مجله مهندسی مکانیک مدرس، آذر 1393، دوره 14، شماره 9، ص‌ص 81-89

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند در فرایند جوشکاری چند مرحله‌ای دو ورق از جنس فولاد زنگ‌نزن با ضخامت غیریکسان

سهیل نخودچی[1*] صالح اکبری ایرج[2]، علی شکوه فر[3]، حسین رضازاده[4]

1- استادیار ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران
2- کارشناس ارشد ، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران
3- استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی ، تهران
4- کارشناس ارشد، مهندسی مواد، شرکت مهندسی و ساخت توربین مپنا، کرج
* تهران، صندوق پستی 16765-3381، snakhodchi@kntu.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 19 اسفند 1392
پذیرش: 16 فروردین 1393
ارائه در سایت: 30 شهریور 1393

کلید واژگان:
جوشکاری
توزیع دما
تنش پسماند
روش اجزاء محدود

چکیده

جوشکاری چند مرحله‌ای یکی از پرکاربردترین انواع جوشکاری در صنایع مختلف است. در این مقاله توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرایند جوشکاری سه مرحله‌ای دو ورق فولادی زنگ-نزن از نوع AISI 321 با ضخامت غیریکسان بررسی شده است. فرآیند جوشکاری شامل دو مرحله جوشکاری الکترود دستی[1] و یک مرحله جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی[2] می‌باشد. این فرایند ابتدا در محیط آزمایشگاهی انجام گردید و توزیع دمای ناشی از فرآیند توسط ترموکوپل‌هایی ثبت گردید. همچنین تنش پسماند ایجاد شده به صورت تجربی و با استفاده از روش سوراخ‌کاری مرحله‌ای مرکزی به دست آمد. سپس فرآیند مذکور در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مدل‌سازی شده و نتایج با اندازه‌گیری‌های تجربی دما و تنش پسماند مقایسه شده است. مدل اجزاء محدود شامل خواص حرارتی و مکانیکی فلز پایه و فلز جوش به صورت تابعی از دما است. همچنین ابزارهای پیشرفته مدل‌سازی فرآیند جوشکاری مانند حرکت منبع حرارتی و تولد المان استفاده شده‌است. مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که نتایج عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی تطابق خوبی با یکدیگر داشته و مدل به وجود آمده می‌تواند پیش‌بینی خوبی از توزیع دما و تنش پسماند در این فرآیند جوشکاری داشته باشد، لذا این مدل قابل استفاده در طراحی و ارزیابی سازه جوشکاری شده است.

Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having different thicknesses

Soheil Nakhodchi*[1], Saleh Akbari Iraj[2], Ali shokuhfar[3], Hossein Rezazadeh[4]

1- Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
3- Department of Mechanical Engineering, K.N.Toosi University of Technology, Tehran, Iran
4- Department of Engineering, MAPNA Turbine Engineering and Manufacturing Company, Karaj, Iran
* P.O.B. 16765-3381, Tehran, Iran, snakhodchi@kntu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 March 2014
Accepted 05 April 2014
Available Online 21 September 2014

Keywords:
Welding
temperature distribution
residual stress
finite element method

ABSTRACT

Multi-pass welding process is one of the most applicative methods of welding in various industries. In this paper, temperature and residual stress distribution due to three pass welding of two plates made of AISI 321 stainless steel having different thicknesses is studied. Welding process consists of three welding passes of two Shielded Metal Arc Welding (SMAW) process and one Gas Tungsten Arc Welding (GTAW) process. First, the benchmark plates are manufactured and welding process is performed. The transient temperature distribution during the welding process is recorded using thermocouples attached to the welding plates. First this process simulated experimentally and temperature distribution during to welding process was measured using thermocouples. Furthermore, the final residual stress distribution after welding process is measured using incremental center hole drilling technique (ICHD). The three pass welding process was then simulated using ABAQUS finite element (FE) code. The finite element model consists of temperature-dependent properties of base metal and weld metal. Furthermore, moving heat source and the element-birth technique is implemented in FE model. Experimentally measured temperature and residual stresses provide an in-depth knowledge insight the complicated welding process. . Comparing between the results shows that the numerical predictions and experimental measurements have good agreement and therefore the FE developed model can be employed in designing and evaluating of welded structures.

1-Shielded Metal Arc Welding (SMAW)
2- Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

S. Nakhodchi, S. Akbari Iraj, A. shokuhfar, H. Rezazadeh , Numerical and experimental study of temperature and residual stress in multi-pass welding of two stainless steel plates having diffrent, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 14, No. 9, pp. 81-89, 2014 (In Persian)

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

1- مقدمه

جوشکاری یکی از فرآیندهای مهم مهندسی است که به صورت وسیعی در صنعت جهت ساخت، نگهداری و تعمیر اجزاء و سازه‌ها به کار می‌رود. سازه‌های جوشکاری شده قسمت‌های ضروری بسیاری از ساختمان‌ها، پل‌ها، کشتی‌ها، لوله‌های انتقال گاز، مجراهای فشار و تجهیزات انتقال قدرت می‌باشند. ضمن فرآیند جوشکاری به واسطه‌ی حرارت موضعی ایجاد شده نزدیک خط جوش و سرد شدن متعاقب آن، یک گرادیان تنش حرارتی تولید می‌شود. از سوی دیگر ناهمگونی موضعی در ناحیه‌ی جوش به واسطه‌ی اتصال فلز جوش، می‌تواند یک ناهمگونی الاستیک/پلاستیک به وجود آورد که موجب ایجاد یک تنش پسماند بزرگ و اعوجاج گردد.

ورق‌های فلزی ضخیم معمولاً با فرآیند جوشکاری چند مرحله‌ای به یکدیگر متصل می‌گردند [1]. در این روش ابتدا مرحله اول جوشکاری انجام می‌گیرد و به قطعه فرصت سرد شدن تا دمایی خاص که دمای بین مرحله‌ای نامیده[1] می‌شود، داده می‌شود. بعد از رسیدن دمای قطعه به مقدار مذکور مرحله جوشکاری بعدی انجام می‌گیرد. این فرآیند تکرار می‌گردد تا در نهایت که مرحله آخر انجام می‌گیرد و قطعه تا دمای محیط و ایجاد تعادل حرارتی خنک می‌گردد. توزیع دمای ایجادشده ریز ساختار ماده و نیز خواص مکانیکی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین تنش پسماند ایجادشده در قطعه در اثر جوشکاری چند مرحله‌ای متأثر از تمام مراحل انجام‌شده روی قطعه می‌باشد [2].

یکی از شیوه‌های موثر جهت بررسی توزیع دما و ننش پسماند ناشی از جوشکاری در قطعات بزرگ صنعتی، ساختن نمونه‌های ساده آزمایشگاهی[2] است [3]. استفاده از این نوع نمونه‌های آزمایشگاهی کمک می‌کند که پیچیدگی‌های قطعه صنعتی که مدل‌سازی و آزمون تجربی را تقریباً غیرممکن یا بسیار دشوار می‌نماید، حذف‌شده ولی اطلاعات دما و تنش پسماند مورد نیاز جهت استفاده در طراحی یا ارزیابی قطعه‌ی صنعتی فراهم شود. روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند به سه گروه اصلی مخرب، نیمه مخرب و غیر مخرب تقسیم‌بندی می‌گردند [4]. روش کانتور[3] [5] و روش ایجاد شکاف[4] [6] جزو روش‌های مخرب هستند. روش سوراخ‌کاری[5] [7] از روش‌های نیمه مخرب می‌باشد. روش انکسار نوترون[6] [8] نیز در دسته روش‌های غیر مخرب قرار دارد. در نهایت نتایج به دست آمده از نمونه‌های آزمایشگاهی ایجادشده به شرایط واقعی سازه‌های جوشکاری شده تعمیم داده می‌شوند.

