

بررسی متغیرهای جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا (HFRW) بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیر همجنس فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدن به فولاد پر آلیاژ کروم دار

محمد صادقی^۱، حامد ثابت*^۲، سید حسین رضوی^۳

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۱۰، ش.ص: ۱۴-۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۲/۰۹)

چکیده

در این تحقیق، اثر پارامترهای جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال فولاد کم آلیاژ ۲/۲۵ Cr- ۱ Mo به فولاد پر آلیاژ کروم دار به عنوان لوله‌های پرده‌دار پیچشی مورد استفاده در صنعت بویلر سازی مورد بررسی قرار گرفته شده است. برای این منظور عملیات جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا با بررسی پارامترهای متغیر جوشکاری شامل شدت جریان، ولتاژ، سرعت جوشکاری و گام پرها بر روی نمونه‌های واقعی (صنعتی) انجام گرفت، سپس آزمون‌های متالوگرافی، کشش و سختی سنجی مطابق استاندارد تکنولوژی لوله پرده‌دار و ASTM بر روی مقاطع مختلف بعد از نمونه برداری انجام گردید. نتایج متالوگرافی و خواص مکانیکی نشان دادند که نفوذ جوش حداقل ۹۰٪ تابع پارامترهای بهینه جوشکاری و موقعیت قرارگیری قطب‌های جوشکاری مقاومتی، تنظیمات فشار بواسطه جک هیدرولیکی جهت ایجاد فواصل بهینه غلتک‌های دستگاه و گام فین‌ها در اتصال غیرهمجنس لوله‌های فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی به فین پرهاهای آلیاژی فولاد پر آلیاژ کروم دار می‌باشد. همچنین هرچه گام فین و ضخامت فین کم‌تر انتخاب گردد، کیفیت نفوذ فین به تیوب بیش‌تر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: جوشکاری مقاومتی، فرکانس بالا، ریزساختار، خواص مکانیکی، لوله‌های پرده‌دار.

۱ - دانشجوی دکتری تخصصی مهندسی مواد، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۲ - دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، کرج، ایران

۳ - دانشیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول مقاله: h-sabet@kia.ac.ir

پیشگفتار

بویلرهای سیکل ترکیبی برای استفاده بهینه از انرژی گرمایی گازهای خروجی از توربین گازی و بالا بردن راندمان در نیروگاه‌های گازی طراحی می‌شوند [۱]. به منظور افزایش میزان انتقال حرارت در این مبدل‌های حرارتی از لوله‌های پره‌دار^۱ در صنایع پتروشیمی و نیروگاهی از جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا استفاده می‌گردد [۲]. جوشکاری فرکانس بالا یکی از انواع روش‌های جوشکاری مقاومتی می‌باشد که در آن انرژی گرمایی توسط مقاومت در برابر جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی تامین می‌شود. در این روش جریان الکتریکی متناوب و با فرکانس بالا می‌باشد. در فرآیندهای جوشکاری القایی، اتصال دو سطح توسط حرارت و فشار توأم انجام می‌شود [۳]. در فرآیند جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا، فلزات به دلیل مقاومت الکتریکی در اثر عبور جریان الکتریکی، گرم و خمیری شده [۴] و با اعمال نیروهای فشاری (در زمان‌های قبل و حین عبور جریان الکتریکی) باعث فورج شدن و اتصال صورت می‌پذیرد [۵]. از کاربردهای منحصر بفرد لوله‌های پره‌دار تولیدی با این روش که در فرکانس بالاتر از 400000 Hz تولید می‌شوند، انتقال حرارت در نیروگاه‌های سیکل ترکیبی به عنوان یک مبدل حرارتی است [۶]. جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا با این روش، یک اتصال متالورژیکی قوی و در عین حال با عمق کم و منطقه متاثر از حرارت کوچک HAZ^۲ ایجاد می‌نماید. این ناحیه کوچک با توجه به ضخامت کم لوله‌ها، باعث جلوگیری از بروز تخریب در لوله‌ها در مدت طولانی خواهد شد [۷]. فین تیوب در لغت به معنی لوله پره‌دار می‌باشد. علت وجود پره‌ها در حقیقت به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت و سطح بیرونی لوله می‌باشد. پره‌های مورد استفاده در بویلرهای بازیاب در حالتی که سوخت توربین، گاز طبیعی باشد به صورت لوله‌های پره‌دار دندانه‌دار^۳ و بدون دندانه^۴ می‌باشد [۸]. در خصوص جوشکاری و عملکرد فین تیوب‌ها تحقیقات محدودی انجام شده است. در سال ۲۰۰۷ میلادی تحقیقات کوشیما و همکارانش [۹] بر روی متغیرهای موثر خواص مکانیکی و ریزساختار لوله فولادی ۲/۲۵ Cr- ۱ Mo پرداختند. نتایج آن‌ها مشخص نمود که

