



تحلیل و ارائه یک سیکل عملیات حرارتی بهینه پس از جوش جهت کاهش حداکثری تنش‌های پسماند جوشکاری پرتو الکترونی

حسین رجبی^۱، علی حیدری^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، واحد خمینی‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی‌شهر، اصفهان، ایران

* خمینی‌شهر، صندوق پستی ۱۱۹-۸۴۱۷۵، heidari@iaukhsh.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در این تحقیق، فرآیند جوشکاری پرتو الکترونی لب به لب دو ورق فولادی P91 در دوبعد و در مدت زمان کوتاه با دقت قابل قبول در دو مرحله تحلیل غیر کوپله حرارتی و مکانیکی به انجام رسیده است. نتایج تنش‌های پسماند با نتایج آزمایشگاهی و عددی محققان دیگر اعتبارسنجی شده است که تطابق خوبی را نشان می‌دهد. در ادامه تحقیق با اعمال عملیات حرارتی بعد از جوشکاری سعی شده است تنش‌های پسماند کاهش پیدا کند. سپس تأثیر پارامترهای سیکل عملیات حرارتی مانند میزان توان حرارت ورودی، زمان حرارت‌دهی، زمان نگه داشتن دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی در بازه سرد شدن بر روی میزان کاهش تنش پسماند بررسی شده است. با بررسی نتایج تأثیرات پارامترها، یک سیکل عملیات حرارتی بهینه جهت کاهش حداکثری تنش پسماند ارائه شده است که با اعمال این سیکل بهینه تنش پسماند ماکزیمم به میزان 55 درصد کاهش یافته است.	مقاله پژوهشی کامل دریافت: ۱۷ فروردین ۱۳۹۷ پذیرش: ۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۷ ارائه در سایت: ۱۵ مرداد ۱۳۹۷
	کلیدواژگان جوشکاری پرتو الکترونی اتصال لب به لب تنش‌های پسماند عملیات حرارتی پس از جوش

Analysis and presenting an optimum post weld heat treatment cycle to maximum reduction of residual stresses of electron beam welding

Hossein Rajabi¹, Ali Heidari^{2*}

1-M.Sc. Student, Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, **Islamic Azad University**, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

2-Assistant Prof., Department of Mechanical Engineering, Khomeinishahr Branch, **Islamic Azad University**, Khomeinishahr/Isfahan, Iran.

* P.O.B. 84175-119 Khomeinishahr/Isfahan, Iran, heidari@iaukhsh.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 6 April 2018
Accepted 20 May 2018
Available Online 6 August 2018

Keywords

Electron beam welding
Butt weld joint
Residual stresses
Post weld heat treatment

ABSTRACT

In this research, the electron beam welding process of P91 steel plates was simulated by the finite element method in two dimensions and in a short time with acceptable accuracy in two steps (non-coupled thermal and mechanical analysis). The simulation results were validated with experimental and numerical results presented by other researchers. Moreover, by applying post weld heat treatment, the residual stresses were reduced. Then, the effect of heat treatment cycle parameters such as heat input power, heating time, holding time and cooling rate were investigated on the quantity of residual stress reduction. By examining the results of the effects of the parameters, an optimum heat treatment cycle is introduced to maximum reduction of the residual stress. Using this optimum heat treatment cycle, the residual stress value was reduced to 55 percent.

Please cite this article using:

Hossein Rajabi, Ali Heidari, Analysis and presenting an optimum post weld heat treatment cycle to maximum reduction of residual stresses of electron beam welding, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 9, No. 2, pp. 55-65, 2018 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

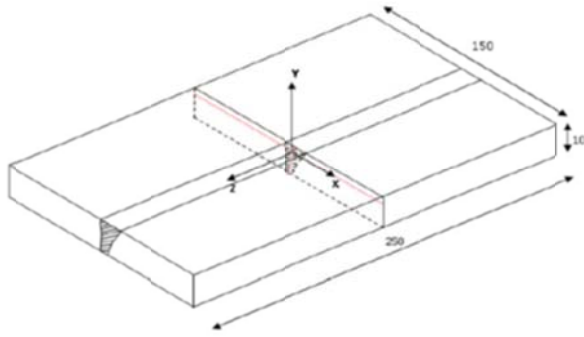
۱- مقدمه

جوشکاری پرتوالکترونی یکی از روش‌های پیشرفته جوشکاری ذوبی است که امروزه کاربرد وسیعی در صنایع هوافضا یافته است. فرآیند جوشکاری دارای محدودیت‌هایی می‌باشد که می‌توان به گسترش تنش‌های پسماند حاصل از حرارت موضعی بالا، سیکل‌های حرارتی و نیز گرادیان حرارتی بسیار بالا اشاره کرد. همه فرآیندهایی که موجب تغییر شکل پلاستیکی شوند منجر به ایجاد تنش‌های پسماند در قطعه خواهند شد. این تنش‌های پسماند باعث شکست ترد، کاهش حد تحمل بار، کاهش عمر اتصالات جوشی و تغییر فرم‌هایی در سازه‌های جوشکاری خواهد شد. به همین دلیل اندازه‌گیری میزان تنش‌های پسماند و چگونگی از بین بردن یا کاهش آن از اهمیت بالایی برخوردار است. راهکارهای متفاوتی از جمله عملیات ارتعاشی و عملیات حرارتی برای از بین بردن تنش‌های پسماند وجود دارد که عملیات حرارتی پس از جوش یکی از ساده‌ترین روش‌ها برای از بین بردن تنش‌های پسماند در جوش می‌باشد. در طول سه دهه‌ی گذشته، روش المان محدود به عنوان ابزاری ثابت و قابل قبول برای محاسبه تنش‌های پسماند و شبیه‌سازی عملیات حرارتی استفاده شده است.

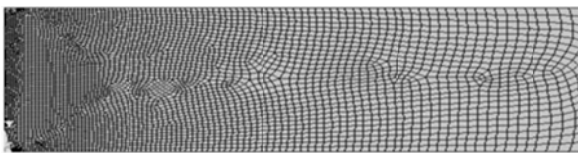
اسمیت و گرود [۱] تأثیر عملیات حرارتی پس از جوشکاری قوس الکتریکی بر روی تنش‌های پسماند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بعد از گرم کردن، بیشترین تنش‌های پسماند به موازات خط جوش و در وسط ضخامت به مراتب کاهش می‌یابد. جوزف و همکارانش [۲] میزان تنش پسماند موجود در اتصالات جوش از جنس فولادهای کربنی را بررسی کردند. در این تحقیق که به کمک روش‌های غیر مخرب اشعه ایکس و نیز امواج مافوق صوت انجام گرفت، اثربخشی عملیات حرارتی بر روی آزاد شدن تنش‌های پسماند مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از کاهش تنش‌های پسماند پس از عملیات حرارتی بود. اولابی و هاشمیا [۳] تأثیر عملیات حرارتی جوش را روی خواص مکانیکی و تنش‌های پسماند در فلزی با مقدار کروم بالا که در موتور هواپیما مورد استفاده قرار گرفته بررسی کرده‌اند. آنها سه نرخ گرمایی متفاوت و سه نرخ سرد کردن متفاوت را بررسی کرده‌اند. تمامی شرایط گرمادهی تا ۵۵۰ درجه سانتی گراد انجام می‌شد. مشاهده شد که نرخ سرد کردن ۱۰ درجه سانتی گراد بر ساعت تأثیر بیشتری بر کاهش تنش پسماند و بهبود چقرمگی داشت. همچنین آشکار شد که نرخ حرارت دهی تأثیر قابل توجهی در مقدار بیشترین تنش پسماند ندارد.

