مجله مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1395، دوره 16، شماره 12، ص‌ص 722-732

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بررسی اثر آماده سازی لبه‌ی ورق بر کیفیت اتصال در فرایند جوشکاری القایی لوله‌های فلزی

سجاد قنبری[1]، داود اکبری[2*]، حسن مسلمی نائینی[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
3- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
* تهران، صندوق پستی 14115-143، daakbari@modares.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 20 شهریور 1395
پذیرش: 01 آذر 1395
ارائه در سایت: 11 دی 1395

کلید واژگان:
جوشکاری القایی فرکانس بالا
تحلیل مغناطیسی- حرارتی
شکل لبه‌ی بهینه
گرادیان دمایی

چکیده

در این مقاله، اثر پارامترهای جوشکاری القایی فرکانس بالا بر روی بهبود کیفیت جوش در لوله‌های درزدار مطالعه و بررسی شده است. بدین منظور پارامترهای فرآیندی نظیر شدت جریان، فرکانس جوشکاری و همچنین شکل لبه‌ی اتصال بررسی شده و اثر آنها بر توزیع حرارت در ناحیه‌ی جوش مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌های تجربی مورد بررسی با انجام آزمون‌های کشش، متالوگرافی و میکروسختی ارزیابی و کیفیت سنجی شدند و نواحی متاثر از جوش شامل سه ناحیه با دانه بندی متفاوت و عملیات ترمومکانیکی مختلف شناسایی و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که با اصلاح شکل لبه، بیشترین کاهش اندازه متوسط دانه‌ها در ناحیه فلز جوش و به میزان 27 درصد می‌باشد. همچنین با انجام تحلیل مغناطیسی- حرارتی، شدت جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف برای ایجاد توزیع دمایی مناسب مدل‌سازی و ارزیابی شد. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش شدت جریان و فرکانس جوشکاری، نواحی متاثر از حرارت گسترش یافته و سایر نواحی کوچکتر می‌شوند. بیشترین افزایش دمای متوسط لبه به ازای افزایش واحد فرکانس، از شدت جریان 1250 تا 1500 آمپر و در حدود 42 درصد بوده است. از آزمون سنجش ریزسختی برای تشخیص فازها در جوش استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از تست متالوگرافی و میکرو سختی منطقه جوش، عرض جوش یکنواخت‌تری در نمونه‌های جوش داده شده با لبه اصلاح شده مشاهده شد. همچنین نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش 18 درصدی در میزان عرض جوش در نمونه‌های مذکور نسبت به نمونه‌های بدون آماده سازی لبه بودند.

An Investigation of the groove shape preparation effects in the high frequency induction welding of the metal pipes

Sajad Ghanbari, Davood Akbari*, Hasan Moslemi Naeeni

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
* P.O.B.14115-143, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 10 September 2016
Accepted 21 November 2016
Available Online 31 December 2016

Keywords:
High frequency induction welding
magnetic-thermal analysis
edge prepration

ABSTRACT

In this paper, the effect of high frequency induction welding parameters on the weld quality of welded pipes is studied. For this purpose, process parameters such as current, frequency and edge shape of the weld connection and their effects on the heat distribution are investigated. Experimental investigation is performed by using tensile test, metallography, and micro hardness. This reveals three regions with different grading and various thermo-mechanical treatments. The results show that the grain size decreases about 27 percents as the edge shape is improved. By conducting thermo-magnetic analysis, different current intensities and frequencies are evaluated in the creation of appropriate temperature distribution. The results show that with increasing the current and frequency, the heat-affected zone is expanded and other areas become smaller. The maximum increase of the average temperature in the weld edge, was about 42 percents from 1250 to 1500 amperes per unit increase of the frequency. Micro-hardness test is used to detect micro-structural phases of the weld zone.By comparing the results of the metallography and micro-hardness tests, more uniform weld width was observed with modified edge of the in welded samples. The results represent 18 percents of decrease in the weld width of the modified samples in comparison with samples without edge preparation.

1- مقدمه

فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا[1] یکی از فرآیندهای بسیار مهم و پرکاربرد در تولید مقاطع بسته به خصوص در صنایع ساخت لوله‌های درزدار است. به نحوی که کیفیت این فرایند به طور مستقیم در کیفیت محصولات تولیدی تاثیر گذار است. این فرآیند که به اختصار HFIW نامیده می‌شود،

[1] High frequency induction welding

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
S. Ghanbari, D. Akbari, H. Moslemi Naeeni, An Investigation of the groove shape preparation effects in the high frequency induction welding of the metal pipes, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 12, pp. 722-732, 2016 (in Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

برای اتصال لبه‌های پروفیل‌های بسته در ایستگاه پایانی فرایند شکل‌دهی غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به دلیل قرارگیری فرایند جوش القایی در مراحل پایانی تولید، این فرایند نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت پروفیل نهایی تولیدی دارد. این فرایند به دلیل سرعت بالا، اتوماتیک و پیوسته بودن به طور گسترده‌ای در صنعت لوله و پروفیل‌سازی استفاده می‌شود. همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، در اتصال لبه‌های لوله در فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا از یک سیم پیچ به عنوان القاگر، برای ایجاد شار جریان الکتریکی با فرکانس بالا، بهره برده می‌شود [1]. شار الکتریکی موجب ایجاد جریان گردابه‌ای در سطح لوله و لبه‌ها می‌گردد و به دلیل فرکانس بالای فرآیند، دما در لبه‌ها به شدت بالا رفته و جوشکاری القایی فرکانس بالا به صورت یک فرآیند پیوسته صورت می‌گیرد.

به دلیل کاربرد فراوان لوله‌های درزدار در صنایع مختلف، و نیاز به دستیابی به قابلیت اطمینان بالا در تولید این لوله‌ها، کیفیت جوش القایی در تولید این لوله ها بایستی تا حد امکان بالا برده شود.

یکی از پارامترهای مهم در کیفیت جوش بدست آمده هندسه‌ی لبه‌ی اتصال و یا زاویه‌ی پخ می‌باشد. زاویه‌های مختلف لبه در ایستگاه جوشکاری، متناسب با هندسه‌ی اولیه لبه‌ی ورق، موجب ایجاد گرادیان دمایی مختلف در مقطع جوش شده، که منجر به ایجاد اختلاف دما بین بخش‌های بیرونی و درونی و همچنین ناحیه‌ی میانی در هندسه‌ی اتصال می‌شود. این مسأله در ورق‌هایی با ضخامت بالای 5 میلی متر مشهودتر بوده و کیفیت اتصال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که لوله‌های ضخامت بالا در فشارهای کاری بسیار بالا کاربرد خواهند داشت، مسئله کیفیت اتصال لبه‌ها در فرایند جوشکاری القایی بسیار مهم خواهد بود.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌هایی بر روی جوشکاری القایی فرکانس بالا، شکل لبه در فرایند شکل‌دهی غلتکی و شبیه‌سازی فرایند HFIW انجام گرفته است. بررسی همه جانبه‌ی این فرایند به دلیل دارا بودن پارامترهای متعدد، بسیار دشوار بوده و بررسی ها عمدتاً منحصر به یک یا چند پارامتر محدود بوده است. بررسی‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که فرکانس، شدت جریان، هندسه‌ی ناحیه‌ی Vee شکل[1] و عرض اولیه‌ی ورق بیشترین تاثیر را بر کیفیت جوش می‌گذارند[2].

کیم و همکاران [3] در سال 2003 به پیش‌بینی شکل اولیه‌ی لبه‌ی ورق، با در نظر گرفتن شکل پره‌های ایستگاه پره‌ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شکل لبه‌ی مثلثی معکوس می‌تواند برخورد لبه‌ها را با پره‌های ایستگاه پره‌ای، بهبود بخشد. بنابر نتایج بدست آمده، شکل لبه‌ی ورق، یکی از پارامترهای مهم بر کیفیت فرایند شکل‌دهی می‌باشد.

جانگ کیم و سانگ کای یانگ [4] در سال 2008 شبیه‌سازی سه بعدی فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا را به منظور بررسی اثر پارامترهای تأثیرگذار بر روی کیفیت جوش، انجام دادند. آنها به این نتیجه رسیدند، که سطح بیرونی لبه‌ها، زودتر ذوب شده و همین امر موجب ذوب غیریکنواخت لبه‌ها و گاه فوق داغ شدن آنها خواهد شد. همچنین در صورتی که زاویه‌ی Vee شکل تا حد ممکن کاهش یابد، به دلیل شدت گرفتن اثر مجاورتی حجم بیشتری از لبه‌ها ذوب خواهد شد، هر چند عرض منطقه‌ی متاثر از حرارت در زوایای کوچک کاهش می‌یابد.

هان و یو [5] در سال 2012 به شبیه‌سازی فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا و بررسی ریزساختار ناحیه‌ی جوش پرداختند. این پژوهش نشان داد که راهی موثر برای بهبود کیفیت ناحیه‌ی جوش، بررسی هندسه و ابعاد لبه‌ی لوله می باشد، که موجب کاهش اختلاف دما در لبه‌ها در ناحیه‌ی Vee شکل می‌شود. همچنین برای جلوگیری از رخداد عیوبی همچون جوش سرد، سوختگی لبه‌ها و دیگر عیوب، بایستی گرادیان دمایی در لبه‌های لوله را کاهش داد.

