



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

سجاد قنبری^۱، داود اکبری^{۲*}، حسن مسلمی نائینی^۳

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

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

۳- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۴۱۱۵-۱۴۳ daakbari@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله، اثر پارامترهای جوشکاری القابی فرکанс بالا بر روی بهبود کیفیت جوش در لوله‌های درزدار مطالعه و بررسی شده است. بدین منظور پارامترهای فرایندی نظیر شدت جریان، فرکанс 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 ۲۷ درصد می‌باشد. همچنین با انجام تحلیل مغناطیسی- حرارتی، شدت جریان‌ها و فرکانس‌های مختلف برای ایجاد توزیع دمایی مناسب مدل سازی 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 ۱۲۵۰ تا ۱۵۰۰ آمپر و در حدود ۴۲ درصد بوده است. از آزمون سنجش ریزساختی برای تشخیص فازها در جوش استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل از تست متالوگرافی و میکرو سختی منطقه‌ی جوش، عرض جوش یکنواختتری در نمونه‌های جوش داده شده با لبه اصلاح شده مشاهده شد. همچنین نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش ۱۸ درصدی در میزان عرض جوش در نمونه‌های مذکور نسبت به نمونه‌های بدون آماده سازی لبه بودند.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۰ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۰۱ آذر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۱۱ دی ۱۳۹۵

کلید واژگان:

جوشکاری القابی فرکانس بالا

تحلیل مغناطیسی- حرارتی

شکل لبه‌ی بهینه

گردایان دمایی

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 preparation

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.

- مقدمه

فرایند جوشکاری القابی فرکانس بالا^۱ یکی از فرایندهای بسیار مهم و پرکاربرد در تولید مقاطع سنته به خصوص در صنایع ساخت لوله‌های درزدار است. به نحوی که کیفیت این فرایند به طور مستقیم در کیفیت محصولات تولیدی تأثیر گذار است. این فرایند که به اختصار HFIW نامیده می‌شود،

^۱ High frequency induction welding

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)

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 راویه‌ی 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 می‌باشد، که موجب کاهش اختلاف دما در لبه‌ها در ناحیه‌ی Vee شکل می‌شود. همچنین برای جلوگیری از رخداد عیوبی همچون جوش سرد، سوتگی 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 شاربی برای بررسی کیفیت و چقرمگی در ناحیه‌ی جوش و منطقه‌ی متاثر از حرارت² استفاده کردند. از آنجایی که بررسی‌های گذشته نشان می‌دادند که عملیات حرارتی پس از جوش نمی‌تواند به طور کامل ریزساختار ناحیه‌ی جوش را به حالت اولیه برگرداند، به بررسی عوامل مؤثر بر عدم بازگشت به ریزساختار اولیه پرداختند. آنها دلایل کاهش چقرمگی جوش را ریزساختار، آستینیت باقیمانده، آخال‌های اکسیدی³ و جهت بندی کربیستالی⁴ بیان کردند.

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 لبه ورق در هنگام جوشکاری و پارامترهای تأثیرگذار فرایندی 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 نظریه جریان و فرکانس جوشکاری نیز در هندسه‌های مختلف لبه بررسی خواهد شد. همچنین برای ارزیابی اثر بهبود لبه اتصال بر کیفیت متالورژیکی جوش، ریزساختار ناحیه‌ی متاثر از حرارت در نمونه‌های بهبود یافته با استفاده از مشاهده 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

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 گسترشده‌ای 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 بالا در 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 لوله‌ها باقیستی تا حد امکان بالا برده شود.

یکی از پارامترهای مهم در کیفیت جوش بدست آمده هندسه‌ی لبه‌ی اتصال و یا زاویه‌ی پیچ می‌باشد. زاویه‌های مختلف لبه در ایستگاه جوشکاری، مناسب با هندسه‌ی اولیه لبه ورق، موجب ایجاد گرادیان دمایی مختلف در مقاطع جوش شده، که منجر به ایجاد اختلاف دما بین بخش‌های بیرونی و درونی و همچنین ناحیه‌ی میانی در هندسه‌ی اتصال می‌شود. این مسئله در ورق‌هایی با ضخامت بالای 5 میلی متر مشهودتر بوده و کیفیت اتصال را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از آنجایی که لوله‌های ضخامت بالا در فشارهای کاری بسیار بالا کاربرد خواهند داشت، مستلزم 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 بررسی‌ها عمدها منحصر به یک یا چند پارامتر محدود بوده است. بررسی‌های تجربی و تحلیلی نشان می‌دهند که فرکانس، شدت جریان، هندسه‌ی ناحیه Vee شکل¹ و عرض اولیه‌ی ورق بیشترین تأثیر 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 پره‌های پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شکل لبه‌ی مثلثی معکوس می‌تواند برخورد لبه‌ها را با پره‌های

