

بررسی اثر آماده سازی لبه ی ورق بر کیفیت اتصال در فرایند جوشکاری القایی لوله های فلزی

سجاد قنبری¹، داود اکبری^{2*}، حسن مسلمی نائینی³

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 لبه ی بهینه
 گردان دمایی

چکیده

در این مقاله، اثر پارامترهای جوشکاری القایی فرکانس بالا بر روی بهبود کیفیت جوش در لوله های درزدار مطالعه و بررسی شده است. بدین منظور پارامترهای فرآیندی نظیر شدت جریان، فرکانس جوشکاری و همچنین شکل لبه ی اتصال بررسی شده و اثر آنها بر توزیع حرارت در ناحیه ی جوش مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه های تجربی مورد بررسی با انجام آزمون های کشش، متالوگرافی و میکروسختی ارزیابی و کیفیت سنجی شدند و نواحی متأثر از جوش شامل سه ناحیه با دانه بندی متفاوت و عملیات ترمومکانیکی مختلف شناسایی و مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می دهند که با اصلاح شکل لبه، بیشترین کاهش اندازه متوسط دانه ها در ناحیه فلز جوش و به میزان 27 درصد می باشد. همچنین با انجام تحلیل مغناطیسی - حرارتی، شدت جریان ها و فرکانس های مختلف برای ایجاد توزیع دمایی مناسب مدل سازی و ارزیابی شد. نتایج نشان می دهند که با افزایش شدت جریان و فرکانس جوشکاری، نواحی متأثر از حرارت گسترش یافته و سایر نواحی کوچکتر می شوند. 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 میکروسختی منطقه جوش، عرض جوش یکنواخت تری در نمونه های جوش داده شده با لبه اصلاح شده مشاهده شد. همچنین نتایج بدست آمده نشان دهنده کاهش 18 درصدی در میزان عرض جوش در نمونه های مذکور نسبت به نمونه های 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 Naeni

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.

1- مقدمه

پر کاربرد در تولید مقاطع بسته به خصوص در صنایع ساخت لوله های 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 می شود،

فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا¹ یکی از فرآیندهای بسیار مهم و

¹ High frequency induction welding

ایستگاه پره ای، بهبود بخشد. بنابر نتایج بدست آمده، شکل لبه ی ورق، یکی از پارامترهای مهم بر کیفیت فرایند شکل دهی می باشد.

جانگ کیم و سانگ کای یانگ [4] در سال 2008 شبیه سازی 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 لبه ها، زودتر ذوب شده و همین امر موجب ذوب غیریکنواخت لبه ها و گاه فوق داغ شدن آنها خواهد شد. همچنین در صورتی که زاویه ی Vee شکل تا حد ممکن کاهش یابد، به دلیل شدت گرفتن اثر مجاورتی حجم بیشتری از لبه ها ذوب خواهد شد، هر چند عرض منطقه ی متأثر از حرارت در زوایای کوچک کاهش می یابد.

هان و یو [5] در سال 2012 به شبیه سازی فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا و بررسی ریزساختار ناحیه ی جوش پرداختند. این پژوهش نشان داد که راهی مؤثر برای بهبود کیفیت ناحیه ی جوش، بررسی هندسه و ابعاد لبه ی لوله می باشد، که موجب کاهش اختلاف دما در لبه ها در ناحیه ی Vee شکل می شود. همچنین برای جلوگیری از رخداد عیوبی همچون جوش سرد، سوختگی لبه ها و دیگر عیوب، بایستی گرادیان دمایی در لبه های لوله را کاهش داد.

یان و همکاران [6] در سال 2011 به بررسی اثر حرارت بر ریزساختار ناحیه ی جوش لبه ها پرداختند. آنها از آزمون های کشش و شارپی برای بررسی کیفیت و چقرمگی در ناحیه جوش و منطقه متأثر از حرارت² استفاده کردند. از آنجایی که بررسی های گذشته نشان می دادند که عملیات حرارتی پس از جوش نمی تواند 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، آخال های اکسیدی³ و جهت بندی کریستالی⁴ بیان کرده اند.

دوگیرو و همکاران [7] در سال 2011 به شبیه سازی المان محدود فرایند HFIW پرداختند. داده های حرارتی بدست آمده از شبیه سازی نشان داد که تمرکز دمایی در لبه ها بسیار زیاد می باشد و در نقطه ی جوش، چگالی توان نسبت به ناحیه Vee شکل، به شدت افزایش می یابد.

در این مقاله، هندسه ی لبه ی ورق در هنگام جوشکاری و پارامترهای تأثیرگذار فرآیندی بر کیفیت جوش تولیدی بررسی و با انجام تحلیل های تکمیلی، هندسه ی 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 هندسه های مختلف لبه بررسی خواهد شد. همچنین برای ارزیابی اثر بهبود لبه اتصال بر کیفیت متالورژیکی جوش، ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت در نمونه های 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 شبیه سازی صحیح فرایند و انجام آزمایش های لازم برای رسیدن به نتیجه مطلوب، تلاش شده است تا روند انجام آزمایش های تجربی بر اساس نتایج نهایی بدست آمده از شبیه سازی ها باشد. از این رو شبیه سازی های فرایند در شدت جریان و فرکانس های صنعتی انجام شده است. به همین منظور، مهمترین عوامل مؤثر بر فرایند HFIW از قبیل

برای اتصال لبه های پروفیل های بسته در ایستگاه پایانی فرایند شکل دهی غلتکی مورد استفاده قرار می گیرد. به دلیل فرارگیری فرایند جوش القایی در مراحل پایانی تولید، این فرایند نقش تعیین کننده ای در کیفیت پروفیل نهایی تولیدی دارد. این فرایند به دلیل سرعت بالا، اتوماتیک و پیوسته بودن به طور گسترده ای در صنعت لوله و پروفیل سازی استفاده می شود. همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، در اتصال لبه های لوله در فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا از یک سیم پیچ به عنوان القاگر، برای ایجاد شار جریان الکتریکی با فرکانس بالا، بهره برده می شود [1]. شار الکتریکی موجب ایجاد جریان گردابه ای در سطح لوله و لبه ها می گردد و به دلیل فرکانس بالای فرآیند، دما در لبه ها به شدت بالا رفته و جوشکاری القایی فرکانس بالا به صورت یک فرآیند پیوسته صورت می گیرد.

