاصل از فرآیند جوشکاری باید انتقال حرارت، ارزیابی ریزساختار و تنش حرارتی را با هم در نظر گرفت. عوامل موثر در حرارت ورودی شامل قوس، فعل و انفعالات مواد و دینامیک سیالات در حوضچه مذاب جوش است که در این میان رفتار دینامیکی سیال مذاب بررسی نشده است. از دیدگاه حرارتی مکانیکی، حرارت ورودی می‌تواند به عنوان توزیع انرژی حجمی یا سطحی در نظر گرفته شود، در این صورت اثر جریان سیال که منجر به توزیع یکنواخت دما در منطقه ذوب شده می‌شود، به سادگی از طریق افزایش رسانایی حرارتی که بیش از دمای ذوب گرفته شده، محاسبه می‌شود. انتقال حرارت در مواد جامد به کمک معادله‌های (1)، (2) و (3) توصیف می‌شود:

$$\rho\left(\frac{dH}{dt}\right) - \mathrm{div}(k\nabla T) - Q = 0 \quad (1)$$

$$(k\nabla T)\cdot n = q(T,t)\ on\ \partial\Omega_q \quad (2)$$

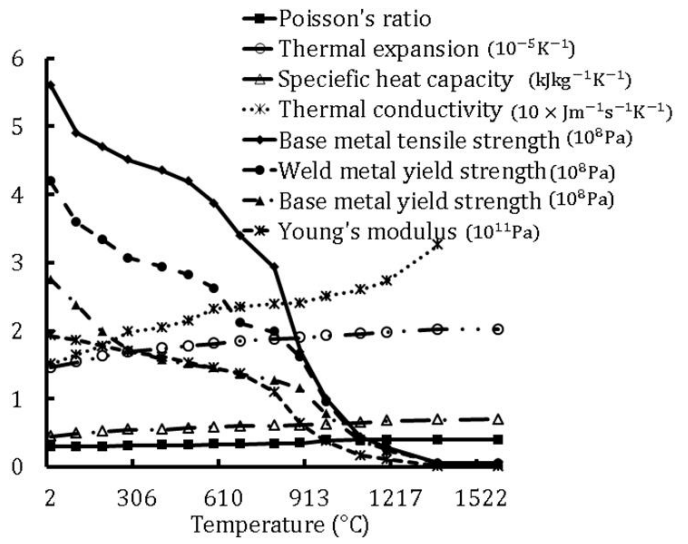
$$T = T_{\mathrm{p}}(t)\ \mathrm{on}\ \partial\Omega_t \quad (3)$$

در معادلات (1)، (2) و (3)، ρ، H، k و T به ترتیب چگالی، آنتالپی، رسانایی حرارتی و دما هستند. Q معرف منبع حرارت داخلی است. n بردار عمود به سمت خارج دامنه $\partial\Omega$ و q چگالی شار گرما است که روی دما و زمان مدل همرفتی تبادل دمایی تکیه دارد و T_{p} یک درجه حرارت معین است. گرمای ورودی توسط منبع حرارت داخلی ارائه شده است. در این مطالعه الگوی منبع حرارت دو بیضی‌گون گلداک استفاده شده است [6] و [24].

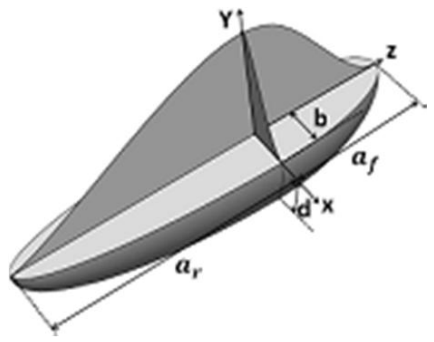
1- Simufact welding

2- Brick

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



شکل 7 خواص متغیر با دمای فولاد زنگ نزن A316 [22]



شکل 8 مدل منبع حرارتی دو بیضی‌گون گلداک [6]

جدول 2 پارامترهای مدل گلداک (پاس ریشه طرح 1)

پارامتر گلداک	مقدار
طول نیم بیضی جلویی (mm)	3.3
طول نیم بیضی عقبی (mm)	5.5
عرض منبع حرارت (mm)	2.5
عمق منبع حرارت (mm)	4

همان‌طور که در شکل 8 نشان داده شده است نیمه جلویی منبع حرارت ربع یک بیضی‌گون است و نیمه پشتی نیز ربع دیگر آن است. معادلات گلداک برای منبع حرارتی جلو و عقب به ترتیب براساس روابط (4) و (5) بیان می‌شود [6]:

$$\text{Front: } q_f(x,y,z) = \frac{6\cdot\sqrt{3}\cdot f_f\cdot Q}{b\cdot d\cdot a_f\cdot\pi\cdot\sqrt{\pi}}\cdot e^{\left(-\frac{3x^2}{a_f^2}\right)}\cdot e^{\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right)}\cdot e^{\left(-\frac{3z^2}{d^2}\right)} \quad (4)$$

$$\text{Rear: } q_r(x,y,z) = \frac{6\cdot\sqrt{3}\cdot f_r\cdot Q}{b\cdot d\cdot a_r\cdot\pi\cdot\sqrt{\pi}}\cdot e^{\left(-\frac{3x^2}{a_r^2}\right)}\cdot e^{\left(-\frac{3y^2}{b^2}\right)}\cdot e^{\left(-\frac{3z^2}{d^2}\right)} \quad (5)$$

در معادلات (4) و (5)، b، d، a_f و a_rثابت‌های ابعادی مدل گلداک بوده و به ترتیب برابر عمق منبع حرارتی، نصف عرض منبع، طول نیم‌بیضی جلویی و پشتی هستند، f_r وf_f به ترتیب فاکتور توزیع حرارت نیمه جلویی و پشتی هستند و براساس معادلات (6) و (7) بیان می‌شوند:

$$f_f = 2/(1+\frac{a_r}{a_f}) \quad (6)$$

$$f_r = 2/(1+\frac{a_f}{a_r}) \quad (7)$$

بین ضریب‌های توزیع حرارت رابطه (8) برقرار است:

$$f_f + f_r = 2 \quad (8)$$

پارامترهای ابعادی منبع جوشکاری مربوط به یک نمونه تجربی در جدول 2 آورده شده است. بازده قوس جوشکاری در تنظیمات مربوط به مشخصات منبع جوشکاری برای فرآیند جوشکاری قوس الکتریکی با گاز محافظ و الکترود تنگستنی 70% در نظر گرفته شده است [25].

Q حرارت ورودی کل است و با رابطه (9) محاسبه می‌شود:

$$Q = V\cdot I \quad (9)$$

که V ولتاژ و I شدت جریان جوشکاری است. ضرایب انتقال حرارت همرفتی و تشعشع از تمام سطوح غیر از سطح تقارن صورت می‌گیرد. به کمک رابطه‌های (10) و (11) ضریب ترکیبی انتقال حرارت از ضرایب همرفتی و تشعشع محاسبه می‌گردد [26]:

$$q_{bc} = h(T-T_{amb}) + \varepsilon\sigma(T^4 - T_{amb}^4) \quad (10)$$

$$h_{total} = h + \varepsilon\sigma(T+T_{amb})\cdot(T^2+T_{amb}^2) = 2 \quad (11)$$

که در آن q_{bc} حرارت اتلاف شده (W/m^3)، h ضریب همرفتی و برابر $8W/m^2°C$ است، ε قابلیت تشعشع جسم، σ ثابت بولتزمن، T دمای جسم T_{amb} دمای محیط می‌باشد. تحلیل مکانیکال از نتایج تحلیل حرارتی که تغییرات دما برحسب زمان را برای گره‌های موجود بیان می‌کند به عنوان ورودی بار دمایی استفاده می‌کند. در تحلیل مکانیکال الاستیک-پلاستیک، کرنش کل از رابطه (12) به دست می‌آید:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p + \varepsilon_{ij}^{th} \quad (12)$$

که در آن ε_{ij}^e کرنش الاستیک، ε_{ij}^p کرنش پلاستیک و ε_{ij}^{th} کرنش حرارتی می‌باشد. برای یک ماده همسانگرد تنش با رابطه (13) بیان می‌شود:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl}^e(\varepsilon_{ij} - \varepsilon_{ij}^p - \varepsilon_{ij}^{th}) \quad (13)$$

که در آن C_{ijkl}^e ماتریس سفتی الاستیک ماده می‌باشد. برای به‌دست آوردن تنش باید کرنش‌های مورد نظر به‌دست آیند. بدین منظور باید خواص مکانیکی جسم از جمله مدول الاستیک، ضریب پواسون، خواص پلاستیک و ضریب انبساط حرارتی (جهت محاسبه کرنش حرارتی) وارد تحلیل گردند. پس از این مرحله نتایج تغییرات دما برحسب زمان برای به‌دست آوردن کرنش و متعاقب آن تنش به کار گرفته خواهند شد.