یان و همکاران [6] در سال 2011 به بررسی اثر حرارت بر ریزساختار ناحیه‌ی جوش لبه‌ها پرداختند. آنها از آزمون‌های کشش و شارپی برای بررسی کیفیت و چقرمگی در ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت[2] استفاده کردند. از آنجایی که بررسی‌های گذشته نشان می‌دادند که عملیات حرارتی پس از جوش نمی‌تواند به طور کامل ریزساختار ناحیه جوش را به حالت اولیه برگرداند، به بررسی عوامل مؤثر بر عدم بازگشت به ریزساختار اولیه پرداختند. آنها دلایل کاهش چقرمگی جوش را ریزساختار، آستنیت باقیمانده، آخال‌های اکسیدی[3] و جهت بندی کریستالی[4] بیان کرده‌اند.

دوگیرو و همکاران [7] در سال 2011 به شبیه‌سازی المان محدود فرایند HFIW پرداختند. داده‌های حرارتی بدست آمده از شبیه‌سازی نشان داد که تمرکز دمایی در لبه‌ها بسیار زیاد می‌باشد و در نقطه‌ی جوش، چگالی توان نسبت به ناحیه Vee شکل، به شدت افزایش می‌یابد.

در این مقاله، هندسه‌ی لبه‌ی ورق در هنگام جوشکاری و پارامترهای تاثیرگذار فرآیندی بر کیفیت جوش تولیدی بررسی و با انجام تحلیل‌های تکمیلی، هندسه‌ی مناسب برای ایجاد یک اتصال جوش بهبود یافته معرفی خواهد شد. در این راستا اثر پارامترهای مهم فرایندی نظیر جریان و فرکانس جوشکاری نیز در هندسه‌های مختلف لبه بررسی خواهد شد. همچنین برای ارزیابی اثر بهبود لبه اتصال بر کیفیت متالورژیکی جوش، ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت در نمونه‌های بهبود یافته با استفاده ازمشاهده ساختار میکروسکوپی به کمک میکروسکوپ نوری و همچنین انجام آزمون میکروسختی بررسی خواهد شد.

2- نمونه سازی و آزمون تجربی

در این پژوهش به منظور شبیه‌سازی صحیح فرایند و انجام آزمایش‌های لازم برای رسیدن به نتیجه مطلوب، تلاش شده است تا روند انجام آزمایش‌های تجربی بر اساس نتایج نهایی بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها باشد. از این رو شبیه‌سازی‌های فرایند در شدت جریان و فرکانس‌های صنعتی انجام شده است. به همین منظور، مهمترین عوامل موثر بر فرایند HFIW از قبیل

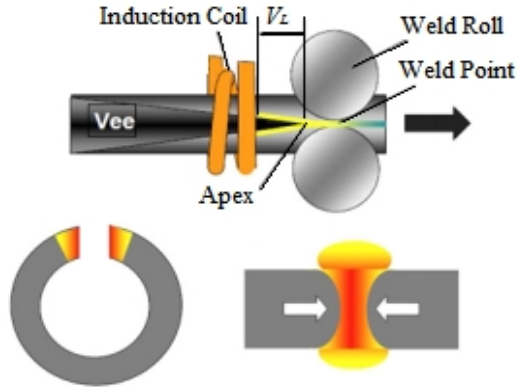

Fig. 1 Schematic of high frequency induction welding

شکل 1 شماتیک فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا

[1] Vee Shape Zone

[2] Heat affected zone
[3] Inclusions
[4] Metallographic texture

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

فرکانس، شدت جریان و شکل لبه‌ی اتصال در لوله مورد بررسی قرار گرفته اند. به منظور انجام فرایند جوشکاری از خط شکل‌دهی غلتکی با 8 ایستگاه، و دستگاه جوش فرکانس بالا با بیشینه توان خروجی 300 کیلووات استفاده شده است. نمونه‌های مورد بررسی از جنس فولاد L 210 با ضخامت 5 میلی‌متر و با هندسه لوله به قطر 165.2 میلی‌متر انتخاب و پس از انجام فرایند جوشکاری، نمونه‌های لازم از لوله جدا شده و برای بررسی‌های مکانیکی و ریز ساختار آماده سازی شده اند.

خواص مکانیکی آلیاژ مورد نظر با استفاده از انجام آزمایش‌های مکانیکی به صورت جدول 1 به‌دست آمد و ترکیب شیمیایی آن در جدول 2 ارائه شده است.

برای انجام آزمون‌های تجربی بر روی نمونه‌های جوش داده شده، سه نمونه به طول 1 متر، با ضخامت 5 میلی متر و عرض اولیه‌ی 526 میلی‌متر از قطعات جوش داده شده جدا شد. در هر قطعه شکل لبه‌ی بدست آمده از داده‌های شبیه‌سازی، بر روی لبه‌ها ایجاد شده است. بر اساس ضخامت و قطر لوله، از توان 144 کیلو وات به منظور انجام فرایند جوش القایی استفاده شده است. آماده سازی لبه‌ها در طول ورق، بر اساس داده‌های گرفته شده از نتایج شبیه‌سازی صورت گرفته است. به دلیل یکسان بودن شرایط فرایند جوش اتوماتیک و نبودن خطای انسانی، تنها متغیر در آزمون تجربی شکل لبه ورق در ناحیه Vee شکل می‌باشد. از این رو مقایسه بین نمونه‌های بدست آمده را می‌توان با اطمینان بیشتری انجام داد.

لبه های بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی عددی، که جهت آماده سازی لبه‌های ورق استفاده شده است شامل بدون لبه سازی (1st) بهینه سازی دوم (2nd) و شکل لبه نهایی (3rd) در شکل 2 نشان داده شده است.

پس از انجام آزمایش‌ها، نمونه‌ها از نظر کیفی بررسی شدند، که نشان دهنده‌ی عدم وجود عیب در ناحیه‌ی جوش می‌باشد. به این منظور آزمون فراصوتی و هیدرو استاتیک استفاده شد.

در انجام جوشکاری فاصله‌ی بین مرکز القاگر و منطقه‌ی جوش 22 سانتی‌متر، فاصله‌ی بین لبه‌ها در ابتدای القاگر 14 میلی متر و زاویه‌ی ناحیه Vee شکل 2.5 درجه در نظر گرفته شد. در شکل 3 شمایی از عملیات جوشکاری لوله نشان داده شده است.

3- مدلسازی فرایند القای جریان

برای بررسی مسائل مربوط به جریان القایی در سیم پیچ‌های دایره‌ای، نیاز به حل معادلات استاتیک کوشی برای بدست آوردن پتانسیل مغناطیسی A می‌باشد [8]:

$$\sigma\frac{\partial A^*}{\partial t}+\nabla\times\left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\nabla\times A^*\right)=\sigma\frac{Nl_{coil}}{A}e_{coil} \quad (1)$$

که در آن:

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد L 210

Table 1 Mechanical properties of L210 carbon steel.

نمونه	استحکام نهایی (MPa)	تنش تسلیم (MPa)	درصدازدیاد طول(%)
L 210 or A	446	340	37.6

جدول 2 ترکیب شیمیایی فولاد L 210 بر اساس استاندارد API 5L [7]

Table 2 Chemical composition of L 210 carbon steel [7].

C	S	P	Mn	Other
0.22	0.03	0.03	0.9	Nb+V max0.06

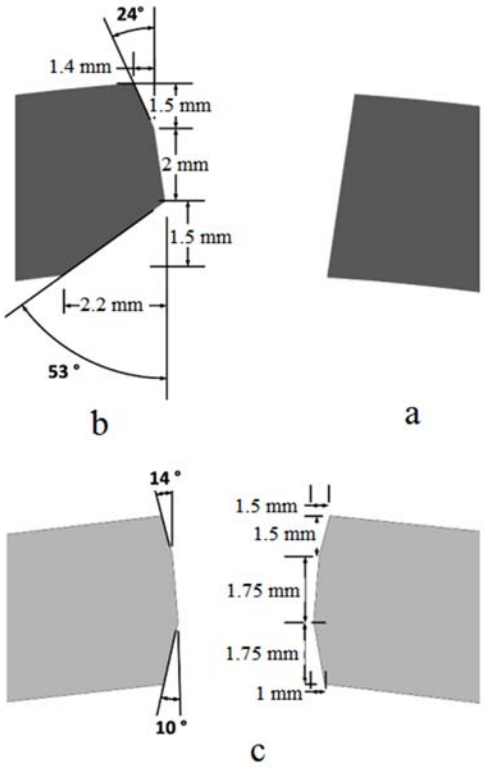

Fig. 2 Schematic of edge preparing in the experimental tests. A) without edge preparing b) second preparing edge c) final preparing edge

شکل 2 انواع هندسه‌ی لبه ورق مورد استفاده در آزمون‌های تجربی. A) بدون آماده سازی لبه (1st) b) دومین آماده سازی لبه (2nd) c) آماده سازی لبه نهایی(3rd)

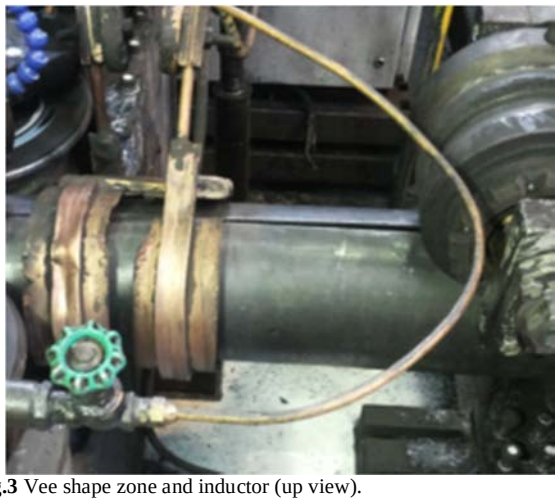

Fig.3 Vee shape zone and inductor (up view).