استرجوسکی و همکارانش [۴] خصوصیات جوش در مخزن تحت فشار لعابدار را قبل و بعد از عملیات حرارتی جوش مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می‌داد با اینکه عملیات حرارتی جوش باعث نرم شدن منطقه‌ی تحت تأثیر حرارت جوش می‌شد ولی شکست در این منطقه اتفاق نمی‌افتاد و همچنین کاهش قابل توجه تنش‌های پسماند سطحی مشاهده شد. پادیا و همکارانش [۵] توزیع تنش پسماند در یک لوله‌ی P91 قبل و بعد از عملیات حرارتی را بررسی کردند و به این نتایج دست یافتند که بیشترین تنش‌های پسماند کششی در مرز بین منطقه تحت تأثیر حرارت و فلز اصلی و همچنین ریشه‌ی جوش به وجود می‌آید. علاوه بر این تنش‌های پسماند هیدرواستاتیک قابل توجهی در مجاورت منطقه‌ی تحت تأثیر حرارت ایجاد می‌شود و بیشترین تنش‌های فشاری در آخرین پاس جوش به وجود آمدند که همگی بعد از پس گرم کردن کاهش پیدا کردند. ابوری ونکاتا و همکارانش [۶] مطالعه‌ای بر روی تأثیر پارامترهای عملیات حرارتی روی آزادسازی تنش‌های پسماند در ورق مستطیل شکل P91 با جوش پرتو الکترونی انجام دادند که مشاهده شد زمان نگه داشتن در یک دمای ثابت فقط می‌تواند تا ۲ ساعت قابل توجه باشد، بعد از آن تأثیر قابل توجهی در آزادسازی تنش پسماند ندارد و حداکثر دمای آن باید ۷۷۰ درجه‌ی سانتی‌گراد باشد.

گانگ دونگ و همکارانش [۷] تأثیر عملیات حرارتی در جوش اصطکاکی را بین دو فلز آلایژ تیتانیوم TC4 و فلز 40CR بررسی کردند. بعد از عملیات حرارتی در ۶۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای مدت زمان ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ ساعت استحکام کششی کاهش پیدا کرد اما زاویه‌ی خمش از ۹/۶ درجه در جوش به ۳۲/۵ درجه بعد از عملیات حرارتی در ۲ ساعت تبدیل شد. اسمیت و همکارانش [۸] به اندازه‌گیری و پیش‌بینی تنش‌های پسماند چهار فلز ضخیم که با جوش پرتو الکترونی اتصال داده شده بودند پرداختند که دو مورد از آن‌ها فلز فریتی و دو مورد دیگر فلز ضد زنگ بودند. مشاهده شد که در فلز فریتی بیشترین تنش پسماند در خارج از منطقه‌ی جوش به نام منطقه‌ی تحت تأثیر حرارت رخ می‌دهد که بعد از عملیات حرارتی از حدود ۶۰۰ مگاپاسکال به ۹۰ مگاپاسکال کاهش یافت اما در مورد فلز ضد زنگ چنین چیزی مشاهده نگردید. همچنین تخمین تنش‌های پسماند به روش آنالیز المان محدود تکرار شد که آنالیز المان محدود ایشان همواره مقادیر بالاتری را نشان می‌داد. چرخ‌ی و اکبری [۹] تأثیر عملیات حرارتی پیش از جوش بر روی کاهش تنش‌های پسماند



شکل ۱ هندسه مدل



شکل ۲ المان بندی مدل

روش جوشکاری در این تحقیق، فرآیند پرتو الکترونی به صورت یک پاسه می‌باشد که پارامترهای آن در جدول ۱ مشخص شده است. همچنین زمان انجام فرآیند ۰/۲۶ ثانیه و زمان خنک‌کاری ۲۵۰۰ ثانیه می‌باشد.

جدول ۱ پارامترهای جوشکاری [۶]

نوع فرایند	قدرت (kw)	سرعت (m/min)	راندمان (%)
پرتو الکترونی	۴/۲	۱	۹۰

در برنامه شبیه‌ساز حاضر سه سطح برای پارامترهای مساله تعریف شده است: سطح اول، پارامترهای هندسی قطعه‌کار و نقاط تنظیم دستگاه را در بر می‌گیرد مانند طول، عرض و ضخامت هر یک از دو قسمت ورق یا سرعت جوشکاری، قدرت تنظیمی و زمان جوشکاری. دسترسی به این پارامترها بسیار ساده است و با شروع برنامه مقادیر پیش فرض در پنجره‌هایی نمایش داده می‌شوند از طریق همین پنجره‌ها امکان تغییر این پارامترها وجود دارد. سطح دوم شامل پارامترهایی ناظر بر خصوصیات ترموفیزیکی ماده است که با تغییر جنس می‌بایست تغییر نمایند، این پارامترها که عمدتاً وابسته به دما می‌باشد در فایل‌های جنبی برنامه ذخیره شده‌اند و سطح سوم شامل تنظیمات مدل اجزاء محدود مانند تعداد و دانسیته مش، نوع حلگر و مشابه آن است که ویرایش آن فقط در قالب تغییر در

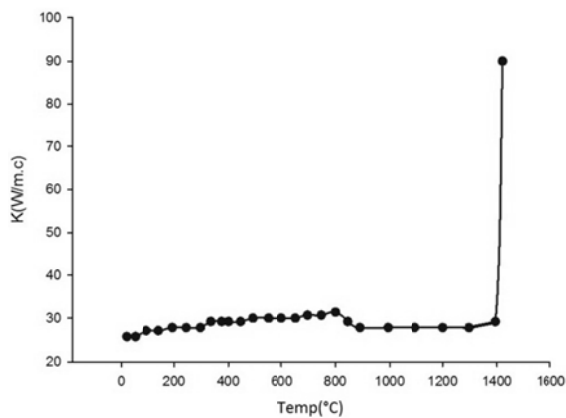
جوشکاری در تعمیر لوله‌های فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی را به صورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. نتایج ایشان نشان داد که با افزایش دمای عملیات پیش‌گرم، تنش‌های پسماند محوری کششی هم در سطح داخلی و هم در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌نزن و فولاد کربنی به ترتیب تا ۳۵ و ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش دمای پیش‌گرم تنش پسماند محیطی کششی در سطح خارجی لوله فولاد زنگ‌نزن و در سطح داخلی لوله فولاد کربنی کاهش می‌یابد اما تغییرات تنش‌های فشاری قابل توجه نمی‌باشد.

در تحقیق حاضر به منظور بررسی تنش‌های پسماند در اتصال دو ورق فولادی P91 از شبیه‌سازی حرارتی و مکانیکی فرآیند به صورت غیرکوپله استفاده شده است. نتایج حاصل با داده‌های آزمایشگاهی و نتایج عددی محققان دیگر مقایسه شده است. در ادامه تأثیر یک سیکل عملیات حرارتی پس از جوش بر روی تنش‌های پسماند بررسی و سعی شده یک سیکل حرارتی بهینه به منظور رسیدن به تنش پسماند کمینه پیشنهاد گردد. بدین منظور تأثیر چهار پارامتر موجود در سیکل عملیات حرارتی شامل زمان گرمایش، میزان توان حرارت ورودی، زمان ثابت نگه داشتن دما و نرخ سرد شدن مورد بررسی قرار گرفته است.