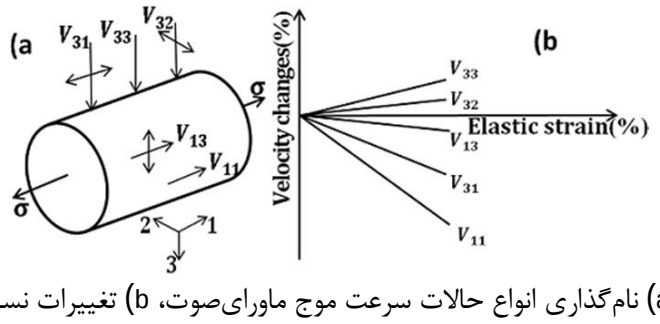
6- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش ماورای صوت

6-1- تأثیر حالت تنش بر سرعت موج ماورای صوت

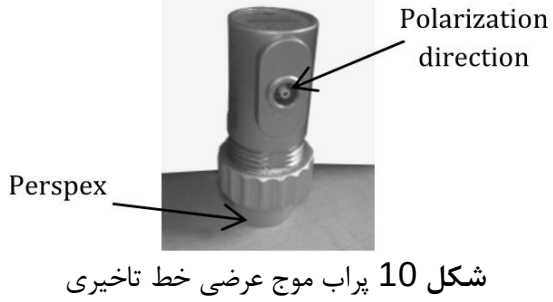
تغییر حالت[1] موج ماورای صوت تنها در صورتی رخ می‌دهد که موج با زاویه نسبت به خط عمود برسطح جدا کننده دو محیط انتشار برخورد کند. اگر جهت انتشار بر جهت ارتعاش موج عمود باشد، موج از نوع عرضی محسوب و اگر جهت انتشار با جهت ارتعاش موازی باشد از نوع طولی محسوب می‌شود. اگر موجی با زاویه صفر درجه (عمود بر سطح جدا کننده دو محیط) برخورد کند بدون تغییر در حالت آن بدون توجه به این‌که نوع موج طولی یا عرضی باشد، تا برخورد به فصل مشترک بعدی به حرکت خود در محیط دوم ادامه خواهد داد و پس از برخورد با فصل مشترک محیط بعدی به علت اختلاف مقاومت صوتی[2] بخشی از امواج منعکس و مقداری از آن عبور خواهد کرد. این پژوهش با استفاده از پراب نرمال (زاویه صفر درجه) امواج عرضی انجام شده است، به همین دلیل تغییر حالت موج رخ نخواهد داد. با توجه به جهت بارگذاری و انتشار و ارتعاش موج و جهت‌های اصلی می‌توان پنج حالت موج در نظر گرفت که اندیس اول جهت انتشار و اندیس دوم جهت ارتعاش را بیان می‌کنند در شکل 9-a امواج با اندیس 31، 13 و 32 از نوع عرضی و امواج با اندیس 11 و 33 طولی‌اند. چون سرعت موج در ماده ایزوتروپ در تمام جهات یکسان است، می‌توان این‌گونه بیان کرد که تغییر سرعت موج ماورای صوت تابعی از کرنش‌های الاستیک ماده است. اثر کرنش بر تغییر سرعت امواج ماورای صوت در شکل 9-b نشان داده شده است، همان‌طور که مشاهده می‌شود بیشترین اثر تغییر کرنش روی موج طولی است که جهت انتشار آن هم‌راستای جهت کرنش است و بعد از آن، موج عرضی که جهت قطبیت[3] آن هم‌راستا با کرنش اعمالی است.

1- Mode conversion
2- Acoustic impedance
3- Polarizasion

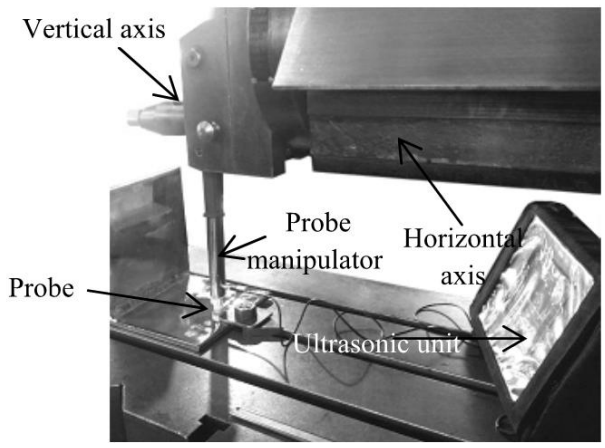
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



شکل 9 a) نام‌گذاری انواع حالات سرعت موج ماورای‌صوت، b) تغییرات نسبی سرعت موج به عنوان تابعی از کرنش الاستیک [9]



شکل 10 پراب موج عرضی خط تاخیری



شکل 11 تجهیزات ماورای صوت و میز مختصات

6-2- اثر آکستوالاستیسیته

در صورتی که ماده همسانگرد باشد ثابت‌های الاستیک موردنیاز برای توصیف اثر آکستوالاستیسیته به دو ثابت مستقل λ و μ و سه ثابت مستقل l, mو n که ثابت‌های الاستیک مرتبه سوم ماده هستند، کاهش می‌یابند. λ و μ رفتار الاستیک جسم را در اولین تقریب (قانون هوک) توصیف می‌کنند. در مهندسی خواص الاستیک بیشتر به وسیله مدول یانگ (E) و مدول برشی (G) توصیف می‌شوند [7] و [27-31]:

$$G = \mu \quad (14)$$

$$E = \mu(3\lambda + 2\mu)/(\lambda + \mu) \quad (15)$$

حل معادلات موج به سه رابطه منجر می‌شود، یکی برای انتشار امواج خالص طولی و دو معادله برای امواج عرضی خالص که هر کدام در یک جهت کرنش قطبیت یافته‌اند، به این صورت که تفاضل سرعت‌های عرضی آن‌ها با این فرض که سرعت‌های اولیه متفاوت است، به روابط (16) و (17) منجر می‌شود:

$$(v_{ij}/v_{0ij}) - (v_{ik}/v_{0ik}) = (4\mu + n)\cdot(\varepsilon_j - \varepsilon_k)/(4\mu) \quad (16)$$

کرنش‌ها با استفاده از قانون هوک می‌توانند با تنش جایگزین شوند:

$$(\varepsilon_j - \varepsilon_k) = (\sigma_j - \sigma_k)/(2\mu) \quad (17)$$

$$(v_{ij}/v_{0ij}) - (v_{ik}/v_{0ik}) = (4\mu + n)\cdot(\sigma_j - \sigma_k)/(8\mu^2) \quad (18)$$

رابطه (18) مبنای محاسبات اندازه‌گیری سرعت در ضخامت ثابت است که مورد استفاده برای اندازه‌گیری تنش پسماند در این پژوهش خواهد بود.

6-3- تجهیزات اندازه‌گیری

ترنسدوسر مورد استفاده در این پژوهش از نوع امواج عرضی با فرکانس 4 مگاهرتز و قطر اسمی 6 میلی‌متر، ساخت شرکت تروسونیک[1] می‌باشد (شکل10). براساس مشخصات فنی پراب، جهت قطبیت هم‌راستای سوکت موجود در پراب است. به منظور افزایش قدرت تفکیک نواحی نزدیک سطح[2] که با کاهش همپوشانی منطقه مرده[3] (به علت وجود امواج مخرب که از ارتعاش در خلاف جهت ضخامت کریستال پراب تولید می‌شود) با نواحی سطحی مرتبط است و همچنین کاهش اثرات ناشی از کوپلنت، پراب با کفشک‌های خط تاخیری قابل تعویض انتخاب شد [32]. این کفشک از جنس پلی متیل متاکریلات با نام تجاری پلکسی‌گلاس است. جهت اطمینان از جفت‌شدگی کامل، استفاده از کوپلنت تولیدی سازنده پراب مناسب می‌باشد و به صورت جایگزین می‌توان کوپلنت‌های با ویسکوزیته بالا را (مانند چسب کاغذ دیواری که در این پژوهش از آن استفاده شده است) به کار گرفت [32]. به منظور کاهش اثرات ترکنندگی قبل از این‌که سرعت‌ها محاسبه شوند، پراب در جای خود چند بار چرخانده می‌شود تا کوپلنت کاملا سطح کفشک را تر کند و جفت‌شدگی کامل انجام شود. از یک مکانیزم محور- لغزنده مربوط به یک دستگاه فرز برای دست‌یابی به مختصات موردنظر مطابق شکل 11 استفاده شده است. شاخصی نیز برای چرخش محوری 90 درجه برای دست‌یابی به دو قطبیت عمود و موازی خط جوش در آن لحاظ شده است. جهت کاهش اثرات غیریکنواختی لایه کوپلنت، فشار اعمالی بر پراب 2 مگاپاسکال است [8] که توسط محور عمودی دستگاه فرز به انتهای پراب انتقال می‌یابد و از ارتفاع یکنواخت اکوها در نقاط مختلف نمونه‌ها می‌توان دریافت که فشار به صورت مساوی اعمال شده است. دستگاه ماورای صوت کرات‌کرامر با پالسر دو حالته 200 و500 ولت است و دقت نمایش تاخیر در پراب برابر 0.001 میکروثانیه می‌باشد. همچنین دستگاه ماورای صوت دارای قابلیت کالیبراسیون اتوماتیک و نمایش سرعت با دقت 0.1 متر بر ثانیه می‌باشد. این مشخصه نمایش به افزایش دقت در محاسبات رابطه (18) منجر خواهد شد. به کمک حالت کالیبراسیون اتوماتیک سرعت مورد نظر در قطبیت مدنظر با توجه به ثابت بودن ضخامت سنجیده می‌شود و سمت راست رابطه (18) قرار می‌گیرد.