شکل 3 نمایی از ناحیه وی شکل و ایناداکتور از نمای بالا.

سطح مقطع ایناداکتور	A (m²)
پتانسیل مغناطیس	A^* (Wb/m)
طول یک دور کویل	l_{coil} (m)
رسانایی الکتریکی	σ (S/m)
تراوایی مغناطیسی خلاء	μ_0
تراوایی مغناطیسی ایناداکتور	μ_r
تعداد دور ایناداکتور	N

موردی که سیکل جریان القایی به صورت پریودیک باشد، معادله به شکل زیر ساده سازی می‌شود:

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

$$(J\omega\sigma A + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0\mu_r}\nabla \times A\right) = \sigma\frac{Nl_{\text{coil}}}{A}e_{\text{coil}} \quad (2)$$

که در آن:

فرکانس زاویه ای ω (Radian/s)

چگالی جریان گردابه ای J (Ampere/m²)

با توجه به روابط بالا، سه پارامتر ضخامت، طول ناحیه‌ی Vee شکل و عمق نفوذ استاندارد مهمترین پارامترهای تاثیرگذار ساختاری فرایند می‌باشند که بر اساس دو پارامتر ذاتی فرایند القای مغناطیسی؛ یعنی اثرات مجاورتی و پوسته‌ای کارکرد سیستم را کنترل می‌کنند. بر اساس دو اثر اشاره شده در بالا، چگالی جریان در لبه‌ها و با نزدیکتر شدن آنها به یکدیگر افزایش می‌یابد.

اثر مجاورتی موجب افزایش چگالی جریان القاشده در دو ناحیه‌ی نزدیک به هم می‌شود، به طوری که با نزدیک شدن هر چه بیشتر دو لبه، چگالی جریان در لبه‌ها افزایش یافته است. اثر پوسته‌ای نیز که بر چگالی جریان القاشده تأثیر می‌گذارد، موجب می‌شود که جریان الکتریکی در فرکانس‌های بالا، به صورت سطحی گذر کند، به طوری که با افزایش فرکانس، جریان در عمق کمتری از رسانا نفوذ می‌کند. به عمق نفوذی که بیشترین جریان الکتریکی را از خود عبور می دهد، عمق نفوذ استاندارد گفته می‌شود، که از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید [9]:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f\mu\sigma}} \quad (3)$$

که در آن:

تراوایی مغناطیسی μ (H/m)

رسانایی الکتریکی σ ((1/Ωm)

فرکانس جریان f (Hz)

3-1-تحلیل عددی

مدل ریاضی مورد استفاده جهت مطالعه چگونگی توزیع دما در ناحیه جوش از اصل بقای انرژی (معادله بایوت-فوریه) گرفته شده است.

قطر لوله 165.2 و ضخامت دیواره 5 میلی متر در نظر گرفته شده است. طول لوله شبیه‌سازی شده 100 سانتی‌متر می‌باشد و ویژگی‌های الکتریکی، حرارتی و مغناطیسی مواد در نرم افزار وارد شده اند. بر اساس مدل هندسی ایجاد شده و اعمال شرایط اولیه و نیروها، فرایند القای جریان الکتریکی به لوله‌ی فولادی اعمال می‌شود. میزان جریان وارد شده از سمت ایندکتور به لوله بر اساس روابط زیر اعمال می‌شوند:

$$(J\omega\sigma - \omega^2\epsilon_0\epsilon_r)A + \nabla \times H = J_e \quad (4)$$

$$\frac{1}{\mu_0\mu_r}\nabla \times B - \sigma VB = H \quad (5)$$

که در آنها:

چگالی شار مغناطیسی B (Tesla)

میدان مغناطیسی H (Ampere/meter)

با القای جریان به لوله، بر اثر مقاومت داخلی مدار، جریان القایی به صورت تلفات در لبه‌ها به حرارت تبدیل می شود، میزان حرارت ایجاد شده در لوله بر اساس روابط زیر ایجاد می‌گردند [10]. با فرض اینکه تمام توان ورودی به ناحیه وی شکل، در سطح به گرما تبدیل گردد، گرمای وارده میانگین از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u\cdot\nabla T = \nabla\cdot(k\nabla T) + Q_e \quad (6)$$

$$Q_e = Q_{\text{rh}} + Q_{\text{ml}} \quad (7)$$

$$Q_{\text{rh}} = \frac{1}{2}R_e(J\cdot E) \quad (8)$$

$$Q_{\text{ml}} = \frac{1}{2}R_e(iwB\cdot H) \quad (9)$$

که در آنها:

تلفات مقاومتی Q_{rh} (W/m³)

تلفات مغناطیسی Q_{ml} (W/m³)

ظرفیت گرمایی C_p (J/kg.K)

چگالی ρ (kg/m³)

سرعت u (m/s)

برای انجام شبیه‌سازی‌های لازم و تحلیل فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا، از نرم افزار کامسال[1] استفاده شده است. ابتدا ابعاد لوله‌ی مورد نظر از استاندارد انجمن نفت آمریکا[2] استخراج شده است [11] و سپس بر اساس هندسه‌ی لوله و ایستگاه‌های پره‌ای مدل‌سازی لبه‌های لوله انجام گرفت.

شکل لبه‌ی اولیه در شبیه‌سازی‌های انجام شده بر اساس شکل پره در ایستگاه پره‌ای انجام شده است، به طوری که لبه‌ها در ایستگاه پره‌ای، پیش از ایستگاه جوشکاری، نسبت به یکدیگر زاویه‌ای 5 درجه دارند. در نرم‌افزار، از معادلات ماکسول برای انجام محاسبات مغناطیسی و الکتریکی استفاده شده است، که با تبدیل تلفات الکتریکی سطحی، گرمای ایجاد شده در لبه ها بدست آمده است.

3-2-پارامترهای فرایند

فرایند جوشکاری القایی، فرآیندی شامل مودهای الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی می‌باشد، که با توجه به گذرا و همزمان بودن فرایند، بررسی عددی دارای پیچیدگی‌های زیادی می‌باشد. برای شبیه‌سازی‌های عددی فرایند به 4 محیط برای انتقال انرژی‌های شبیه‌سازی شده در هر مود استفاده شده است. ماده مورد استفاده برای لوله، فولاد ساده‌ی کربنی می‌باشد.

زاویه‌های ناحیه وی شکل و جناغی ایجاد شده در لبه‌ها 2.5 درجه در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی هندسی از شبکه‌بندی چهار وجهی[3] سه بعدی استفاده شده است، که قابلیت انتقال میدان‌های مغناطیسی و حرارتی را دارد، و دارای 4 گره و 4 وجه می‌باشد. همچنین برای مقایسه نتایج تجربی با شبیه‌سازی، مدل سه بعدی در نظر گرفته شد. پارامترهای فرایند شامل فرکانس جریان الکتریکی، شدت جریان، طول و زاویه‌ی ناحیه Vee شکل می‌باشد و شکل لبه‌های مورد نظر در دو لبه‌ی ورق ایجاد شده است. مدل شبکه‌بندی شده در شکل 4 و خواص مواد به کار برده شده در مدل‌سازی به صورت وابسته به دما در شکل‌های 5 تا 7 نشان داده شده است.

شکل هندسی لبه‌های لوله در ناحیه وی شکل بر اساس شکل پره‌های ایستگاه پره‌ای بدست آمده‌اند. سپس با انجام شبیه‌سازی‌ها، شکل بهبود یافته‌ای برای لبه‌های اتصال در ایستگاه جوشکاری پیشنهاد داده شده است. برای رسیدن به کمترین گرادیان دمایی ایجاد شده در لبه‌ها چندین شبیه‌سازی با شکل لبه‌های مختلف انجام شده است، به طوری که این روند به صورت پی در پی و با به کار بردن معیاری برای حداقل گرادیان دمایی در لبه‌ها انجام پذیرفته است.

به دلیل عبور جریان‌های گردابه‌ای با چگالی بالا در لبه‌های اتصال و بر هم کنش دو اثر پوسته ای و مجاورتی، لبه‌ها داغ شده و در نقطه‌ی اتصال به

[1] API
[2] Comsol
[3] Tetrahedral

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

Fig.4 model meshed with tetrahedral element.

شکل 4 مدل شبکه‌بندی شده با المان‌های تتراهدرال

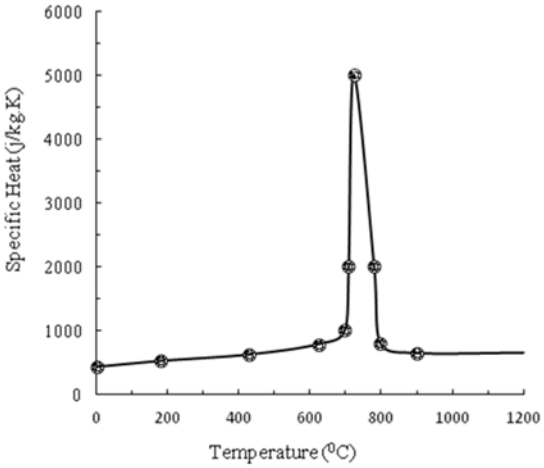

Fig. 5 Specific heat at different temperatures for structural steel [12].