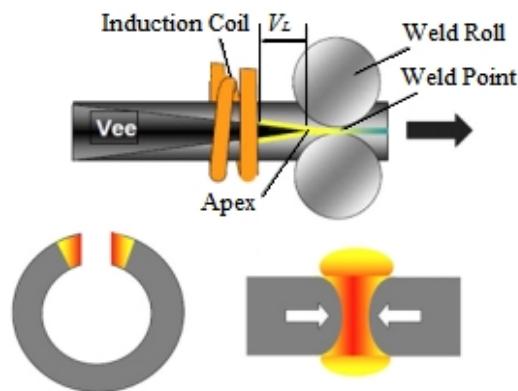


Fig. 1 Schematic of high frequency induction welding

شكل 1 شماتیک فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا

¹ Vee Shape Zone

² Heat affected zone

³ Inclusions

⁴ Metallographic texture

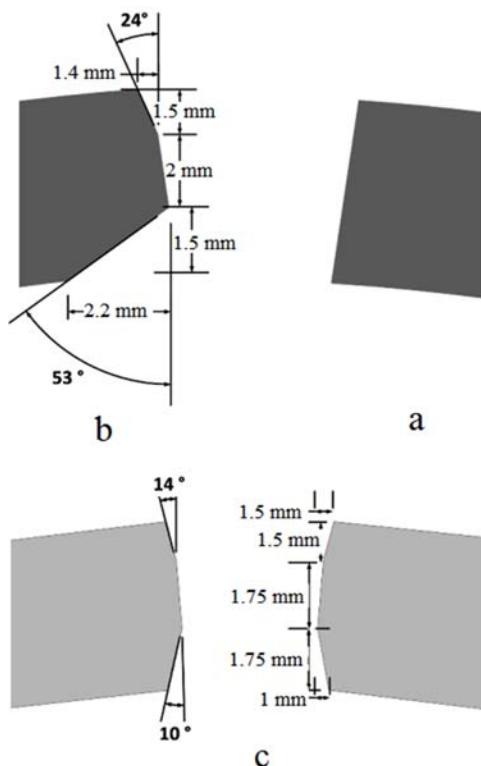


Fig. 2 Schematic of edge preparing in the experimental tests. A) without edge preparing b) second preparing edge c) final preparing edge

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



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

A (m^2)	سطح مقطع ایندکتور
A^* (Wb/m)	پتانسیل مغناطیسی
l_{coil} (m)	طول یک دور کویل
σ (S/m)	رسانایی الکتریکی
μ_0	تروایی مغناطیسی خلاء
μ_r	تروایی مغناطیسی ایندکتور
N	تعداد دور ایندکتور
موردی که سیکل جریان القایی به صورت پریودیک باشد، معادله به شکل زیر ساده سازی می شود:	

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

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

برای انجام آزمون های تجربی بر روی نمونه های جوش داده شده، سه نمونه به طول 1 متر، با ضخامت 5 میلی متر و عرض اولیه 526 میلی متر از قطعات جوش داده شده جدا شد. در هر قطعه شکل لبه بست آمده از داده های شبیه سازی، بر روی لبه ها 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 لبه ها در طول ورق، بر اساس داده های گرفته شده از نتایج شبیه سازی صورت گرفته است. به دلیل یکسان بودن شرایط فرایند جوش اتوماتیک و بودن خطای انسانی، تنها متغیر در آزمون تجربی شکل لبه ورق در ناحیه Vee شکل می باشد. از این رو مقایسه بین نمونه های بست آمده را

می توان با اطمینان بیشتری انجام داد.

لبه های بست آمده از نتایج شبیه سازی عددی، که جهت آماده سازی لبه های 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 آزمایش ها، نمونه ها از نظر کیفی بررسی شدند، که نشان دهنده عدم وجود عیوب در ناحیه جوش می باشد. به این منظور آزمون فراصوتی و هیدرو استاتیک استفاده شد.

در انجام جوشکاری فاصله بین مرکز الفاگر و منطقه جوش 22 سانتی متر، فاصله بین لبه ها در ابتدای الفاگر 14 میلی متر و زاویه ناحیه Vee شکل 2.5 درجه در نظر گرفته شد. در شکل 3 شمایی از عملیات جوشکاری لوله نشان داده شده است.

3- مدل سازی فرایند القای جریان

برای بررسی مسائل مربوط به جریان القایی در سیم پیچ های دایره ای، نیاز به حل معادلات استاتیک کوشی برای بست آوردن پتانسیل مغناطیسی A می باشد [8]:

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

که در آن:

جدول 1 خواص مکانیکی فولاد L 210

Table 1 Mechanical properties of L210 carbon steel.

استحکام نهایی (MPa)	درصد افزایش نشش تسلیم (%)	نمونه
37.6	340	L 210 or A

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

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

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

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

که در آنها:

$$Q_{rh} (\text{W/m}^3) \quad \text{تلفات مقاومتی}$$

$$Q_{ml} (\text{W/m}^3) \quad \text{تلفات مغناطیسی}$$

$$C_p (\text{J/kg.K}) \quad \text{ظرفیت گرمایی}$$

$$\rho (\text{kg/m}^3) \quad \text{چگالی}$$

$$u (\text{m/s}) \quad \text{سرعت}$$

برای انجام شبیه‌سازی‌های لازم و تحلیل فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا، از نرم افزار کامسال¹ استفاده شده است. ابتدا ابعاد لوله مورد نظر از استاندارد انجمن نفت آمریکا² 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 نرم افزار، از معادلات ماکسول برای انجام محاسبات مغناطیسی و الکتریکی استفاده شده است، که با تبدیل تلفات الکتریکی سطحی، گرمای ایجاد شده در لبه‌ها بدست آمده است.

3-2-پارامترهای فرایند

فرایند جوشکاری القایی، فرایندی 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 ناحیه‌ی شکل و جناغی ایجاد شده در لبه‌ها 2.5 درجه در نظر گرفته شده است. در مدل‌سازی هندسی از شبکه‌بندی چهار وجهی³ 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 Veer 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 ناحیه‌ی شکل بر اساس شکل پره‌های ایستگاه پره‌ای بدست آمداند. 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 پوسته‌ای و مجاورتی، لبه‌ها داغ شده و در نقطه‌ی اتصال به

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

که در آن:

فرکانس زاویه‌ای

چگالی جریان گردابهای ای

با توجه به روابط بالا، سه پارامتر ضخامت، طول ناحیه Vee شکل و عمق نفوذ استاندارد مهمترین پارامترهای تاثیرگذار ساختاری فرایند می‌باشند که بر اساس دو پارامتر ذاتی فرایند القایی 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 القاشه 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 القاشه 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 می‌دهد، 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

رسانایی الکتریکی

فرکانس جریان

3-1-تحلیل عددی

مدل ریاضی مورد استفاده جهت مطالعه چگونگی توزیع دما در ناحیه‌ی جوش از اصل بقای انرژی (معادله بایوت-فوريه) 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 القایی 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