6-4- به‌دست آوردن مشخصات الاستیک و آکوستیک مواد

برای استفاده از رابطه (18) جهت اندازه‌گیری مقدار تنش پسماند نیاز به فرضیات و تحلیل‌های اضافی است. تنش‌ها به موازات خطوط جوش (تنش طولی) در حین جوشکاری بسیار بیشتر از تنش‌های عمود بر خط جوش (تنش‌های عرضی) است. بنابراین با ناچیز در نظر گرفتن تنش‌های عرضی می‌توان نتیجه گرفت مقدار عددی سمت چپ معادله برای هر نقطه متناسب با مقدار تنش طولی در آن نقطه است. برای استفاده از رابطه (18) باید از فلز جوش و فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت نمونه‌های استانداردی تهیه گردد و متعاقبا تنش‌زدایی گردند و سپس مورد آزمون کشش قرار گیرند پس از آن به کمک موج عرضی با دو قطبیت عمود بر جهت بار و با رسم نمودار تنش-سرعت، مقدار عددی عبارت $(4\mu + n)/(8\mu^2)$ قابل محاسبه است. در این پژوهش فرض شده چنین شرایطی در دسترس نمی‌باشد و برای تبدیل توصیف کیفی تنش به مقادیر عددی از فرضیات ساده کننده استفاده شده است [7،8]. به منظور تکمیل سمت راست رابطه (18) به سرعت‌های اولیه نیاز است. با توجه به این‌که در اکثر پلیت‌هایی که محصول عملیات نورد می‌باشند خواص نمونه در جهات نورد و عمود بر آن متفاوت است و این خاصیت بر سرعت موج ماورای‌صوت اثر می‌گذارد، باید دو سرعت اولیه را برای این ماده اندازه‌گیری کرد. با توجه به دسترسی به ورق خام سرعت‌های اولیه به

1- Trusonic

2- Near Surface Resolution
3- Dead zone

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]

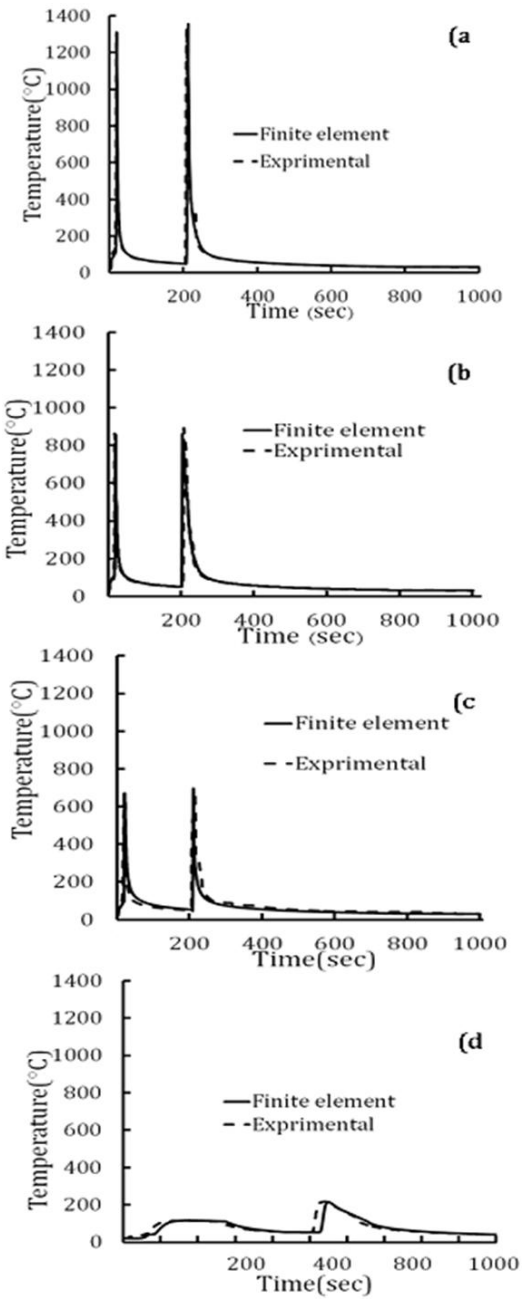
کمک حالت کالیبراسیون اتوماتیک دستگاه در نقاط دور از خط جوش که مقدار تنش پسماند کوچک است یا در قطعه قبل از جوشکاری که می‌تواند به عنوان نمونه عاری از تنش در نظر گرفته شود، اندازه‌گیری می‌شود. در این پژوهش سرعت موج با قطبیت موازی و عمود بر خط جوش به ترتیب(m/s) 3138.9 و (m/s)3193.5 اندازه‌گیری شده است. مقادیر μ=G و n نیز از پژوهش‌های بلاهسن و لو [11] و لیدبتر [33] قابل استخراج است. (گیگاپاسکال657- =n و گیگا پاسکال82=μ=G) پس از هر بار محاسبه مقادیر سرعت توسط دستگاه، پراب به اندازه 90 درجه چرخیده شده و در این قطبیت نیز سرعت‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به عبور موج عرضی از کل ضخامت قطعه و همچنین تغییرات حالت تنش در عمق‌های مختلف، می‌توان این گونه بیان کرد که؛ تنش پسماندی که به کمک روش امواج عرضی اندازه‌گیری می‌شود متوسط تنش‌های پسماند نقاطی است که با پرتو ماورای‌صوت همپوشانی دارند [8]. به منظور کاهش عدم قطعیت‌های ذاتی دستگاه و همچنین کاهش اثرات ترکنندگی کوپلنت، آزمایش سه بار تکرار شده و در آزمایش‌ها هر نقطه پنج بار بررسی شد. نمونه‌ای از نقاط مورد بررسی در جدول 3 نشان داده شده و تحلیل نهایی براساس مقادیر متوسط داده‌ها انجام شده است.

7- بحث و بررسی نتایج

در این بخش ابتدا جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود طرح 1 که شامل دو بخش تحلیل حرارتی و مکانیکی است از داده‌های ترموکوپل‌ها برای قسمت حرارتی و از روش‌های کرنش‌سنجی سوراخ و ماورای صوت در بخش مکانیکی استفاده می‌شود. جهت اعتبارسنجی نتایج مدل المان محدود طرح‌های 2 و 3 در قسمت حرارتی از ترموکوپل و در قسمت مکانیکی از روش ماورای صوت استفاده شده است. ضریب انتقال حرارت فلزات از هوا بیشتر است که منجر به افزایش دمای پروفیل حرارتی در فلزات می‌شود. با توجه به این‌که در مرحله آغاز و پایان جوشکاری به علت وجود لبه در ابتدا و انتها، اختلاف دماهای بزرگ بین المان‌های مجاور وجود دارد. این اختلاف با حرکت منبع حرارتی در جهت جوشکاری به تدریج بسیار اندک می‌شود و فرآیند جوشکاری به حالت پایدار می‌رسد. پایداری فرآیند منجر به توزیع یکنواخت تنش پسماند در مسیر خط مرکزی عمود بر محور جوش خواهد شد. به همین دلیل مسیر خط مرکزی عمود بر محور جوش جهت بررسی تنش پسماند انتخاب شد.

7-1- اعتبارسنجی قسمت حرارتی مدل المان محدود

اطلاعات دمایی ثبت شده به وسیله ترموکوپل‌ها و نتایج حاصل از مدل المان‌محدود مربوط به طرح‌های 1، 2 و 3 در شکل‌های 12، 13 و14 نشان داده شده است. با توجه به این‌که شبیه‌سازی المان محدود جوشکاری در3600 ثانیه انجام شده است و عملا پس از 1000 ثانیه قطعه به حدود دمای محیط می‌رسد و همچنین برای نشان دادن مناسب‌تر تغییرات دما نسبت به زمان همه نمودارها تا 1000 ثانیه را نشان می‌دهند. با مقایسه بین نتایج تطابق خوبی مشاهده می‌شود. چون جوشکاری در دو پاس انجام شده و این‌که فاصله زمانی بین پاسی 2.5 دقیقه است، دو صعود در نمودار مشاهده می‌شود. روند صعود و نزول نمودار مربوط به نقاط مورد بررسی، به دور یا نزدیک شدن منبع حرارتی گلداک مرتبط است. خطای جزعی مربوط به نوسان در سرعت حرکت مشعل و فیلر جوشکاری و همچنین دقیق نبودن شدت‌جریان نمایش داده شده منبع جوشکاری و ضرایب انتقال حرارت با توجه به شرایط محیطی است.