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

یکی از پارامترهای مهم در کیفیت جوش بدست آمده هندسه ی لبه ی اتصال و یا زاویه ی پخ می باشد. زاویه های مختلف لبه در ایستگاه جوشکاری، متناسب با هندسه ی اولیه لبه ی ورق، موجب ایجاد گرادیان دمایی مختلف در مقطع جوش شده، که منجر به ایجاد اختلاف دما بین بخش های بیرونی و درونی و همچنین ناحیه ی میانی در هندسه ی اتصال می شود. این مسأله در ورق هایی با ضخامت بالای 5 میلی متر مشهودتر بوده و کیفیت اتصال را تحت تأثیر قرار می دهد. از آنجایی که لوله های ضخامت بالا در فشارهای کاری بسیار بالا کاربرد خواهند داشت، مسئله کیفیت اتصال لبه ها در فرایند جوشکاری القایی بسیار مهم خواهد بود.

در سال های اخیر، پژوهش هایی بر روی جوشکاری القایی فرکانس بالا، شکل لبه در فرایند شکل دهی غلتکی و شبیه سازی فرایند HFIW انجام گرفته است. بررسی همه جانبه ی این فرایند به دلیل دارا بودن پارامترهای متعدد، بسیار دشوار بوده و بررسی ها عمدتاً منحصر به یک یا چند پارامتر محدود بوده است. بررسی های تجربی و تحلیلی نشان می دهند که فرکانس، شدت جریان، هندسه ی ناحیه ی Vee شکل¹ و عرض اولیه ی ورق بیشترین تأثیر را بر کیفیت جوش می گذارند [2].

کیم و همکاران [3] در سال 2003 به پیش بینی شکل اولیه ی لبه ی ورق، با در نظر گرفتن شکل پره های ایستگاه پره ای پرداختند و به این نتیجه رسیدند که شکل لبه ی مثلثی معکوس می تواند برخورد لبه ها را با پره های

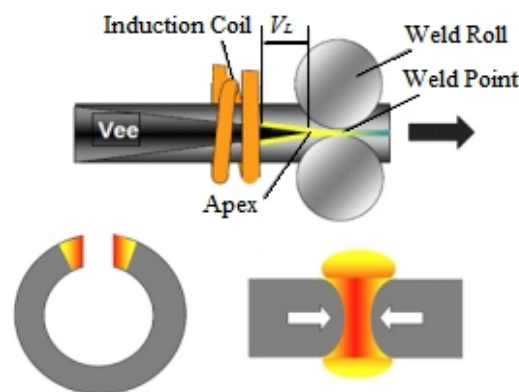


Fig. 1 Schematic of high frequency induction welding

شکل 1 شماتیک فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا

¹ Vee Shape Zone

² Heat affected zone

³ Inclusions

⁴ Metallographic texture

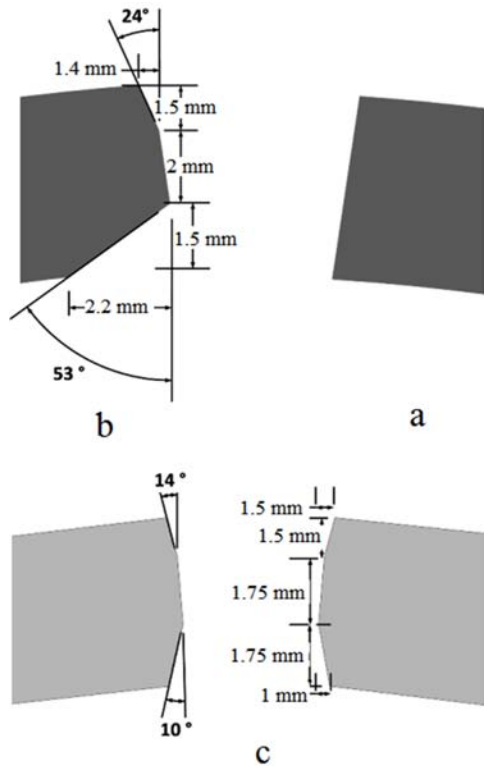


Fig. 2 Schematic of edge preparing in the experimental tests. A) without edge preparing b) second preparing edge c) final preparing edge

شکل 2 انواع هندسه ی 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)

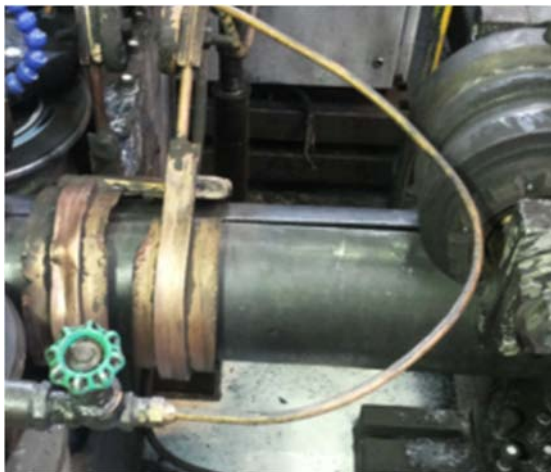


Fig.3 Vee shape zone and inductor (up view).