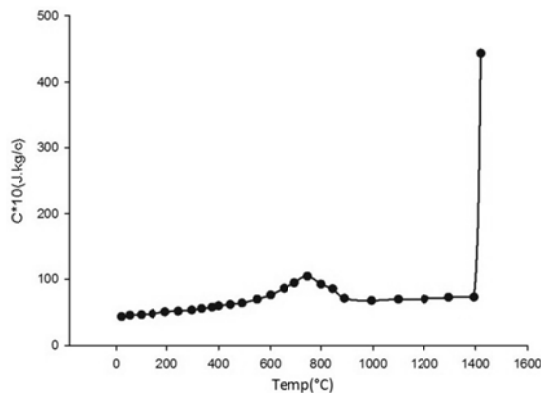
۲- مدل اجزاء محدود

در این تحقیق، اتصال دو ورق مشابه با اندازه $250 \times 150 \times 10$ mm با طرح اتصال V شکل در نظر گرفته شده است. جوش بسیار باریک به عرض ۱/۲ میلی‌متر و شکاف درز جوش ۰/۱ میلی‌متر انتخاب می‌شود. شکل ۱ هندسه مدل و سیستم مختصات را نشان می‌دهد. این مدل به صورت دوبعدی و با رفتار کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به تقارن، تنها نیمی از جسم مدل شده است. نحوه المان‌بندی مدل در شکل ۲ نمایش داده شده است. به علت وجود گرادیان شدید دما و تنش در ناحیه اطراف جوش، این ناحیه از اهمیت بالاتری برخوردار است [۱۰]. به همین خاطر در این ناحیه از المان‌بندی ریزتر استفاده شده است.

می‌نماید که به این گرما، گرمای حاصل از استحاله فازی می‌گویند. لذا طبق رابطه $Q = mC\Delta T$ (که Q مقدار گرما، m جرم، C ظرفیت گرمایی و T دما می‌باشد.) برای افزایش یا کاهش گرما در حالتی که دما ثابت است می‌توان ظرفیت گرمایی را تغییر داد. بنابراین برای شبیه‌سازی گرمای نهان استحاله به کمک تغییر در ظرفیت گرمایی جسم در فاصله دمایی استحاله فازی، اثر گرمای آزاد شده و یا جذب شده در جسم را می‌توان لحاظ کرد [۱۳، ۱۴]. لذا برای در نظر گرفتن آن، ظرفیت گرمایی در دمای ذوب با ضریبی افزایش داده شده است که در شکل ۵ می‌توان آن را مشاهده کرد.



شکل ۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت هدایتی



شکل ۵ تغییرات ظرفیت گرمایی

یکی دیگر از نکات مهم و اساسی در شبیه‌سازی جوشکاری نحوه‌ی اعمال اثرات تغییر حجم ماده در دمای استحاله به عنوان یکی از منابع اساسی و مهم ایجاد تنش در قطعه می‌باشد. برای در نظر گرفتن این اثر، در بازه دمایی استحاله ضریب انبساط حرارت جسم به طور غیر واقعی مقداری منفی در نظر گرفته شده

برنامه ممکن است. هرگونه تغییر در سطح سوم پارامترها نیاز به اعتبار سنجی تحلیل دارد.

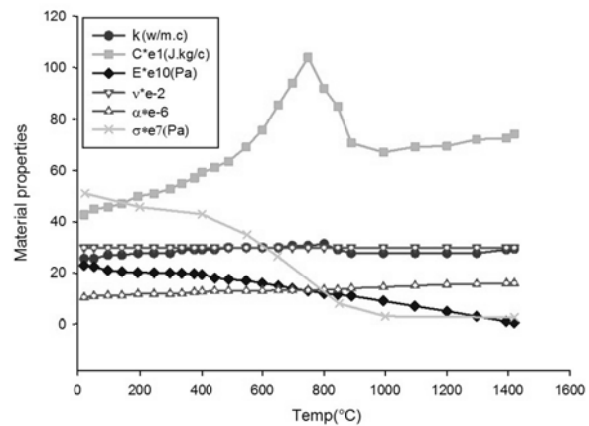
۳- مشخصات ماده

در این تحقیق قطعه کار از جنس فولاد P91 اصلاح شده می‌باشد که درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده مربوط به آن در جدول ۲ آمده است.

جدول ۲ درصد وزنی عناصر فولاد P91 اصلاح شده [۶]

C	Mn	Si	Cr	Mo	Ni	Cu
۰/۱	۰/۴	۰/۲	۸/۹	۰/۹	۰/۲	۰/۱

خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد تابعی از دما می‌باشد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. در این شبیه‌سازی، خواص فلز پایه و منطقه موثر از جوش و فلز جوش یکسان در نظر گرفته شده است [۱۱]. فرض می‌شود ماده از معیار تسلیم فون میزز و قانون جریان تبعیت می‌کند. قانون سختی به صورت سختی ایزوتروپیک خطی در نظر گرفته می‌شود.



شکل ۳ خواص مکانیکی و ترموفیزیکی فولاد P91 اصلاح شده [۶]

۴- چند نکته برای شبیه‌سازی فرایند

وجود جریان مذاب در داخل حوضچه جوش باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد. لذا برای در نظر گرفتن اثر آن ضریب انتقال حرارت هدایتی در دمای بالاتری از نقطه ذوب با ضریبی افزایش داده شده است [۱۲] که در شکل ۴ می‌توان آن را مشاهده کرد. همچنین زمانی که قطعه دچار تغییر فاز یا استحاله فازی می‌شود با توجه به نوع استحاله و فازهای ایجاد شده طی استحاله جسم در دمای تقریباً ثابت، مقداری گرما آزاد و یا جذب

حرارتی در امتداد جوش صرف نظر کرد یعنی $\partial T / \partial z = 0$. بدین ترتیب فرض مدل دو بعدی صادق خواهد بود [۱۳]. با توجه به محدودیت زمانی در صنعت و سرعت بالای حل دوبعدی نسبت به حل سه‌بعدی، در این تحقیق، مدل دوبعدی و با رفتار کرنش صفحه‌ای شبیه‌سازی می‌گردد. با این فرض، شار حرارتی به مقطع عمود بر امتداد جوش در مختصات $x-y$ محدود می‌شود. از آنجائی که در جوشکاری گرمای حاصل از کرنش پلاستیک، اثر تنش‌های قطعه بر روی استحاله‌های فازی و تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی در اثر کرنش‌های سطحی ناچیز می‌باشد، می‌توان معادلات مکانیکی و حرارتی را به صورت مستقل حل نمود و از حل غیر کوپله استفاده کرد [۱۷].

ضریب انتقال حرارت جابه جایی در خط مرکزی، به علت تقارن صفر و در بقیه سطوح این ضریب برابر $15 \text{ W/m}^2\text{k}$ لحاظ شده است. دمای محیط نیز 20°C در نظر گرفته شده است. در مدل حرارتی از المان حرارتی Plane55 که المانی چهار وجهی و هشت گره‌ای می‌باشد، استفاده شده است.