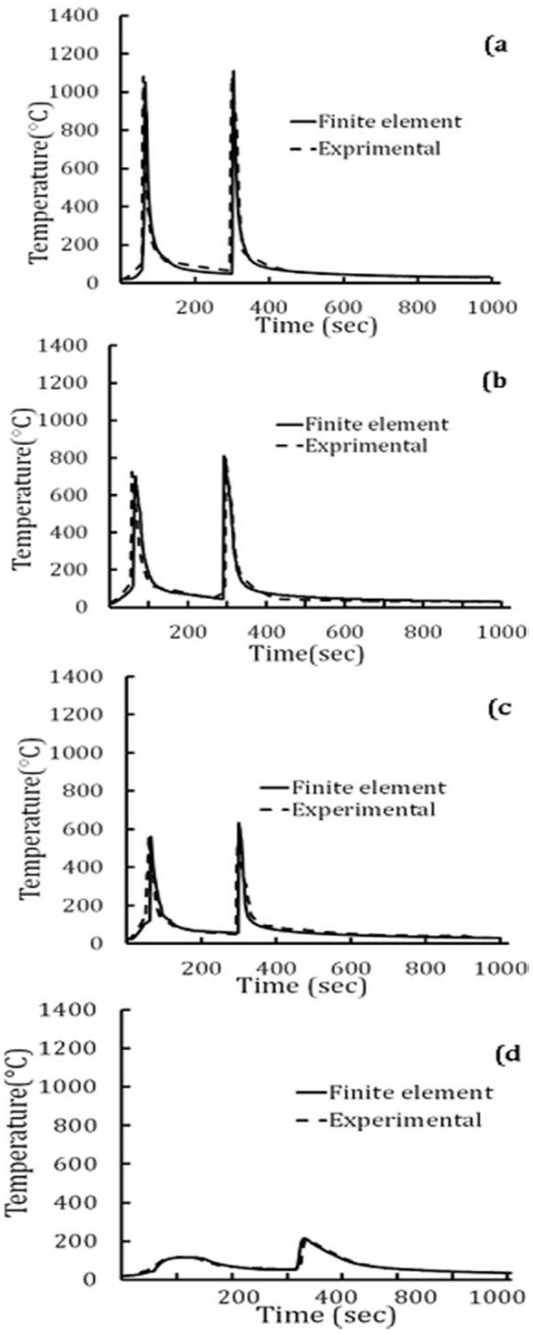
شکل 12 مقایسه داده‌های تجربی و نتایج المان‌محدود ترموکوپل‌های طرح1، a) ترموکوپل 1، b) ترموکوپل 2، c) ترموکوپل 3 d) ترموکوپل 4

جدول3 سرعت اندازه‌گیری شده در دو پلاریزاسیون عمود بر هم طرح 1

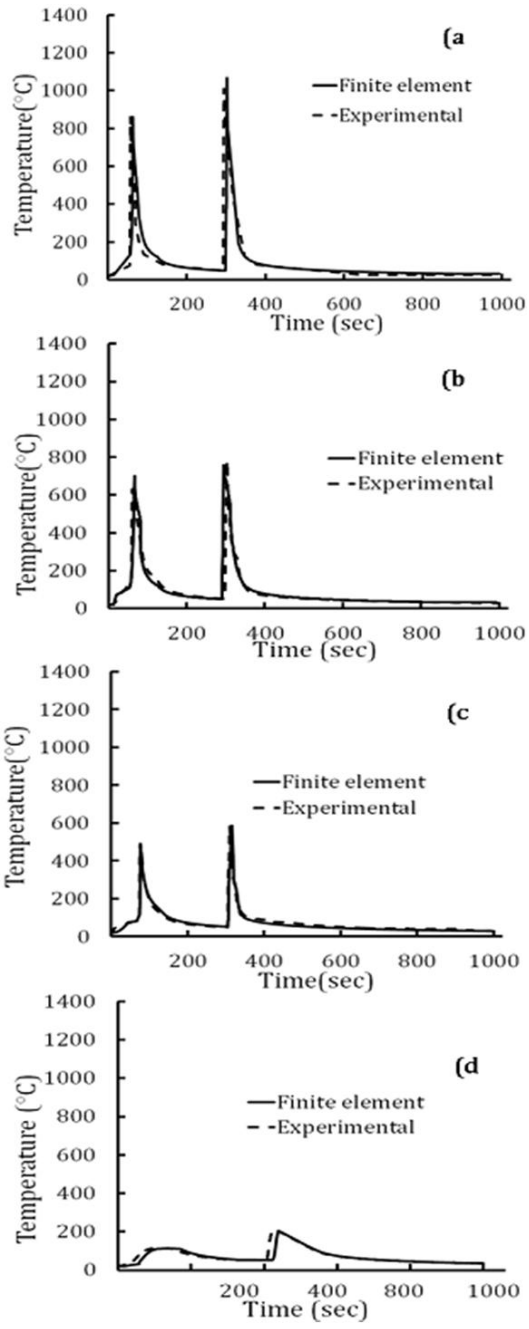
فاصله از محور جوش (mm)	6	20	36
سرعت موازی با محور جوش (ms^{-1})	3134.3	3137.3	3138
سرعت عمود بر محور جوش (ms^{-1})	3193.3	3191.1	3192.2
مقدار عددی رابطه (18) (MPa)	229.4	-39.5	-19.7

با توجه به شکل‌های 12، 13 و 14 بیشینه دمایی مربوط به ترموکوپل شماره 1 طرح 1 در پاس دوم جوشکاری است که با توجه به نزدیکی آن به خط جوش دمای حدود 1350 درجه سانتی‌گراد را ثبت نموده است، این مقدار برای طرح 2 حدود 1180 درجه سانتی‌گراد و برای طرح 3 حدود 1050 درجه سانتی‌گراد است. بیشینه دمای ثبت شده مربوط به ترموکوپل شماره 2 برای طرح 1 حدود 910 درجه سانتی‌گراد است، این مقدار برای طرح 2 حدود 855 درجه سانتی‌گراد و برای طرح 3 حدود 790 درجه سانتی‌گراد است. دمای ثبت شده حداکثر ترموکوپل شماره 3 برای طرح‌های 1، 2 و3 به ترتیب 700 درجه سانتی‌گراد، 620 درجه سانتی‌گراد و 590 درجه سانتی‌گراد است. با توجه به اینکه بار حرارتی اعمال شده در پاس اول پس از شروع پاس دوم همچنان در قطعه جوشکاری وجود دارد، دمای ثبت شده توسط ترموکوپل‌ها در پاس دوم جوشکاری بالاتر از دمای پاس اول است. در واقع پاس دوم جوشکاری با دمای بین پاسی حاصل از پاس اول آغاز می‌شود. این دما در فرآیند جوشکاری اهمیت بالایی دارد و موجب تغییرات در ریزساختار و سختی قطعه می‌گردد و در اکثر دستورالعمل‌های تایید شده جوشکاری تغییر دمای بین‌پاسی از محدوده مجاز سبب بی‌اعتباری آن می‌شود [19].

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



شکل 13 مقایسه داده‌های تجربی و المان‌محدود ترمو کوپل‌های طرح2، a) ترموکوپل 1، b) ترموکوپل 2، c) ترموکوپل 3 d) ترموکوپل 4



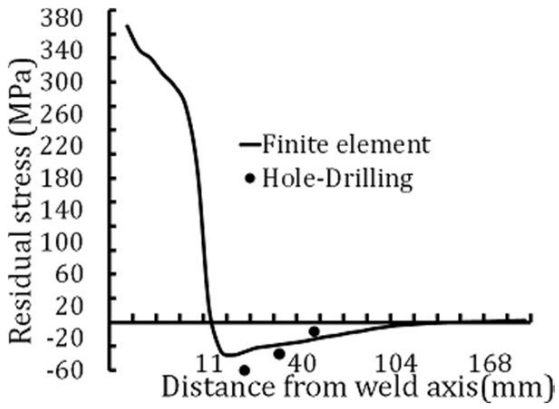
شکل 14 مقایسه داده‌های تجربی و المان‌محدود ترمو کوپل‌های طرح3، a) ترموکوپل 1، b) ترموکوپل 2، c) ترموکوپل 3 d) ترموکوپل 4

تفاوت دمای بیشینه طرح‌ها را می‌توان به اختلاف هندسی آن‌ها نسبت داد. با توجه به این‌که در طرح شماره 1 حوضچه جوش با محیط اطراف به علت عدم وجود شکاف ریشه تنها از بالای شیار ارتباط دارد، در رابطه (15) سهم ضرایب انتقال حرارت همرفتی و تشعشع کمتر از طرح‌های 2 و 3 است و این مساله موجب کاهش انتقال حرارت طرح 1 نسبت به دو طرح دیگر می‌شود که به نوبه خود به ثبت دماهای بالاتری منجر شده است. اختلاف دمایی بین طرح‌های 2 و 3 به مساحت بالاتر سطح‌های انتقال حرارت طرح 3 مرتبط است. علاوه بر این حجم حوضچه مذاب طرح 3 نسبت به طرح‌های 1 و 2 به ترتیب برابر 52% و 51.5% کمتر است. بنابراین ثبت دمای بالاتر ترموکوپل-های طرح1 نسبت به طرح‌های 2 و3 قابل توجیه است. برای ترموکوپل شماره 4 طرح‌ها که روی ورق بدون شیار در فاصله 20 میلی‌متری از محور جوش قرار دارد نیز همانند سایر ترموکوپل‌ها دمای ثبت شده در پاس دوم به دلایل ذکر شده بالاتر است. همچنین میزان دمای ثبت شده در ترموکوپل 4 طرح‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر است، که با توجه به عدم مجاورت مستقیم با حوضچه مذاب و فاصله بیشتر نسبت به سایر ترموکوپل‌ها با آن و این‌که انتقال حرارت رسانایی از حوضچه مذاب به دو قسمت بالا و پایین ورق بدون شیار صورت می‌گیرد، قابل توجیه است.