شکل 5 گرمای ویژه در دماهای مختلف برای فولاد ساختمانی

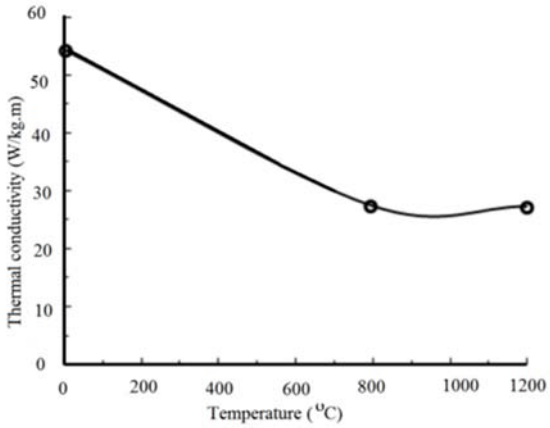

Fig. 6 Thermal conductivity at various temperatures for structural steel [12].

شکل 6 رسانایی حرارتی برای فولاد ساختمانی در دماهای مختلف

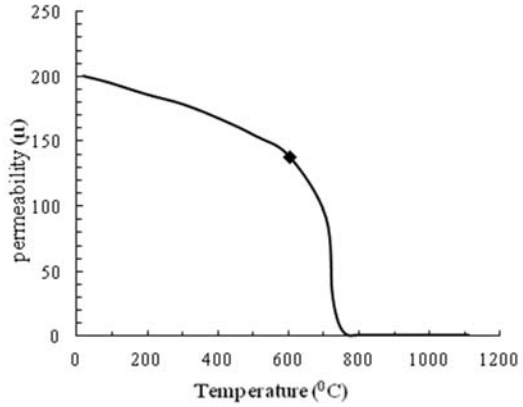

Fig. 7 Relative permeability at various temperatures structural steel [13].

شکل 7 گذردهی مغناطیسی در دماهای مختلف برای فولاد ساختمانی.

بیشتری گرم شده و دمای بخش داخلی لبه‌ها نسبت به سایر بخش‌ها به شدت افزایش می‌یابد. برای رساندن بخش‌های مرکزی و بیرونی لبه‌ها به حداقل دمای ذوب، بایستی جریان بیشتری به لوله القا شود، این امر مستلزم اعمال توان بیشتر می‌باشد؛ که موجب افزایش هزینه‌های انرژی می‌شود. از سوی دیگر با رساندن دمای کل لبه به حداقل دمای اتصال، بخش داخلی لبه‌ها نیز افزایش پیدا خواهد کرد، به طوری که با رسیدن دمای بخش بیرونی لبه به حداقل دمای اتصال، بخش داخلی لبه، به دمایی بسیار بالاتر از دمای ذوب خواهد رسید. همین امر موجب فوق ذوب شدن و سوختن لبه‌های داخلی خواهد شد. همچنین اعمال توان بیشتر برای رساندن دمای کل لبه به دمای اتصال، موجب افزایش عرض جوش و منطقه متأثر از حرارت می‌شود. مقادیر دمای بالای بدست آمده در شبیه‌سازی‌ها از دمای ذوب نیز در شبیه‌سازی‌های فرایند بدست آمده است، که نشان دهنده‌ی عبور جریان با چگالی بالا در سطح بسیار کوچکی از ناحیه‌ی جوش می‌باشد. میزان درصد ناحیه‌ای که چنین دمایی را تجربه می‌کند، در مقایسه با ناحیه‌ی جوش بسیار کوچک است.

با بهبود شکل لبه، گرادیان دمایی تا جایی که به یکنواختی لازم برسد کاهش داده می‌شود و از آن به عنوان شکل لبه‌ی بهبود یافته‌ی نهایی برای انجام آزمون‌های تجربی استفاده می‌شود.

در شکل 8 تغییرات دمای 4 نقطه از لبه‌ی اتصال در راستای دور شدن از مرکز جوش لبه نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، گرادیان دمایی 1200 درجه‌ای در لبه ایجاد شده است. بر اساس نمودارهای ایزوترمال گرافیکی بدست آمده از دمای لبه، شکل لبه اصلاح شده و هندسه‌ی آن در مدل‌سازی تغییر می‌کند. این عملیات برای رسیدن به شکل لبه‌ی بهبود یافته در چندین مرحله انجام شده است. شکل لبه‌ی بهبود یافته به صورت شکل 9 بدست آمده است.

برای ترسیم پروفیل دمایی در شکل 8، تعداد چهار نقطه که نقطه اول در سطح بیرونی جوش و نقاط بعدی به ترتیب در عمق 2 ، 4 و 5 میلیمتری از سطح و به سمت سطح داخلی جوش هستند، انتخاب شدند.

نتایج شبیه‌سازی بر روی شکل لبه‌ی بهبود یافته‌ی اول، دوم و سوم نشان می‌دهد که شکل لبه، مهمترین پارامتر بر روی گرادیان دمایی می‌باشد. دما در لبه‌ی بهبود یافته‌ی نهایی دارای کمترین گرادیان و در نتیجه یکنواخت‌ترین توزیع دما می‌باشد.

3-3- شبیه‌سازی های اثر هندسه‌ی لبه

شبیه‌سازی‌های اولیه بر روی شکل لبه‌ی ورق با هدف کاهش گرادیان دمایی و رسیدن به شکل لبه‌ی بهینه با کمترین گرادیان دمایی، انجام شده است. در شبیه‌سازی‌های اولیه نتایج، گرادیان دمایی بالایی را در لبه‌ها نشان می‌دهد که در واقع بخش داخلی لبه‌ها به خاطر اثرات پوسته ای و مجاورتی با شدت

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

در شکل‌های 10 و 11 توزیع دما در لبه‌ها، در 2 توان 123 کیلو وات و 179 کیلو وات در دو هندسه‌ی مختلف لبه نشان داده شده است.

افزایش توان در لبه‌ها موجب افزایش عرض جوش و منطقه‌ی متاثر از حرارت شده است. مقایسه‌ی نمودارهای توزیع دمایی در شکل لبه‌های مختلف نشان می‌دهد که توان مصرفی در گرمایش لوله با شکل لبه‌ی دوم 3 درصد بیشتر از توان مصرفی در شکل لبه‌ی بهبود یافته‌ی نهایی می‌باشد؛ در حالی که در گرمایش لبه‌های بهبود یافته‌ی دوم، بخش‌هایی از لبه به حداقل دمای اتصال نرسیده‌اند. به همین دلیل برای رساندن دمای تمامی سطح لبه به دمای اتصال، نیاز به افزایش توانی معادل 50 کیلو وات در توان مصرفی می‌باشد. این میزان افزایش توان معادل 60 درصد افزایش در انرژی مصرفی جوش است.

توزیع دما در 4 نقطه از لبه‌ی اتصال در نمونه با شکل لبه‌ی نهایی در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود کاهش گرادیان دمایی از 1200 به 200 درجه، نشان دهنده‌ی تاثیر بسیار زیاد شکل لبه‌ی ورق در یکنواخت‌سازی توزیع دما در لبه‌ی اتصال می‌باشد.

فرایند گرمایش در 2 ناحیه شامل: ناحیه Vee شکل و منطقه‌ی جوش مهمتر می‌باشد به طوری که هر اندازه طول ناحیه Vee شکل بیشتر باشد،

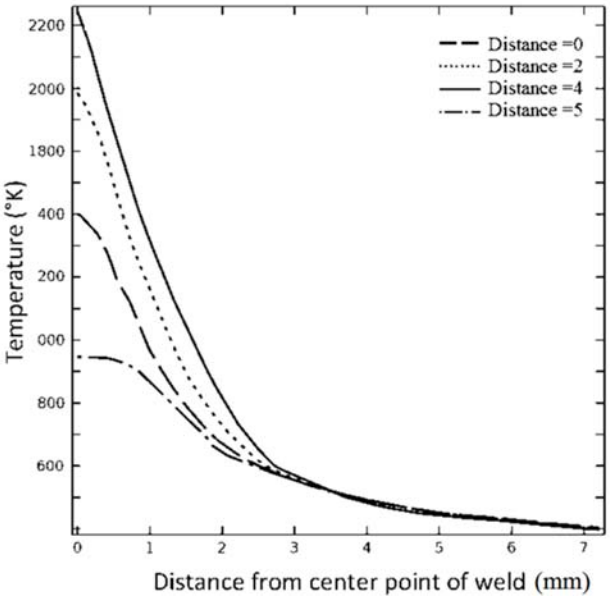

Fig. 8 Temperature profiles of 4 points in the weld edge without edge preparing.

شکل 8 پروفیل دمایی در 4 نقطه از سطح بیرونی جوش، بدون آماده سازی لبه.

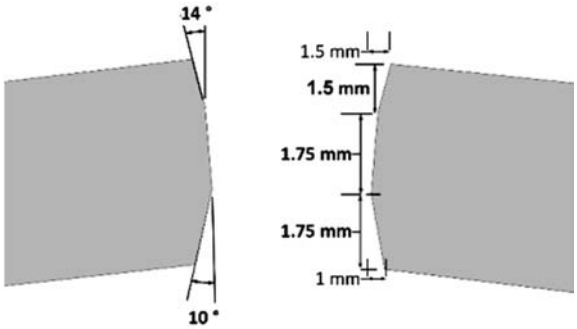

Fig. 9 final improved edge shape derived from Isothermal diagrams.