خواص مکانیکی فولاد مذکور تابع ریزساختار آن تحت تاثیر نرخ سرد شدن در شرایط عملیات حرارتی می‌باشد. نس [۱۰] اثر انتقال حرارت بر روی شکل هندسی پره‌ها در اتصال لوله بررسی‌هایی انجام داد. نتایج تحقیقات نشان داد که افزایش تراکم فین، باعث کاهش انتقال حرارت و افزایش ارتفاع فین، باعث افزایش انتقال حرارت می‌گردد. لوین [۱۱] به صورت مقایسه‌ای انتقال حرارت لوله‌های پره‌دار را در دو حالت ساده و پره‌دار مقایسه و با شبیه سازی حرارتی عنوان نموده است که دما در حالت پره‌دار بیش تر از حالت ساده است که نشان دهنده انتقال حرارت بیشتر در تیوب-های پره‌دار (فین تیوب‌ها) می‌باشد. کوکورک و همکارش [۱۲] در خصوص تکنولوژی تولید فین تیوب‌ها به روش جوشکاری با لیزر تحقیقاتی انجام دادند. نتایج بررسی آن‌ها مشخص نمود این روش جوشکاری با پیوستگی نفوذ کامل دارای کیفیت بالا می‌باشد و سختی در ناحیه اتصال از ۳۸۰ ویکرز تجاوز نمی‌کند. آدامیک [۱۳] جهت جوشکاری مبدل حرارتی از آلیاژ اینکونل ۶۲۵ در فرآیند جوشکاری لیزر استفاده نمود. نتایج تحقیقات مشخص نمود که این روش جوشکاری مناسب آلیاژ اینکونل است؛ زیرا مقطع جوش در روش مذکور مقاوم در برابر خوردگی می‌باشد. همچنین زابوک و همکارانش [۱۴] بر روی پارامترهای جوشکاری غیرهمجنس فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی ۲/۲۵ Cr- ۱ Mo به فولاد پرآلیاژ کروم‌دار با روش‌های لیزر و GMAW پرداخته است. نتایج تحقیق آن‌ها مشخص نمود که تغییرات ریزساختار به علت نفوذ ترکیب شیمیایی با استفاده از قوانین فیک مرتبط می‌گردد و با استفاده از دیگرام شفلر استحاله فازی ریزساختار را پیشبینی نمود. لیما و همکارانش [۱۵] بر روی ارزیابی ریزساختارهای لوله‌های فولاد فریتی- بینایتی و فریتی- پرلیتی ۲/۲۵ Cr- ۱ Mo در حین سرویس در دماهای ۵۰۰، ۵۷۵ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد در مدت ۲۰۰۰ ساعت و همچنین خواص خزشی تحت تنش ۱۰۰ مگاپاسکال را مقایسه و نتایج آن‌ها نشان داد، فولاد با ریزساختار فریتی- بینایتی رفتار پایداری دارد؛ اما فولاد با ریز ساختار فریتی- پرلیتی خواص خزشی بهتری در زمان عملکرد از خود نشان می‌دهد. با توجه به اهمیت و حساسیت بالای لوله‌های پره‌دار در عملکرد مناسب

۳ - Serrated Fin
 ۴ - Solid Fin

۱ - Finned Tube
 ۲ - Heat affected zone

جوشکاری (سرعت چرخش لوله) به عنوان متغیرهای تحقیق انتخاب و با استفاده از طراحی آزمایش‌ها به روش تاگوچی و تحلیل واریانس تعداد ۱۰ نمونه با استفاده از دستگاه جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا مدل هانسونگ کره مدل HFS-9488pu و مطابق شرایط آرایه شده در جدول ۳ تحت عملیات جوشکاری قرار گرفتند.

بعد از عملیات جوشکاری نمونه برداری جهت آزمون‌ها انجام شد. آزمون متالوگرافی مطابق استانداردهای ASTM E3 و ASTM E340 انجام شد، برای این منظور ابتدا نمونه برداری مطابق با شکل ۱ از محل اتصال فین به لوله انجام شد و بعد از مانت نمونه‌ها، آماده سازی سطوح بوسیله سنباده زنی (۱۰۰-۱۰۰۰) و پولیش (آلومینای ۳ میکرون) و حکاکی با محلول نایتال ۲٪ (برای لوله از جنس فولاد کم آلیاژ کروم - مولیبدنی) و محلول $HCl+HNO_3+H_2O$ (برای فین از جنس فولاد پر آلیاژ کروم دار) انجام گردید.

تجهیزات نیروگاهی و نبود اطلاعات منسجم علمی تحقیق حاضر انجام گردید. هدف از این تحقیق، بررسی متغیرهای جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا (HFRW) بر ریزساختار و خواص مکانیکی اتصال غیرهمجنس فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدن (لوله) به فولاد پرآلیاژ کروم دار (فین) در ساخت مبدل‌های حرارتی و نیروگاهی می‌باشد.