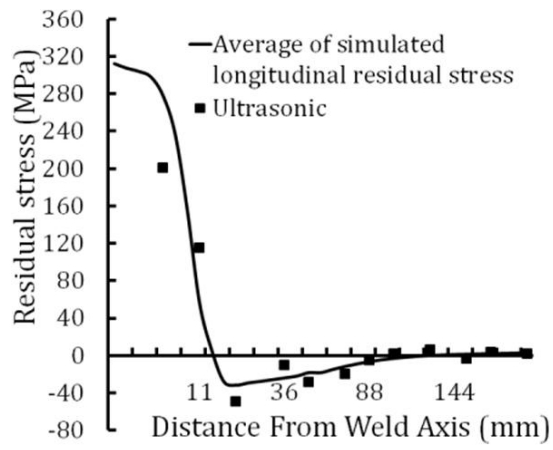
7-2- اعتبارسنجی قسمت مکانیکال مدل المان محدود طرح 1

جهت اعتبارسنجی مدل المان محدود طرح 1 از روش کرنش‌سنجی سوراخ استفاده شد. سوراخ‌کاری تا عمق 2 میلی‌متری در سه نقطه با گام‌های0.25 میلی‌متری در هشت مرحله انجام و کرنش‌های ε_1، ε_2 و ε_3 اندازه‌گیری شد. جهت محاسبه مقدار تنش‌ها از یک کد محاسباتی براساس روابط موجود در استاندارد انجمن تست و مواد آمریکا استفاده شده است [20]. مقدار بیشینه نتایج تجربی در فاصله 20 میلی‌متری از محور جوش 60 مگاپاسکال فشاری اندازه‌گیری شد و در نقاط بعدی با فاصله گرفتن از محور جوش، مقادیر روند کاهشی دارند به نحوی که در فاصله 32 و 55 میلی-متری تنش به ترتیب 41 مگاپاسکال و 11 مگاپاسکال فشاری اندازه‌گیری شد. شکل 15 مقایسه بین نتایج المان‌محدود و کرنش‌سنجی را نشان می‌دهد. مشخص است بین نتایج المان‌محدود و تجربی انطباق نسبی وجود دارد. مطابق شکل 15 تنش‌ها از محور جوش تا حدود 12 میلی‌متری از آن به صورت کششی است و حداکثر مقدار آن در نزدیکی محور جوش برابر مقدار 370 مگاپاسکال است، این مقدار بین استحکام تسلیم فلز پایه و فلز جوش است. مقدار حداکثر تنش کششی نشان می‌دهد فلز پایه تا فاصله حدود 12 میلی‌متری در ناحیه کرنش سختی قرار دارد و فلز جوش در ناحیه الاستیک قرار دارد. همچنین استحکام کششی بالاتر فلز جوش نسبت به فلز پایه دلیلی بر بالاتر بودن تنش پسماند کششی در وسط قطعه است [5]. با دور شدن از فاصله 12 میلی‌متری از محور جوش مقدار تنش به سمت فشاری شدن میل می‌کند، تنش‌ها در فاصله حدود 17 میلی‌متر با بیشینه فشاری 41 مگاپاسکال است. پس از این نقطه با فاصله از منبع حرارت ورودی‌های بار حرارتی کم شده و به تبع آن کاهش مقدار تنش پسماند تا مقادیر اندک رخ می‌دهد. روند کششی و فشاری مذکور نشان می‌دهد در صورت وجود نداشتن بارگذاری خارجی مقادیر تنش پسماند در قطعه تعادلی است.

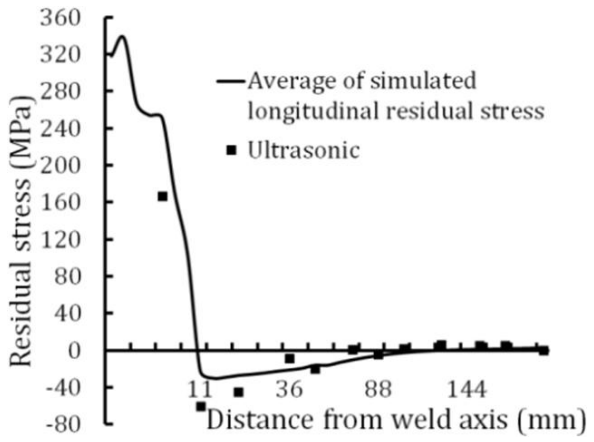
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



شکل 15 مقایسه تنش پسماند المان‌محدود و کرنش‌سنجی سوراخ



شکل 16 مقایسه تنش پسماند متوسط المان‌محدود و ماورای‌صوت طرح 1



شکل 17 مقایسه تنش پسماند متوسط المان‌محدود و ماورای‌صوت طرح 2

7-3- نتایج حاصل از اندازه‌گیری تنش پسماند به روش ماورای صوت طرح 1

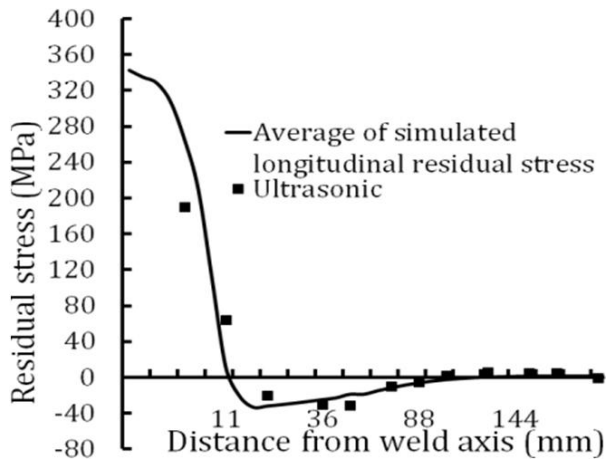
برای طرح 1 مقدارهای تنش پسماند براساس فاصله از محور خط جوش به روش ماورای صوت در 12 نقطه اندازه‌گیری شده است. این نتایج میانگین تنش پسماند اندازه‌گیری شده نقاطی است که موج ماورای صوت عرضی از آن‌ها عبور می‌کند (در روش امواج عرضی کل ضخامت قطعه محل عبور پرتو صوتی است). بنابراین برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی المان محدود با روش ماورای صوت باید میانگین تنش پسماند المان‌های داخل پروفیل پرتو را محاسبه کرد. با توجه به این‌که در خط مرکزی پرتو بیشترین انرژی را دارد [32]، مرکز دایره کریستال پراب به عنوان شاخص سنجش قرار گرفته است. جهت محاسبه متوسط تنش پسماند المان‌های داخل پروفیل پرتو صوتی کدی نوشته شده است. در کد محاسبتی با توجه به ابعاد پروفیل پرتو صوتی که شامل زاویه واگرایی پرتو نیز می‌باشد [32]، میانگین تنش پسماند مربوط به المان‌هایی را که با پرتو هم پوشانی دارند محاسبه می‌شود. مقدارهای اندازه‌گیری شده ماورای صوت در فاصله 6 میلی‌متری از محور جوش با مقدار کششی 201.4 مگاپاسکال است. با توجه به این‌که استحکام تسلیم فلز جوش از فلز پایه بالاتر است تنش‌ها از نوع کششی هستند. در فاصله 11 میلی‌متری مقدار کششی 115.2 مگاپاسکال اندازه‌گیری شد. در فاصله 20 میلی‌متری مقدار متوسط تنش‌ها فشاری شده و 49.5 مگاپاسکال ثبت شده است. در نقاط بعدی مورد بررسی روند تغییرات نتایج روش المان محدود و ماورای صوت تقریبا منطبق برهم می‌باشند. با توجه به این‌که فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت و فلز جوش استحکام تسلیم متفاوتی نسبت به هم دارند، می‌توان علت این تغییرات را به تفاوت سهم فلز جوش و فلز پایه و منطقه متاثر از حرارت در ضخامت مورد بررسی میانگین تنش پسماند نسبت داد. به نحوی که در جایی که سهم فلز جوش در نقاط مورد بررسی بالاتر است عمدتا تنش‌ها کششی و با کاهش سهم فلز جوش و افزایش سهم منطقه متاثر از حرارت تنش‌ها به صورت فشاری هستند. همچنین در جایی که سهم فلز پایه نسبت به منطقه متاثر از حرارت بالاتر است روند کششی شدن تنش فشاری آغاز خواهد شد و در نقاط دور از محور جوش به علت دوری از منبع حرارت جوشکاری مقدارهای تنش پسماند به سمت صفر میل می‌کند، که با یافته‌های نخودچی و همکاران انطباق دارد [5]. با توجه به شکل 16 تطابق نسبتا خوبی از نظر توزیع و مقدارهای تنش پسماند متوسط بین نتایج المان محدود و ماورای صوت امواج عرضی وجود دارد.

7-4- اعتبارسنجی قسمت مکانیکال مدل المان محدود طرح 2

مقادیر تنش پسماند میانگین با توجه به اندازه‌گیری سرعت امواج عرضی ماورای‌صوت در دو قطبیت عمود و موازی خط جوش و استفاده از رابطه (18) برای طرح 2 محاسبه شد. اولین و بیشترین مقدار تنش کششی در فاصله 6 میلی‌متری با مقدار 167 مگاپاسکال است. در فاصله 11 میلی‌متری از محور جوش مقدار تنش 60 مگاپاسکال فشاری اندازه‌گیری شد و پس از این نقطه اندازه تنش پسماند فشاری روند کاهشی دارد و در فواصل دورتر از محور جوش به علت اثر کم منبع حرارت مقدارها به صفر میل می‌کند. با توجه به شکل 17 مشخص است انطباق مناسبی بین نتایج المان محدود و تجربی وجود دارد. همان‌گونه که در شکل 17 مشخص است روند کششی و فشاری تنش‌های طولی تا حدود زیادی مشابه طرح 1 است، با این تفاوت که در طرح 2 روند تغییرات در قسمت کششی یکنواخت نیست. این فاصله‌ها در واقع نقاطی هستند که سهم فلز جوش در میانگین تنش محاسبه شده بیشتر است.