ایجاد یک مدل اجزاء محدود با دقت بالا [9]، ابزاری قوی جهت بررسی توزیع دما و تنش پسماند ناشی از جوشکاری است. شبیه‌سازی اجزاء محدود جوش چند مرحله‌ای [10] به دو صورت دو بعدی [8] و سه بعدی [11] قابل انجام است. جهت صحت‌سنجی مدل اجزاء محدود می‌توان از روش‌های تجربی استفاده نمود. مدل اجزاء محدود فرآیند جوشکاری امکان مطالعه‌ی جزء به جزء و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر قطعه را نیز ایجاد می‌نماید و در کاهش هزینه‌ها بسیار موثر است.

فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی یکی از انواع فولادها هستند که کاربرد وسیعی در صنعت دارند. یکی از انواع این فولادها، فولاد زنگ‌نزن AISI 321 است که در صنایع نیروگاهی و خطوط انتقال گاز استفاده می‌گردد. مقاومت خوردگی و خواص منحصر به فرد این ماده در دماهای بالا از دلایل کاربرد وسیع این نوع فولاد در صنایع ذکر شده است. داده‌های حرارتی مربوط به توزیع دما و نیز تنش پسماند ناشی از جوشکاری مربوط به این نوع فولاد بسیار کم و محدود است که وجود این اطلاعات می‌تواند در زمینه‌ی بررسی سازه‌های جوشکاری شده از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 بسیار مفید باشد.

در مراجع موجود فرآیند جوشکاری اتصال دو ورق با ضخامت غیر یکسان کمتر بررسی شده است. همان طور که ذکر گردید در بین فولادهای زنگ‌نزن آستنیتی، اطلاعات جوشکاری فولاد زنگ‌نزن نوع AISI 321 کمتر در دسترس است. کار حاضر با هدف بررسی این موارد توزیع دما و تنش پسماند در دو ورق با ضخامت غیریکسان که توسط فرآیند جوشکاری به یکدیگر متصل شده‌اند و از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 هستند را مورد مطالعه قرار داده است. در ابتدا نمونه‌هایی با ابعاد 200 میلی‌متر در 200 میلی‌متر که ضخامت یکی 6 میلی‌متر و دیگری 10 میلی‌متر است ساخته شدند. در ادامه توزیع دما و تنش‌های پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری در آن‌ها به روش تجربی به دست آمد. مدل اجزاء محدود فرآیند جوشکاری نیز منطبق بر نمونه‌ها ساخته شد. مدل اجزاء محدود به صورت کوپل غیرمستقیم[7] حرارتی-تنشی سه بعدی در نرم‌افزار آباکوس 1-10-6 شبیه‌سازی گردید. جهت صحت‌سنجی مدل نیز از نتایج تجربی به دست آمده استفاده شده است. به این ترتیب که نتایج قسمت حرارتی با اتصال ترموکوپل‌هایی به قطعه کار و ثبت تاریخچه‌ی دمایی اعتبارسنجی شد. همچنین جهت اعتبارسنجی مدل تنشی از روش سوراخ‌کاری جهت اندازه‌گیری تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری استفاده گردید.

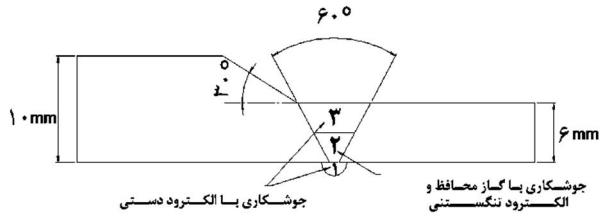
2- مواد و نمونه‌سازی

جهت بررسی تجربی فرآیند جوشکاری، دو ورق به ابعاد 200×200میلی‌متر که یکی دارای ضخامت 6 میلی‌متر و دیگری دارای ضخامت 10 میلی‌متر است جوشکاری شده‌اند. فرآیند جوشکاری مطابق شکل 1 شامل دو مرحله جوشکاری الکترود دستی (مرحله اول و سوم) و یک مرحله جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی (مرحله دوم) می‌باشد.

جدول 1 مشخصات تجربی ثبت‌شده مربوط به جوشکاری را برای هر مرحله نشان می‌دهد.

3- اندازه‌گیری تاریخچه‌ی دمایی

همان‌طور که اشاره شد تحلیل و بررسی فرآیند جوشکاری شامل دو قسمت حرارتی و تنشی است. جهت به دست آوردن تاریخچه‌ی دمایی قطعه و نیز اعتبارسنجی مدل حرارتی، نیاز به اندازه‌گیری دما حین انجام فرآیند جوشکاری می‌باشد. جهت بررسی توزیع دما در نمونه‌های آماده‌شده جهت



شکل 1 مقطع جوش و مراحل جوشکاری

1-Inter pass temperature
2-Benchmark specimens
3-Contour
4-Slitting
5-Hole drilling
6-Neutron diffraction
7-Sequentially coupled

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

جدول 1 خصوصیات منبع حرارتی جوشکاری

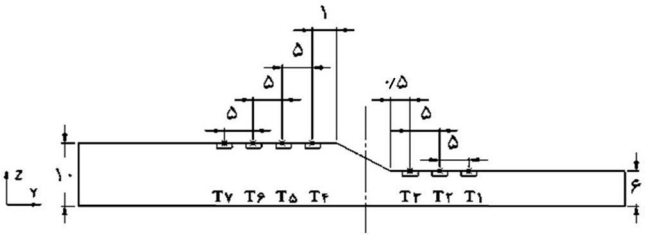
شماره مرحله	اختلاف پتانسیل الکتریکی (V)	شدت جریان (I)	سرعت منبع (ms^{-1})
1	20-23	70	0/0012
2	11-12	150	0/0017
3	20-24	72	0/00094

جوشکاری، ابتدا با توجه به حداکثر دمای به وجود آمده حین فرآیند جوشکاری ترموکوپل نوع k انتخاب شده است. این ترموکوپل‌ها جهت گزارش دما باید در تماس مستقیم با قطعه کار در نقطه‌ی مورد نظر قرار گیرند. بدین منظور در قطعه کار قبل از شروع جوشکاری سوراخ‌هایی تعبیه شد که مشخصات مربوط به آن در شکل 2 آمده است. این نقاط روی خطی که از وسط صفحه می‌گذرد قرار دارند. همچنین تصویر اتصال ترموکوپل‌ها روی نمونه‌ها هنگام اندازه‌گیری تجربی دما در شکل 3 نشان داده شده است.

بعد از قرار دادن ترموکوپل‌ها در نقاط مورد نظر، جهت گزارش و ثبت تاریخچه‌ی دمایی نیاز به یک دستگاه رایانه و یک دستگاه ثبت‌کننده‌ی داده‌ها[1] می‌باشد. با شروع فرایند جوشکاری تغییرات دما نسبت به زمان برای هر نقطه‌ای که ترموکوپل در آن قرار دارد ثبت می‌شود. حاصل این مرحله نمودارهای دما- زمان است که در ادامه توضیح داده شده است. البته همان طور که در شکل 3 نیز مشخص است تعداد ترموکوپل‌های مورد استفاده 7 عدد می‌باشد که یکی از ترموکوپل‌ها در حین فرآیند خراب شد و نتایج آن ثبت نگردید.

4- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش سوراخ‌کاری

جهت تحلیل تنش قطعه و نیز اعتبارسنجی تنشی مدل عددی نیاز به اندازه‌گیری تجربی تنش پسماند می‌باشد. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری تنش پسماند روش سوراخ‌کاری مرکزی[2] است [12]. این روش از روش‌های نیمه مخرب اندازه‌گیری تنش می‌باشد به این معنی که خسارت



شکل 2 الگوی محل قرار گرفتن ترموکوپل‌ها روی نمونه ایجادشده (ابعاد به میلی‌متر هستند)

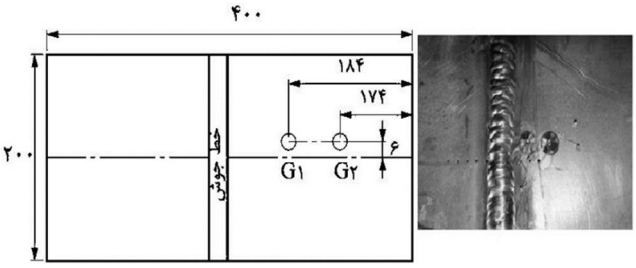
شکل 3 اتصال ترموکوپل‌ها به قطعه به صورت تجربی

ایجادشده موضعی بوده و در اغلب حالت‌ها کارکرد نمونه را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. این روش شامل نصب کرنش سنج‌هایی روی سطح قطعه و ایجاد سوراخ در نزدیکی کرنش سنج (اینجا در مرکز آن) و اندازه‌گیری کرنش آزاد شده است. کرنش سنج‌هایی که در کار حاضر مورد استفاده قرار گرفت از نوع FRS-2 محصول شرکت TML ژاپن می‌باشند. در ادامه این کرنش‌ها توسط معادلاتی به تنش‌های اصلی ربط داده می‌شوند . در حالتی که توزیع تنش پسماند در راستای ضخامت یکنواخت باشد از روش استاندارد شده ASTM E837 [12] می‌توان استفاده نمود. این روش توسعه‌یافته و با انجام مرحله‌ای سوراخ‌کاری و استفاده از کرنش‌های آزادشده در هر مرحله‌ی سوراخ‌کاری می‌توان تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت حتی به صورت غیریکنواخت را نیز اندازه‌گیری نمود. این روش که در مقاله‌ی حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است، سوراخ‌کاری مرکزی مرحله‌ای[3] نامیده می‌شود [13]. در واقع اساس هر دو روش و نحوه‌ی آزمایش یکسان است و تنها در عمق‌هایی که کرنش در آن‌ها اندازه‌گیری می‌شود و تعداد مراحل اندازه‌گیری متفاوت هستند. در کار حاضر کرنش سنج‌ها در دو نقطه روی ورق با ضخامت 6 میلی‌متر به نمونه متصل شدند و نتایج کرنش و به تبع آن تنش در این دو نقطه به دست آمدند. محل استقرار کرنش سنج‌ها و نیز نحوه اتصال آن‌ها به نمونه در شکل 4 آمده است.

5- شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند جوشکاری

شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند جوشکاری توانایی پیش‌بینی توزیع دما و میدان‌های تنشی ناشی از این فرآیند را دارا می‌باشد. با توجه به محدودیت‌هایی که در اندازه‌گیری تجربی دما و تنش وجود دارد، با استفاده از یک مدل اجزاء محدود با دقتی بالا می‌توان جزئیات تغییرات دما و یا تنش را در نقاط مختلف روی مدل و در زمان‌های متفاوت به دست آورد. در تحقیق حاضر شبیه‌سازی به صورت کوپل غیرمستقیم حرارتی- تنشی انجام شده است که شامل یک تحلیل حرارتی و یک تحلیل تنشی است که از نتایج تحلیل حرارتی به عنوان ورودی تحلیل تنشی استفاده می‌گردد. در ادامه هر یک از این مراحل شرح داده شده است. نحوه‌ی مش‌بندی اجزاء محدود نمونه در شکل 5 ارائه شده است که شامل 12600 المان است . با در نظر گرفتن بیشینه دمای مربوط به نقاط روی نمونه به عنوان شاخص سنجش همگرایی جواب، این تعداد المان با اختلاف حدود 2% با تعداد المان بیشتر، پاسخ قابل قبولی را ارائه می‌نمایند. باید دقت شود که نحوه مش‌بندی در هر دو تحلیل حرارتی و مکانیکی یکسان است تا نتایج تحلیل حرارتی به عنوان ورودی برای تحلیل مکانیکی قابل اعمال باشند.

5-1- تحلیل حرارتی



شکل 4 نحوه و محل استقرار کرنش سنج‌ها روی نمونه جوشکاری شده (کرنش سنج‌ها روی ورق با ضخامت 6 میلی‌متر متصل شده‌اند و ابعاد به میلی‌متر هستند).

1-Data logger
2-Center hole drilling (CHD)
3-Incremental center hole drilling (ICHD)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

تحلیل حرارتی یک تحلیل سه بعدی انتقال حرارت است. در این تحلیل معادله‌ی انتقال حرارت حاکم به صورت رابطه (1) است [14] :

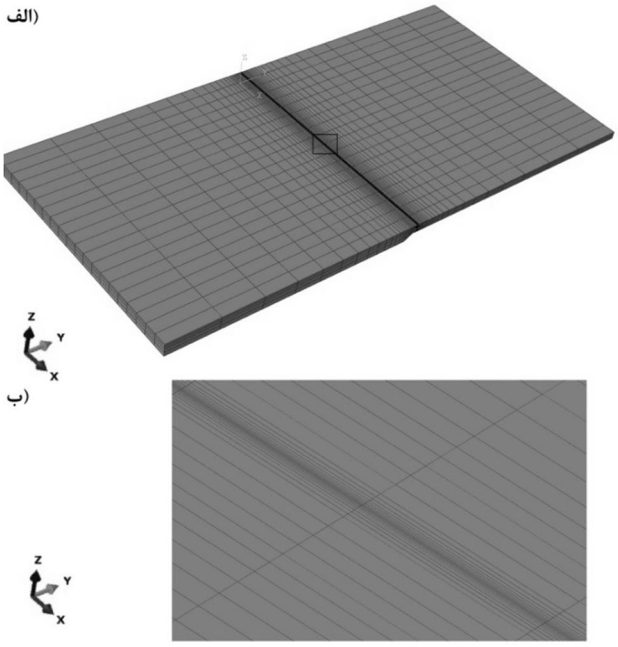
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x})+\frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y})+\frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z})+Q \qquad (1)$$

که در آن ρ چگالی ماده (kgm^{-3})، C_p ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)، T دمای ماده در هر لحظه (K)، k رسانایی حرارتی وابسته به دما ($Wm^{-1}K^{-1}$)، Q نرخ حرارت تولیدی درونی (Wm^{-3}) و t زمان (sec) می‌باشد. با توجه به معادله‌ی فوق خواصی از ماده که برای تحلیل حرارتی مورد نیاز هستند چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه و رسانایی حرارتی می‌باشند که در ادامه برای ماده‌ی مورد استفاده در این کار آورده شده‌اند.

ورودی حرارتی ناشی از مشعل جوشکاری به صورت شار حرارتی توزیع‌شده[1] مدل می‌گردد که تمرکز آن بر خط جوش است، سپس این حرارت از طریق هدایت[2] به بقیه‌ی نقاط انتقال می‌یابد. بعد از مرحله‌ی حرارت دادن، ورق تا دمای مشخصی که می‌تواند یک دمای تعیین‌شده برای شروع مرحله‌ی بعدی جوشکاری و یا دمای محیط پس از انجام آخرین مرحله‌ی جوشکاری باشد، سرد می‌شود که این کار توسط شرایط مرزی حرارتی انجام می‌گردد. با توجه به نوع فرایند دریافت می‌شود که ورق می‌تواند به دو طریق با محیط اطراف جهت سرد شدن و رسیدن به تعادل حرارتی انتقال حرارت انجام دهد. این دو طریق همرفت[3] با محیط اطراف و تشعشع[4] می‌باشند [14] که می‌توان این شرط مرزی را با معادله‌ی (2) نشان داد:

$$q_{bc}=h(T-T_a)+\varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T^4-T_a^4) \qquad (2)$$

که آن، q_{bc} حرارت اتلافی (Wm^{-3})، h ضریب انتقال همرفتی ($Wm^{-2}K^{-1}$)، ε_{em} توان گسیل دادن، σ_{bol} ثابت استفان- بولتزمن[5] ($Wm^{-2}K^{-4}$)، T دمای هر نقطه



شکل 5 مش اجزاء محدود مورد استفاده در تحلیل حرارتی و مکانیکی، الف) کل مش‌بندی، ب) مش بزرگنمایی شده در ناحیه‌ی مشخص‌شده.