مواد و روش‌ها

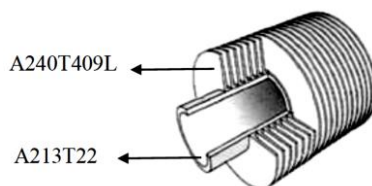
در تحقیق حاضر از لوله‌های فولادی کم آلیاژ کروم - مولیبدن دار بدون درز بر اساس استاندارد ASTM A213 گرید T22 که از پرکاربردترین لوله‌های مورد استفاده در صنعت بویلر سازی بوده و همچنین از فولاد پرآلیاژ کروم دار مطابق ASTM A240 گرید 409 L به عنوان فین، مطابق با ترکیب شیمیایی آرایه شده در جداول ۱ و ۲ استفاده شد. جهت انجام تحقیق، ۴ پارامتر اساسی شدت جریان، اختلاف پتانسیل، تراکم فین‌ها (پره‌ها) و سرعت

جدول ۱- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) لوله مورد استفاده از جنس فولاد ASTM A213-T22 [۱۶]

| Mo | Cr | Si | S | P | Mn | C |
|-----------|-----------|----------|------|------|-----------|-----------|
| ۰/۸۷-۱/۱۳ | ۱/۹۰-۲/۶۰ | ۰/۵۰-۱/۰ | ۰/۰۲ | ۰/۰۲ | ۰/۳۰-۰/۶۰ | ۰/۰۶-۰/۱۵ |

جدول ۲- ترکیب شیمیایی (درصد وزنی) فین‌های مورد استفاده از جنس فولاد فرتیتی ASTM A240- T409 [۱۷]

| Other | Cr | Ni | Si | S | P | Mn | C |
|---------|-------------|-------|------|------|------|------|------|
| Ti 6×C% | ۱۰/۵۰-۱۱/۷۵ | ۰/۵۰۰ | ۱/۰۰ | ۰/۰۴ | ۰/۰۴ | ۱/۰۰ | ۰/۰۳ |



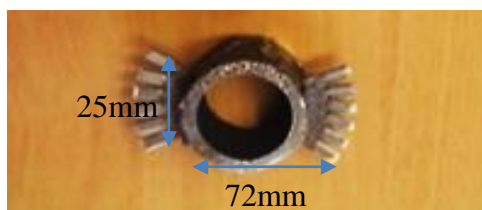
شکل ۱- برش عرضی جهت نمونه برداری از اتصال فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدن (لوله) (A213T22) و فولاد پرآلیاژ کروم دار (فین) (A240T409L)

مطابق استاندارد سازنده دستگاه شرط قبولی اتصال فین به لوله دارا بودن متوسط تطابق بالای ۹۰٪ می باشد. آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM A370 با استفاده از یک دستگاه کشش مدل SANTAM - 600 و با سرعت کشش ۱ میلی متر بر دقیقه انجام گردید. در این آزمون مستقیماً قطعه تحت کشش از نمونه اصلی (مطابق با شرایط ذکر شده برای هر نمونه در جدول ۳) با انتخاب ۶ پره (فین) روبروی هم متصل به لوله، به طول تقریبی هر پره (فین) ۲۵ میلی متر (شکل ۲) تهیه و آزمون بصورت جداگانه (در ۶ مرحله) بر روی دو پره (دو فین) روبروی هم انجام گردید که نتایج کشش هر پره (فین) بصورت جداگانه گزارش گردید.

سپس میزان نفوذ جوش (وضعیت اتصال فین به لوله) توسط میکروسکوپ نوری مدل Olympus DMI3000M مجهز به Image Analyzer انجام گردید. لازم به ذکر است جهت بررسی دقیق اتصال فین به لوله (نفوذ جوش) برای هر یک از شرایط جوشکاری نمونه-های ذکر شده در جدول ۳، حداقل ۸ عدد اتصال فین به لوله تحت بررسی قرار گرفته شد و بعد از تصویر برداری با استفاده از نرم افزار طراحی شده تصاویر تهیه شده با یک نمونه اتصال ایده آل (اتصال ۱۰۰٪) تطابق داده شد و میزان اختلاف در تطابق برای هر اتصال جداگانه تعیین شد. برای تعیین درصد اتصال نهایی هر کدام از نمونه‌های جوشکاری شده متوسط نتایج حداقل ۸ اتصال تطابق داده شده معیار در نظر گرفته شد. لازم به یاد آوری است که

جدول ۳- شرایط جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا نمونه‌های مختلف

| نمونه‌ها | فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی A213-T22 ضخامت × قطر خارجی | فولاد پرآلیاژ کروم دار A240-T 409 ضخامت × ارتفاع | سرعت جوشکاری (RPM) | ولتاژ (V) | شدت جریان (A) | گام فین (تعداد پره بر حسب یک متر) |
|----------|--|---|--------------------|-----------|---------------|-----------------------------------|
| ۱ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۲ | ۵۵۰ | ۱۰/۷ | ۱۲/۷ | ۱۲۶ |
| ۲ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۰ | ۵۵۰ | ۱۰/۸ | ۱۲/۹ | ۱۲۶ |
| ۳ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۲ | ۵۲۰ | ۱۰/۹ | ۱۳/۲ | ۱۸۰ |
| ۴ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۰ | ۵۲۰ | ۱۱/۰ | ۱۳/۴ | ۱۸۰ |
| ۵ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۲ | ۵۰۰ | ۱۱/۱ | ۱۳/۶ | ۲۴۰ |
| ۶ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۰ | ۵۰۰ | ۱۱/۲ | ۱۳/۷ | ۲۴۰ |
| ۷ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۲ | ۴۸۰ | ۱۱/۳ | ۱۳/۹ | ۲۷۶ |
| ۸ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۲ | ۴۸۰ | ۱۱/۴ | ۱۴/۰ | ۲۷۶ |
| ۹ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۰ | ۴۵۰ | ۱۱/۵ | ۱۴/۰ | ۳۰۵ |
| ۱۰ | ۳۸/۱×۲/۷ | ۱۷×۱/۰ | ۵۰۰ | ۱۱/۶ | ۱۴/۴ | ۳۰۵ |