7-5- اعتبارسنجی قسمت مکانیکال مدل المان‌محدود طرح 3

جهت اعتبارسنجی قسمت مکانیکی مدل المان‌محدود طرح 3 نیز از روش ماورای‌صوت امواج عرضی همانند طرح‌های قبلی و در نقاط مشابه استفاده شد. مقایسه بین نتایج تجربی و المان‌محدود تنش پسماند در شکل 18 نشان داده شده است. با توجه به شکل 18 شروع مقدارهای کششی تنش‌های طولی طرح 3 اندکی بیشتر از طرح 1 و 2 با مقدار 342.6 مگاپاسکال است. با اندازه‌گیری سرعت امواج عرضی ماورای‌صوت در دو قطبیت عمود و موازی خط جوش مقادیر تنش پسماند متوسط با استفاده از رابطه (18) برای طرح 3 اندازه‌گیری شد. اولین و بیشترین مقدار تنش کششی اندازه‌گیری شده در فاصله 6 میلی‌متری با مقدار191 مگاپاسکال است. با توجه به شکل 18 مشخص است انطباق مناسبی بین نتایج المان‌محدود و تجربی وجود دارد.

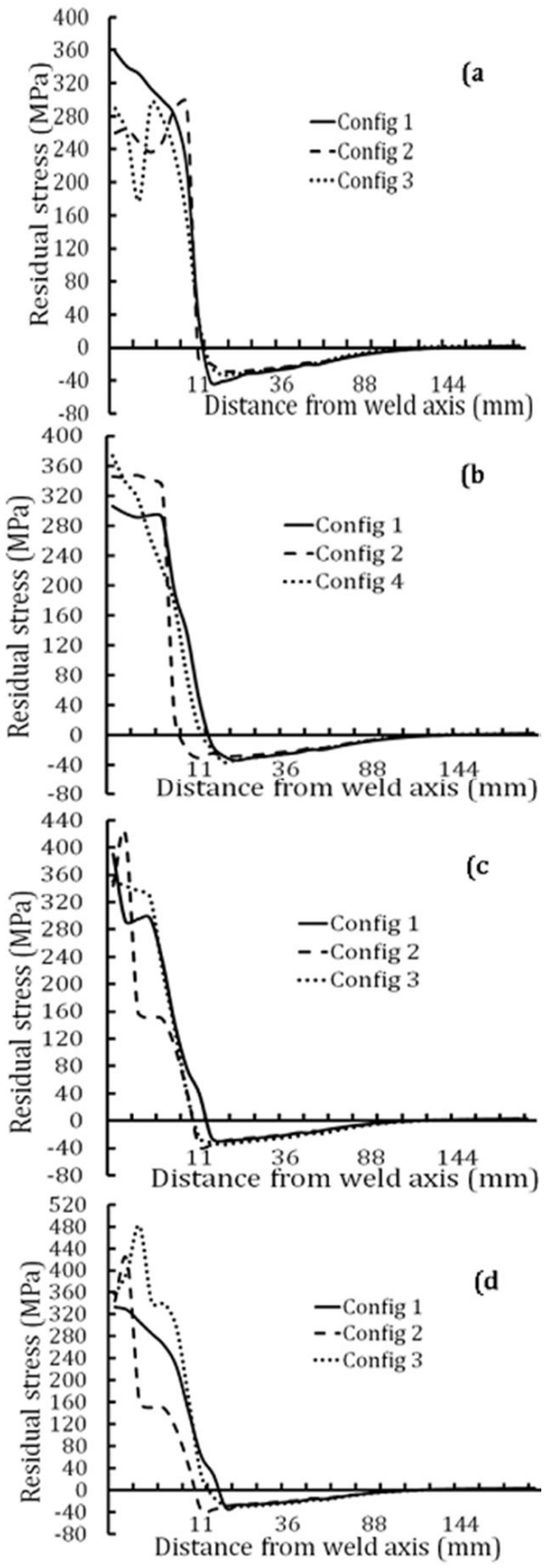


شکل 18 مقایسه تنش پسماند متوسط المان محدود و ماورای صوت طرح 3

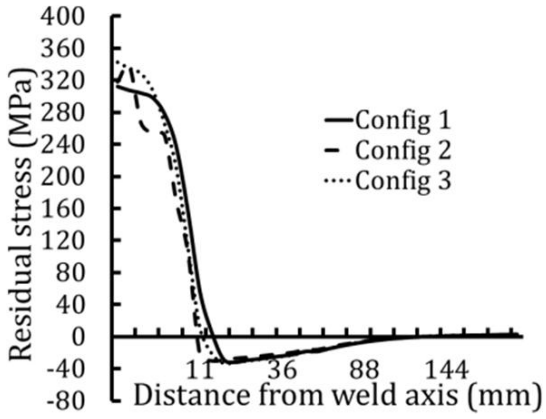
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]

6-7- بررسی هندسه طرح اتصال بر تنش پسماند

جهت بررسی اثر هندسه طرح‌های 1، 2 و 3 بر تنش پسماند از مدل المان محدود اعتبارسنجی شده در مراحل قبل استفاده شده است. ابتدا تنش‌های پسماند طولی و سپس تنش‌های پسماند عرضی در عمق‌های مشابه بررسی شده و در ادامه تنش موثر در سه طرح اتصال مقایسه خواهد شد. همان‌طور که ذکر شد؛ تنش پسماند ناشی از گرادیان تنش حرارتی و بر هم‌کنش مواد نسبت به هم می‌باشد. بنابراین نقاطی که نرخ انتقال حرارت بالاتری داشته باشند، دارای گرادیان حرارتی بالاتری می‌باشند. هرچه اختلاف دمای بین محیط و جسم بالاتر باشد براساس معادله‌های شماره 14 و 15 بار حرارتی بالاتری ایجاد خواهد شد و به تبع آن در معادله‌های 16 و 17 به ترتیب مقدار کرنش و تنش پسماند بالاتری حاصل خواهد شد. لذا در بررسی تنش پسماند از دو سری نقطه که در مجاورت با محیط اطراف باشند و یا در مجاورت نواحی بین پاس‌های 1 و 2 طرح‌ها باشند جهت نشان دادن بهتر تغییرات تنش پسماند استفاده شد. در شکل 19 مقایسه تنش‌های پسماند طولی در چهار عمق نشان داده شده است. با توجه به ساختار هندسی طرح 1 سهم فلز جوش در مختصات مورد بررسی آن بیشتر از مختصات مشابه در دو طرح دیگر است. همچنین تبادل حرارتی سطح جوش پاس پرکن طرح 1 به علت مساحت بالاتری که در مجاورت با محیط دارد، بیشتر است. بنابراین مقدار تنش پسماند در عمق‌های نزدیک به سطح طرح 1 بیشتر از دو طرح دیگر است. در مورد طرح‌های 2 و 3 مقادیر تنش در آغاز مسیر تقریبا برابر هم می‌باشد(شکل a- 19). شکل b- 19 تنش در عمق 3 میلی‌متری از سطح طرح‌ها را نشان می‌دهد. با توجه به این‌که شروع نمودار طرح 3 مربوط به پاس اول جوشکاری می‌باشد و همچنین به علت این‌که پاس اول طرح 3 نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به سایر طرح‌ها دارد (چون از دو سمت بالا و پایین پاس اول جوشکاری با هوای محیط در تماس است، دارای اتلاف حرارتی بالاتری می‌باشد و همچنین حجم حوضچه جوش آن کمتر می‌باشد و به تبع آن بار حرارتی ورودی کمتر می‌باشد) به عبارتی عامل تاثیر-گذار در بالاتر بودن شروع تنش پسماند در این عمق، بالاتر بودن سرعت سرد شدن نقاط مربوط به این عمق طرح 3 در فاصله زمانی بین پاسی است. شکل c- 19 مربوط به تنش‌های طولی عمق 6 میلی‌متر طرح‌ها می‌شود. در این عمق شروع نقاط مورد بررسی طرح 1 و 2 مربوط به نواحی بین پاس ریشه و پرکن می‌باشد که با توجه به نحوه انتقال حرارت پاس ریشه طرح 2 که در فاصله زمانی بین دو پاس از دو طرف سطح بالایی و پایینی آن انجام می‌شود، مقدار تنش پسماند آن از طرح 1 بالاتر است. طرح‌های 1 و 2 در این نقاط وارد ناحیه کرنش‌سختی خواهند شد. شکل d- 19 مربوط به نقاط واقع در عمق 9.5 میلی‌متری طرح‌ها است، مشخص است این عمق برای طرح 3 به نقاط نزدیک به سطح پاس2 مربوط می‌باشد و برای طرح 2 مربوط به نقاط پاس ریشه است که در این نقاط مقدار تنش از استحکام تسلیم فلز جوش فراتر می-رود، در این ناحیه‌ها فلز جوش وارد کرنش‌سختی می‌شود. مقایسه تنش پسماند متوسط طولی برای سه طرح 1، 2 و 3 در شکل 20 نشان داده شده است. همان‌طور که درشکل 20 مشخص است تفاوت چندانی در تغییرات متوسط تنش پسماند طولی طرح‌های 1، 2 و 3 مشاهده نمی‌شود. در نقاط نزدیک به سطح بالایی قطعه، بیشترین تنش پسماند طولی مربوط به طرح 1 می‌باشد در حالی‌که در نقاط نزدیک سطح پایینی طرح 1 دارای کمترین مقدار تنش و طرح 3 دارای بیشترین مقدار است. در نقاط میانی طرح 3 دارای کمترین مقدار تنش طولی می‌باشد. با مقایسه طرح 1 و 2 می‌توان دریافت که به جز نقاط نزدیک به سطح بالایی در سایر حالات میزان تنش پسماند طولی طرح 2 از طرح 1 بالاتر است[1] و [5].