شکل 3 نمای از ناحیه وی شکل و اینداکتور از نمای بالا.

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

فرکانس، شدت جریان و شکل لبه ی 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 هندسه لوله به 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 ی 526 میلی متر از قطعات جوش داده شده جدا شد. در هر قطعه شکل لبه ی بدست 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 نبودن خطای انسانی، تنها متغیر در آزمون تجربی شکل لبه ورق در ناحیه Vee شکل می باشد. از این رو مقایسه بین نمونه های بدست آمده را می توان با اطمینان بیشتری انجام داد.

لبه های بدست 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 ی عدم وجود عیب در ناحیه ی جوش می باشد. به این منظور آزمون فراصوتی و هیدرو استاتیک استفاده شد.

در انجام جوشکاری فاصله ی بین مرکز القاگر و منطقه ی جوش 22 سانتی متر، فاصله ی بین لبه ها در ابتدای القاگر 14 میلی متر و زاویه ی 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 پیچ های دایره ای، نیاز به حل معادلات استاتیک کوشی برای بدست آوردن پتانسیل مغناطیسی A می باشد [8]:

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

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)	درصد ازدیاد طول (%)
L 210 or A	446	340	37.6

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

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

که در آنها:

Q_{rh} (W/m ³)	تلفات مقاومتی
Q_{ml} (W/m ³)	تلفات مغناطیسی
C_p (J/kg.K)	ظرفیت گرمایی
ρ (kg/m ³)	چگالی
u (m/s)	سرعت

برای انجام شبیه‌سازی‌های لازم و تحلیل فرایند جوشکاری القایی فرکانس بالا، از نرم افزار کامسال¹ استفاده شده است. ابتدا ابعاد لوله‌ی مورد نظر از استاندارد انجمن نفت آمریکا² استخراج شده است [11] و سپس بر اساس هندسه‌ی لوله و ایستگاه‌های پره‌ای مدل‌سازی 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 لبه‌ها 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 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 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 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:

ω (Radian/s)	فرکانس زاویه‌ای
J (Ampere/m ²)	چگالی جریان گردابه‌ای

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 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:

μ (H/m)	تراوایی مغناطیسی
σ ((1/Ωm)	رسانایی الکتریکی
f (Hz)	فرکانس جریان

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 شده‌اند. 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 اینداکتور 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:

B (Tesla)	چگالی شار مغناطیسی
H (Ampere/meter)	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 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:

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

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

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

¹ API

² Comsol

³ Tetrahedral

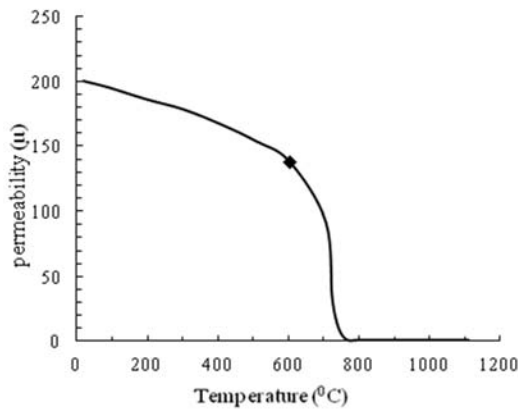


Fig. 7 Relative permeability at various temperatures structural steel [13].

شکل 7 گذردهی مغناطیسی در دماهای مختلف برای فولاد ساختمانی.

بیشتری گرم شده و دمای بخش داخلی لبه ها نسبت به سایر بخش ها به شدت افزایش می یابد. برای رساندن بخش های مرکزی و بیرونی لبه ها به حداقل دمای ذوب، بایستی جریان بیشتری به لوله القا شود، این امر مستلزم اعمال توان بیشتر می باشد؛ که موجب افزایش هزینه های انرژی می شود. از سوی دیگر با رساندن دمای کل لبه به حداقل دمای اتصال، بخش داخلی لبه ها 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 لبه های داخلی خواهد شد. همچنین اعمال توان بیشتر برای رساندن دمای کل لبه به دمای اتصال، موجب افزایش عرض جوش و منطقه متأثر از حرارت می شود. مقادیر دمای بالای بدست آمده در شبیه سازی ها از دمای ذوب نیز در شبیه سازی های فرایند بدست آمده است، که نشان دهنده ی عبور جریان با چگالی بالا در سطح بسیار کوچکی از ناحیه ی جوش می باشد. میزان درصد ناحیه های که چنین دمایی را تجربه می کند، در مقایسه با ناحیه ی جوش بسیار کوچک است.

با بهبود شکل لبه، گرادیان دمایی تا جایی که به یکنواختی لازم برسد کاهش داده می شود و از آن به عنوان شکل لبه ی بهبود یافته ی نهایی برای انجام آزمون های تجربی استفاده می شود.

در شکل 8 تغییرات دمای 4 نقطه از لبه ی 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 درجه ای در لبه ایجاد شده است. بر اساس نمودارهای ایزوترمال گرافیکی بدست آمده از دمای لبه، شکل لبه اصلاح شده و هندسه ی آن در مدل سازی تغییر می کند. این عملیات برای رسیدن به شکل لبه ی بهبود یافته در چندین مرحله انجام شده است. شکل لبه ی 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 شبیه سازی بر روی شکل لبه ی بهبود یافته ی اول، دوم و سوم نشان می دهد که شکل لبه، مهمترین پارامتر بر روی گرادیان دمایی می باشد. دما در لبه ی بهبود یافته ی نهایی دارای کمترین گرادیان و در نتیجه یکنواخت ترین توزیع دما می باشد.