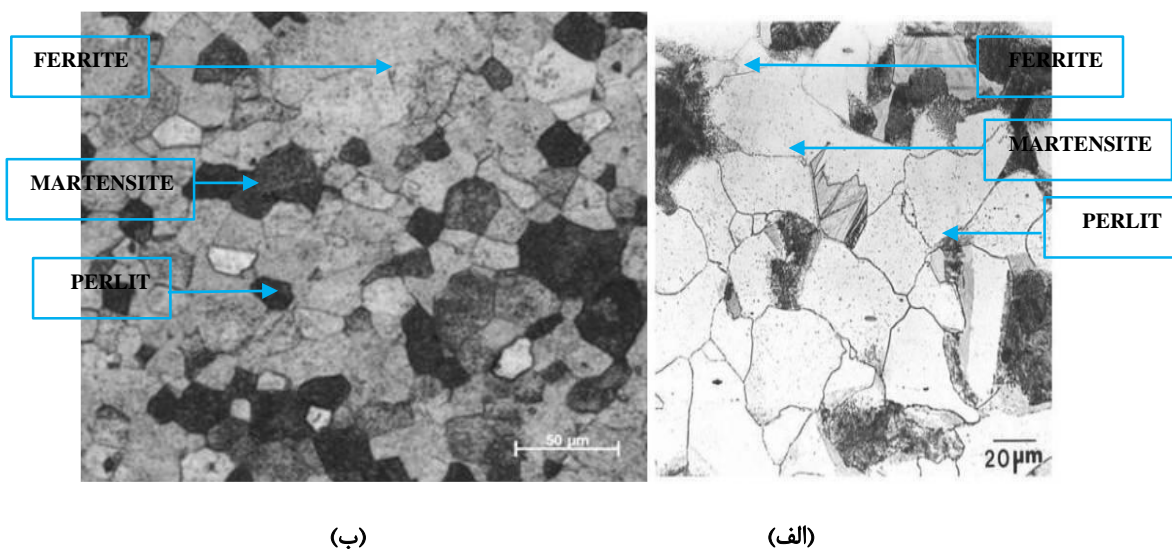
شکل ۲- نمونه آزمون کشش فین به لوله

در انتها نتایج آزمون‌ها تحلیل شدند و تغییر برخی از پارامترها مانند گام فین یا به عبارتی تراکم فین‌ها (تعداد پره بر حسب یک متر) و همچنین ضخامت فین بر کیفیت اتصال و نفوذ فین به لوله و تاثیر آن بر راندمان انتقال حرارت و عملکرد بویلر بررسی و تعیین گام فین و ضخامت مناسب جهت حداکثر کارایی عملکرد بویلر انجام شد.