1-Distributed heat flux
2- conduction
3-Convection
4-Radiation
5-Stefan–Boltzmann constant

(K) و T_a دمای محیط (K) است. از آنجا که این شرط مرزی با توجه متغیرها و ثوابت موجود در آن و شرایط متغیر آن در هر مرحله منجر به پیچیده شدن شبیه‌سازی می‌گردد ، ضریب مرکب h_c که از معادله‌ی زیر به دست می‌آید [15] و اثرات همرفت و تشعشع را به طور همزمان مد نظر قرار می‌دهد، مورد استفاده قرار خواهد گرفت. طبق رابطه (3) خواهیم داشت:

$$h(T-T_a)+\varepsilon_{em}\sigma_{bol}(T^4-T_a^4)=h_c(T-T_a) \qquad (3)$$

بنابراین شرط مرزی حرارتی که در تحلیل عددی مورد استفاده قرار می‌گیرد با رابطه‌ی ساده‌شده‌ی (4) نشان داده می‌شود (قانون سرد شدن نیوتن[6]) :

$$q_{bc}=h_c(T-T_a) \qquad (4)$$

جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی متحرک جوشکاری، زیر برنامه‌ای[7] در زبان برنامه‌نویسی فرترن[8] نوشته‌شده که در آن از فرمول توزیع گوسی [16] با معادله‌ی (5) استفاده شده است.

$$q=\frac{3Q_p}{\pi a^2}\exp(-3(\frac{r}{a})^2) \qquad (5)$$

Q_p در معادله‌ی بالا به این صورت رابطه (6) تعریف می‌گردد:

$$Q_p=\eta\cdot V\cdot I \qquad (6)$$

که در آن η، V و I به ترتیب راندمان، اختلاف پتانسیل الکتریکی و شدت جریان منبع حرارتی می‌باشند. راندمان جوشکاری برای SMAW برابر 0/8 و برای GTAW برابر 0/7 در نظر گرفته شده است [17].

منبع حرارتی دایروی با سرعت جوشکاری v حرکت می‌کند به صورتی که دایره در صفحه‌ی x-z در زمان t با معادله‌ی (7) تعیین می‌گردد:

$$x^2+(z-vt)^2=r^2 \qquad (7)$$

در مدل مورد نظر تنها نواحی که در محدوده‌ی دایره‌ی ذکرشده با شعاع a در هر لحظه قرار می‌گیرند توسط معادله‌ی 7 تحت تأثیر شار حرارتی ورودی قرار خواهند گرفت و حرارت ورودی به سایر نقاط صفر خواهد بود.

برای شبیه‌سازی فلز جوش از روش فعال کردن و غیرفعال کردن المان استفاده شده است. به این ترتیب که المان‌های فلز جوش از ابتدا در مدل‌سازی ایجاد می‌گردد ولی در ابتدا غیرفعال خواهند بود تا زمانی که باید در شبیه‌سازی وجود داشته باشند فعال می‌گردند و خواص اصلی خود را خواهند داشت.

5-2- تحلیل مکانیکی

در تحلیل مکانیکی الاستیک- پلاستیک، کرنش کل از رابطه‌ی (8) به دست می‌آید :

$$\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ij}^e+\varepsilon_{ij}^p+\varepsilon_{ij}^{th} \qquad (8)$$

که ε_{ij}^e کرنش الاستیک، ε_{ij}^p کرنش پلاستیک و ε_{ij}^{th} کرنش حرارتی می‌باشد. برای یک ماده همسانگرد تنش با رابطه‌ی (9) به کرنش وابسته است.

$$\sigma_{ij}=C_{ijkl}^e(\varepsilon_{ij}-\varepsilon_{ij}^p-\varepsilon_{ij}^{th}) \qquad (9)$$

که در آن C_{ijkl}^e ماتریس سفتی الاستیک ماده می‌باشد.

همان‌طور که مشخص است برای به دست آوردن تنش باید کرنش‌های مورد نظر به دست آیند. بدین منظور باید خواص مکانیکی جسم از جمله مدول الاستیک، نسبت پواسون، خواص پلاستیک و ضریب انبساط حرارتی (جهت محاسبه کرنش حرارتی) وارد تحلیل گردند. بعد از این مرحله با اعمال

6-Newton's law of cooling
7-Subroutine
8-FORTRAN

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

تاریخچه‌ی دمایی به دست آمده از تحلیل حرارتی به عنوان ورودی برای تحلیل مکانیکی، کرنش و به تبع آن تنش به دست خواهد آمد.

6- خواص ماده

خواصی از ماده که متغیر با دما هستند در جدول 2 آمده‌اند. همان‌طور که ذکر شد فلز پایه مورد استفاده در این مقاله فولاد زنگ‌نزن AISI 321 است و همچنین نوع فلز جوش در مرحله اول و سوم از نوع فولاد زنگ‌نزن E308 و در مرحله دوم از نوع ER308 می‌باشد.لازم به ذکر است که E308 به معنای فلز جوش در حالت جوشکاری با الکترود دستی و ER308 به معنای فلز جوش در حالت جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی است که خواص مکانیکی آن‌ها با توجه به مرجع ذکر شده در جدول 2 تقریباً یکسان می‌باشد. همچنین به دلیل نزدیکی خواص فلز پایه و جوش تمام خواص آن‌ها به جز استحکام تسلیم یکسان فرض شده‌اند که در تمام حالت‌ها از مدل سخت شوندگی ایزوتروپیک (همسانگرد) استفاده شده است. خواصی از جسم که ضمن تحلیل (حرارتی و مکانیکی) ثابت در نظر گرفته می‌شوند شامل چگالی ماده، گرمای ذوب و محدوده‌ی ذوب ماده نیز به ترتیب 7900 (kgm^{-3})، 247000 (Jkg^{-1}) و ℃ 1425 - ℃ 1400 می‌باشد.

7- نتایج و بحث

به منظور ارزیابی مدل اجزاء محدود ایجادشده، نتایج به دست آمده از این تحلیل توسط نتایج به دست آمده از فعالیت‌های تجربی که در همین کار انجام شده است مورد اعتبارسنجی قرارگرفته است. بدین منظور نتایج تحلیل حرارتی با داده‌های ثبت‌شده توسط ترموکوپل‌ها و تحلیل تنشی توسط نتایج تنش پسماند به دست آمده از روش سوراخ‌کاری مقایسه شده است.

7-1- صحت‌سنجی مدل حرارتی

پاسخ دمایی اندازه‌گیری شده توسط ترموکوپل‌ها با نتایج به دست آمده از حل حرارتی مدل اجزاء محدود مقایسه شده‌اند. ترموکوپل‌ها تاریخچه دمایی را در نقاط نصب و در حین فرآیند جوشکاری نشان می‌دهند. در مدل اجزاء محدود نیز در همان محل تاریخچه‌ی دمایی محاسبه شده است. برای مثال شکل‌های 6 و 7 مقایسه‌ی تاریخچه‌ی دمایی به دست آمده از اندازه‌گیری تجربی و حل اجزاء محدود را به ترتیب در ورق با ضخامت 6 میلی‌متر و ورق با ضخامت 10 میلی‌متر نشان می‌دهد. در هر شکل جزئیات هر یک از منحنی‌ها نیز در قسمت‌های ب، ج و د همان شکل نشان داده شده است. نمودارهای دما-زمان مربوط به هر نقطه در هر مرحله از جوشکاری (جوشکاری با الکترود دستی یا با گاز محافظ و الکترود تنگستنی) شامل سه قسمت صعود دمایی می‌باشد. برای مثال شکل 6-الف). هر صعود دمایی در واقع مربوط به یک مرحله جوشکاری است. در هر مرحله جوشکاری سه ناحیه را می‌توان شناسایی نمود.