۶- بارگذاری حرارتی

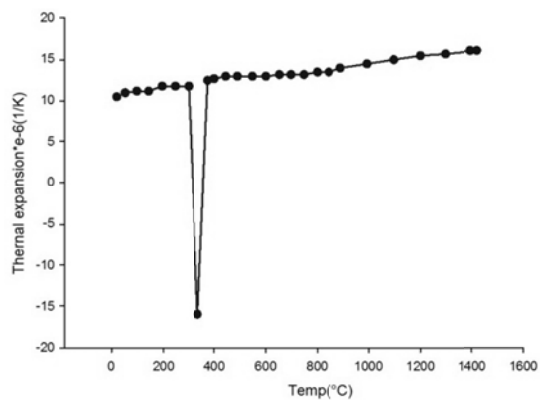
تاکنون روش‌های مختلفی برای اعمال حرارت ناشی از قوس الکتریکی از سوی محققین ارائه شده که مهمترین این روش‌ها عبارتند از [۱۶، ۱۷]:

- ۱- اعمال دمای اولیه بسیار بالا به ناحیه ذوب
- ۲- اعمال سیکل حرارتی از پیش تعیین شده در مدت زمان مشخص به ناحیه ذوب
- ۳- در نظر گرفتن چشمه حرارتی حجمی در ناحیه ذوب برای مدت زمان مشخص
- ۴- اعمال شار حرارتی بر سطح ناحیه ذوب برای مدت مشخص
- ۵- ترکیب روش‌های بالا

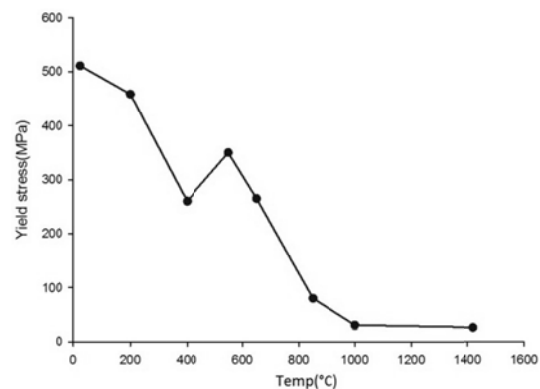
در روش پنجم که به نوعی کاملترین روش محسوب می‌گردد سهم هریک از روش‌های فوق در توان حرارتی جوشکاری را می‌توان بر مبنای اتفاقات فیزیکی حین فرایند تعیین کرد. به طور کلی تشکیل پیوند دو قطعه توسط جوش را می‌توان شامل مراحل زیر دانست:

الف) قطره یا قطراتی از الکتروود جوشکاری به ناحیه جوش وارد می‌گردند و ناحیه جوش را به همراه بخشی از جسم که ذوب شده و به این ناحیه وارد می‌شود تشکیل می‌دهد. سهم هر قسمت در تشکیل ناحیه جوش بر اساس درجه رقت که به نوع و

است [۱۵]. بدین صورت در فرایند سرد شدن قطعه، با رسیدن دمای المان به دمای آغاز استحاله مارتنزیتی با وجود کاهش تدریجی دمای قطعه به دلیل منفی بودن ضریب انبساط حرارت جسم، حجم المان افزایش می‌یابد. با رسیدن دمای المان به دمای پایان استحاله ضریب انبساط حرارت به مقدار مثبت و واقعی خود می‌رسد و روند افزایش حجم المان متوقف می‌گردد و با ادامه سرد شدن جسم، حجم المان کاهش می‌یابد. در شکل ۶ این اثر را برای فاز مارتنزیت می‌توان مشاهده نمود. همچنین کرنش‌های پلاستیک استحاله‌ای در حالی رخ می‌دهد که تنش موثر به تنش تسلیم نرسیده است. لذا برای در نظر گرفتن آن بایستی مقدار تنش تسلیم در بازه دمایی استحاله کاهش داده شود [۱۶] که این کاهش در شکل ۷ در نظر گرفته شده است.



شکل ۶ تغییرات ضریب انبساط حرارتی برای فاز مارتنزیت



شکل ۷ تغییرات تنش تسلیم

۵- مدل حرارتی

در مواردی که سرعت جوشکاری نسبت به سرعت پخش حرارت در امتداد جوشکاری بسیار بیشتر است می‌توان از اثر شار

در رابطه فوق ρ چگالی و C گرمای ویژه فلز است که می‌تواند با دما متغیر باشد. T_i نیز دمای اولیه قطعه کار است که معادل دمای محیط فرض می‌شود. اگر گرمای استحاله‌های فازی قابل توجه باشند می‌توان اثر آن را در C معادل‌سازی نمود. چون فرایند تولد المان لحظه‌ای بوده و حل در لحظه مربوط با مشکلات عدیده‌ی همگرایی روبرو است، از طرفی سهم در کل H_i انرژی انتقال یافته بسیار ناچیز است توصیه می‌گردد در کاربردهای عملی اولین پاس جوش در دمای محیط و پاس‌های بعدی در دمای محاسبه شده برای المانهای مرده در لحظه تولد اعمال شود. این تقریب زمان حل حرارتی را به شدت کاهش می‌دهد.

ب) هنگامی که ناحیه‌ی جوش تشکیل شد در مدت زمانیکه الکتروود بر روی سطح آن قرار دارد در اثر تابش قوس الکتریکی، سطح جوش در معرض شار حرارتی قابل توجهی قرار می‌گیرد. در اغلب تحلیل‌های سه بعدی یک توزیع شار گوسی بر سطح جسم را پیشنهاد داده‌اند که دامنه آن ناحیه‌ای با قطر دو تا سه برابر قطر الکتروود را در بر می‌گیرد. این ناحیه با سرعت v سطح جسم را می‌پیماید. در حل دوبعدی که یک مقطع از جسم در نظر گرفته می‌شود این توزیع به صورت تابعی از زمان به سطح جسم اعمال می‌شود. در این تحقیق توزیع حرارت در مدت زمانی که الکتروود از روی مقطع جسم عبور می‌نماید به صورت یکنواخت و برای ناحیه‌ای با قطری برابر قطر الکتروود مدل شده است چرا که شدت تمرکز انتقال حرارت در توزیع گوسی در زیر الکتروود به طور قابل ملاحظه‌ای بیش از دیگر نواحی است. به کمک این ایده، زمان جایگزین بعد سوم مسئله می‌گردد. همانگونه که از دید ناظری که روی الکتروود جوشکاری قرار دارد مسئله گذرا و دوبعدی است.

بدیهی است کل این گرما به صورت تشعشعی (تابش از قوس به سطح حوضچه) و تماسی سطح ناحیه جوش را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که حوضچه‌ی جوش مذاب است جریان حرارت از سطح به صورت هدایتی و جابجایی به عمق آن نفوذ می‌کند. تعیین میزان سهم هر یک از این دو روش انتقال حرارت بستگی به هندسه جوش، مقدار و چگونگی عمل نیروهای بویانسی، مغناطیسی، خواص مذاب و ... دارد. هر چه اغتشاش در حوضچه جوش بیشتر باشد سهم بخش جابجایی افزایش می‌یابد. چون تحلیل انتقال جرم شبیه‌سازی نمی‌شود این اثر با چشمه‌ی حرارتی جایگزین می‌گردد. شکل 8 نشان می‌دهد چگونه می‌توان اثر اغتشاش در حوضچه که باعث می‌گردد مذاب حرارت را از