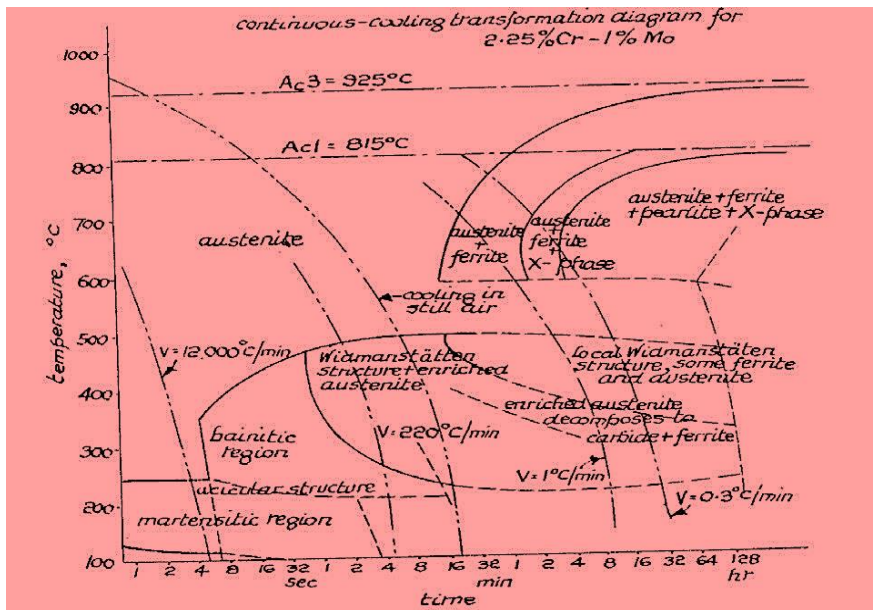
نتایج و بحث

شکل ۳ ریز ساختار فولادهای مورد استفاده در تحقیق را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۳ (الف) لوله از نوع فولاد کم آلیاژ کرم -مولیبدنی می‌باشد. همچنین شکل ۳ (ب) ریزساختار فین از نوع فولاد پرآلیاژ کروم دار می‌باشد، مطابق تصاویر لوله و فین دارای ریز ساختار شامل فریت (مناطق روشن رنگ) و مقدار بسیار کمی پرلیت (مناطق تیره رنگ) و نواحی مایل به روشن مارتنزیت می‌باشد که علت تشکیل فاز مارتنزیت در این فولادها ناشی از نحوه سرد شدن و استحاله فازی بعد از تولید مطابق (شکل ۴) در این خانواده از فولادها می‌باشد. موقعیت فولاد پرآلیاژ کروم دار (فولاد زنگ نزن 409) با توجه به مقدار کروم و نیکل معادل فولاد مذکور (جدول ۲) و با توجه به دیاگرام شفلر (شکل ۵) محدوده ساختار فریتی فولاد مذکور را نشان می‌دهد.

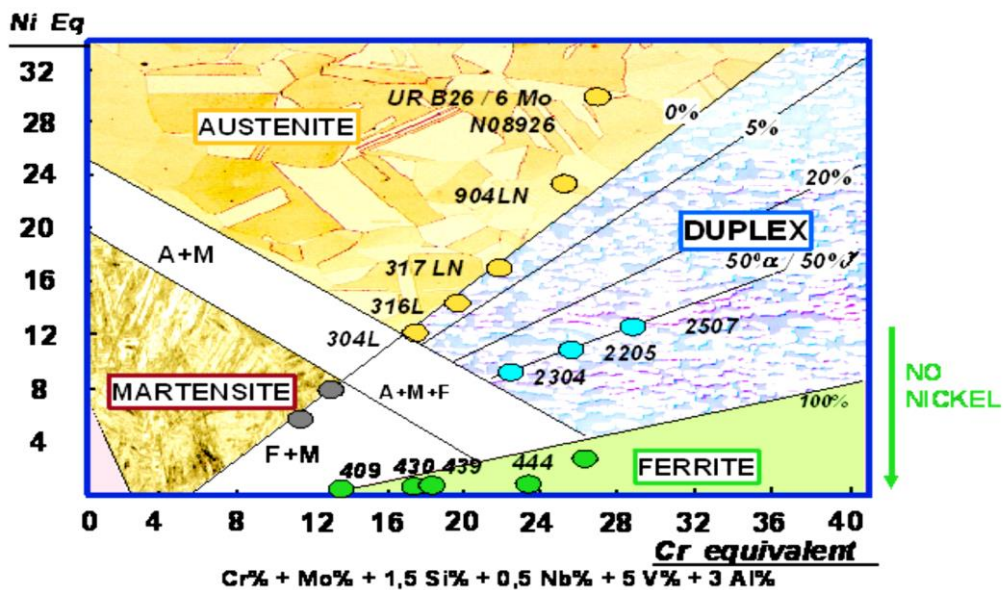
متوسط نتایج کشش هر ۶ پره (فین) به عنوان ملاک خواص کششی نمونه مد نظر گرفته شد. لازم به ذکر است مطابق با استاندارد سازنده دستگاه شرط قبولی اتصال فین (از جنس فولاد پر آلیاژ) به لوله (از جنس فولاد کم آلیاژ) در آزمون کشش بالاتر بودن متوسط استحکام کششی از عدد ۲۷۵ مگا پاسکال می‌باشد. آزمون سختی سنجی بر اساس استاندارد ASTM E384-019 با استفاده از یک دستگاه سختی سنجی ویکرز مدل DRMC-250 با بار اعمالی ۵۰۰ گرم نیرو، زمان اعمال نیرو ۱۵ ثانیه در ۴ موقعیت اتصال انجام گردید. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد ASTM E384-019 سختی در هیچکدام از مناطق فین، لوله و منطقه متاثر از حرارت نباید بیش‌تر از ۴۰۰ ویکرز باشد. آزمون سختی سنجی بر اساس استاندارد ASTM E384-019 با استفاده از یک دستگاه سختی سنجی ویکرز مدل DRMC-250 با بار اعمالی ۵۰۰ گرم نیرو، زمان اعمال نیرو ۱۵ ثانیه در ۴ موقعیت اتصال انجام گردید. لازم به ذکر است که بر اساس استاندارد ASTM E384-019 سختی در هیچکدام از مناطق فین، لوله و منطقه متاثر از حرارت نباید بیش‌تر از ۴۰۰ ویکرز باشد. ضمناً اختلاف بین منطقه متاثر از حرارت و سختی لوله و همچنین اختلاف بین سختی منطقه متاثر از حرارت و سختی فین نباید بیش‌تر از ۱۵۰ ویکرز باشد.