شکل 9 شکل لبه بهبود یافته‌ی نهایی پس از بررسی نمودارهای ایزوترمال.

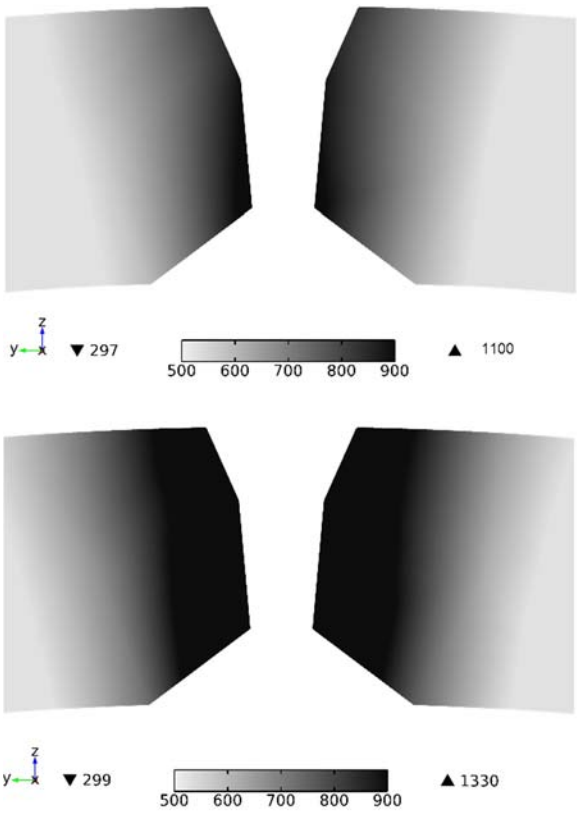

Fig.10 temperature distribution in the edge for second optimized edge for two power sets.

شکل 10 توزیع دما در لبه‌ها در دو توان مختلف برای دومین شکل لبه‌ی بهبود یافته.

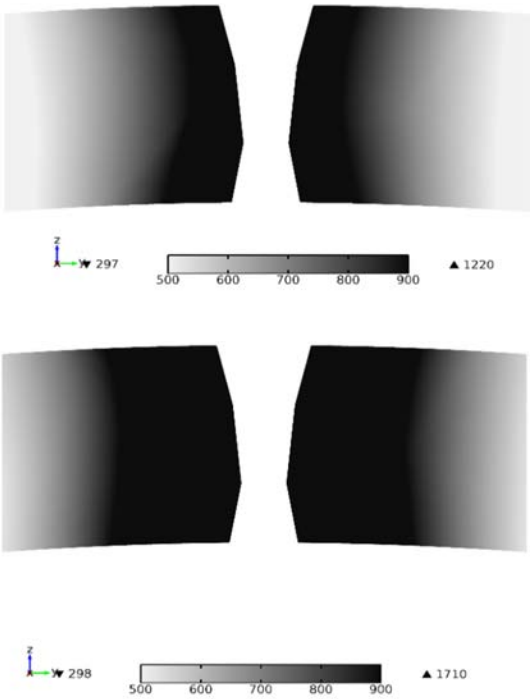

Fig.11 Temperature distribution in final optimized edge in 2 power sets.

شکل 11 توزیع دمای در لبه‌ها در دو توان مختلف برای شکل لبه‌ی بهبود یافته‌ی نهایی.

تلفات حرارتی بیشتر خواهد بود. از سوی دیگر، درصورتی که دمای ایجاد

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

شده در حین جوشکاری پایین‌تر از حد بهینه باشد، عمل تداخل لبه‌ها ضعیف بوده و جوش ایجاد شده از استحکام کافی برخوردار نخواهد بود. بنابراین با توجه به دمای ایجاد شده در حین فرآیند، دستیابی به اتصالی مطلوب است که دارای اندازه عرض جوش یکنواخت و میزان تداخل مناسب باشد. به بیان دیگر با افزایش دمای فرایند، غیر یکنواختی عرض جوش تأثیر منفی و افزایش تداخل تأثیر مثبتی بر روی استحکام کششی اتصال دارند و استحکام کششی تحت تاثیر برهم کنش این دو پارامتر می‌باشد. بدین جهت و با توجه به تأثیر پارامترهای جوشکاری بر حرارت ایجاد شده در حین فرآیند، ریزساختار ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه‌ی ترمومکانیکال در 2 نمونه لبه‌ی بهبود یافته با نمونه‌های بدون لبه بهبود یافته، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

4- نتایج و بحث

4-1- تست کشش

برای ارزیابی کیفیت مکانیکی جوش حاصل در پژوهش حاضر، از نمونه آزمون کشش (مطابق با استاندارد ASTM-E8 [14]) استفاده شد. نمونه‌های آزمون جوشکاری شده در شکل 13 نشان داده شده اند. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه‌ها در جدول 3 ارائه شده است.

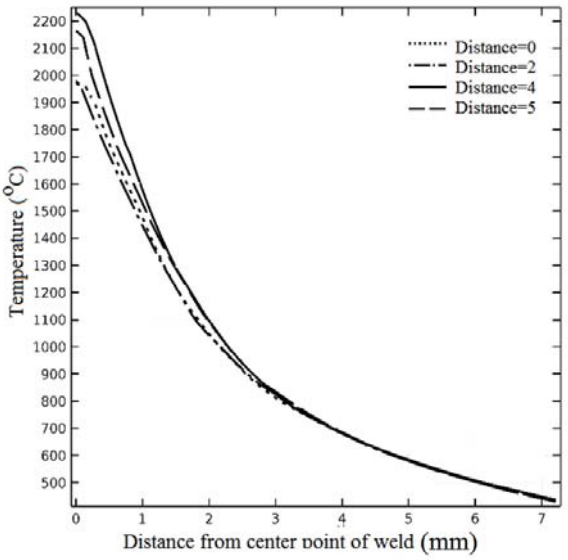

Fig.12 Temperature profiles of 4 distance from the outer surface, in final edge preparation.

شکل 12 پروفیل دمایی در 4 نقطه از لبه‌ی اتصال، در شکل لبه‌ی نهایی.

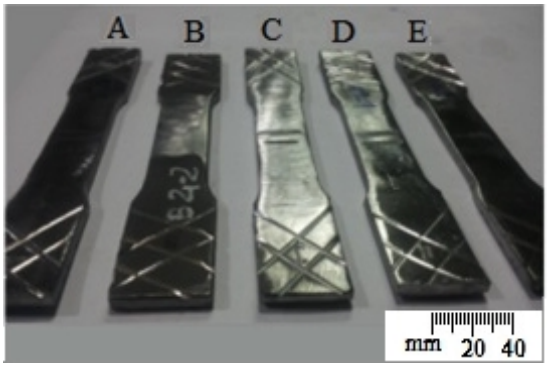

Fig. 13 Tensile test specimens based on ASTM-E8 standard for large diameter pipes.

شکل 13 نمونه‌های تست کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 برای لوله های با قطر بالا.

جدول 3 خلاصه نتایج آزمون کشش نمونه‌ها

Table 3 Tensile test results

شماره نمونه	استحکام کششی تسلیم(MPa)	درصد ازدیاد طول نسبی (%)
1	398	20.2
2	398	17.8
3	388	19.4
4	399	16.1
5	395	16.4
6	375	17.5
7	340	36.7

در نتایج ارائه شده در جدول 3، نمونه‌های 1 و 2 مربوط به شکل لبه آماده‌سازی شده نهایی، نمونه‌های 3 و 4 مربوط به اولین شکل آماده‌سازی لبه و نمونه‌های 5 و 6 مربوط به دومین شکل لبه آماده‌سازی شده می‌باشد. شکل 14 نمودارهای بدست آمده برای استحکام کششی نهایی و تسلیم در شکل لبه‌های مختلف شامل نمونه‌های بدون لبه سازی (1st) بهینه سازی دوم (2nd) و شکل لبه نهایی (3rd) و در شکل 15، درصد ازدیاد طول این نمونه‌ها مقایسه شده‌اند. روند نمودارها در استحکام تسلیم نشان می‌دهند که بهبود شکل لبه، تا حدودی موجب افزایش استحکام کششی شده‌است. میزان افزایش استحکام نمونه‌های بهبود یافته، 5.7 درصد می‌باشد. همچنین ناحیه‌ی شکست در نمونه‌ها، از خط جوش فاصله داشته است، که نشان دهنده‌ی سلامت جوش می‌باشد. از طرفی درصد ازدیاد طول در نمونه‌ی نهایی در مقایسه با نمونه‌های بدون آماده سازی لبه، از 17.5 درصد به 19.1 افزایش داشته است.

همانگونه که مشاهده می‌گردد، تفاوت بزرگی بین نتایج حاصل از آزمون‌ها مشاهده نمی‌گردد. بااین حال دلایل احتمالی این مشاهدات را می‌توان به یکنواخت تر شدن منطقه جوش و در نتیجه کاهش عیوب احتمالی نسبت داد. از طرفی هرچه ابعاد حوزه جوش ایجاد شده بزرگتر باشد، تحت شرایط محیطی حساس مانند محیط‌های خورنده و اکسیدی حساسیت بیشتری داشته و ضعیف‌تر عمل می‌کند. بنابراین در صورتی که نمونه‌ها در یکی از محیط‌های مذکور آزموده شوند، احتمال داده می‌شود که اختلاف استحکام نمونه‌ها بیشتر و معنی دارتر شود.