میدان مغناطیسی

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

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

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

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

¹ API
² Comsol
³ Tetrahedral

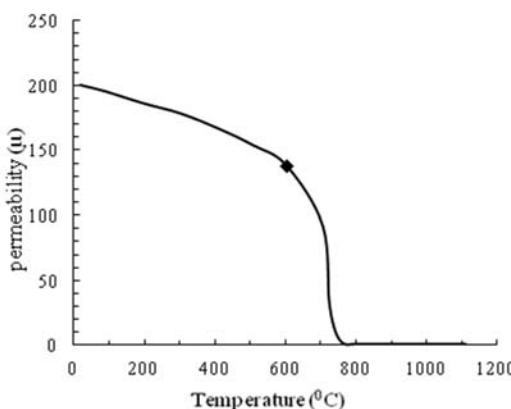


Fig. 7 Relative permeability at various temperatures structural steel [13].

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 سوتختن لبه‌های داخلی خواهد شد. همچنین اعمال توان بیشتر برای رساندن دمای کل لبه به دمای اتصال، موجب افزایش عرض جوش و منطقه متاثر از حرارت می‌شود. مقادیر دمای بالای بدست آمده در شبیه‌سازی‌ها از دمای ذوب نیز در شبیه‌سازی‌های فرایند بدست آمده است، که نشان دهنده 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 لبه 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 ایزووترمال گرافیکی بدست آمده از دمای لبه، شکل لبه اصلاح شده و هندسه‌ی آن در مدل سازی 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.



Fig.4 model meshed with tetrahedral element.

شکل 4 مدل شبکه‌بندی شده با المان‌های تراهدرال

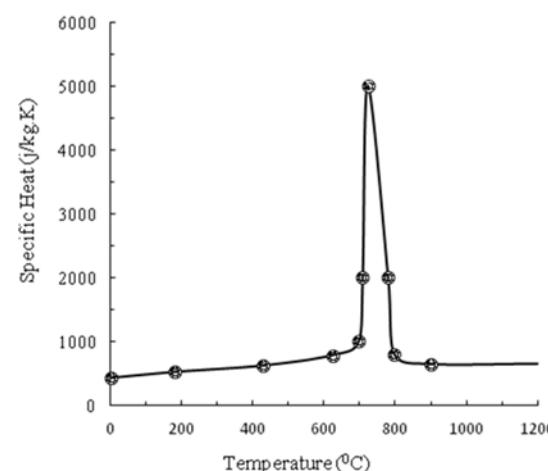


Fig. 5

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

شکل 5 گرمای ویژه در دماهای مختلف برای فولاد ساختمانی

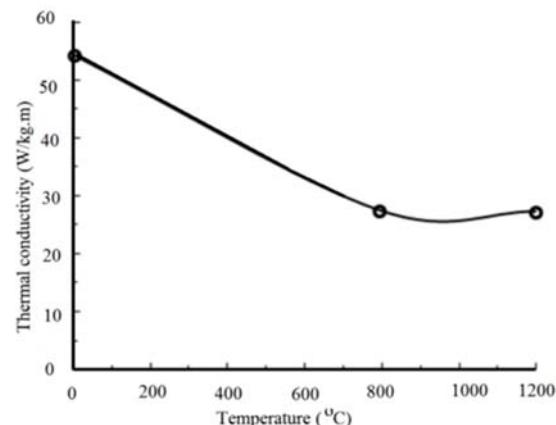


Fig. 6 Thermal conductivity at various temperatures for structural steel [12].

شکل 6 رسانایی حرارتی برای فولاد ساختمانی در دماهای مختلف

دمای لازم برای ایجاد اتصال می‌رسند.

3-3- شبیه‌سازی‌های اثر هندسه‌ی لبه

شبیه‌سازی‌های اولیه بر روی شکل لبه‌ی ورق با هدف کاهش گرادیان دمایی و رسیدن به شکل لبه‌ی بهبود یافته 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 پوسته‌ای و مجاورتی باشد

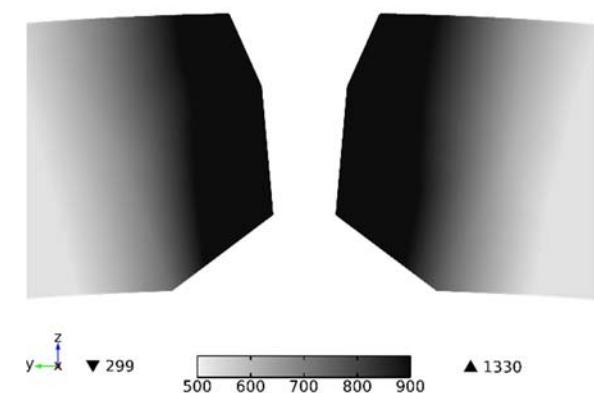
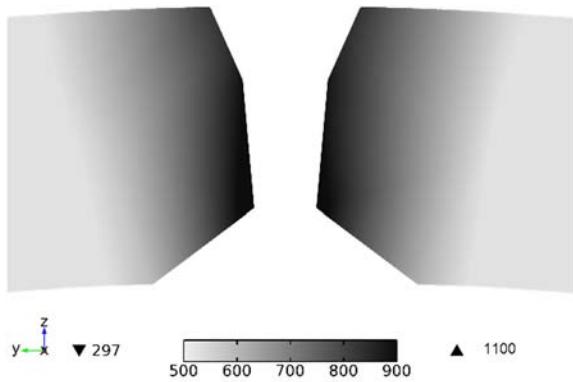


Fig.10 temperature distribution in the edge for second optimized edge for two power sets.