Fig.4 model meshed with tetrahedral element.

شکل 4 مدل شبکه بندی شده با المان های تتراهدرال

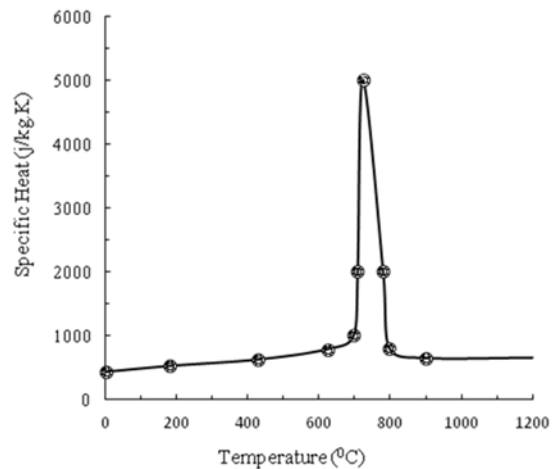


Fig. 5

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

شکل 5 گرمای ویژه در دماهای مختلف برای فولاد ساختمانی

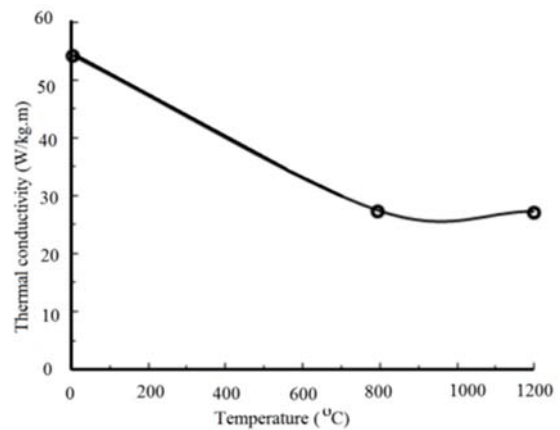


Fig. 6 Thermal conductivity at various temperatures for structural steel [12].

شکل 6 رسانایی حرارتی برای فولاد ساختمانی در دماهای مختلف

دمای لازم برای ایجاد اتصال می رسند.

3-3- شبیه سازی های اثر هندسه ی لبه

شبیه سازی های اولیه بر روی شکل لبه ی ورق با هدف کاهش گرادیان دمایی و رسیدن به شکل لبه ی بهینه با کمترین گرادیان دمایی، انجام شده است. در شبیه سازی های اولیه نتایج، گرادیان دمایی بالایی را در لبه ها نشان می دهد که در واقع بخش داخلی لبه ها به خاطر اثرات پوسته ای و مجاورتی با شدت

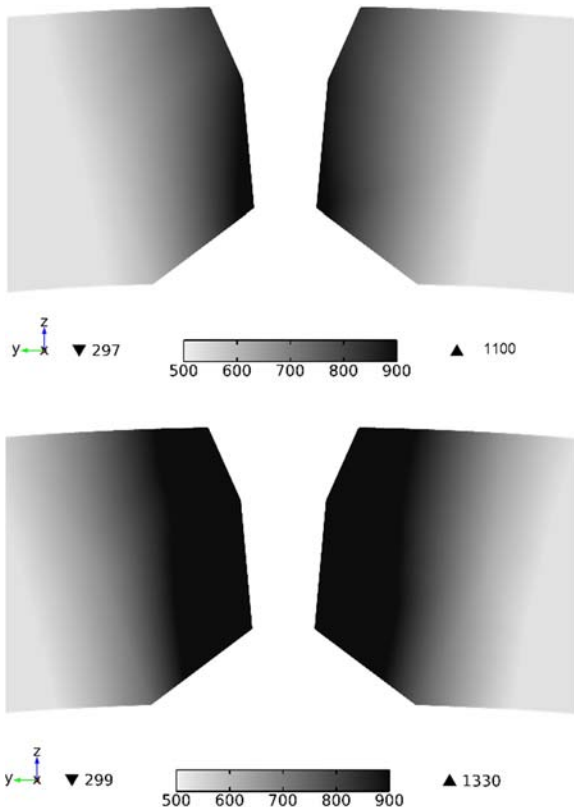


Fig.10 temperature distribution in the edge for second optimized edge for two power sets.

شکل 10 توزیع دما در لبه ها در دو توان مختلف برای دومین شکل لبه ی بهبود یافته.

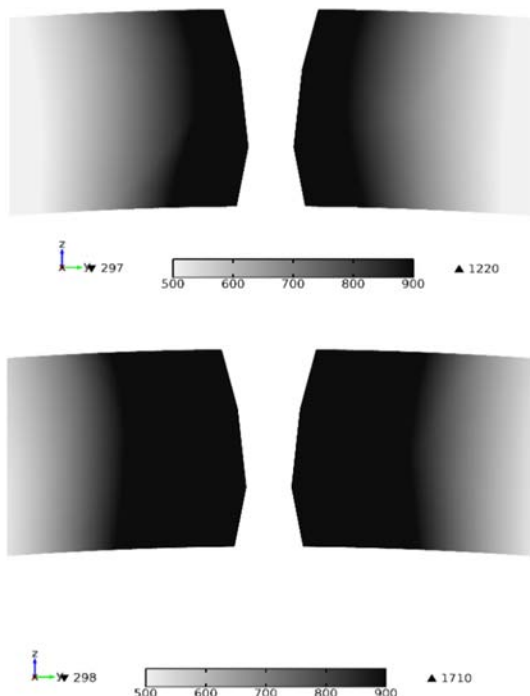


Fig.11 Temperature distribution in final optimized edge in 2 power sets.