4-2- مشاهده و مقایسه‌ی ریز ساختاری

در فرایند جوش القایی فرکانس بالا چهار ناحیه متالورژیکی به دلیل بر هم کنش مکانیزم‌های حرارتی و مکانیکی به وجود می آید [6]. نمونه‌های متالوگرافی از جوش در سه شکل لبه، نشان دهنده‌ی تفاوت اندازه‌ی دانه‌ها در نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه و فلز جوش و ناحیه‌ی ترمومکانیکال[1] می‌باشد. بررسی نمونه‌های متالوگرافی در بیشتر نمونه‌ها 4 ناحیه ریزساختاری را نشان می دهد.

ناحیه فلز پایه: دارای دانه‌های فریت منظم، ریز و نرماله شده، به همراه مرزهای پرلیت می‌باشد. متوسط اندازه‌ی دانه‌ها در این ناحیه 7.56 میکرون است.

ناحیه‌ی ترمومکانیکال: دارای دانه بندی‌های هم محور با جهت بندی در راستای بیرون زدگی فلز از ناحیه‌ی جوش می‌باشد. اندازه‌ی دانه‌ها در این ناحیه تقریبا با ناحیه‌ی فلز پایه برابر می‌باشد، ولی از لحاظ جهت‌گیری و نظم دانه‌ها این دو ناحیه از هم متمایز می‌شوند. ساختار در این ناحیه شامل دانه‌های فریت هم محور شده و مرزهای پرلیتی می‌باشد.

[1] Thermomechanical zone

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

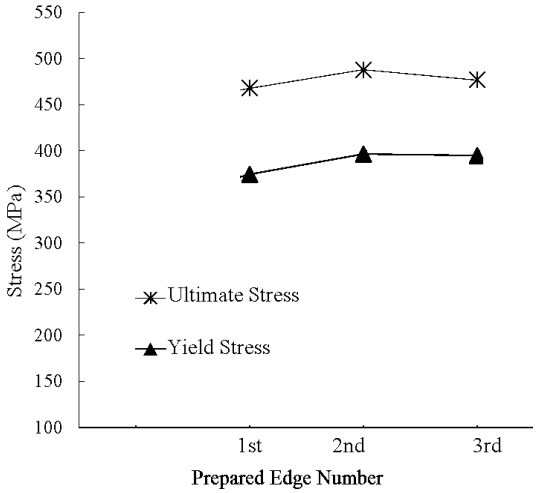

Fig. 14 Comparing the results of yield strength and ultimate strength in a different edge preparation.

شکل 14 مقایسه‌ی نتایج استحکام تسلیم و استحکام نهایی در شکل لبه های مختلف.

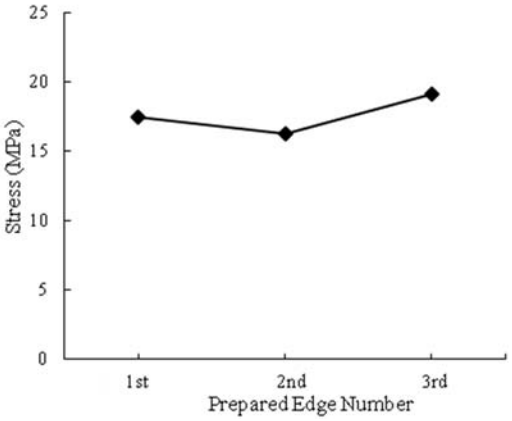

Fig. 15 Comparison of the elongation of the sample

شکل 15 مقایسه‌ی درصد ازدیاد طول در نمونه ها.

ناحیه‌ی ترمومکانیکال دارای ریزساختاری شبیه به فلز پایه است، با این تفاوت که شکل دانه‌های فریت همسان نمی‌باشند و در راستای جریان فلز جهت دار شده‌اند. این ناحیه تنها در بالا و پایین جوش دیده می‌شود، و در مرکز جوش به وضوح دیده نشده است. از دو نظر می‌توان ایجاد جهت بندی‌های دیده شده را توجیه کرد؛ جهت بندی‌ها می‌توانند یکی در هنگام شکل‌دهی و تغییر شکل مستقیم فریت و دیگری پیش از تبدیل شدن آستنیت به فریت در دمای بالا شکل گرفته شده باشند؛ که دومین نظر قوی‌تر است. زیرا در صورت جهت‌بندی دانه‌ها با مکانیزم اول احتمال ایجاد و رشد ترک بالا می‌باشد، در صورتی که ترکی در ناحیه‌ی ترمومکانیکال دیده نشده است و ناحیه پیوسته می‌باشد.

ناحیه متأثر از حرارت: با دانه‌بندی ریزتر از ناحیه‌ی پیشین متمایز می‌شود. به طوریکه اندازه‌ی متوسط دانه‌ها 5.7 میکرون می‌باشد. ریز ساختار این ناحیه دارای دانه‌های فریتی ریز، به همراه جوانه‌های پرلیت که به صورت برفک در زمینه فریت در حال رشد می‌باشند، مشاهده می‌شوند.

ناحیه‌ی ذوب شده[1]: نزدیکترین ناحیه به مرکز جوش است که به دلیل گذراندن کامل استحاله‌های یوتکتیکی و یوتکتوئیدی و رسیدن دما در این ناحیه به دمای بالاتر از دمای آستنیت و همچنین سرد شدن سریع، دارای دانه‌بندی ریز و نامنظم می‌باشد. به طوریکه اندازه‌ی دانه‌ها در این ناحیه به طور متوسط 5.6 میکرون است. ریز ساختار ناحیه‌ی جوش دارای فریت های سوزنی با مورفولوژی ویدمن اشتاین می‌باشد. نواحی بیان شده در شکل 16 و 17 نشان داده شده اند. در شکل 17 نمایی از مقطع جوش در ناحیه‌ی ترمومکانیکال و مرکز جوش نشان داده شده است.

4-3- اثر شکل لبه بر یکنواختی مقطع جوش

یکنواختی مقطع جوش القایی فرکانس بالا در لبه سازی‌های مختلف، با

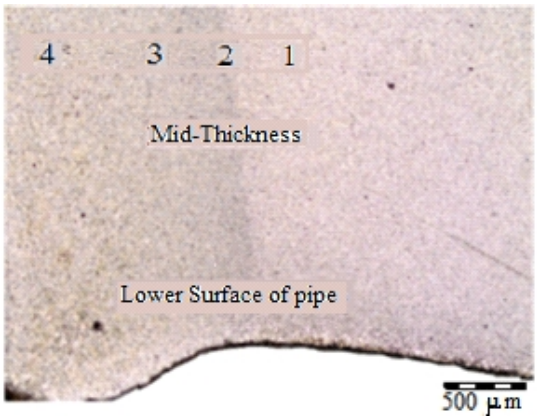

Fig. 16 Cross-section of the weld and 4 difference zones.
1. Base metal 2. Thermomechanical zone 3. Heat affected zone 4. Fusion zone

شکل 16 برش عرضی از سطح جوش و نواحی متفاوت ناحیه جوش. 1. فلز پایه 2. ناحیه ترمومکانیکال 3. ناحیه متاثر از حرارت 4. ناحیه ذوب شده

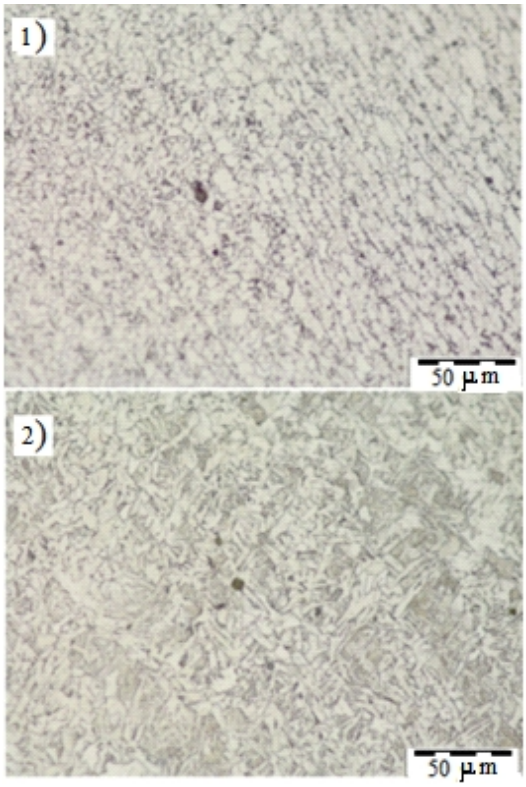

Fig.17 Micro structure and texture of the weld 1) thermomechanical area 2) Center of the welding line.

شکل 17 ساختار دانه بندی و جهت بندی جوش 1) ناحیه‌ی ترمومکانیکال 2) ناحیه‌ی مرکزی جوش.

[1] Fusion Zone (FZ)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

مشاهده‌ی تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع جوش‌ها مقایسه شده‌اند. در تصاویر متالوگرافی نشان داده شده در شکل 18 یکنواختی شکل جوش با اصلاح شکل لبه بهبود یافته است. عرض جوش در نمونه‌های بدون آماده‌سازی لبه (A و B) در بخش داخلی جوش بیشتر از بخش بیرونی می‌باشد، در صورتی که در نمونه‌های پخ زده شده بخش بالایی و پایینی جوش دارای عرض یکسانی می‌باشند. به طور متوسط در نمونه‌های بدون لبه‌سازی، عرض جوش به همراه منطقه متأثر از حرارت در بخش داخلی جوش، حدود 1.5 برابر عرض جوش در بخش بیرونی جوش خواهد بود.