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

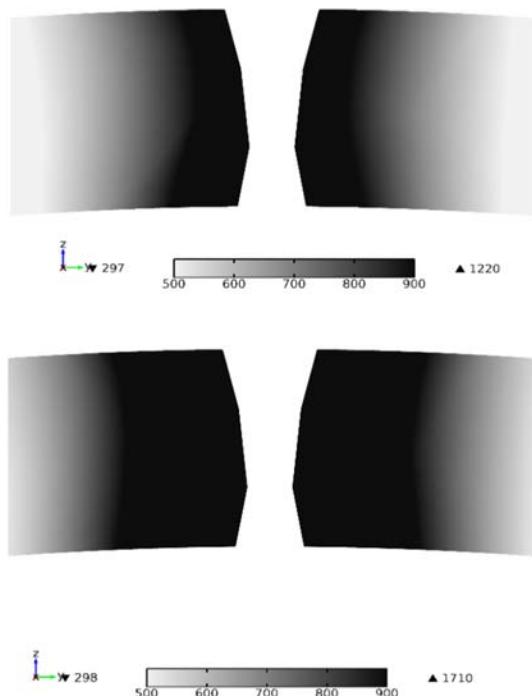


Fig.11 Temperature distribution in final optimized edge in 2 power sets.

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

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

در شکل‌های 10 و 11 توزیع دما در لبه‌ها، در 2 توان 123 کیلووات و 179 کیلووات 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 لبه‌ی دوم 3 مختلف نشان می‌دهد که توان مصرفی در گرمایش لوله با شکل لبه‌ی دوم 3 درصد بیشتر از توان مصرفی در شکل لبه‌ی بهبود یافته 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 کیلووات 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 می‌شود کاهش گرادیان دمایی از 1200 به 200 درجه، نشان دهنده 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،

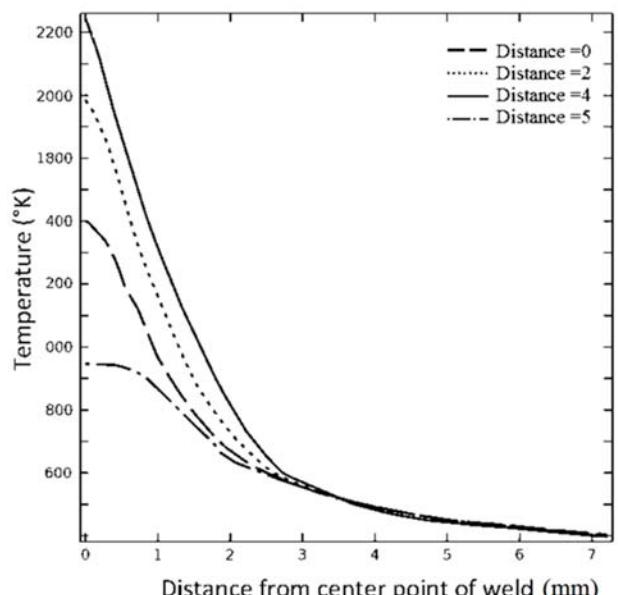


Fig. 8 Temperature profiles of 4 points in the weld edge without edge preparing.

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

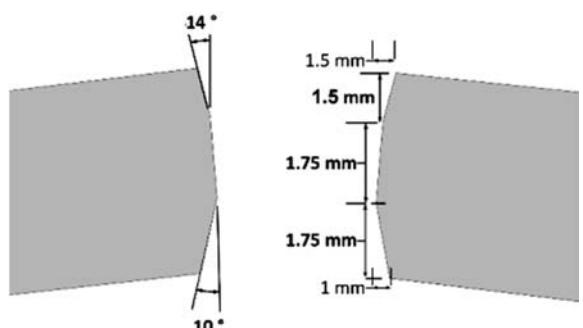


Fig. 9 final improved edge shape derived from Isothermal diagrams.

شکل 9 شکل لبه بهبود یافته نهایی پس از بررسی نمودارهای ایزوترامال.

جدول 3 خلاصه نتایج آزمون کشش نمونه ها

Table 3 Tensile test results

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

در نتایج ارائه شده در جدول 3، نمونه های 1 و 2 مربوط به شکل لبه آماده سازی شده نهایی، نمونه های 3 و 4 مربوط به اولین شکل آماده سازی لبه و نمونه های 5 و 6 مربوط به دومین شکل لبه آماده سازی شده می باشد. شکل 14 نمودارهای بدست آمده برای استحکام کششی نهایی و تسلیم در شکل لبه های مختلف شامل نمونه های بدون لبه سازی (1st) بهینه سازی دوم (2nd) و شکل لبه نهایی (3rd) و در شکل 15، درصد ازدیاد طول این نمونه ها مقایسه شده اند. روند نمودارها در استحکام تسلیم نشان می دهند که بهبود شکل لبه، تا حدودی موجب افزایش استحکام کششی شده است. میزان افزایش شکست در نمونه ها، از خط جوش فاصله داشته است، که نشان دهنده سلامت جوش می باشد. از طرفی درصد ازدیاد طول در نمونه های نهایی در مقایسه با نمونه های بدون آماده سازی لبه، از 17.5 درصد به 19.1 افزایش داشته است.

همانگونه که مشاهده می گردد، تفاوت بزرگی بین نتایج حاصل از آزمون ها مشاهده نمی گردد. با این حال دلایل احتمالی این مشاهدات را می توان به یکنواخت تر شدن منطقه جوش و در نتیجه کاهش عیوب احتمالی نسبت داد. از طرفی هرچه ابعاد حوزه جوش شده بزرگتر باشد، تحت شرایط محیطی حساس مانند محیط های خورنده و اکسیدی حساسیت بیشتری داشته و ضعیفتر عمل می کند. بنابراین در صورتی که نمونه ها در یکی از محیط های مذکور آزموده شوند، احتمال داده می شود که اختلاف استحکام نمونه ها بیشتر و معنی دارتر شود.