شرایط جوشکاری برمی‌گردد قابل محاسبه است. در هنگام شبیه‌سازی، این پدیده را می‌توان با تولد المانهایی به شکل ناحیه جوش با دمای T_0 اولیه که با رابطه (۱) بر حسب درجه رقت D محاسبه می‌گردد شبیه‌سازی نمود:

$$T_0 = [(1 - D)T_{el}^{in} + DT_{ed}] \quad (1)$$

که در آن T_{el}^{in} دمای قطره‌ای است که از الکتروود به حوضچه جوش وارد می‌گردد. بدیهی است که دمای این قطره بیشتر از دمای ذوب ماده الکتروود T_{el}^m و کمتر از دمای تبخیر آن T_{el}^e می‌باشد:

$$T_{el}^m \leq T_{el}^{in} \leq T_{el}^e \quad (2)$$

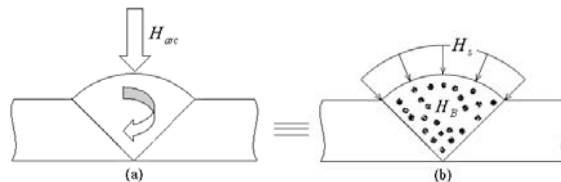
T_{ed} دمای متوسط جداره ناحیه جوش در لحظه وارد شدن قطره به حوضچه است. اینکه متوسط‌گیری تا چه عمقی صورت می‌گیرد به راحتی بر مبنای بقای جرم و با دانستن درجه رقت، دبی جرمی قطرات الکتروود، ابعاد حوضچه و سرعت جوشکاری قابل محاسبه است. این روش حاوی یک فرض اساسی است و آن در نظر گرفتن عمق ثابت برای ناحیه ذوب شده از قطعه کار است. برای استفاده از رابطه (۱) می‌بایست از روش سعی و خطا استفاده کرد چرا که T_{ed} خود مجهول است. لذا ابتدا T_i اولیه حدس زده می‌شود پس از حل مسئله صحت رابطه (۱) چک می‌گردد. اما باید توجه کرد سهمی از انرژی جوش که از این طریق به قطعه کار منتقل می‌گردد ناچیز است ضمن آنکه محدوده‌ی T_0 نیز بین دمای ذوب T_{wp}^m و تبخیر فلز حوضچه T_{wp}^e متغیر است:

$$T_{wp}^e \leq T_0 \leq T_{wp}^m \quad (3)$$

این بازه برای فولادهای کم کربن حدود ۱۴۰۰ تا ۳۰۰۰ درجه سانتیگراد است. چون مدل دوبعدی به ضخامت واحد است، حجم ناحیه پخ خورده $1 \times A$ است که در آن A سطح پر شده از مذاب در هر پاس می‌باشد. برای یک سرعت جوشکاری دلخواه H_i ، v سهم انرژی جوشکاری است که از طریق شرط اولیه تولد المانها با دمای T_0 در ناحیه پخ خورده که همان حوضچه فرض می‌شود به ورق منتقل می‌گردد.

$$H_i = \int_{T_i}^{T_0} v A \rho c dT \quad (4)$$

سطح به عمق حوضچه انتقال دهد با چشمه حرارتی جایگزین کرد.



شکل ۸ چشمه حرارتی (a) واقعیت (b) شبیه‌سازی

در این روابط c_f و c_r به ترتیب مشخصه شعاع توزیع شار در ربع جلو و عقب منبع حرارتی هستند و لذا داریم $f_f + f_r = 2$. پارامترهای a,b,c می‌توانند مقادیر متفاوت در ربع‌های جلو و عقب به خود بگیرند زیرا آن‌ها مستقل هستند. ممکن است در مدل کردن جوشکاری مواد غیر مشابه، نیاز به در نظر گرفتن چهار دسته متفاوت a,b,c باشد.

۷- مدل مکانیکی

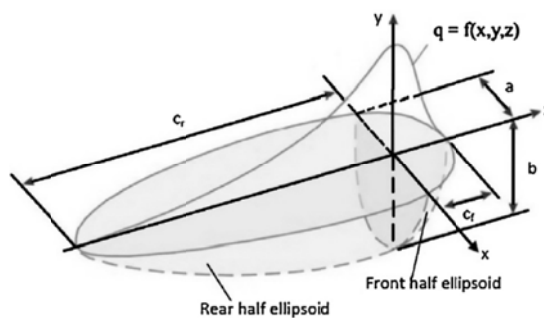
حل حرارتی و مکانیکی به صورت متوالی اجرا می‌شوند. ابتدا حل حرارتی توزیع دما را طی فرآیند جوشکاری مشخص می‌کند و سپس تاریخچه دمایی حاصل به صورت بار حرارتی به مدل مکانیکی اعمال می‌شود و از حل مکانیکی توزیع تنش و اعوجاج بدست می‌آید. بجز نوع المان و شرایط مرزی به کار رفته در مدل مکانیکی، بقیه موارد شبیه مدل حرارتی می‌باشد. در مدل مکانیکی از المان Plane182 که المان چهار وجهی و هشت گره‌ای می‌باشد، با شرط رفتار کرنش صفحه‌ای استفاده شده است. برای اعمال شرایط مرزی مدل مکانیکی، تغییر مکان افقی نقاط واقع بر خط مرکزی صفر و برای جلوگیری از حرکت صلب و همگرا شدن حل، تغییر مکان عمودی یک نقطه با کمترین فاصله از المان‌هایی که طی حل متولد می‌شوند را صفر در نظر می‌گیریم. حل مکانیکی تا زمان همدمای شدن کلیه المان‌ها با دمای محیط ادامه می‌یابد.

۸- عملیات حرارتی پس از جوشکاری

عملیات حرارتی به منظور کاهش تنش‌های پسماند عبارت است از حرارت دادن تا دمای مناسب، ماندن در این دما در دوره زمانی مشخص و سپس سرد کردن آهسته تا دمای محیط، برای به حداقل رساندن تنش‌های پسماند مجدد. در شبیه‌سازی فرآیند عملیات حرارتی مشابه شبیه‌سازی فرآیند جوشکاری می‌توان معادلات مکانیکی و حرارتی را به صورت مستقل حل نمود و از حل غیر کوپله استفاده کرد.

یک سیکل عملیات حرارتی به پارامترهای مختلفی مانند زمان گرم کردن، میزان حرارت وارد شده به قطعه، زمان نگه داشتن حرارت در بالاترین دما و نرخ سرد شدن بستگی دارد. به منظور یافتن یک سیکل عملیات حرارتی بهینه ابتدا با توجه به شرایط قطعه، یک سیکل عملیات حرارتی پیش فرض برای قطعه در نظر می‌شود. سپس در چهار مرحله به صورت جداگانه با تغییرات یکی از پارامترها و ثابت نگه داشتن سه پارامتر دیگر، بهترین

در این تحقیق برای اعمال بارگذاری حجمی از منبع حرارت دو بیضوی چگالی توان گُلداک بهره گرفته شده است (شکل ۹).



شکل ۹ منبع حرارتی دو بیضوی [۱۸]

در این روش، نصف جلو منبع، ربع یک منبع بیضوی و نصف عقب، ربع یک منبع بیضوی دیگر است. بهترین دقت هنگامی حاصل می‌شود که بیضی‌گون شکل و اندازه حوضچه جوش به خود گیرد. این مدل، توزیع انرژی که به ترتیب در ربع جلو و عقب منبع حرارتی ته نشین می‌شود را نشان می‌دهد [۱۹]. توزیع چگالی توان داخل ربع جلو:

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_f^2} \quad (5)$$

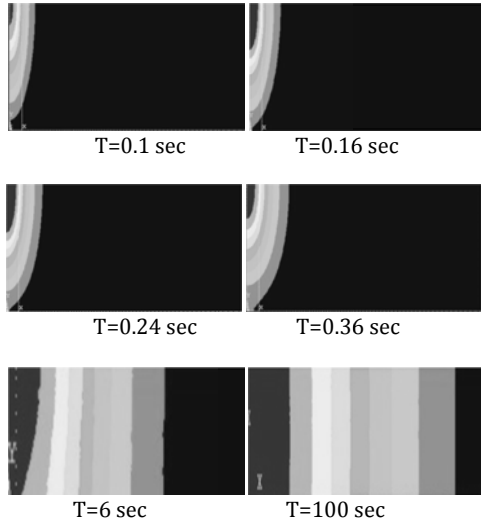
$$f_f = \frac{2c_f}{c_f + c_r} \quad (6)$$

توزیع چگالی توان داخل ربع عقب:

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r\pi\sqrt{\pi}} e^{-3x^2/a^2} e^{-3y^2/b^2} e^{-3[z+v(\tau-t)]^2/c_r^2} \quad (7)$$