شکل جوش بدست آمده در نمونه‌های بهبود یافته، دارای عرض یکنواخت‌تری در مرکز، بالا و پایین جوش می‌باشند. با این حال همانطور که دیده می‌شود، در بخش داخلی، عرض جوش بیشتر از بخش بیرونی است که نشان دهنده‌ی ذوب شدگی بیشتر در بخش داخلی لبه‌ها بوده است. در نتایج شبیه‌سازی نیز همین روند مشاهده می‌گردد. شکل 19 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای محاسبه عرض جوش را در نمونه با لبه بهبود یافته نهایی نشان می‌دهد.

در شکل 20 نتایج تجربی و در شکل 21 نتایج شبیه‌سازی مربوط به عرض ناحیه‌ی جوش در سه شکل لبه‌ی مورد نظر (1st، 2nd و 3rd) و در 5 فاصله از سطح بیرونی لبه جوش مقایسه شده است. با بهبود شکل لبه، میزان عرض جوش کاهش یافته و یکنواختی عرض جوش در راستای ضخامت بهبود یافته است، که هر دو تاثیر مثبت بر کیفیت جوش خواهند داشت.

تفاوت در نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمون‌ها را می‌توان ناشی از شرایط محیطی در آزمون تجربی دانست. به طور مثال در مدار انتقال جریان فرکانس بالا، مقاومت ایجاد شده در شرایط محیطی بیشتر از شرایط ایده ال در شبیه‌سازی‌ها خواهد بود. برخی شرایط محیطی که موجب افزایش مقاومت الکتریکی می شوند شامل آلودگی‌های سطحی لبه ناشی از استفاده از روان کار، وجود ناخالصی در ورق، اکسیداسیون سطح لبه و صافی سطح لبه‌ها می‌باشند. از این رو نتایج تجربی اندازه عرض جوش را کمی بیشتر از مقادیر شبیه‌سازی پیش بینی می‌کند. بعلاوه عرض جوش در آزمون عملی با استفاده از متالوگرافی مقطع اندازه‌گیری می‌شود که برخی خطاهای طبیعی ناشی از اندازه‌گیری نیز در پاسخ مؤثر خواهد بود.

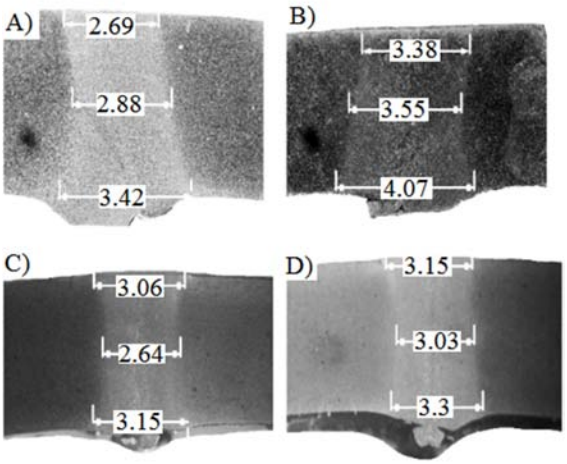

Fig. 18 uniformity comparison of weld's width in several edge shapes A and B) without edge preparing B) second preparing edge C) final preparing edge

شکل 18 مقایسه‌ی یکنواختی جوش در شکل لبه‌های مختلف A) بدون آماده سازی لبه B) دومین آماده سازی لبه C) آماده سازی لبه نهایی

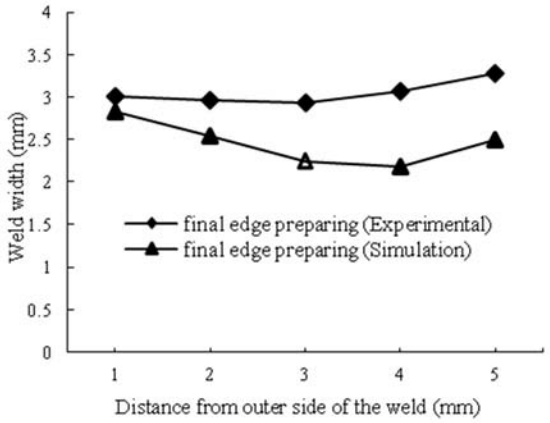

Fig. 19 Comparison of experimental and simulated weld width for improved edge of the end.

شکل 19 مقایسه‌ی نتایج تجربی و شبیه‌سازی عرض جوش برای لبه‌ی بهبود یافته‌ی نهایی.

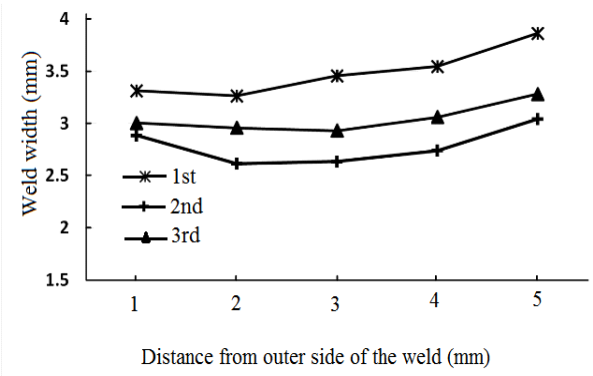

Fig. 20 comparison of experimental results of weld width in different edge preparation.

شکل 20 مقایسه‌ی نتایج تجربی عرض جوش برای شکل لبه های مختلف در 5 فاصله از سطح بیرونی جوش

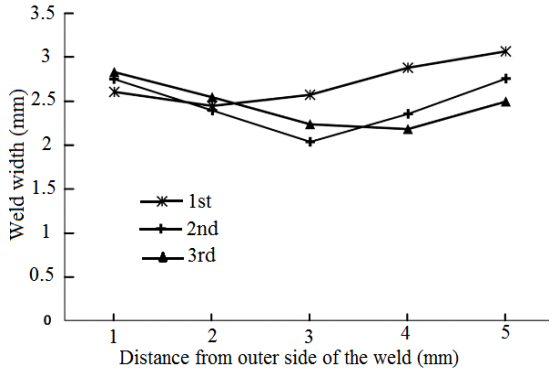

Fig. 21 A comparison of simulation results of weld width in different edge preparations.

شکل 21 مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی عرض جوش برای شکل لبه‌های مختلف در 5 فاصله از سطح بیرونی جوش.

در شکل لبه‌ی دوم، توزیع حرارت در حین فرایند در لبه‌ها مناسب نمی‌باشد، بنابراین جریان مناسبی از مواد ایجاد نمی‌شود. شکل گرده‌ی جوش در این لبه‌ها نشان دهنده‌ی کاهش میزان تداخل لبه‌ها می‌باشد. افزایش میزان تداخل لبه‌ها عاملی تاثیرگذار در بهبود نتایج آزمون تخت شدگی است. در

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

نمونه‌ها با شکل لبه‌ی نهایی (3rd) توزیع حرارت در کل راستای لبه یکنواخت شده و در نتیجه، تداخل لبه‌ها و جریان مواد به صورت مناسب‌تری انجام شده، و با وجود توزیع یکنواخت حرارت در کل راستای لبه، عرض ناحیه‌ی جوش کاهش یافته است. دیده می‌شود که میزان تداخل لبه‌ها در نمونه‌های بهبود یافته‌ی نهایی افزایش یافته است. در شکل 22 تاثیر افزایش فرکانس و شدت جریان بر دما در نقاط مختلف لبه نشان داده شده است. دمای متوسط در لبه‌ی اتصال در فرکانس ها و شدت جریان های مختلف در شکل 23 نشان داده شده است.

دو نتیجه از نمودارهای مربوط به دمای میانگین لبه‌ها بدست می‌آید:

شدت افزایش دما در بین فرکانس‌های 25 تا 125 کیلو هرتز بیشتر می‌شود، بطوریکه پس از فرکانس 125 کیلوهرتز شیب افزایش دما در شدت جریان های ثابت، کاهش یافته است.

هر چه شدت جریان افزایش می یابد، شیب افزایش دما، بر اساس فرکانس، بدون محدودیت افزایش می یابد.

بنابراین بالا بردن فرکانس از مرز 150 کیلوهرتز برای افزایش دمای لبه‌ها، موجب کاهش راندمان جوش و افزایش هزینه های انرژی خواهد شد.

همانطور که در شکل 23 مشاهده می‌شود، با افزایش فرکانس تنها افزایش در گرادیان دمایی دیده می‌شود، به طوریکه دمای متوسط با افزایش 25 کیلوهرتز در فرکانس تغییری نمی‌کند. از طرفی افزایش شدت جریان تنها موجب افزایش دما در کل لبه می‌شود و تاثیر زیادی بر ایجاد گرادیان دمایی ندارد.