4-2- مشاهده و مقایسه ریز ساختاری

در فرایند جوش القابی فرکانس بالا چهار ناحیه متالوگرافیکی به دلیل بر هم کنش مکانیزم های حرارتی و مکانیکی به وجود می آید [6]. نمونه هایی متالوگرافی از جوش در سه شکل لبه، نشان دهنده تفاوت اندازه دانه ها در نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه و فلز جوش و ناحیه ترمومکانیکال¹ می باشد. بررسی نمونه های متالوگرافی در بیشتر نمونه ها 4 ناحیه ریز ساختاری را نشان می دهد.

ناحیه فلز پایه: دارای دانه های فریت منظم، ریز و نرماله شده، به همراه مرزهای پر لیتی می باشد. متوسط اندازه دانه ها در این ناحیه 7.56 میکرون است. ناحیه ترمومکانیکال: دارای دانه بندی های هم محور با جهت بندی در راستای بیرون زدگی فلز از ناحیه جوش می باشد. اندازه دانه ها در این ناحیه تقریباً با ناحیه فلز پایه برابر می باشد، ولی از لحظه جهت گیری و نظم دانه ها این دو ناحیه از هم متمایز می شوند. ساختار در این ناحیه شامل دانه های فریت هم محور شده و مرزهای پر لیتی می باشد.

شده در حین جوشکاری پایین تر از حد بهینه باشد، عمل تداخل لبه ها ضعیف بوده و جوش ایجاد شده از استحکام کافی برخوردار نخواهد بود. بنابراین با توجه به دمای ایجاد شده در حین فرآیند، دستیابی به اتصال 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 تأثیر برهم کنش این دو پارامتر می باشد. بدین جهت و با توجه به تأثیر پارامتر های جوشکاری بر حرارت ایجاد شده در حین فرآیند، ریز ساختار ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه ترمومکانیکال در 2 نمونه لبه می بهبود یافته با نمونه های بدون لبه بهبود یافته، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند.

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. نمونه های آزمون جوشکاری شده در شکل 13 نشان داده شده اند. نتایج حاصل از آزمون کشش نمونه ها در جدول 3 ارائه شده است.

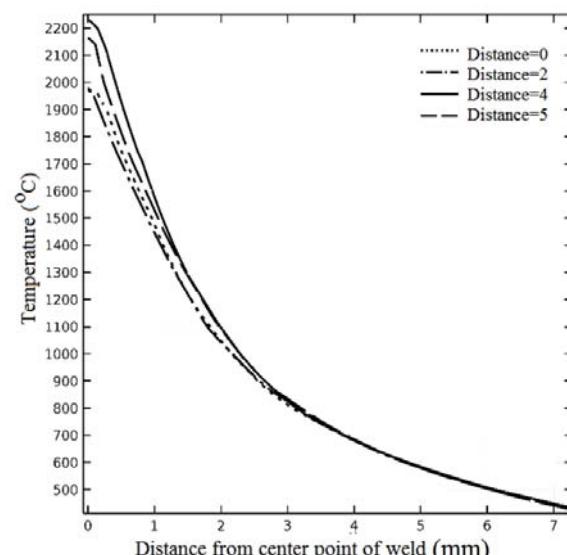


Fig.12 پروفیل دمایی در 4 نقطه از لبه ای اتصال، در شکل لبه نهایی.

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

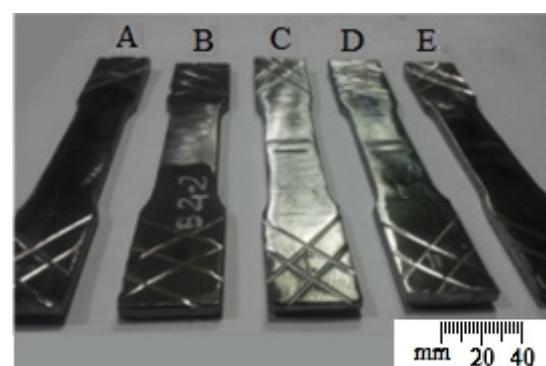


Fig. 13 نمونه های تست کشش بر اساس استاندارد ASTM-E8 برای لوله های با قطر بالا.

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

¹ Thermomechanical zone

ناحیه به دمای بالاتر از دمای آستینیت و همچنین سرد شدن سریع، دارای دانه بندی ریز و نامنظم می باشد. به طوریکه اندازه دانه ها در این ناحیه به طور متوسط 5.6 میکرون است. ریز ساختار ناحیه جوش دارای فریت های سوزنی با مورفولوژی ویدمن اشتاین می باشد. نواحی بیان شده در شکل 16 و 17 نشان داده شده اند. در شکل 17 نمایی از مقطع جوش در ناحیه ترمومکانیکال و مرکز جوش نشان داده شده است.

4-3-1 اثر شکل لبه بر یکنواختی مقطع جوش
یکنواختی مقطع جوش القایی فرکانس بالا در لبه سازی های مختلف، با

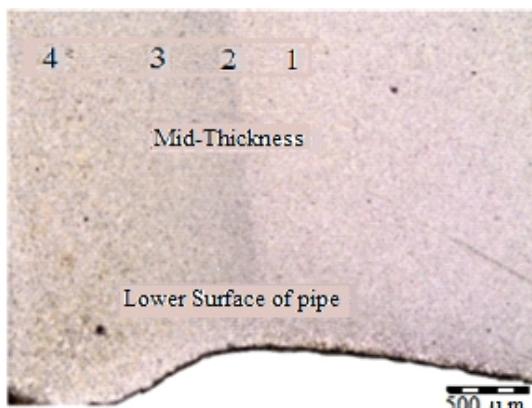


Fig. 16 Cross-section of the weld and 4 difference zones.
1. Base metal 2. Thermomechanical zone 3. Heat affected zone 4. Fusion zone