شکل ۳- تصویر میکروسکوپی نوری (الف) فولادی کم آلیاژ کرم -مولیبدنی (لوله) (ب) فولاد پرآلیاژ کروم دار (فین)



شکل ۴- نمودار CCT فولاد 2.25Cr-1Mo [۱۸].



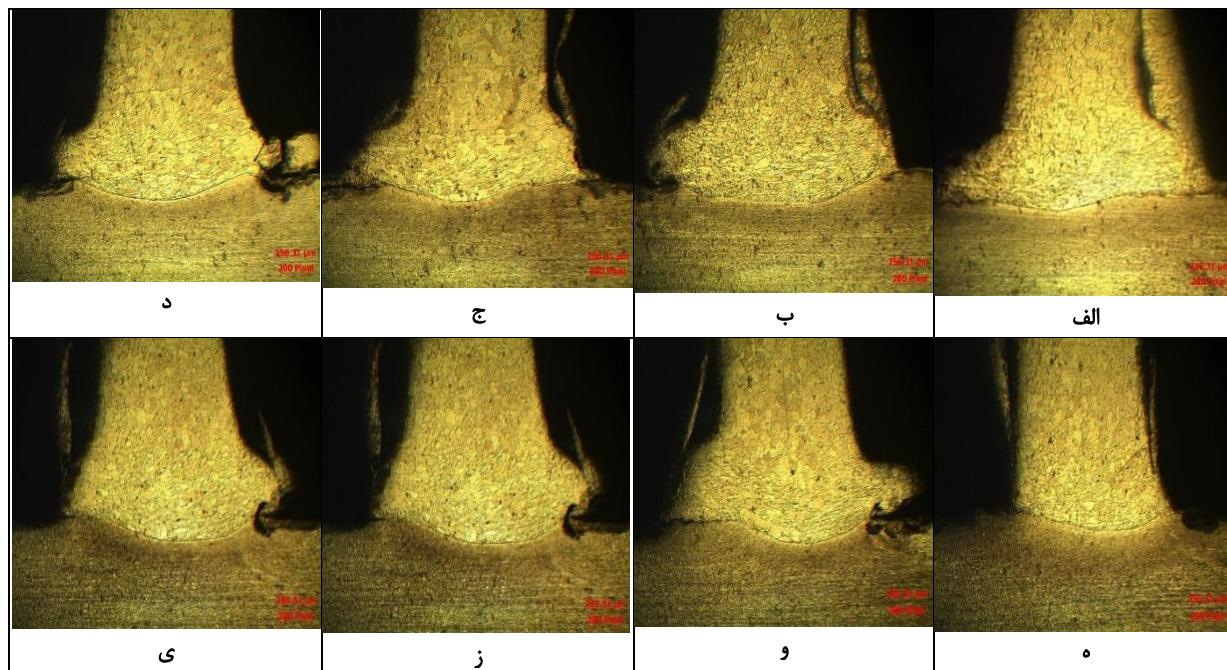
شکل ۵- دیاگرام شفلر و موقعیت فولاد پر آلیاژ کروم دار (فولاد زنگ نزن 409). [۱۹].

همچنین جدول ۴ نتایج تطابق تصاویر شکل ۶ با نمونه ایده آل (نفوذ ۱۰۰٪) مربوط به اتصال فین به لوله نمونه شماره ۸ را ارایه می‌دهد. در نمونه شماره ۸ حداقل تطابق حاصل ۹۶٪ می‌باشد، متوسط تطابق اتصال این ۸ نمونه ۹۸/۸۷٪ می‌باشد. شکل ۷ تصویر میکروسکوپی نوری اتصال فین به لوله مربوط به نمونه جوشکاری شده شماره ۱۱ صرفاً

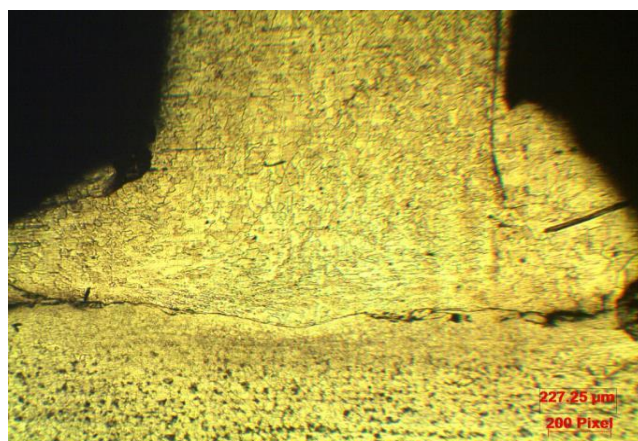
جهت بررسی دقیق درصد نفوذ جوش مطابق استاندارد تکنولوژی لوله‌های پرده‌دار می‌بایست ۸ مقطع از یک دور لوله پرده‌دار نمونه برداری صورت پذیرد. لذا مطابق شکل ۶ تصاویر میکروسکوپی نوری اتصال ۸ عدد فین به لوله مربوط به نمونه جوشکاری شده شماره ۸ (جدول ۳) جهت تعیین درصد نفوذ جوش (اتصال) را نشان می‌دهد،

جوشکاری شده (بر اساس شرایط جدول ۳) را ارایه می-
دهد.