قسمت اول صعود منحنی به دلیل اعمال حرارت ناشی از نزدیک شدن منبع حرارتی به نقطه‌ی مورد نظر است. قسمت دوم بیشینه‌ی دمایی است که در واقع بالاترین دمایی می‌باشد که نقطه‌ی مورد نظر آن را حس می‌کند و قسمت سوم نیز سیر نزولی نمودار است که با توجه به دور شدن منبع حرارتی و سرد شدن ماده در محیط اطراف آن ایجاد می‌شود. این سه جزء در هر سه مرحله‌ی جوشکاری مشترک می‌باشد و فقط در دو مرحله‌ی اول تا دمایی بالاتر از دمای محیط اجازه‌ی سرد شدن به قطعه داده می‌شود ولی در مرحله-ی سوم تا دمای محیط و ایجاد تعادل دمایی قطعه سرد می‌گردد. مشاهده می‌شود که نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. خطای مشاهده‌شده در نمودارهای دمایی می‌تواند ناشی از نحوه‌ی مدل‌سازی منبع دمایی و شرایط انتقال حرارت با محیط اطراف باشد. همچنین خطای تغییرات سرعت دست شخص جوشکار (با توجه به دستی بودن فرآیند جوشکاری) و پاشش جوش به اطراف ضمن فرآیند را باید مدنظر قرار داد.

7-2- بررسی توزیع دما در قطعه

شکل‌های 8، 9 و 10 توزیع دمای به دست آمده از ترموکوپل‌ها در دو ورق را نشان می‌دهند. با توجه به شکل‌ها ملاحظه می‌شود که در نواحی نزدیک به جوش دما تا حدود ℃ 1400 بالا می‌رود ولی در نواحی دورتر از جوش بیشینه‌ی دمایی در حدود ℃ 350 است. مشخص است که تغییرات دما در نقاط نزدیک بسیار بالاتر از نقاط دورتر است و تغییرات دمایی نیز طی مرحله‌های مختلف برای این نقاط بیشتر است. در واقع نقاط دور تر از در واقع

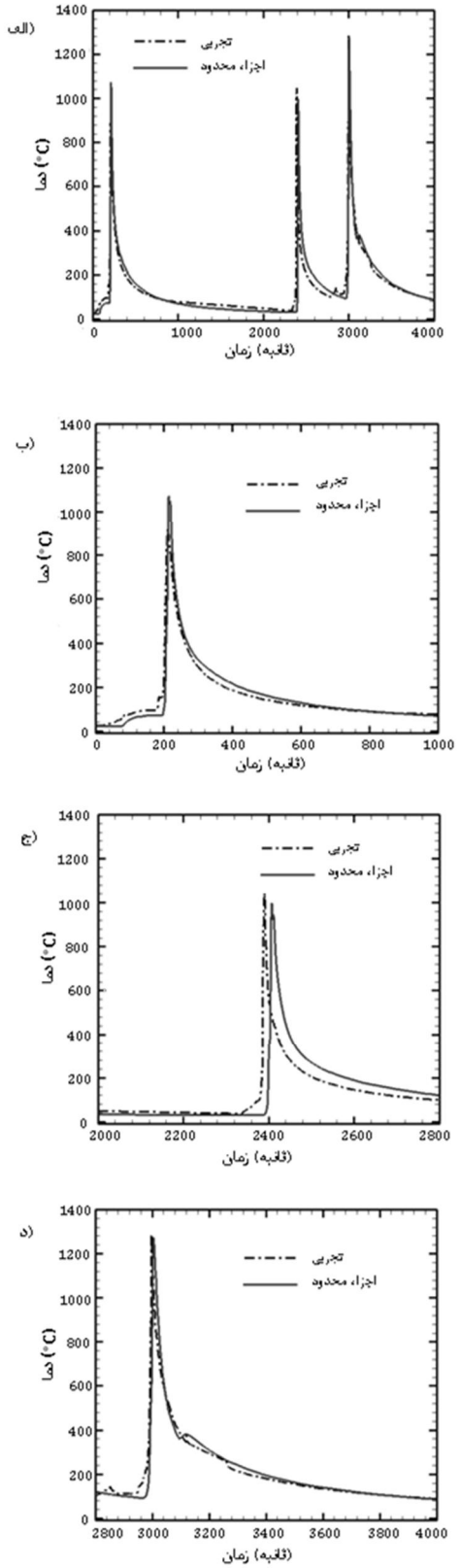
جدول 2 خواص متغیر با دما مواد مورد استفاده [18-20]

رسانایی حرارتی ($Wm^{-1}K^{-1}$)	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	ضریب انبساط حرارتی ($10^{-5}K^{-1}$)	استحکام تسلیم فلز جوش (MPa)	استحکام‌کششی فلز پایه (MPa)	استحکام تسلیم فلز پایه (MPa)	مدول یانگ (GPa)	نسبت پواسون	دما (°C)
15	496	1/67	420	621	241	194	0/29	20
16/3	512	1/67	-	-	-	191	0/29	100
17/8	531	1/71	367	-	190	186	0/29	200
17/8	571	1/71	-	469	170	180	0/31	300
20/8	571	1/71	264	-	157	173	0/318	400
23/6	611	1/85	-	431	144	165	0/318	500
25	627	1/85	209	-	130	155	0/326	600
26/25	638	1/85	154	414	92	133	0/326	800
-	-	2/05	50	-	-	100	0/339	1000
-	-	2/05	-	340	-	57	0/342	1200
-	-	2/1	-	-	-	20	0/388	1300
-	-	-	12	159	-	10	0/388	1400

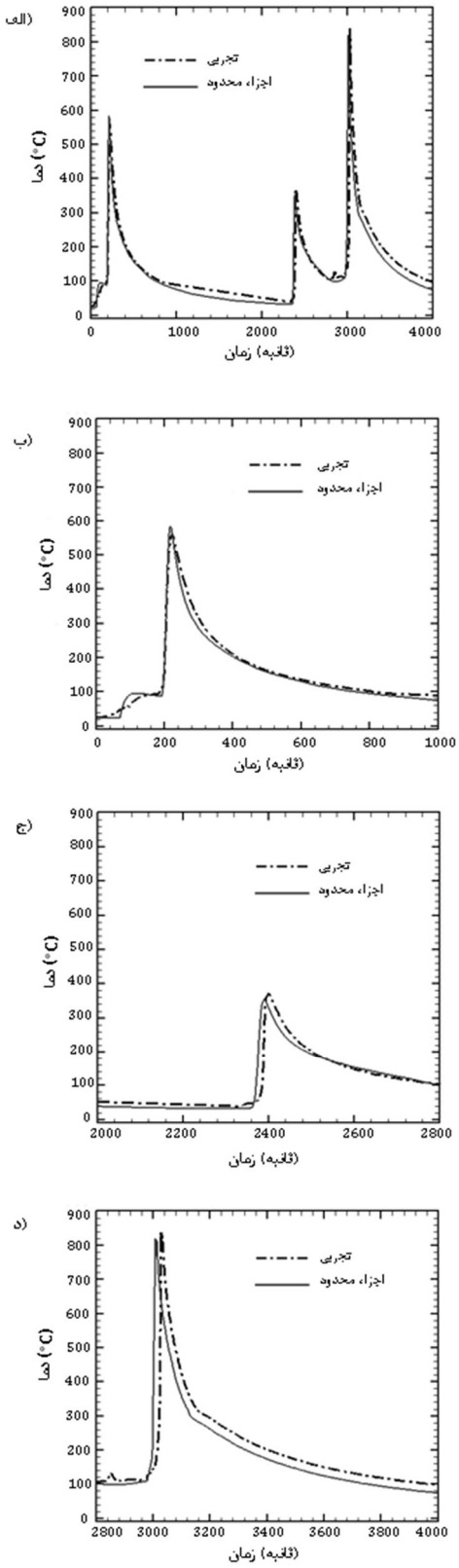
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

نقاط دور تر از خط جوش دماهای بالا و نیز تغییرات دمایی زیادی را حس نمی‌کنند. همین مسئله برای نقاط روی ورق نازک‌تر نسبت به ورق ضخیم‌تر نیز به چشم می‌خورد که بیشینه‌ی دمایی و تغییرات دما (در نقاط متناظر) در ورق 6 میلی‌متری بیشتر از ورق 10 میلی‌متری است.