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها در توان‌های مختلف نشان دهنده‌ی افزایش یکباره‌ی دما در فرکانس های پایین؛ در بازه‌ی 25 تا 150 کیلوهرتز می باشد. به طوری که پس از فرکانس 150 کیلوهرتز شیب افزایش دما کاهش می یابد. از طرفی نمی‌توان فرکانس را از یک مقدار مجاز پایین تر در نظر گرفت، زیرا که در این صورت در فرکانس پایین، بیشتر تلفات در کل لوله ایجاد شده و لبه‌های ورق به دمای مورد نیاز برای فرایند جوش نمی‌رسند. بنابراین فرکانس عاملی محدود کننده در فرایند می‌باشد، که به سادگی قابل تغییر نیست. بنابراین می توان بیان کرد که بهبود شکل لبه اتصال بهترین

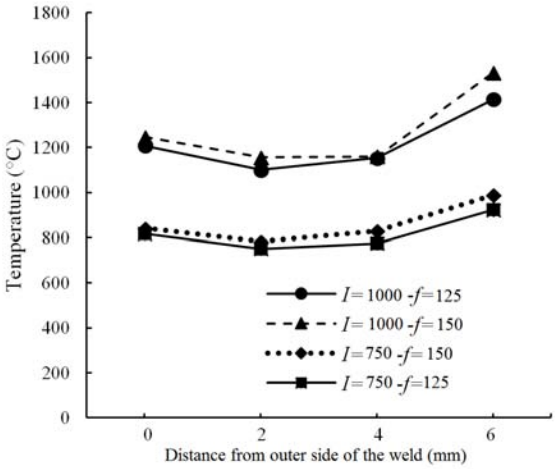

Fig. 22 Comparing the effect of increasing of the frequency and current intensity on the temperature gradient and temperature in 4-point of the edge in the thickness direction of weld.

شکل 22 مقایسه‌ی تاثیر افزایش فرکانس و شدت جریان بر گرادیان دمایی و دما در 4 نقطه از لبه در راستای ضخامت (شدت جریان برحسب آمپر و فرکانس برحسب کیلوهرتز می‌باشد).

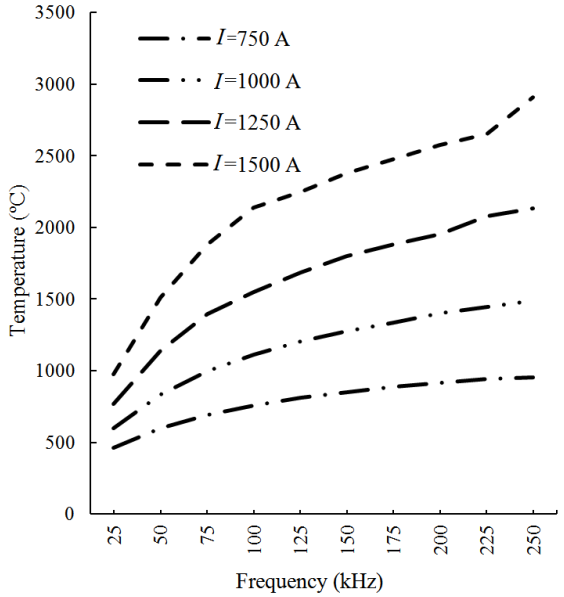

Fig. 23 Comparison of average temperatures generated at the edge, at different frequencies and current intensity.

شکل 23 مقایسه‌ی متوسط دمای ایجاد شده در لبه، در فرکانس و شدت جریان‌های مختلف.

راه برای کاهش گرادیان دمایی در لبه‌ها می باشد که بر اساس نتایج بدست آمده قابل تعیین است.

5- نتیجه گیری

در این مقاله، جوشکاری القایی فرکانس بالا و اثر پارامترهای مختلف فرآیند بر روی بهبود کیفیت جوش در لوله‌های درزدار مطالعه و بررسی شد. مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر روی کیفیت جوش القایی فرکانس بالا، گرادیان دمایی در لبه‌های اتصال می‌باشد. به طوریکه کاهش گرادیان دمایی و یا به تعبیری یکنواختی توزیع دما در لبه‌ی اتصال، موجب بهبود انجام فرایند و افزایش کیفیت ناحیه‌ی جوش خواهد شد.

نتایج نشان می‌دهند که بهبود شکل لبه، تا حد زیادی موجب کاهش گرادیان دمایی در سطح لبه‌های اتصال می‌گردد. اندازه گیری گرادیان دمایی برای شدت جریان 1250 آمپر و فرکانس 150 کیلوهرتز، نشان داد که با بهبود شکل لبه، کاهشی در حدود 600 درجه در گرادیان دمایی لبه‌ها رخ می‌دهد. دلیل این امر، کاهش سطح مقطع انتقال‌دهنده حرارت در برخی مناطق و در نتیجه یکنواخت شدن توزیع شار حرارتی در طول لبه است. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که برای کنترل گرادیان دمایی در لبه‌ها، بهبود شکل لبه‌ی ورق روشی با صرفه و اثر گذار می‌باشد.

بررسی ریزساختارهای مختلف ناحیه جوش نشان دهنده کاهش اندازه دانه‌ها در سه ناحیه فلز جوش، ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه ترمومکانیکال می‌باشد. با اصلاح شکل لبه بیشترین کاهش اندازه متوسط دانه در ناحیه فلز جوش رخ داده است که به میزان 27 درصد می‌باشد. همچنین کاهش اندازه متوسط دانه‌ها در دو ناحیه متاثر از حرارت و ناحیه ترمومکانیکال به ترتیب 18.5 و 17 درصد بوده است. اندازه متوسط دانه‌ها در مرکز جوش از 6 میکرومتر در نمونه‌های بدون آماده‌سازی لبه به 4.4 میکرومتر در نمونه‌های اصلاح شده رسیده است.

شبیه‌سازی‌های انجام گرفته در فرکانس‌ها و شدت جریان‌های مختلف نشان می‌دهد که افزایش فرکانس در لبه‌ها، موجب تشدید اثر پوسته‌ای،

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]

مجاورتی و در نهایت افزایش دمای لبه‌ها خواهد شد، به طوریکه به ازای افزایش فرکانس یک کیلو هرتز در شدت جریان 1250 آمپر، دمای متوسط لبه به میزان 5.4 درجه افزایش پیدا کرده است. افزایش دما به ازای فرکانس یک کیلوهرتز در شدت جریان‌های 1000 و 1500 و 1750 به ترتیب 3.5 و 7.7 و 8.7 درجه می‌باشد. بنابراین بیشترین افزایش دمای متوسط مربوط به افزایش شدت جریان از 1250 به 1500 آمپر در نتایج شبیه‌سازی بوده است.

همچنین نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین افزایش دما تا فرکانس 150 کیلوهرتز رخ داده است. با افزایش بیشتر فرکانس، دمای متوسط لبه‌ها با شیب ملایم‌تری افزایش یافته و تنها موجب افزایش گرادیان دمایی در لبه شده است.

کاهش گرادیان دمایی با به کارگیری شکل لبه‌ی بهبود یافته در جوش القایی فرکانس بالا باعث بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی شده و از طرفی موجب کاهش میزان توان مصرفی در فرایند اتصال لبه‌های لوله خواهد شد.

ایجاد شکل لبه‌ی بهبود یافته در اتصال لوله، موجب افزایش کنترل بر میزان گرده‌ی جوش، حفظ گِردی لوله و همچنین عرض جوش و ناحیه‌ی متاثر از حرارت می‌گردد که این امر با بررسی متالورژیکی مقاطع جوش در شکل لبه‌های مختلف بدست آمده است. از طرفی شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که افزایش فرکانس جوشکاری، تا حدودی موجب عدم یکنواختی توزیع دما در مقطع جوش می‌شود که این امر در کیفیت جوش تاثیرگذار است.

6- مراجع

[1] R. K. Nichols, High Frequency Welding The Process and Applications, *Thermatool Corp*, pp. 88-101, 1999.

[2] J. Wright, *principles of highfrequency induction welding*, pp. 25-150, Washington, 1997.

[3] N. Kim, B. Kang, S. Lee, Prediction and Design of Edge Shape of Initial Strip for Thick Tube Roll Forming Using Finite Element Method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 142, No. 2, pp. 476-479, 2003.

[4] H. J. kim, S. K. Youn, Three Dimensional Analysis of High Frequency Induction Welding of Steel Pipes With Impeder, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 130, No. 3, pp. 1-7, 2008.

[5] Y. Han, E. L. Yu, Numerical Analysis of a High-Frequency. Induction Welded Pipe, *Welding Journal*, Vol. 91, No. 10, pp. 270-277, 2012.

[6] p. Yan, Ö.E. Güngör, P. Thibaux, M. Liebeherr, H. K. D. H. Bhadeshia, Tackling the toughness of steel pipes produced by high frequency induction welding and heat-treatment, *Materials Science and Engineering*, Vol. 528, No. 29, pp. 8492–8499, 2011.

[7] F. Dughiero, M. Forzan, M. Garbin, C. Pozza, a 3D numerical FEM model for the simulation of induction welding of tubes, *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 30, No.5, pp. 1570-1581, 2011.

[8] AC/DC Module, User's Guide, *Comsol multy physics*, p.p 74-80, 2014.

[9] M.M. Kasaei, H. Moslemi Naeini, R. Azizi Tafti, M. Salmani Tehrani, Prediction of maximum initial strip width in the cage roll forming process of ERW pipes using edge buckling criterion, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, No. 2, pp.190–199, 2014.

[10] Heat Transfer Module, User's Guide, *Comsol multy physic*, pp. 90-95, 2014.

[11] International standard, *Petroleum and natural gas industries steel pipe for pipeline transportation systems*, ISO Second edition, 2007.

[12] V. A. Narang, *Heat Transfer Analysis In Steel Structures*, PhD Thesis, Faculty of the worcester polytechnic, 2005.

[13] J. D. Livingston, G. Y. Chin, *Magnetic properties of metals and alloys*, E E. Luborsky, pp. 29, Elsevier Science, 1996.

[14] Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, *ASTM Standard*, 2007.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1395.16.12.81.6]