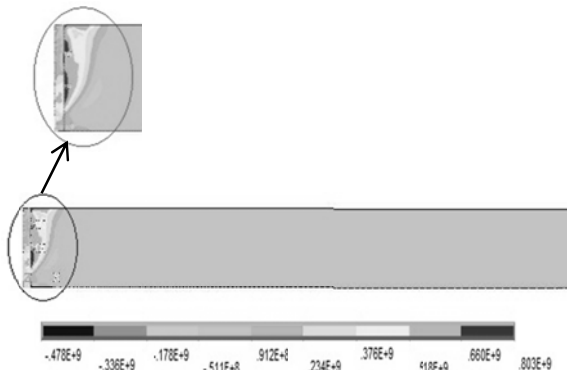
$$f_r = \frac{2c_r}{c_f + c_r} \quad (8)$$

حرارت سریعاً در امتداد ضخامت (جهت Y) به سطح قطعه رسیده و از این لحظه به بعد انتقال حرارت در راستای عرضی (جهت X) سهم بیشتری خواهد داشت. بنابراین می‌توان دریافت که انتقال حرارت هدایتی نسبت به انتقال حرارت جابه‌جایی نقش بسیار مهمتری در خنک‌سازی جوش دارد.



شکل ۱۲ توزیع دما بعد از جوشکاری

تنش موازی با امتداد خط جوش را تنش‌پسماند طولی نام‌گذاری می‌کنیم. در شکل ۱۳ توزیع تنش‌پسماند طولی آورده شده است.



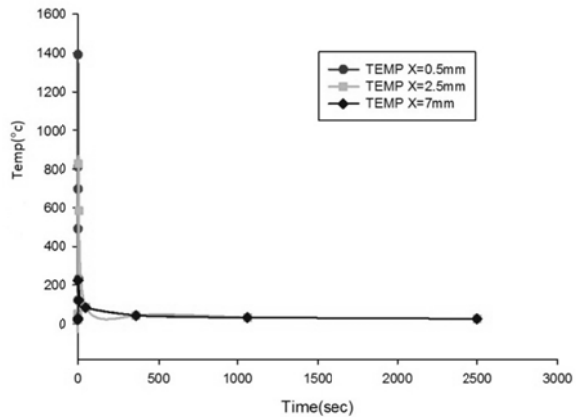
شکل ۱۳ توزیع تنش پسماند طولی بعد از جوشکاری

به منظور راستی آزمایی شبیه‌سازی، نتایج حل مکانیکی فرایند با نتایج تجربی و عددی مرجع [۶] مقایسه شده است. در شکل ۱۴ تنش‌های پسماند طولی با ۱/۵ میلی‌متر فاصله از سطح بالایی مدل با نتایج مرجع [۲۰] مقایسه شده است. همان‌طور که

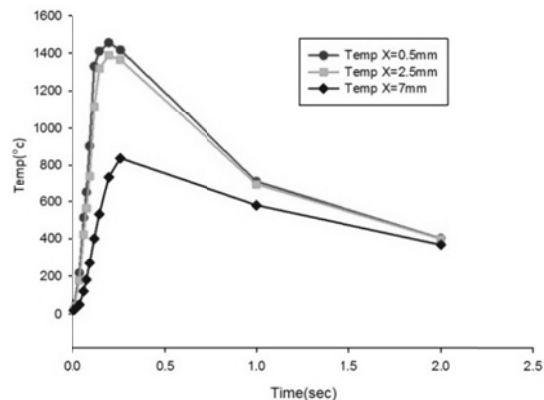
عملکرد هریک از پارامترها برای دستیابی به یک سیکل عملیات حرارتی بهینه ارزیابی می‌شود.

۹- نتایج

نتایج حل حرارتی فرایند جوشکاری برای مدل موجود در شکل ۱۰ آمده است که در آن، تاریخچه دمایی نقاطی از سطح بالای مدل با فاصله ۰/۵، ۲/۵ و ۷ میلی‌متر نسبت به خط مینای جوش در بازه زمانی ۰ تا ۲۵۰۰ ثانیه را نشان می‌دهند. به دلیل آنکه زمان جوشکاری بسیار سریع در حدود ۰/۲۶ ثانیه انجام می‌شود، برای بهتر دیده شدن تغییرات دما بعد از جوش دادن، تاریخچه دمایی نقاط در بازه زمانی ۰ تا ۲ ثانیه نیز در شکل ۱۱ آورده شده است.

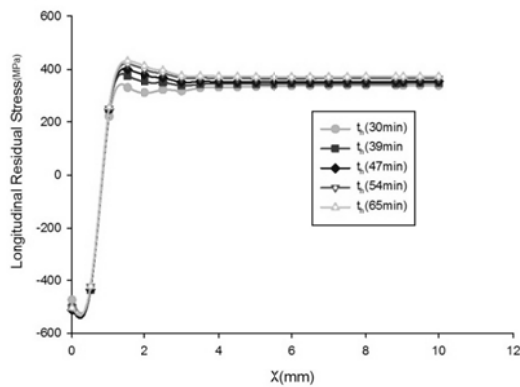


شکل ۱۰ تاریخچه دمایی نقاط از سطح بالای مدل در بازه زمانی ۰ تا ۲۵۰۰ ثانیه

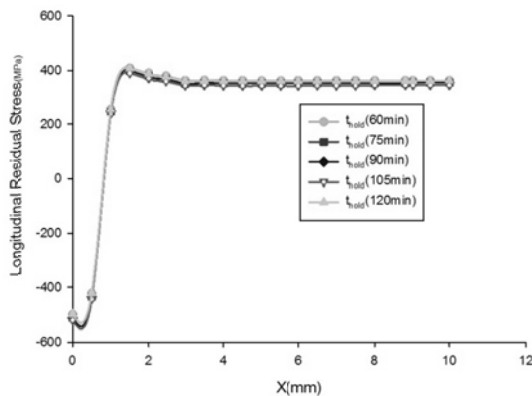


شکل ۱۱ تاریخچه دمایی نقاط از سطح بالای مدل در بازه زمانی ۰ تا ۲ ثانیه

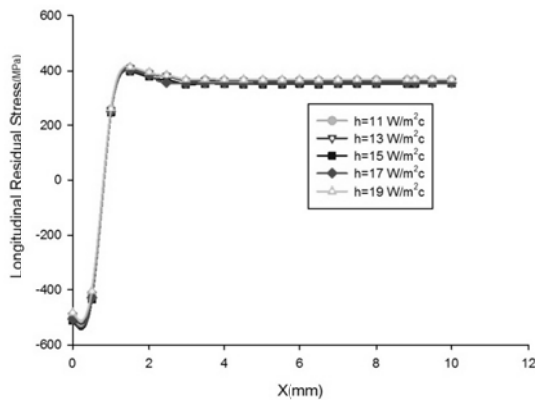
شکل ۱۲ توزیع دما را برای زمان‌های بعد از شروع فرایند جوشکاری نمایش می‌دهد. از این شکل می‌توان دریافت که



شکل ۱۶ تاثیر زمان حرارت دهی بر روی تنش پسماند طولی



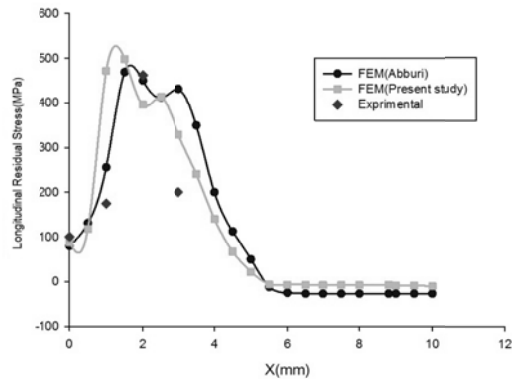
شکل ۱۷ تاثیر زمان نگه داشتن دما بر روی تنش پسماند طولی