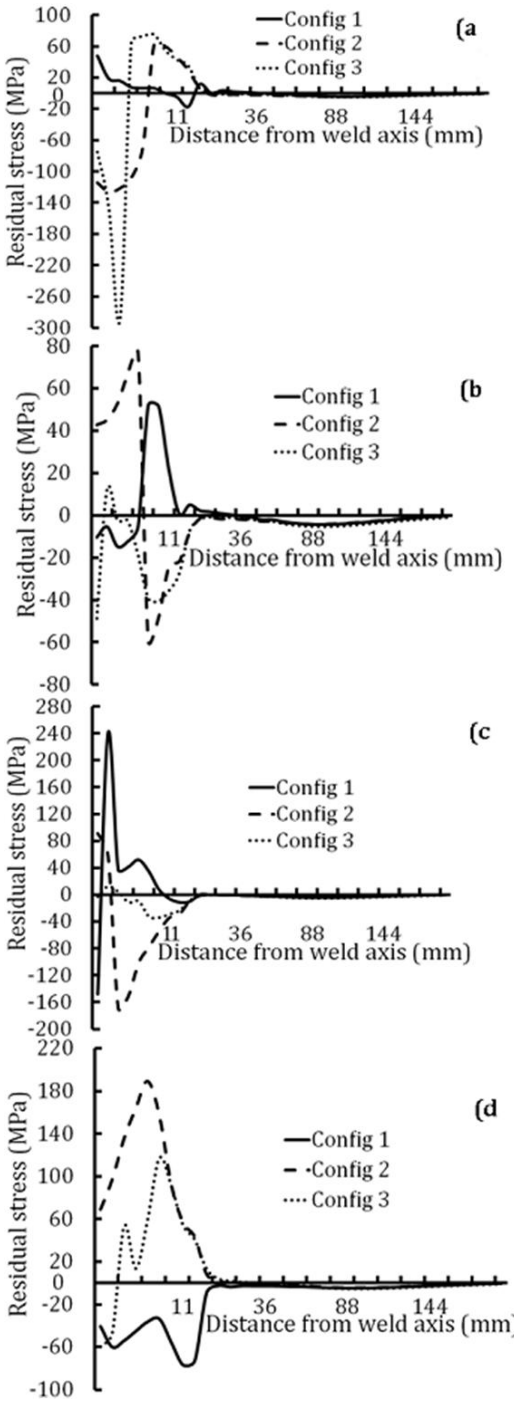
شکل 19 مقایسه تنش‌های پسماند طولی طرح‌های 1، 2 و3 a) عمق 0.5 میلی‌متر، b) عمق 3 میلی‌متر، c) عمق 6 میلی‌متر، d) عمق 9.5 میلی‌متر



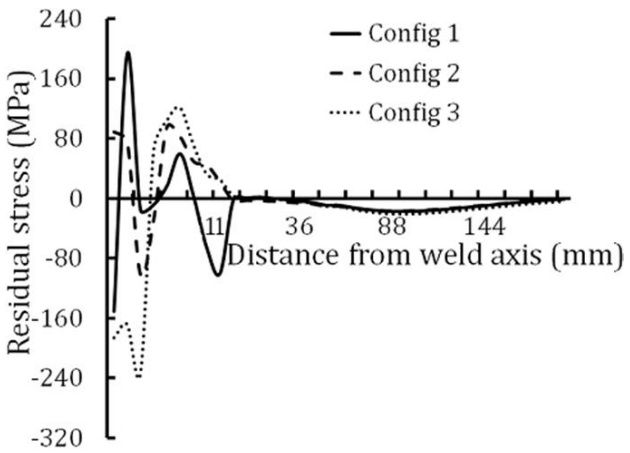
شکل 20 مقایسه تنش‌های پسماند متوسط طولی

بیشترین گستردگی مناطق دارای تنش پسماند طولی مربوط به طرح 1 و کمترین آن مربوط به طرح 3 است. تنش‌های پسماند عرضی مربوط به چهار عمق مختلف طرح‌های 1، 2 و 3 در شکل 21 نشان داده شده است. مشخص است که بیشترین تنش پسماند فشاری و کششی در عمق 0.5 میلی‌متری از سطح بالایی مربوط به طرح 3 است و کمترین آن‌ها مربوط به طرح 1 است (شکل a-21).

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]



شکل 21 مقایسه تنش‌های پسماند عرضی طرح‌های 1، 2 و3 a) عمق 0.5 میلی-متر، b) عمق 3 میلی‌متر، c) عمق 6 میلی‌متر، d) عمق 9.5 میلی‌متر



شکل 22 مقایسه تنش‌های پسماند متوسط عرضی

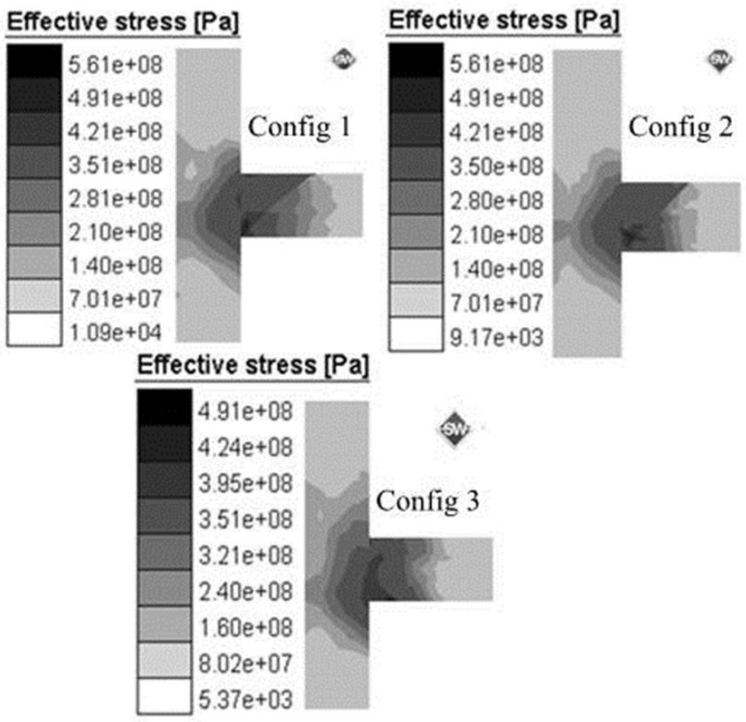
این اختلاف با توجه به تفاوت ابعاد سطوح انتقال حرارت و ماهیت هندسی طرح‌ها و حرارت ورودی قابل توجیه است. در عمق 3 میلی‌متر از سطح بیشترین تنش پسماند عرضی کششی و فشاری مربوط به طرح 2 و کمترین مقدار کششی مربوط به طرح 3 است (شکل 21-b). در شکل 21-c که مربوط به نقاط واقع در عمق 6 میلی‌متری از سطح می‌باشد، تنش عرضی کششی بیشینه مربوط به طرح 1 و تنش عرضی بیشینه فشاری در طرح 2 رخ می‌دهد. کمترین مقدارهای تنش فشاری و کششی در این عمق مربوط به طرح 3 است. با مقایسه تنش‌های عرضی طرح‌ها در عمق 9.5 میلی‌متری از سطح که در شکل 21-d نشان داده شده، مشخص است بیشترین تنش پسماند عرضی کششی مربوط به طرح 2 و تنش عرضی فشاری بیشینه در طرح 1 رخ داده است. در شکل 22 متوسط تنش‌های عرضی طرح‌های 1، 2 و 3 براساس فاصله از محور جوش با هم مقایسه شده‌اند. بیشترین تنش کششی مربوط به طرح 1 و بیشترین تنش فشاری عرضی مربوط به طرح 3 می‌باشد.

شکل 23 کانتورهای تنش موثر طرح‌های 1، 2 و 3 را به صورت مقطع عرضی درخط مرکزی عمود برمحور جوش نشان می‌دهد. مطابق شکل 23 بیشینه تنش‌های پسماند طرح‌های 1 و 2 به علت حجم حوضچه مذاب و بار حرارتی ورودی تقریبا برابر، یکسان است. تنش پسماند بیشینه طرح 3 به علت کم بودن ابعاد منابع حرارتی پاس‌های اول و دوم و به تبع آن کاهش بار حرارتی ورودی از دو طرح دیگر کمتر است.