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

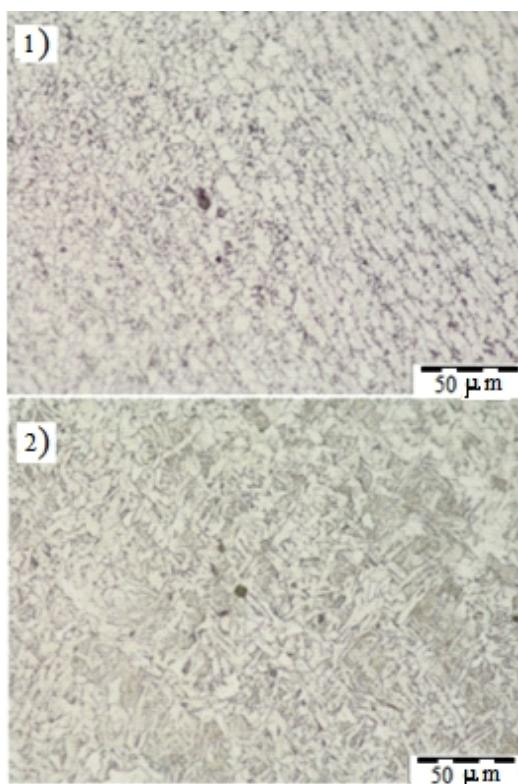


Fig.17 Micro structure and texture of the weld 1) thermomechanical area 2) Center of the welding line.

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

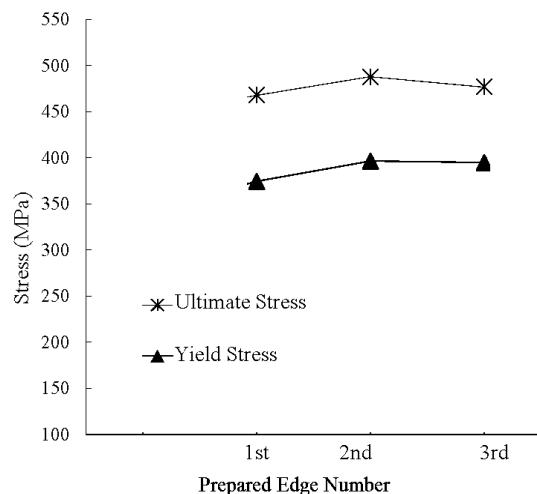


Fig. 14 Comparing the results of yield strength and ultimate strength in a different edge preparation.

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

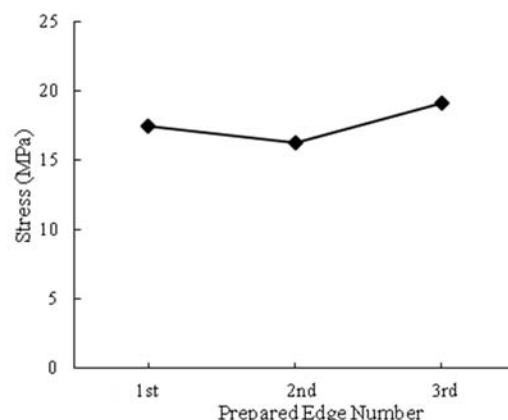


Fig. 15 Comparison of the elongation of the sample

شکل 15 مقایسه درصد ازدیاد طول در نمونه ها.

ناحیه ترمومکانیکال دارای ریزساختاری شبیه به فلز پایه است، با این تفاوت که شکل دانه های فریت همسان نمی باشند و در راستای جریان فلز جهت دار شده اند. این ناحیه تنها در بالا و پایین جوش دیده می شود، و در مرکز جوش به وضوح دیده نشده است. از دو نظر می توان ایجاد جهت بندی های دیده شده را توجیه کرد؛ جهت بندی ها می توانند یکی در هنگام شکل دهی و تغییر شکل مستقیم فریت و دیگری پیش از تبدیل شدن آستینیت به فریت در دمای بالا شکل گرفته شده باشند؛ که دو میان نظر قوی تر است. زیرا در صورت جهت بندی دانه ها با مکانیزم اول احتمال ایجاد و رشد ترک بالا می باشد، در صورتی که ترکی در ناحیه ترمومکانیکال دیده نشده است و ناحیه پیوسته می باشد.

ناحیه متأثر از حرارت: با دانه بندی ریزتر از ناحیه پیشین متمایز می شود. به طوریکه اندازه متوسط دانه ها 5.7 میکرون می باشد. ریز ساختار این ناحیه دارای دانه های فریتی ریز، به همراه جوانه های پر لیت که به صورت بر فک در زمینه فریت در حال رشد می باشند، مشاهده می شوند.

ناحیه ذوب شده¹: نزدیکترین ناحیه به مرکز جوش است که به دلیل گذراندن کامل استحاله های یوتکتیکی و یوتکتوئیدی و رسیدن دما در این

¹ Fusion Zone (FZ)

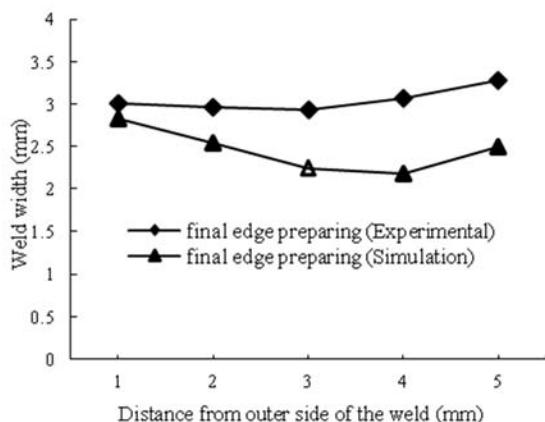


Fig. 19 Comparison of experimental and simulated weld width for improved edge of the end.

شکل ۱۹ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی عرض جوش برای لبه بهبود یافته‌ی نهایی.