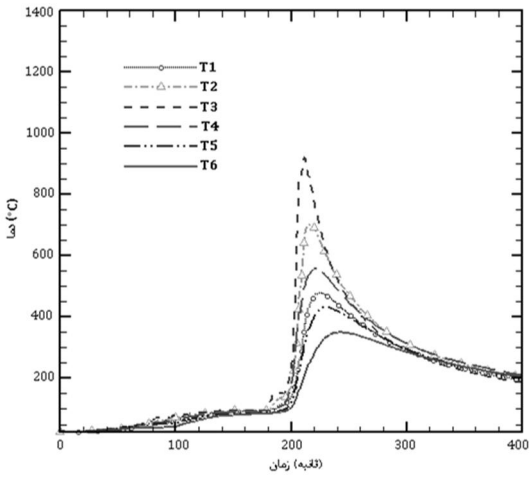


شکل 6 مقایسه‌ی توزیع دما در محل ترموکوپل T3 الف) کل بازه، ب) مرحله اول جوشکاری، ج) مرحله دوم جوشکاری، د) مرحله سوم جوشکاری

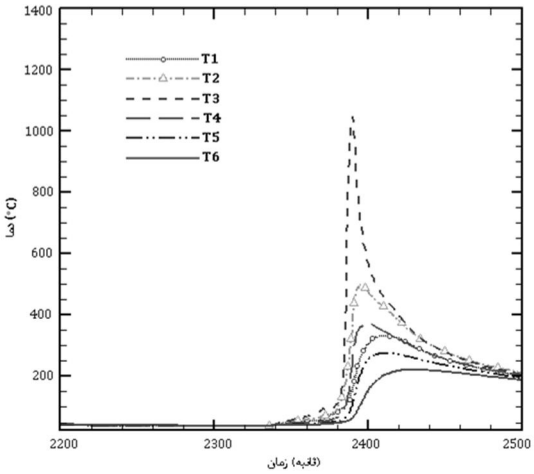


شکل 7 مقایسه‌ی توزیع دما در محل ترموکوپل T4 الف) کل بازه، ب) مرحله اول جوشکاری، ج) مرحله دوم جوشکاری، د) مرحله سوم جوشکاری

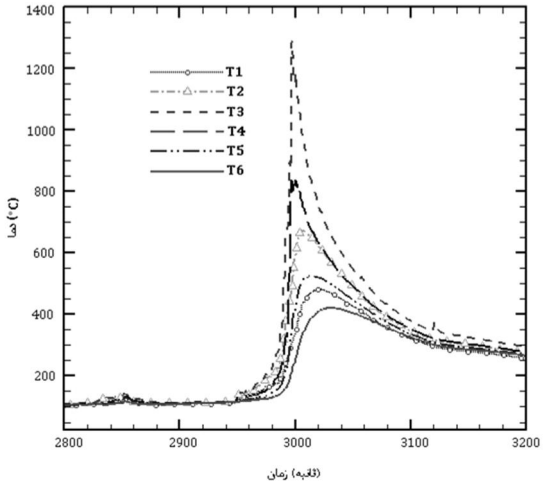
[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]



شکل 8 توزیع دما در محل ترموکوپل‌ها در مرحله اول



شکل 9 توزیع دما در محل ترموکوپل‌ها در مرحله دوم



شکل 10 توزیع دما در محل ترموکوپل‌ها در مرحله سوم

مشخص است که بیشینه دما در دو ترموکوپل نزدیک به خط جوش روی ورق با ضخامت 6 میلی‌متری (T2وT3) در مرحله اول و دوم بیشتر از بیشینه دما در محل ترموکوپل نزدیک به خط جوش روی ورق با ضخامت 10 میلی‌متری (T5وT4) است که این خود نشان‌دهنده‌ی نحوه‌ی توزیع دما روی دو ورق غیر همسان از نظر ضخامت است. در مرحله سوم بیشینه دمای T4 از T2 بیشتر می‌گردد ولی باز هم کمتر از مقدار متناظر دما در T3 است. همچنین مشخص است که بیش‌ترین دماها در مرحله سوم ایجاد می‌شود که ناشی از ورودی حرارتی بیشینه در این مرحله می‌باشد. در واقع می‌توان این مرحله را از لحاظ دمایی موثرترین مرحله طی جوشکاری دانست. توزیع دما از آن جهت در این کار مهم می‌باشد که می‌تواند باعث ایجاد تغییر فاز در فلز پایه که یک فولاد زنگ‌نزن آستنیتی است، گردد.

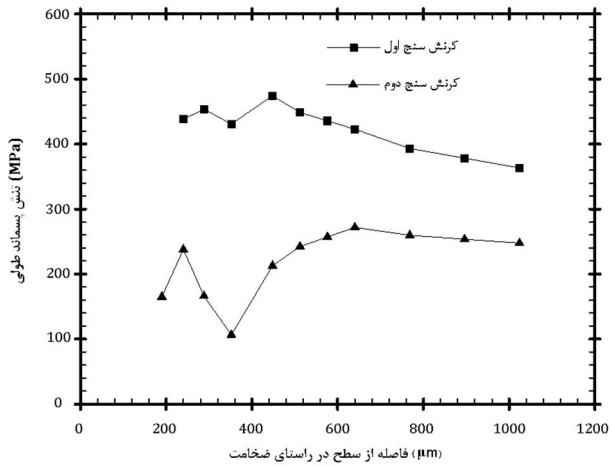
7-3- نتایج تجربی اندازه‌گیری تنش در راستای ضخامت

با توجه به روش سوراخ‌کاری مرحله‌ای به کار گرفته‌شده برای اندازه‌گیری تنش پسماند که تغییرات تنش را در راستای ضخامت نیز می‌دهد، شکل 11 نمودار تغییرات تنش در راستای ضخامت تا عمق حدود 1 میلی‌متر را نشان می‌دهد. در واقع بعد از اندازه‌گیری کرنش‌ها به صورت تجربی، با استفاده از کدی که نوشته شد تنش‌های متناظر محاسبه گردید.

همان‌طور که مشاهده می‌شود روش سوراخ‌کاری مرحله‌ای به خوبی تغییرات تنش را در راستای ضخامت تا عمق 1 میلی‌متر را نمایش می‌دهد. لازم به توضیح است که مقادیر به دست آمده در بیش‌ترین مقدار تقریباً معادل 480 مگا پاسکال است که از استحکام تسلیم ماده بیشتر و تا استحکام کششی ماده هنوز فاصله بسیار زیادی دارد.