شکل ۱۸ تاثیر ضریب انتقال حرارت جابجایی در بازه سرد شدن بر روی تنش پسماند طولی

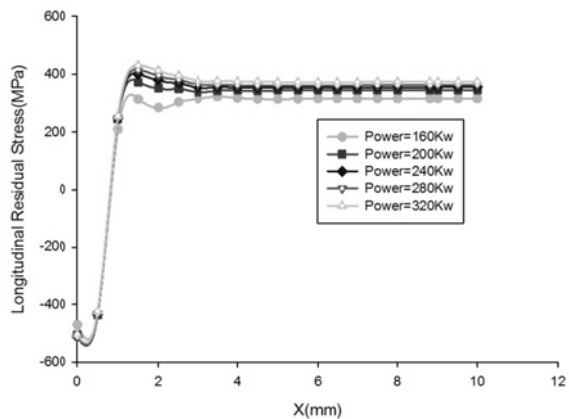
در جدول ۳ اثر تغییرات چهار پارامتر ورودی بر روی ماکزیمم تنش پسماند طولی و ماکزیمم تنش پسماند فون میزب ارائه شده است. با توجه به نتایج بدست آمده بهترین عملکرد هر کدام از پارامترها به منظور یافتن یک سیکل عملیات حرارتی بهینه انتخاب شده است. بدین صورت که کم شدن میزان

در این شکل مشاهده می‌شود، تطابق خوبی بین نتایج بدست آمده از این تحقیق با نتایج آزمایشگاهی و عددی ابوری وجود دارد و همین‌طور روند تغییرات تنش‌های موجود از نظر کیفی مشابه روندی است که در مقالات موجود مشاهده می‌شود. به طور کلی اعتقاد بر این است که تاریخچه پیچیده بارگذاری می‌تواند نقش مهمی در تفاوت نتایج روش اجزاء محدود و روش اندازه‌گیری تجربی ایفا کند.



شکل ۱۴ مقایسه تنش‌های پسماند طولی

در شکل‌های ۱۵ تا ۱۸ می‌توان توزیع تنش‌های پسماند طولی در فاصله ۱/۵ میلی‌متر از سطح را به ترتیب با تغییرات توان حرارت ورودی، زمان حرارت دهی، زمان نگه داشتن دما و ضریب انتقال حرارت جابجایی در بازه سرد شدن مشاهده نمود.



شکل ۱۵ تاثیر توان حرارت ورودی بر روی تنش پسماند طولی

ماکزیمم تنش فون میزز (MPa)	ماکزیمم تنش پسماند طولی (MPa)	زمان نگه داشتن دما (min)
۴۱۶	۴۰۹	۶۰
۴۰۵	۴۰۰	۷۵
۴۱۱	۳۹۹	۹۰
۴۰۱	۳۹۰	۱۰۵
۴۱۲	۴۰۷	۱۲۰

(c)

ماکزیمم تنش فون میزز (MPa)	ماکزیمم تنش پسماند طولی (MPa)	ضریب انتقال حرارت جابجایی (W/m^2c)
۴۲۳	۴۱۲	۱۱
۴۲۱	۴۱۱	۱۳
۴۱۱	۳۹۹	۱۵
۴۱۴	۴۰۳	۱۷
۴۲۱	۴۱۵	۱۹

(d)

حرارت ورودی میزان تنش را کاهش می‌دهد. همچنین ملاحظه می‌شود که زمان حرارت‌دهی در حدود ۳۰ دقیقه بهترین عملکرد را دارد. از طرفی بهترین زمان برای نگه داشتن دما در ۱۰۵ دقیقه ملاحظه شده است که البته به دلیل در نظر نگرفتن اثر خزش در شبیه‌سازی، این پارامتر تاثیر چندانی نداشته است. در بررسی نرخ سرد شدن، ضریب انتقال حرارت جابجایی در $15 W/m^2c$ که تقریباً در شرایط هوای آرام اتفاق می‌افتد نتیجه بهتری از خود نشان داده است. بر اساس این نتایج سیکل عملیات حرارتی پس‌گرم بهینه حاصل شده است (شکل ۱۹).

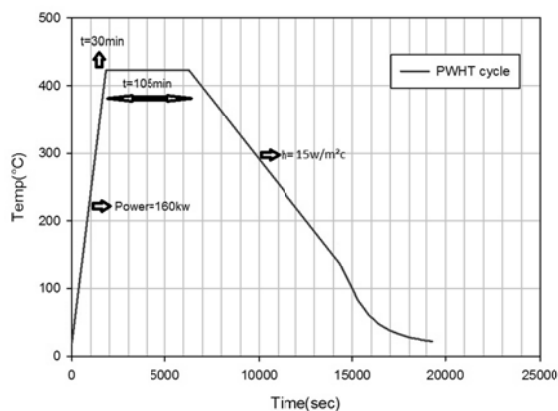
جدول ۳ مقایسه ماکزیمم تنش‌های پسماند طولی و فون میزز با تغییرات پارامترهای ورودی (a) توان حرارت ورودی (b) زمان حرارت دهی (c) زمان نگه داشتن دما (d) ضریب انتقال حرارت جابجایی

ماکزیمم تنش فون میزز (MPa)	ماکزیمم تنش پسماند طولی (MPa)	توان حرارت ورودی (Kw)
۳۸۲	۳۳۲	۱۶۰
۳۹۰	۳۷۵	۲۰۰
۴۱۱	۳۹۹	۲۴۰
۴۲۶	۴۲۰	۲۸۰
۴۳۳	۴۳۱	۳۲۰

(a)

ماکزیمم تنش فون میزز (MPa)	ماکزیمم تنش پسماند طولی (MPa)	زمان حرارت‌دهی (min)
۳۶۹	۳۱۳	۳۰
۳۹۱	۳۷۲	۳۹
۴۱۱	۳۹۹	۴۷
۴۳۴	۴۱۴	۵۴
۴۴۸	۴۳۰	۶۵

(b)



شکل ۱۹ سیکل عملیات حرارتی پس‌گرم بهینه

در شکل ۲۰ توزیع تنش‌های پسماند طولی در فاصله ۱/۵ میلی‌متر از سطح بالای مدل بعد از جوش و بعد از عملیات حرارتی ارائه شده است. از مقایسه نتایج قبل و بعد از عملیات حرارتی به خوبی می‌توان دریافت که ماکزیمم تنش پسماند در حدود ۵۵ درصد کاهش پیدا کرده است.

عملیات حرارتی بعد از جوش توانست تنش‌های پسماند بعد از جوش را به میزان قابل توجهی کاهش دهد به طوری که حداکثر تنش پسماند طولی حدود 55 درصد کاهش یافته است.