شکل 11 توزیع دمای در لبه ها در دو توان مختلف برای شکل لبه ی بهبود یافته ی نهایی.

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

در شکل های 10 و 11 توزیع دما در لبه ها، در 2 توان 123 کیلو وات و 179 کیلو وات در دو هندسه ی مختلف لبه نشان داده شده است.

افزایش توان در لبه ها موجب افزایش عرض جوش و منطقه ی متأثر از حرارت شده است. مقایسه ی نمودارهای توزیع دمایی در شکل لبه های مختلف نشان می دهد که توان مصرفی در گرمایش لوله با شکل لبه ی دوم 3 درصد بیشتر از توان مصرفی در شکل لبه ی بهبود یافته ی نهایی می باشد؛ در حالی که در گرمایش لبه های بهبود یافته ی دوم، بخش هایی از لبه به حداقل دمای اتصال نرسیده اند. به همین دلیل برای رساندن دمای تمامی سطح لبه به دمای اتصال، نیاز به افزایش توانی معادل 50 کیلو وات در توان مصرفی می باشد. این میزان افزایش توان معادل 60 درصد افزایش در انرژی مصرفی جوش است.

توزیع دما در 4 نقطه از لبه ی اتصال در نمونه با شکل لبه ی نهایی در شکل 12 نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود کاهش گرادیان دمایی از 1200 به 200 درجه، نشان دهنده ی تاثیر بسیار زیاد شکل لبه ی ورق در یکنواخت سازی توزیع دما در لبه ی اتصال می باشد.

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

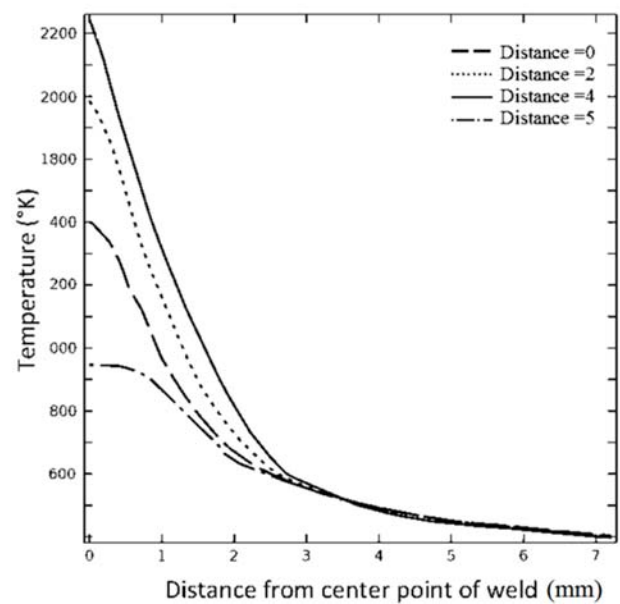


Fig. 8 Temperature profiles of 4 points in the weld edge without edge preparing.

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

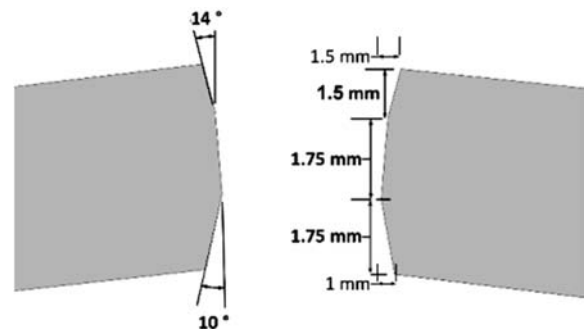


Fig. 9 final improved edge shape derived from Isothermal diagrams.

شکل 9 شکل لبه بهبود یافته ی نهایی پس از بررسی نمودارهای ایزوترمال.

جدول 3 خلاصه نتایج آزمون کشش نمونه ها

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، 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 استحکام نمونه های بهبود یافته، 5.7 درصد می باشد. همچنین ناحیه ی شکست در نمونه ها، از خط جوش فاصله داشته است، که نشان دهنده ی سلامت جوش می باشد. از طرفی درصد ازدیاد طول در نمونه ی 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 ایجاد شده بزرگتر باشد، تحت شرایط محیطی حساس مانند محیط های خورنده و اکسیداسیون حساسیت بیشتری داشته و ضعیف تر 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 ی ریز ساختاری

در فرایند جوش القایی فرکانس بالا چهار ناحیه متالورژیکی به دلیل برهم کنش مکانیزم های حرارتی و مکانیکی به وجود می آید [6]. نمونه های متالوگرافی از جوش در سه شکل لبه، نشان دهنده ی تفاوت اندازه ی دانه ها در نواحی متأثر از حرارت و فلز پایه و فلز جوش و ناحیه ی ترمومکانیکال¹ می باشد. بررسی نمونه های متالوگرافی در بیشتر نمونه ها 4 ناحیه ریزساختاری را نشان می دهد.