8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی اثر هندسه طرح اتصال بر توزیع تنش پسماند و دما به کمک شبیه‌سازی المان‌محدود فرآیند جوشکاری ورق‌های فولاد زنگ نزن A316 که با سه هندسه طرح اتصال مختلف و پارامترهای مشابه جوشکاری به هم جوش شدند، پرداخته شد. جهت اعتبارسنجی قسمت حرارتی شبیه‌سازی از ترموکوپل‌های نصب شده به طرح‌ها به همراه دستگاه ثبت اطلاعات دمایی استفاده شد. برای صحت‌سنجی قسمت مکانیکی طرح 1 از دو روش تجربی امواج ماورای صوت عرضی و کرنش‌سنجی سوراخ استفاده شد. جهت جلوگیری از ایجاد آثار مخرب روی قطعه از روش غیرمخرب امواج ماورای صوت عرضی برای اعتبارسنجی قسمت مکانیکی مدل المان محدود طرح‌های 2 و 3 استفاده شد. با توجه به نتایج حاصل دستاوردهای این تحقیق عبارتند از:

1. بیشینه دمای ثبت شده طرح 1 بالاتر از طرح‌های 2 و 3 است و نمودارهای توزیع دمای طرح‌ها از نظر صعود و نزول و شکل کلی مطابق مراجع [6،5] و [34] است.
2. مقادیر بیشینه فشاری تنش پسماند طولی برای هر سه طرح اتصال تقریبا برابر است و روند تغییرات تنش پسماند طولی در قسمت فشاری هر سه طرح اتصال مشابه هم می‌باشد که درمراجع [5،1] و [12-14] به اثبات رسیده است.
3. بیشینه کششی تنش پسماند طولی طرح 3 مربوط به عمق 9.5 میلی-متری است که با یافته‌های مرجع [1] انطباق دارد و مقدار بیشینه تنش کششی برای طرح 1 و 2 مربوط به عمق 6 میلی‌متر است که شامل نواحی بین پاسی است.



شکل 23 کانتورهای تنش موثر طرح‌های 1، 2 و3

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]

4. تغییرات تنش پسماند عرضی نسبت به تنش پسماند طولی در اثر تغییر هندسه طرح اتصال بالاتر است. بیشینه کششی متوسط تنش پسماند عرضی مربوط به طرح اتصال 1 می‌باشد. برای هر سه طرح اتصال با دور شدن از خط جوش مقدارهای تنش پسماند عرضی تغییراتی مشابه دارند.

5. ابعاد مناطق دارای تنش پسماند طولی کششی برای تمام عمق‌های مورد بررسی طرح 1 بیشتر از دو طرح دیگر است. همچنین ابعاد مناطق دارای تنش پسماند کششی عرضی طرح 1 به ترتیب از طرح 2 و 3 بیشتر است.

6. کمترین مقدار تنش موثر مربوط به طرح 3 می‌باشد. مقدار تنش موثر برای طرح‌های 1 و 2 تقریبا برابر است. برای طرح‌های 1 و 2 بیشینه تنش موثر در پاس اول و برای طرح 3 در پاس دوم رخ می‌دهد. در طرح 3 مقدار تنش موثر و گستردگی مناطق دارای تنش پسماند کششی و همچنین حجم حوضچه مذاب (ملاحظات اقتصادی) نسبت به دو طرح دیگر کمتر است. بنابراین طرح 3 نسبت به دو طرح دیگر جهت اهداف طراحی در اولویت خواهد بود.

9- مراجع

[1] I. Sattarifar and 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, pp. 723-731, 2009.

[2] A. Yaghi, T. H. Hyde, A. A. Becker, W. Sun, and J. A. Williams, "Residual stress simulation in thin and thick-walled stainless steel pipe welds including pipe diameter effects", *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* Vol. 83, No. 11–12, pp. 864-874, 11, 2006.

[3] S. J. Lewis, H. Alizadeh, C. Gill, A. Vega, H. Murakawa, W. El-Ahmar, P. Gilles, D. J. Smith, and C. E. Truman, "Modelling and measurement of residual stresses in autogenously welded stainless steel plates: Part1–fabrication and modelling", *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* Vol. 86, No. 12, pp. 798-806, 12, 2009.

[4] B. Brickstad, and B. L. 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, 1, 1998.

[5] S. Nakhodchi, I. Saleh Akbari, 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 thicknesses", *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 81-89, 2014 (in Persian).

[6] V. Karimnia, and I. Sattarifar, "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).

[7] M. C. Smith, P. J. Bouchard, M. Turski, L. Edwards, and R. J. Dennis, "Accurate prediction of residual stress in stainless steel welds", *Computational Materials Science,* Vol. 54, No. 0, pp. 312-328, 3, 2012.

[8] N. S. Rossini, M. Dassisti, K. Y. Benyounis, and A. G. Olabi, "Methods of measuring residual stresses in components", *Materials & Design,* Vol. 35, No. 0, pp. 572-588, 3, 2012.

[9] V. Hauk, *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods Evaluation - Application - Assessment* - Elsevier Science, ISBN: 0 444 82476 6, Germany,1997.

[10] G. S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods,* First Edition. Edited by John Wiley & Sons, Ltd, 2013.

[11] F. Belahcene and J. Lu, "Determination of residual stress using critically refracted longitudinal waves and immersion mode", *Journal of Strain Analysis,* Vol. 37(1), pp. 13-20, 2002.

[12] Y. Javadi, M. Akhlaghi, and M. A. Najafabadi, "Nondestructive Evaluation of Welding Residual Stresses in Dissimilar Welded Pipes", *Journal Nondestructiv Evaluation,* Vol. 32, pp. 177-187, 2013.

[13] Y. Javadi, H. S. Pirzaman, M. H. Raeisi, and M. A. Najafabadi, "Ultrasonic inspection of a welded stainless steel pipe to evaluate residual stresses through thickness", *Materials & Design,* Vol. 49, pp. 591-601, 2013.

[14] Y. Javadi, M. Akhlaghi, and M. A. Najafabadi, "Using finite element and ultrasonic method to evaluate welding longitudinal residual stress through the thickness in austenitic stainless steel plates", *Materials & Design,* Vol. 45, pp. 628-642, 2013.

[15] S. Sadeghi, M. A. Najafabadi, Y. Javadi, and M. Mohammadisefat, "Using ultrasonic waves and finite element method to evaluate through thickness residual stresses distribution in the friction stir welding of aluminum plates", *Materials & Design,* Vol. 52, pp. 870-880, 2013.

[16] Y. Kudryavtsev, J. Kleiman, V. Trufiakov, and P. Mikheev, "Expert system for fatigue assessment and optimization of welded elements", *short paper Proceedings of the Third World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization,* Buffalo, New York, USA, May 17-21, Vol. 2, pp. 469-471, 1999.

[17] K. Azari, M. Ahmadi Najafabadi, and Y. Javadi, "Using nondestructive ultrasonic method to Residual stress measurment", *11th Iranian conference on maniufacturing engineering*, Tabriz, A-10-38-2, 2010 (in Persian).

[18] P. Vasantharaja, M. Vasudevan, and P. Palanichamy, "Effect of welding processes on the residual stress and distortion in type 316LN stainless steel weld joints", *Manufacturing Processes,* http:// dx. doi. org/ 10. 1016/ j. jmapro. 2014. 09. 004, 2014.

[19] ASME Boiler and Pressure Vessel Code Sec IX "*Qualification standard for welding and brazing procedures, welders, brazers, and welding and brazing operatores*", 56-3934, New York, NY 10016-5990, 2007.

[20] ASTM Standard, "*E837-08 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-drilling Strain-gage Method*", in ASMT international, West Conshohocken, PA, ed, 2008.

[21] L. ZhangQin, L. YongBing, W. YaSheng, and C. GuanLeng, "Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 27, pp. 288-295, 2005.

[22] Hand book of High temperature characteristic of stainless steels, *A Designer's Handbook Series,* N 9004, A. I. a. S. Institute, ed.

[23] WELDING GUIDE, *BOHLER. Welding Products,* ed. 2010.

[24] H. Moein, and I. Sattarifar, "Different finite element techniques to predict welding residual stresses in aluminum alloy plates", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 28, pp. 679-689, 2014.

[25] R. Singh, *Applied Welding Engineering Processes,* Codes and Standards, 2011.

[26] M. Ghassabzadeh, H. Ghassemi, and M. Nahali, "Study of welding temperature history by dual reciprocity boundary element method", *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 11, pp. 95-103, 2011 (in Persian).

[27] F. D. Murnaghan, "Finite deformations of an elastic solid", *American Journal of Mathematics,* pp. 235-260, 1937.

[28] D. S. Hughes and J. Kelly, "Second-order elastic deformation of solids", *Physical Review,* Vol. 92, p. 1145, 1953.

[29] R. M. Bergman and R. A. Shahbender, "Effect of Statically Applied Stresses on the Velocity of Propagation of Ultrasonic Waves", *Journal of Applied Physics,* Vol. 29, pp 1736-1738, 1958.

[30] R. W. Benson and V. J. Realson, "Acoustoelasticity", *Product Engineering,* Vol. 30, pp. 56-62, 19 59.

[31] R.E. Green Jr., "Ultrasonic Investigation of Mechanical Properties", *Treatise on Materials Science and Technology,* H. Herman (ed.), Academic Press, New York and London Vol. 3, pp. 73-126, 1973.

[32] Handbook of NDT Evaluation - Level I-III , Revision ion of NASA, *General DynamicsNDT Training Series The Industry Standard for Basic NDT Training*, 2008.

[33] H. M. Ledbetter, "Stainlesssteel elastic constants at low temperatures", *Journal of Applied Physics*, Vol. 52, no. 3, pp.1587-1589, 1981.

[34] M. J. Attarha, and I. Sattari-Far, "Study on welding temperature distribution in thin welded plates through experimental measurements and finite element simulation", *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 211, No. 4, pp. 688-694, 4, 1, 2011.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.11.16.2]