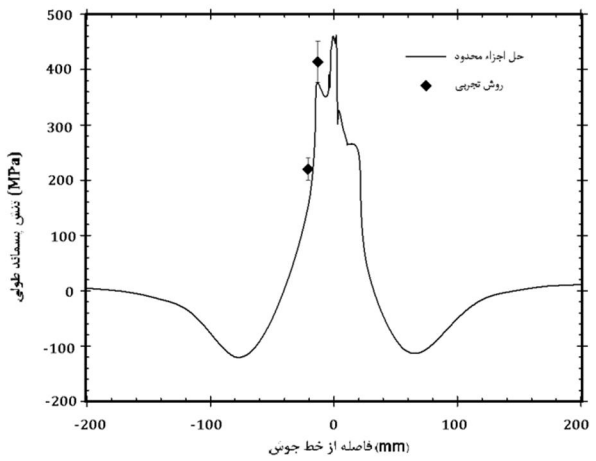
7-4- صحت‌سنجی مدل تنشی و بررسی توزیع تنش

شکل 12 مقایسه‌ی بین نتایج تنش پسماند طولی تجربی و عددی را روی مسیری از قطعه که هر دو کرنش سنج قرار دارند نشان می‌دهد. مشخص است که نتایج تجربی و عددی تطابق خوبی با یکدیگر دارند. نتایج تنشی نشان‌دهنده‌ی این موضوع هستند که تنش پسماند در ناحیه‌ی خط جوش و تا فاصله‌ی حدود 3 سانتی‌متر از آن به صورت کششی هستند و در برخی نقاط نزدیک به جوش مقادیر آن‌ها به استحکام تسلیم ماده و یا حتی بیشتر از آن نیز می‌رسد که این مقادیر بیشتر نشان‌دهنده‌ی ورود آن نقاط از ماده به ناحیه‌ی کرنش سختی ماده است. همچنین وجود فلز جوش با استحکام تسلیم بالا (بیشتر از فلز پایه) نیز دلیلی برای زیاد بودن مقدار تنش پسماند کششی در وسط قطعه می‌باشد. مشاهده می‌شود که قسمت‌هایی از جسم دارای تنش پسماند فشاری هستند که این امر، خود- تعادلی بودن تنش پسماند را در جسم در صورت عدم حضور بارگذاری خارجی نشان می‌دهد. همچنین مشاهده می‌گردد که مقادیر تنش پسماند روی ورق 6 میلی‌متری



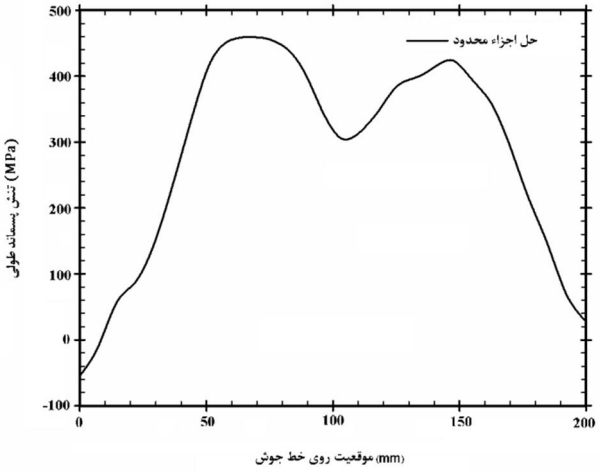
شکل 11 تغییرات تنش پسماند طولی در محل کرنش سنج‌ها در امتداد ضخامت قطعه

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

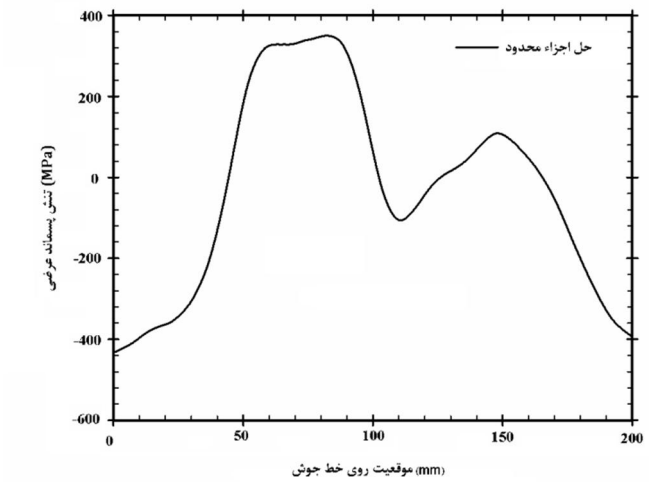


شکل 12 توزیع تنش پسماند در انتهای جوش سوم و مقایسه با نتایج تجربی

دارای مقادیر بیشتری هستند و ناحیه‌ی کششی روی این ورق بزرگ‌تر از ورق با ضخامت 10 میلی‌متر می‌باشد. در صورتی که روی خط جوش مسیری تعریف گردد نتایج توزیع تنش پسماند طولی و عرضی روی این مسیر به صورت شکل 13و شکل 14 می‌گردد. مشاهده می‌گردد در هر دو نمودار مقدار تنش از ابتدای مسیر سیر صعودی را طی می‌نماید تا در اواسط مسیر مقدار تنش به بیشینه‌ی خود می‌رسد و سپس تنش به مقداری کاهش یافته و دوباره و افزایش می‌یابد و بعد از بیشینه مقدار دوم سیر نزولی شروع می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد و در شکل نیز مشخص است در وسط مسیر به یک باره کاهش و دوباره افزایش مقدار تنش وجود دارد، دلیل این امر را می‌توان نوع و نحوه‌ی جوشکاری مورد استفاده قرارگرفته در کار حاضر دانست. در جوشکاری با الکترود دستی با توجه به اینکه الکترود مورد استفاده برای پر کردن کل مسیر کافی نبود هر بار مدتی زمان طول کشید تا الکترود جدید جایگزین گردد و جوشکاری دوباره شروع شود، همین امر و سرد شدن قطعه در مدت تعویض الکترود و شروع دوباره‌ی فرآیند باعث توزیع تنش بدین شکل شده است. البته شکل کلی نمودار روی خط جوش با توجه به مرجع [2] تقریباً همین روند را طی می‌کند.



شکل 13 توزیع تنش پسماند طولی در راستای خط جوش



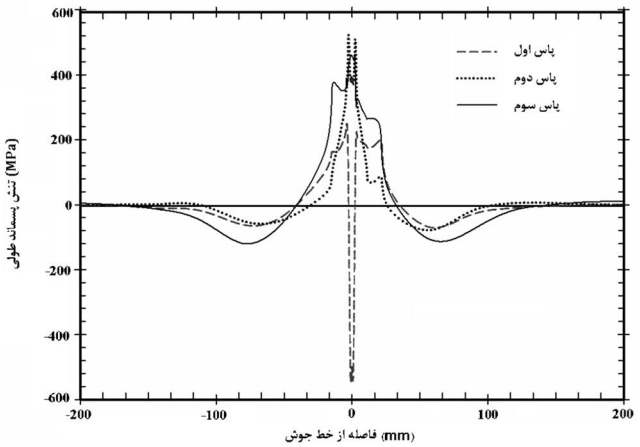
شکل 14 توزیع تنش پسماند عرضی در راستای خط جوش

7-5- بررسی اثر تعداد مرحله‌های جوشکاری بر توزیع تنش پسماند

با توجه به اینکه فرایند جوشکاری حاضر شامل سه مرحله (دو مرحله جوشکاری با الکترود دستی و یک مرحله جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی) می‌باشد و اینکه هر مرحله خصوصیات و شرایط سرد شدن خاص خود را دارد نتایج تنش پسماند طولی در هر مرحله را می‌توان به صورت جداگانه گزارش کرد. در شکل 15 نتایج هر مرحله در یک نمودار به صورت همزمان رسم شده و مورد مقایسه قرار گرفته است. مشخص است که توزیع تنش در هر مرحله متفاوت است. مشاهده می‌شود توزیع تنش پسماند در مرحله‌ی اول جوشکاری در وسط قطعه دارای مقادیر فشاری است. ولی در ادامه با شروع مراحل بعدی و آزاد شدن تنش به واسطه‌ی حرارت ورودی در این مراحل شکل تنش به تدریج تغییر می‌کند و تا در نهایت به شکل توزیع تنش در مرحله‌ی سوم می‌رسد که در وسط قطعه و اطراف خط جوش کششی می‌باشد و در نهایت به مقادیر فشاری می‌رسد.