جهت مقایسه نفوذ ناقص جوش با ۷۱٪ نفوذ را نشان
می‌دهد. جدول ۴ نتایج متوسط تطابق اتصال ۱۰ نمونه



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی نوری اتصال مقطع جوش فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی (لوله) به فولاد پرآلیاژ کروم دار (فین) مربوط به نمونه مورد قبول شماره ۸ با نفوذ (الف) ۱۰۰٪ (ب) ۱۰۰٪ (ج) ۹۶٪ (د) ۱۰۰٪ (ه) ۹۷٪ (و) ۹۸٪ (ز) ۱۰۰٪ (ی) ۱۰۰٪



شکل ۷- تصویر میکروسکوپی نوری اتصال مقطع جوش فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی (لوله) به فولاد پرآلیاژ کروم دار (فین) مربوط به نمونه مردود جهت مقایسه با ۷۱٪ نفوذ جوش

جدول ۴- متوسط تطابق اتصال ۱۰ نمونه جوشکاری شده

| نمونه ها | نفوذ جوش فین به لوله | نتیجه |
|----------|----------------------|-----------|
| ۱ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۲ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۳ | %۹۶ | مورد قبول |
| ۴ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۵ | %۹۷ | مورد قبول |
| ۶ | %۹۸ | مورد قبول |
| ۷ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۸ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۹ | %۱۰۰ | مورد قبول |
| ۱۰ | %۱۰۰ | مورد قبول |

۶ پره (فین) به لوله را بصورت جداگانه مربوط به نمونه (الف) مورد تایید شماره ۸ و (ب) نمونه مردود را ارایه می‌دهد، همچنین شکل ۸ منحنی کشش مربوط به این شش پره (فین) را بصورت جداگانه مربوط به نمونه (الف) مورد تایید شماره ۸ و (ب) نمونه مردود را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۵ مشخص می‌گردد، در نمونه شماره ۸ حداقل استحکام کششی ۳۶۸/۲۳ مگاپاسکال می باشد، متوسط استحکام کششی (۶ فین متصل به لوله) در این نمونه ۳۷۹/۵۷ مگا پاسکال می باشد. جدول ۶ نتایج متوسط استحکام کششی مربوط به ۶ فین متصل به تیوب ۱۰ نمونه جوشکاری شده (بر اساس شرایط جدول ۳) را ارایه می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۶ مشخص می‌گردد که تمامی نمونه‌ها با توجه دارا بودن متوسط استحکام کششی بالاتر از ۲۷۵ مگا پاسکال مورد تایید می‌باشند.

با توجه به نتایج تصاویر شکل ۶ مشخص می‌گردد که تمامی نمونه‌ها با توجه به دارا بودن متوسط تطابق بیش از %۹۰ مورد تایید می‌باشند که دلیل آن انتخاب پارامترهای بهینه جوشکاری و محل‌های قرار گیری قطب‌های جوشکاری مقاومتی، تنظیمات فشار با غلتک‌های دستگاه و تراکم فین‌ها در اتصال غیرهمجنس لوله‌های فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی به فین پره‌های آلیاژی فولاد پر آلیاژ کروم دار می‌باشد که با تاثیر گذاری بر مجموع انرژی حرارتی متمرکز شده و انرژی حرارتی نفوذ داده شده با توزیع شار حرارتی پیوسته تغییراتی در ساختار میکروسکوپی ناحیه اتصال و خطوط همدمایی دانه‌های فریت و پرلیت ریز مشاهده می‌شود. این سیکل حرارتی ناشی از سرعت سرد شدن بالا همراه با پاشش آب، باعث ریز شدن ساختار میکروسکوپی و محدود شدن منطقه متاثر از حرارت نیز می‌شود. جدول ۵ نتایج آزمون کشش مربوط به اتصال

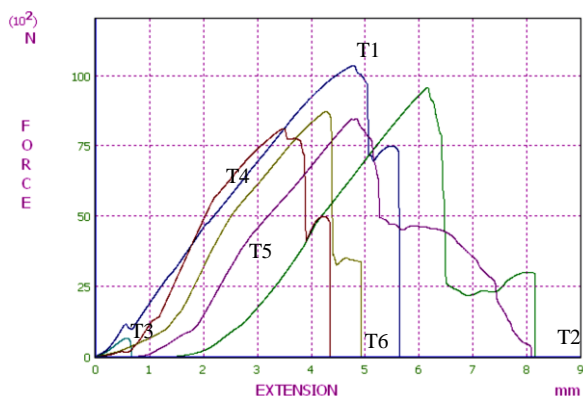
جدول ۵- نتایج آزمون کشش اتصال ۶ پره به لوله بصورت جداگانه مربوط به (الف) نمونه مورد تایید شماره ۸ (ب) نمونه مردود

(الف)