ناحیه فلز پایه: دارای دانه های فریت منظم، ریز و نرماله شده، به همراه مرزهای پرلیت می باشد. متوسط اندازه ی دانه ها در این ناحیه 7.56 میکرون است. ناحیه ی ترمومکانیکال: دارای دانه بندی های هم محور با جهت بندی در راستای بیرون زدگی فلز از ناحیه ی جوش می باشد. اندازه ی دانه ها در این ناحیه تقریباً با ناحیه ی فلز پایه برابر می باشد، ولی از لحاظ 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 پرلیتی 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 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 تأثیر برهم کنش این دو پارامتر می باشد. بدین جهت و با توجه به تأثیر پارامترهای جوشکاری بر حرارت ایجاد شده در حین فرآیند، ریزساختار ناحیه متأثر از حرارت و ناحیه ی ترمومکانیکال در 2 نمونه لبه ی بهبود یافته با نمونه های بدون لبه بهبود یافته، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته اند.

4- نتایج و بحث

1-1- 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.

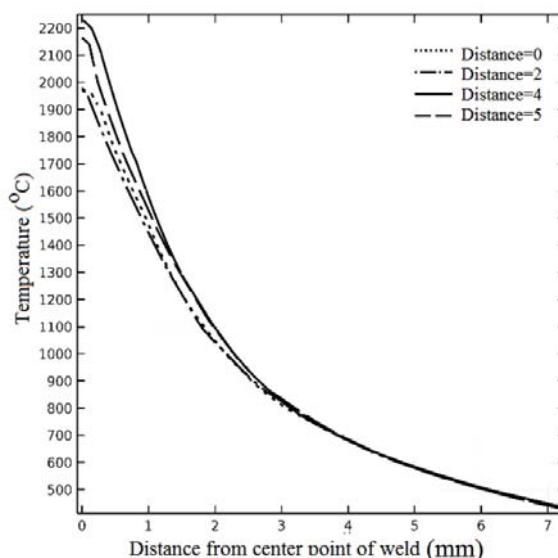


Fig.12 Temperature profiles of 4 distance from the outer surface, in final edge preparation.

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

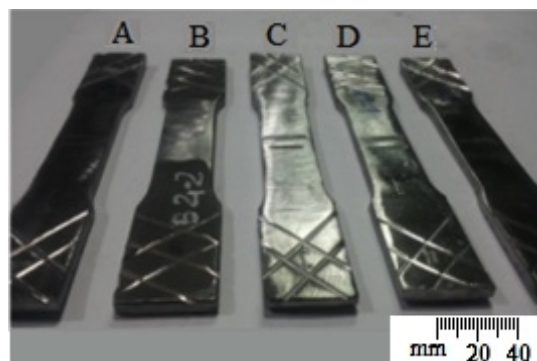


Fig. 13 Tensile test specimens based on ASTM-E8 standard for large diameter pipes.

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

3-4- اثر شکل لبه بر یکنواختی مقطع جوش

یکنواختی مقطع جوش القایی فرکانس بالا در لبه سازی های مختلف، با

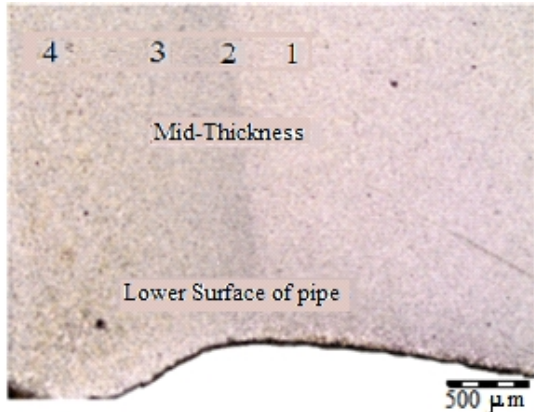


Fig. 16 Cross-section of the weld and 4 difference zones. 1. Base metal 2. Thermomechanical zone 3. Heat affected zone 4. Fusion zone

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

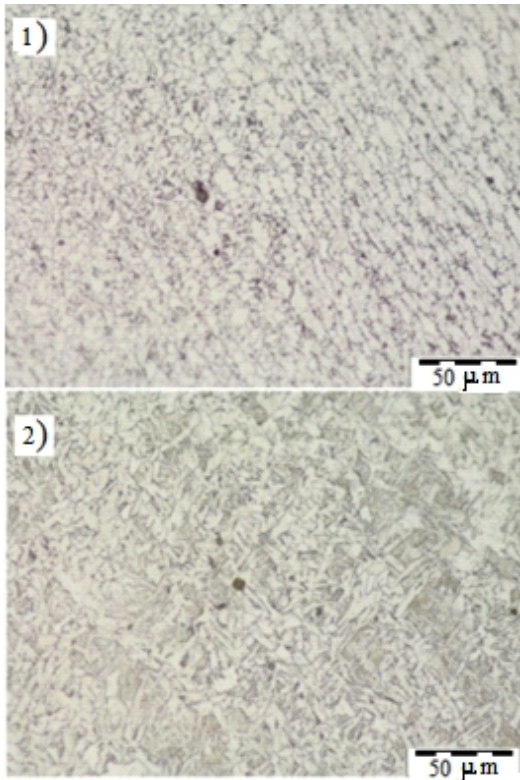


Fig.17 Micro structure and texture of the weld 1) thermomechanical area 2) Center of the welding line.