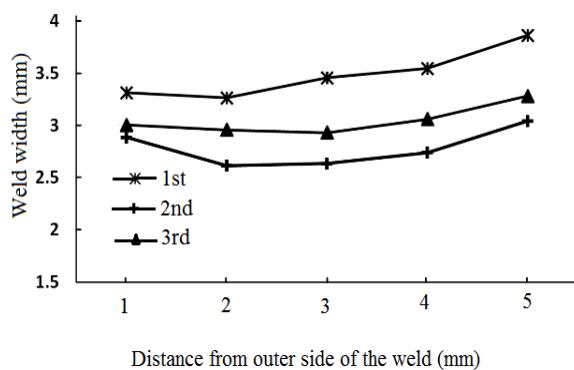


Fig. 20 comparison of experimental results of weld width in different edge preparation.

شکل ۲۰ مقایسه نتایج تجربی عرض جوش برای شکل لبه های مختلف در ۵ فاصله از سطح بیرونی جوش

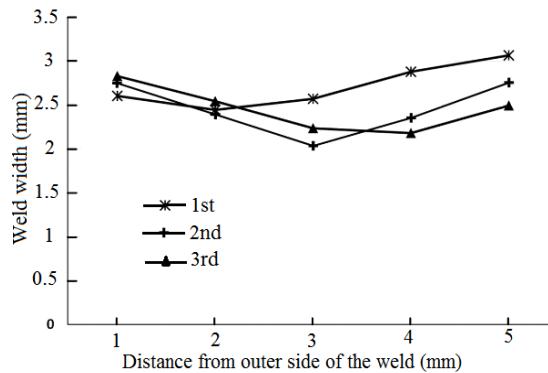


Fig. 21 A comparison of simulation results of weld width in different edge preparations.

شکل ۲۱ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عرض جوش برای شکل لبه های مختلف در ۵ فاصله از سطح بیرونی جوش.

در شکل لبه دوم، توزیع حرارت در حین فرایند در لبه ها مناسب نمی باشد، بنابراین جریان مناسبی از مواد ایجاد نمی شود. شکل گردی جوش در این لبه ها نشان دهنده کاهش میزان تداخل لبه ها می باشد. افزایش میزان تداخل لبه ها عاملی تأثیرگذار در بهبود نتایج آزمون تخت شدگی است. در

مشاهدهی تصاویر متالوگرافی از سطح مقطع جوش ها مقایسه شده‌اند. در تصاویر متالوگرافی نشان داده شده در شکل ۱۸ یکنواختی شکل جوش با اصلاح شکل لبه بهبود یافته است. عرض جوش در نمونه های بدون آماده سازی لبه (A و B) در بخش داخلی جوش بیشتر از بخش بیرونی می باشد، در صورتی که در نمونه های پی زده شده بخش بالایی و پایینی جوش دارای عرض یکسانی می باشند. به طور متوسط در نمونه های بدون آماده سازی، عرض جوش به همراه منطقه متأثر از حرارت در بخش داخلی جوش، حدود ۱.۵ برابر عرض جوش در بخش بیرونی جوش خواهد بود.

شکل جوش بدست آمده در نمونه های بهبود یافته، دارای عرض یکنواخت تری در مرکز، بالا و پایین جوش می باشند. با این حال همانطور که دیده می شود، در بخش داخلی، عرض جوش بیشتر از بخش بیرونی است که نشان دهنده ذوب شدگی بیشتر در بخش داخلی لبه ها بوده است. در نتایج شبیه‌سازی نیز همین روند مشاهده می گردد. شکل ۱۹ مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی برای محاسبه عرض جوش را در نمونه با لبه بهبود یافته نهایی نشان می دهد.

در شکل ۲۰ نتایج تجربی و در شکل ۲۱ نتایج شبیه‌سازی مربوط به عرض ناخیهی جوش در سه شکل لبه مورد نظر (1st, 2nd و 3rd) و در ۵ 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 خواهد داشت.

تفاوت در نتایج شبیه‌سازی و نتایج آزمون ها را می توان 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 افزایش مقاومت شبیه‌سازی ها خواهد بود. برخی شرایط محیطی که موجب افزایش مقاومت الکتریکی می شوند شامل آلودگی های سطحی لبه ناشی از استفاده از روان کار، وجود ناخالصی در ورق، اکسیداسیون سطح لبه و صافی سطح لبه ها می باشند. از این رو نتایج تجربی اندازه عرض جوش را کمی بیشتر از شبیه‌سازی پیش بینی می کند. علاوه عرض جوش در آزمون عملی با استفاده از متالوگرافی مقطع اندازه گیری می شود که برخی خطاهای طبیعی ناشی از اندازه گیری نیز در پاسخ مؤثر خواهد بود.

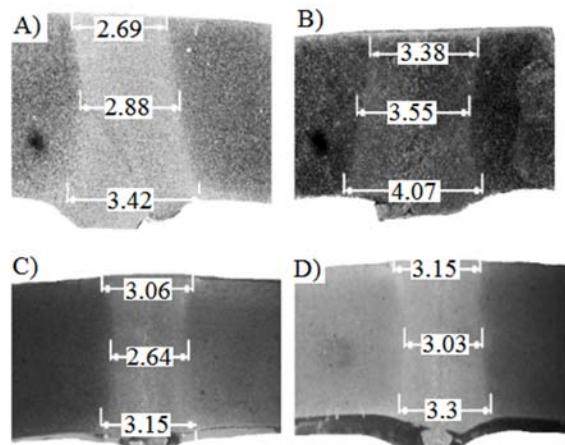


Fig. 18 uniformity comparison of weld's width in several edge shapes A and B) without edge preparing edge B) second preparing edge C) final preparing edge

شکل ۱۸ مقایسه یکنواختی جوش در شکل لبه های مختلف (A) بدون آماده سازی لبه (B) دومین آماده سازی لبه (C) آماده سازی لبه نهایی