۱۱- فهرست علائم

a, b, c	مقاطع منبع حرارتی جوشکاری
A	مساحت سطح پخ خورده (m^2)
C	گرمای ویژه قطعه ($J/kg \text{ } ^\circ C$)
D	درجه رقت
H_i	توان وارد شده به سیستم ناشی از تولد المانها در لحظه تولد (J/s)
H_s	توان وارد شده به سیستم به صورت شار حرارتی سطحی (J/s)
H_B	توان وارد شده به سیستم به صورت چشمه حرارتی حجمی (J/s)
H_{arc}	کل توان حرارتی جذب شده قوس (J/s)
q	شدت توان حرارتی بر واحد سطح (J/m^2s)
T	دما ($^\circ C$)
T_0	دمای اولیه المانهای متولد شده ($^\circ C$)
T_{el}^{in}	دمای قطره‌های الکتروود ورودی به حوضچه ($^\circ C$)
T_{el}^m	دمای ذوب الکتروود ($^\circ C$)
T_{el}^e	دمای تبخیر الکتروود ($^\circ C$)
T_{ed}	دمای متوسط جداره ناحیه جوش در لحظه وارد شدن قطره به حوضچه ($^\circ C$)
T_{wp}^m	دمای ذوب فلز حوضچه جوش ($^\circ C$)
T_{wp}^e	دمای تبخیر فلز حوضچه جوش ($^\circ C$)
v	سرعت جوشکاری

علائم یونانی

ρ چگالی (kg/m^3)

بالانویس‌ها

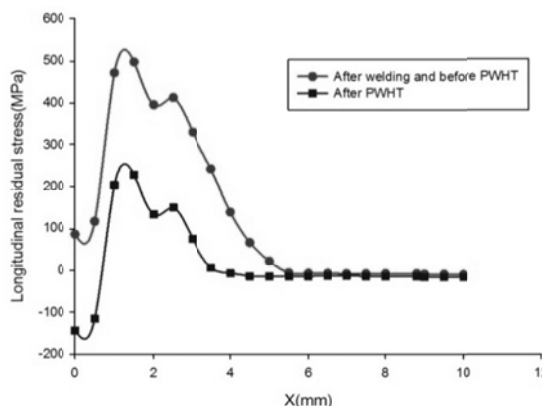
in ورودی

m ذوب

e تبخیر

زیرنویس‌ها

B حجمی



شکل ۲۰ توزیع تنش پسماند طولی قبل و بعد از عملیات حرارتی پس گرم

۱۰- نتیجه‌گیری

- در نزدیکی ناحیه جوش شاهد گرادیان بالای دما نسبت به امتداد در راستای محور X خواهیم بود.
- انتقال حرارت هدایتی نقش بسیار مهم‌تری نسبت به انتقال حرارت جابجایی و تشعشع، در خنک‌سازی ناحیه جوش دارد.
- نظر به این‌که نسبت سرعت جوشکاری به سرعت انتقال حرارت هدایتی در امتداد جوش بسیار بیشتر است، لذا نتایج مدل دوبعدی انطباق بسیار خوبی با نتایج حاصل از کار تجربی دارد که این امر در بالا بردن سرعت شبیه‌سازی موثر است. این موضوع مشاهدات محققان قبلی مبتنی بر کفایت دقت تحلیل‌های دوبعدی فرایند جوشکاری را تأیید می‌کند.
- در اطراف ناحیه جوش، تنش پسماند طولی کششی بسیار بزرگی حاصل می‌شود و با دور شدن از ناحیه جوش این مقدار کاهش می‌یابد.
- کم کردن توان حرارت ورودی و زمان حرارت‌دهی در سیکل عملیات حرارتی میزان تنش پسماند را کاهش می‌دهد.
- با توجه به در نظر نگرفتن خزش در شبیه‌سازی، پارامتر زمان نگه داشتن دما در سیکل عملیات حرارتی تاثیر قابل توجهی بر تنش پسماند جوش نداشته است.
- تنش پسماند در شرایط ضریب انتقال حرارت هوای آرام کمترین مقدار را داشته است.

- [10] G. MAZRUEI, A. HEIDARI, A NEW PLAN TO CONNECT ALUMINUM TUBES OF SUBSURFACE STRUCTURES, 2016.
- [11] M. Forouzan, S. M. Nasiri, A. Mokhtari, A. Heidari, S. Golestaneh, Residual stress prediction in submerged arc welded spiral pipes, *Materials & Design*, Vol. 33, pp. 384-394, 2012.
- [12] S. Wen, P. Hilton, D. Farrugia, Finite element modelling of a submerged arc welding process, *Journal of materials processing technology*, Vol. 119, No. 1, pp. 203-209, 2001.
- [13] S.-H. Cho, J.-W. Kim, Analysis of residual stress in carbon steel weldment incorporating phase transformations, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 7, No. 4, pp. 212-216, 2002.
- [14] B. Taljat, B. Radhakrishnan, T. Zacharia, Numerical analysis of GTA welding process with emphasis on post-solidification phase transformation effects on residual stresses, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 246, No. 1, pp. 45-54, 1998.
- [15] M. R. Forouzan, A. Heidari, S. J. Golestaneh, FE simulation of submerged arc welding of API 5L-X70 straight seam oil and gas pipes, *Journal of computational methods in engineering (Esteghlal)*, Vol. 28, No. 1, pp. 93-110, 2009.
- [16] M. Forouzan, A. Heidari, S. Golestaneh, FE simulation of submerged arc welding of API 5L-X70 straight seam oil and gas pipes, 2009.
- [17] J. Goldak, A. Chakravarti, M. Bibby, A new finite element model for welding heat sources, *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol. 15, No. 2, pp. 299-305, 1984.
- [18] X. Jia, J. Xu, Z. Liu, S. Huang, Y. Fan, Z. Sun, A new method to estimate heat source parameters in gas metal arc welding simulation process, *Fusion Engineering and Design*, Vol. 89, No. 1, pp. 40-48, 2014.

جلو	f
عقب	r
سطحی	s
قوس الکتریکی	arc
الکتروود	el
جداره ناحیه حوش	ed
حوضچه جوش	wp

۱۲- تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی‌شهر جهت انجام این تحقیق کمال تشکر را داشته باشند.

۱۳- مراجع

- [1] D. Smith, S. Garwood, Influence of postweld heat treatment on the variation of residual stresses in 50 mm thick welded ferritic steel plates, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 51, No. 2, pp. 241-256, 1992.
- [2] A. Joseph, P. Palanichamy, S. Rai, T. Jayakumar, B. Raj, Non-destructive measurement of residual stresses in carbon steel weld joints, *Science and Technology of Welding and Joining*, Vol. 3, No. 6, pp. 267-271, 1998.
- [3] A. Olabi, M. Hashmi, Effects of the stress-relief conditions on a martensite stainless-steel welded component, *Journal of materials processing technology*, Vol. 77, No. 1, pp. 216-225, 1998.
- [4] Z. Sterjovski, D. Dunne, S. Ambrose, Evaluation of cross-weld properties of quenched and tempered pressure vessel steel before and after PWHT, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 81, No. 6, pp. 465-470, 2004.
- [5] S. Paddea, J. Francis, A. Paradowska, P. Bouchard, I. Shibli, Residual stress distributions in a P91 steel-pipe girth weld before and after post weld heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 534, pp. 663-672, 2012.
- [6] K. A. Venkata, S. Kumar, H. Dey, D. Smith, P. Bouchard, C. Truman, Study on the effect of post weld heat treatment parameters on the relaxation of welding residual stresses in electron beam welded P91 steel plates, *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 223-233, 2014.
- [7] H. Dong, L. Yu, D. Deng, W. Zhou, C. Dong, Effect of post-weld heat treatment on properties of friction welded joint between TC4 titanium alloy and 40Cr steel rods, *Journal of Materials Science & Technology*, Vol. 31, No. 9, pp. 962-968, 2015.
- [8] D. Smith, G. Zheng, P. Hurrell, C. Gill, B. Pellereau, K. Ayres, D. Goudar, E. Kingston, Measured and predicted residual stresses in thick section electron beam welded steels, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 120, pp. 66-79, 2014.
- [9] D. Akbari, Application of pre-heating in the reduction of residual stress in the repair welds of steel pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 12, pp. 1-10, 2018.