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

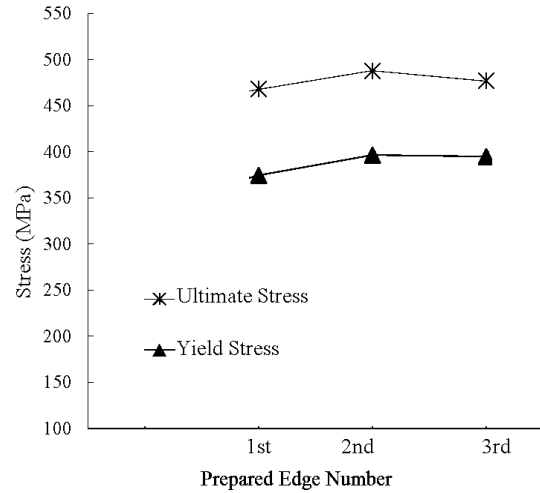


Fig. 14 Comparing the results of yield strength and ultimate strength in a different edge preparation.

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

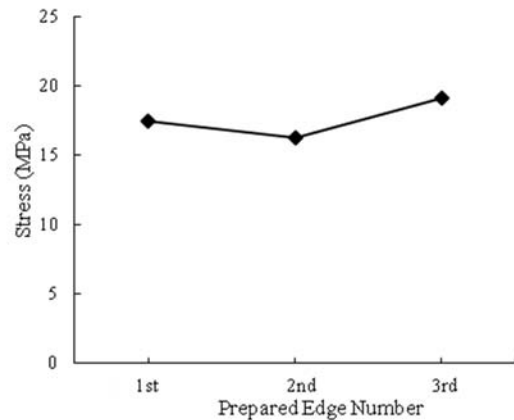


Fig. 15 Comparison of the elongation of the sample

شکل 15 مقایسه ی درصد ازدیاد طول در نمونه ها.

ناحیه ی 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 آستنیت به فریت در دمای بالا شکل گرفته شده باشند؛ که دومین 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 ی ترمومکانیکال دیده نشده است و ناحیه پیوسته می باشد.

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

ناحیه ی 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)

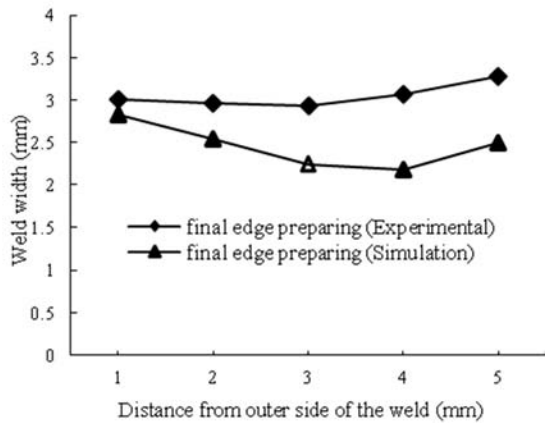


Fig. 19 Comparison of experimental and simulated weld width for improved edge of the end.

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

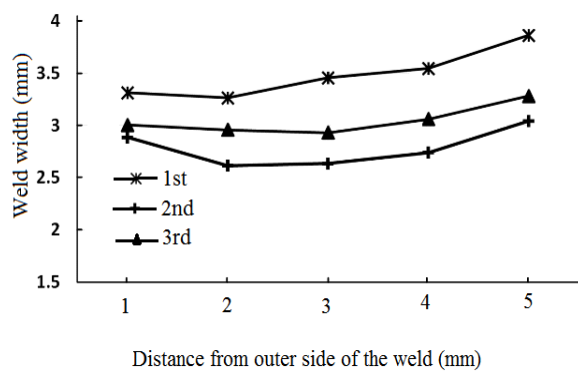


Fig. 20 comparison of experimental results of weld width in different edge preparation.

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

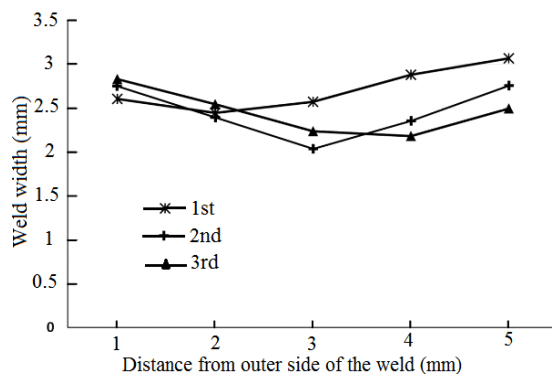


Fig. 21 A comparison of simulation results of weld width in different edge preparations.

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 تأثیرگذار در بهبود نتایج آزمون تخت شدگی است.

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 تأثیر 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 می‌شوند 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.

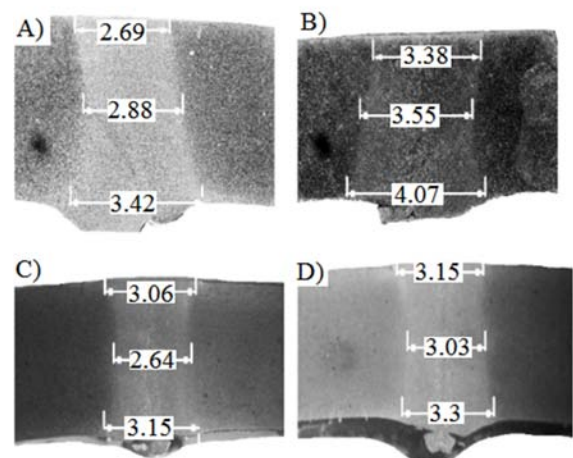


Fig. 18 uniformity comparison of weld's width in several edge shapes A) without edge preparing B) second preparing edge C) final preparing edge