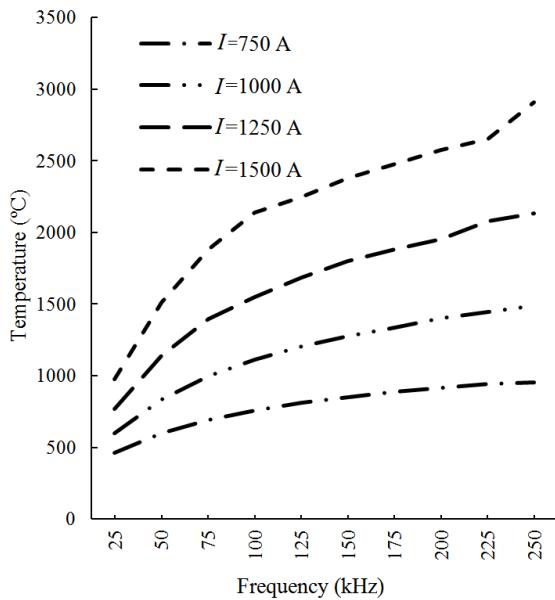


Fig. 23 Comparison of average temperatures generated at the edge, at different frequencies and current intensity.

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

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

5- نتیجه گیری

در این مقاله، جوشکاری القابی فرکانس بالا و اثر پارامترهای مختلف فرایند بر روی بهبود کیفیت جوش در لوله‌های درزدار مطالعه و بررسی شد. مهم‌ترین پارامتر تاثیرگذار بر روی کیفیت جوش القابی فرکانس بالا، گرادیان دمایی در لبه‌های اتصال می‌باشد. به طوریکه کاهش گرادیان دمایی و یا به تعبیری یکنواختی توزیع دما در لبه 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 لبه ورق نوشی با صرفه و اثر گذار می‌باشد.

بررسی ریزاساختارهای 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 6 و 17 درصد بوده است. اندازه متوسط دانه‌ها در مرکز جوش از 18.5 و 17 درصد بوده است. اندازه متوسط دانه‌ها در مرکز جوش از 4.4 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،

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 تأثیر افزایش فرکانس و شدت جریان بر دما در نقاط مختلف لبه نشان داده شده است. دمای متوسط در لبه اتصال در فرکانس‌ها و شدت جریان‌های 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 شب افزایش دما در شدت جریان‌های ثابت، کاهش یافته است.

هر چه شدت جریان افزایش می‌یابد، شب افزایش دما، بر اساس فرکانس، بدون محدودیت افزایش می‌یابد. بنابراین بالا بردن فرکانس از مرز 150 کیلوهرتز برای افزایش دمای لبه‌ها، موجب کاهش راندمان جوش و افزایش هزینه‌های ارزی 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 تأثیر زیادی بر ایجاد گرادیان دمایی ندارد.

نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها در توان‌های مختلف نشان دهنده افزایش یکباره‌ی دما در فرکانس‌های پایین؛ در بازه‌ی 25 تا 150 کیلوهرتز می‌باشد. به طوری که پس از فرکانس 150 کیلوهرتز شب افزایش دما کاهش می‌یابد. 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 نیاز برای فرایند جوش نمی‌رسند. بنابراین فرکانس عاملی محدود کننده در فرایند می‌باشد، که به سادگی قابل تغییر نیست. بنابراین می‌توان بیان کرد که بهبود شکل لبه اتصال بهترین

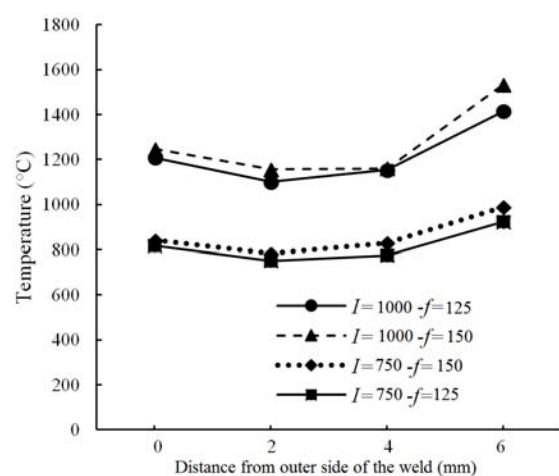


Fig. 22 Comparing the effect of increasing of the frequency and current intensity on the temperature gradient and temperature in 4-point of the edge in the thickness direction of weld.

شکل 22 مقایسه تأثیر افزایش فرکانس و شدت جریان بر گرادیان دمایی و دما در نقطه از لبه در راستای ضخامت (شدت جریان بر حسب آمپر و فرکانس بر حسب کیلوهرتز می‌باشد).

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.

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 کیلوهertz در شدت جریان های 1000 و 1500 و 1750 به ترتیب 3.5 و 7.7 و 8.7 درجه می باشد. بنابراین افزایش دمای متوسط مریوط به افزایش شدت جریان از 1250 به 1500 آمپر در نتایج شبیه سازی بوده است.

همچنین نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها نشان می دهد که بیشترین افزایش دما تا فرکانس 150 کیلوهertz رخ داده است. با افزایش بیشتر فرکانس، دمای متوسط لبهها با شبیه سازی افزایش یافته و تنها موجب افزایش گردایان دمایی در لبه شده است.

کاهش گردایان 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 لبه های لوله خواهد شد. ایجاد شکل لبهی بهبود یافته در اتصال لوله، موجب افزایش کنترل بر میزان گرددی جوش، حفظ گردی لوله و همچنین عرض جوش و ناحیه ای متاثر از حرارت می گردد که این امر با بررسی متالورژیکی مقاطع جوش در شکل لبه های مختلف بدست آمده است. از طرفی شبیه سازی ها نشان می دهند که افزایش فرکانس جوشکاری، تا حدودی موجب عدم یکنواختی توزیع دما در مقطع جوش می شود که این امر در کیفیت جوش تاثیرگذار است.