8- نتیجه‌گیری

در مقاله به بررسی عددی و تجربی توزیع دما و تنش پسماند ناشی از فرآیند جوشکاری در اتصال دو ورق با ضخامت‌های متفاوت از جنس فولاد زنگ‌نزن AISI 321 پرداخته شده است. مدل عددی شامل یک تحلیل اجزاء محدود است که در آن فرایند جوشکاری اعم از قطعات ، ابعاد و خواص آن‌ها و نیز



شکل 15 توزیع تنش پسماند طولی در مرحله‌های مختلف

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-10-12]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]

منبع حرارتی شبیه‌سازی شده‌اند. با توجه به اینکه این تحلیل اجزاء محدود شامل دو قسمت حرارتی و تنشی است نتایج مدل اجزاء محدود توسط نتایج تجربی اندازه‌گیری شده مورد صحت‌سنجی قرارگرفته‌اند. جهت صحت‌سنجی مدل حرارتی از ترموکوپل‌هایی متصل شده به قطعات استفاده گردید. برای صحت‌سنجی مدل تنشی نیز از اندازه‌گیری تنش پسماند به روش سوراخ‌کاری استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری را می‌توان به این صورت خلاصه کرد:

1. تطابق خوب نتایج حرارتی به دست آمده از تحلیل اجزاء محدود و اندازه-گیری تجربی، نشان می‌دهد که مدل شار حرارتی سطحی (گوسی) استفاده‌شده جهت شبیه‌سازی منبع حرارتی برای دو روش جوشکاری با الکترود دستی و جوشکاری با گاز محافظ و الکترود تنگستنی مناسب می‌باشد.
2. نمودارهای حرارتی با نتایج کارهای انجام‌شده در این زمینه مانند مرجع [22,21] از لحاظ شکل کلی منحنی و قسمت‌های صعودی و نزولی آن تطابق دارد.
3. نتایج تاریخچه‌ی دمایی در نقاط مختلف نشان می‌دهد که مقادیر دما در نزدیکی خط جوش در فولاد زنگ نزن خیلی بیشتر از نقاط دورتر از خط جوش می‌باشد. به طوری که تحلیل نشان می‌دهد نقاط دورتر از خط جوش تغییرات دمایی بسیار پایینی دارند. همچنین ورق با ضخامت 6 میلی‌متر دمای بیشتری را نسبت به ورق با ضخامت 10 میلی‌متر حس می‌کند. این تغییرات دما به دلیل اثراتی که بر تغییر فاز فلز پایه دارند نیز حائز اهمیت هستند.
4. نتایج نشان می‌دهد که تنش‌های پسماند طولی در نزدیکی جوش دارای مقادیر کششی و با دور شدن از خط جوش به مقادیر فشاری نیز می‌رسند. این نتیجه در مراجع دیگر مانند مرجع [3] نیز به اثبات رسیده است. در واقع این اندازه‌ی هر کدام از نواحی کششی و فشاری است که در کارهای مختلف متفاوت می‌باشد و باید محاسبه گردد.
5. مقادیر تنش پسماند روی ورق 6 میلی‌متری دارای مقادیر بیشتری هستند و ناحیه‌ی کششی روی این ورق بزرگ‌تر از ورق با ضخامت 10 میلی‌متر می‌باشد.
6. رسم تنش‌های پسماند ایجادشده در هر مرحله به صورتی‌که با یکدیگر قابل مقایسه باشند نشان می‌دهد که زمانی که طول می‌کشد تا قطعه تا دمای مشخصی سرد گردد بر توزیع تنش‌ها و نیز کششی یا فشاری بودن آن‌ها تأثیر دارد که این نکته در مرجع [8] نیز تصریح شده بود.
7. توزیع تنش در راستای ضخامت در ورق 6 میلی‌متری تقریباً یکنواخت می‌باشد.

9- تقدیر و تشکر

از گروه مپنا به دلیل حمایت انجام شده از پایان‌نامه کارشناسی ارشد تشکر و قدردانی می‌گردد.

10- مراجع

[1] A. Yaghi, T. H. Hyde, A. A. Becker, W. Sun, 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.

[2] B. Brickstad, 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.

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

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

[5] P. Pagliaro, M. B. Prime, H. Swenson, B. Zuccarello, Measuring Multiple Residual-Stress Components using the Contour Method and Multiple Cuts, *Experimental Mechanics,* Vol. 50, No. 2, pp. 187-194, 2010/02/01, 2010. English

[6] M. B. Prime, Plasticity effects in incremental slitting measurement of residual stresses, *Engineering Fracture Mechanics,* Vol. 77, No. 10, pp. 1552-1566, 7/ /, 2010.

[7] 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, 11/ /, 2009.

[8] S. H. Kim, J. B. Kim, W. J. Lee, Numerical prediction and neutron diffraction measurement of the residual stresses for a modified 9Cr–1Mo steel weld, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 209, No. 8, pp. 3905-3913, 4/21/, 2009.

[9] S. J. Lewis, H. Alizadeh, C. Gill, A. Vega, H. Murakawa, W. El-Ahmar, P. Gilles, D. J. Smith, C. E. Truman, Modelling and measurement of residual stresses in autogenously welded stainless steel plates: Part 1 – fabrication and modelling, *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* Vol. 86, No. 12, pp. 798-806, 12/ /, 2009.

[10] S. H. Hashemi, M. Sabokrouh, M. R. Farahani, Investigation of weldability in multi-pass girth welding of thermomechanical steel pipe, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, pp. 60-73, 2013. (In Persian)

[11] Y. S. Yegaie, A. Kermanpur, M. Shamanian, Numerical simulation and experimental investigation of temperature and residual stresses in GTAW with a heat sink process of Monel 400 plates, *Journal of Materials Processing Technology,* Vol. 210, No. 13, pp. 1690-1701, 10/1/, 2010.

[12] ASTM, ASTM E837-01: Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, 2006.

[13] G. S. Schajer, Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part II—Practical Application of the Integral Method, *Journal of Engineering Materials and Technology,* Vol. 110, No. 4, pp. 344-349, 1988.

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

[15] W. Sun, E. J. Williams, C. J. Bennett, A. A. Becker, D. W. J. Tanner, A. H. Yaghi, T. H. Hyde, Current capabilities of the thermo-mechanical modelling of welding processes, *Journal of Multiscale Modelling,* Vol. 01, No. 03n04, pp. 451-478, 2009.

[16] I. F. Z. Fanous, A. S. Wifi, M. Y. A. Younan, 3-D finite element modeling of the welding process using element birth and element movement techniques, *Journal of Pressure Vessel Technology,* Vol. 125, No. 2, pp. 144-150, 2003.

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

[18] L. ZhangQin, L. YongBing, W. YaSheng, C. GuanLeng, Numerical analysis of a moving gas tungsten arc weld pool with an external longitudinal magnetic field applied, *Int J Adv Manuf Technol,* Vol. 27, pp. 288-295, 2005.

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

[20] WELDING GUIDE, BOHLER. Welding. Products, ed., 2010.

[21] M. J. Attarha, 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.

[22] S. Murugan, P. V. Kumar, B. Raj, M. S. C. Bose, Temperature distribution during multipass welding of plates, *International Journal of Pressure Vessels and Piping,* Vol. 75, No. 12, pp. 891-905, 10/ /, 1998.

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

[DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.9.14.9]