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

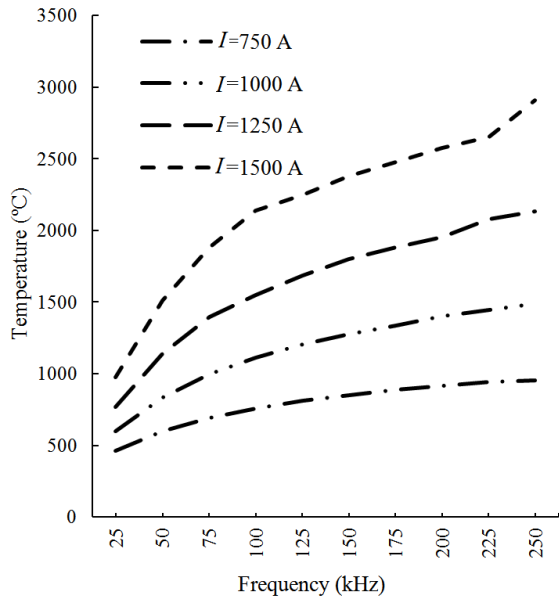


Fig. 23 Comparison of average temperatures generated at the edge, at different frequencies and current intensity.

شکل 23 مقایسه ی متوسط دمای ایجاد شده در لبه، در فرکانس و شدت جریان های مختلف.

راه برای کاهش گرادیان دمایی در لبه ها 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 لوله های درزدار مطالعه و بررسی شد. مهم ترین پارامتر تاثیرگذار بر روی کیفیت جوش القایی فرکانس بالا، گرادیان دمایی در لبه های اتصال می باشد. به طوریکه کاهش گرادیان دمایی و یا به تعبیری یکنواختی توزیع دما در لبه ی اتصال، موجب بهبود انجام فرایند و افزایش کیفیت ناحیه ی جوش خواهد شد.

نتایج نشان می دهند که بهبود شکل لبه، تا حد زیادی موجب کاهش گرادیان دمایی در سطح لبه های اتصال می گردد. 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 لبه ها رخ می دهد. دلیل این امر، کاهش سطح مقطع انتقال دهنده حرارت در برخی مناطق و در نتیجه یکنواخت شدن توزیع شار حرارتی در طول لبه است. از این رو می توان نتیجه گرفت که برای کنترل گرادیان دمایی در لبه ها، بهبود شکل لبه ی ورق روشی با صرفه و اثر گذار می باشد.

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

شبیه سازی های انجام گرفته در فرکانس ها و شدت جریان های مختلف نشان می دهد که افزایش فرکانس در لبه ها، موجب تشدید اثر پوسته ای،

نمونه ها با شکل لبه ی نهایی (3rd) توزیع حرارت در کل راستای لبه یکنواخت شده و در نتیجه، تداخل لبه ها و جریان مواد به صورت مناسب تر انجام شده، و با وجود توزیع یکنواخت حرارت در کل راستای لبه، عرض ناحیه ی جوش کاهش یافته است. دیده می شود که میزان تداخل لبه ها در نمونه های بهبود یافته ی 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 لبه ی اتصال در فرکانس ها و شدت جریان های مختلف در شکل 23 نشان داده شده است.

دو نتیجه از نمودارهای مربوط به دمای میانگین لبه ها بدست می آید: شدت افزایش دما در بین فرکانس های 25 تا 125 کیلوهرتز بیشتر می شود، 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 150 کیلوهرتز برای افزایش دمای لبه ها، موجب کاهش راندمان جوش و افزایش هزینه های انرژی خواهد شد. همانطور که در شکل 23 مشاهده می شود، با افزایش فرکانس تنها افزایش در گرادیان دمایی دیده می شود، به طوریکه دمای متوسط با افزایش 25 کیلوهرتز در فرکانس تغییری نمی کند. از طرفی افزایش شدت جریان تنها موجب افزایش دما در کل لبه می شود و تاثیر زیادی بر ایجاد گرادیان دمایی ندارد.

نتایج بدست آمده از شبیه سازی ها در توان های مختلف نشان دهنده ی افزایش یکباره ی دما در فرکانس های پایین؛ در بازه ی 25 تا 150 کیلوهرتز می باشد. به طوری که پس از فرکانس 150 کیلوهرتز شیب افزایش دما کاهش می یابد. از طرفی نمی توان 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 لبه های ورق به دمای مورد نیاز برای فرایند جوش نمی رسند. بنابراین فرکانس عاملی محدود کننده در فرایند می باشد، که به سادگی قابل تغییر نیست. بنابراین می توان بیان کرد که بهبود شکل لبه اتصال بهترین

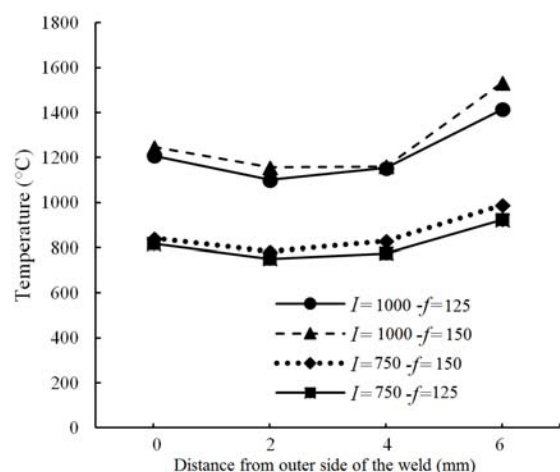


Fig. 22 Comparing the effect of increasing of the frequency and current intensity on the temperature gradient and temperature in 4-point of the edge in the thickness direction of weld.

شکل 22 مقایسه ی 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 می باشد).

6- مراجع

- [1] R. K. Nichols, High Frequency Welding The Process and Applications, *Thermatoool 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 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 گردی لوله و همچنین عرض جوش و ناحیه‌ی متأثر 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 تأثیرگذار است.