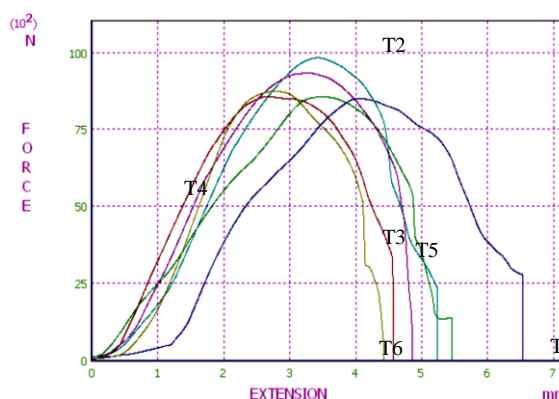
| Specimen | Thickness(mm) | Sec. Area (mm ²) | Total load (N) | UTS (MPa) | Location of failure |
|----------|---------------|------------------------------|----------------|-----------|---------------------|
| T1 | 1.2 | 26.76 | 10192.6 | 380.88 | Fin |
| T2 | 1.2 | 26.36 | 10133.7 | 384.37 | Fin |
| T3 | 1.2 | 26.24 | 10051.6 | 383 | Fin |
| T4 | 1.2 | 26.91 | 10376.5 | 375.51 | Fin |
| T5 | 1.2 | 27.61 | 10366.7 | 375.44 | Fin |
| T6 | 1.2 | 27.61 | 10052.8 | 368.23 | Fin |
| Result | ACCEPT | | | | |

(ب)

| Specimen | Thickness(mm) | Sec. Area (mm ²) | Total load (N) | UTS (MPa) | Location of failure |
|----------|---------------|------------------------------|----------------|-----------|---------------------|
| T1 | 1.2 | 32.812 | 10354.5 | 315.57 | Weld |
| T2 | 1.2 | 28.756 | 9572.1 | 332.87 | Weld |
| T3 | 1.2 | 30.056 | 674.4 | 22.43 | Weld |
| T4 | 1.2 | 29.316 | 8100.6 | 276.34 | Weld |
| T5 | 1.2 | 28.575 | 8458.7 | 296.01 | Weld |
| T6 | 1.2 | 30.251 | 8729.7 | 288.57 | Weld |
| Result | REJECT | | | | |



(ب)



(الف)

شکل ۸- نمودار آزمون کشش اتصال ۶ پره به لوله بصورت جداگانه مربوط به (الف) نمونه مورد تایید شماره ۸ (ب) نمونه مردود

جدول ۶- متوسط استحکام کششی ۱۰ نمونه جوشکاری شده

| نمونه ها | استحکام کششی Mpa | نتیجه |
|----------|------------------|-----------|
| ۱ | ۳۸۰/۳۱ | مورد قبول |
| ۲ | ۳۷۸/۳۹ | مورد قبول |
| ۳ | ۳۷۵/۴۴ | مورد قبول |
| ۴ | ۳۷۷/۸۵ | مورد قبول |
| ۵ | ۳۷۶/۲۴ | مورد قبول |
| ۶ | ۳۸۱/۱۵ | مورد قبول |
| ۷ | ۳۸۰/۱۷ | مورد قبول |
| ۸ | ۳۷۹/۵۷ | مورد قبول |
| ۹ | ۳۷۵/۶۱ | مورد قبول |
| ۱۰ | ۳۷۹/۷۳ | مورد قبول |

بین HAZ لوله با لوله مقدار ۱۶۹ ویکرز مربوط به نمونه ۱ می‌باشد. بررسی نتایج جدول ۷ مشخص می‌نماید که مطابق استاندارد ASTM E384-019 سختی کلیه نمونه‌ها در محدوده قابل قبول می‌باشد. همچنین جدول ۸ یک نمونه مردود صرفاً جهت مقایسه با نمونه‌های مورد تایید ارائه شده است.

مطابق جدول ۹ از طرفی وضعیت نحوه ایجاد دندانه بر روی لوله‌های پره‌دار دندانه‌دار نسبت به حالت بدون دندانه شرایط متفاوتی را خواهد داشت. دو حالت فوق در لوله‌های پره‌دار تولید شده به روش فرکانس بالا با توجه به اندازه قطر خارجی لوله و ضخامت فین پارامتر تراکم فین‌ها مشخص می‌گردد و به حداکثر ارتفاع فین در دو حالت پره‌دار دندانه‌دار و پره‌دار بدون دندانه نیز بستگی دارد.

تحلیل نتایج نمونه‌ها نشان داد که هرچه تراکم فین‌ها و ضخامت فین کم‌تر انتخاب گردد، کیفیت نفوذ فین به لوله بیش‌تر می‌گردد؛ اما از طرف دیگر با کاهش گام فین‌ها راندمان انتقال سطح حرارتی در فرآیند نهایی عملکرد بویلر کاهش می‌یابد، لذا جهت افزایش کارایی عملکرد از لحاظ طراحی و مهندسی جوش لوله‌های پره‌دار با افزایش گام در محدوده ۲۷۶ فین برحسب متر و ضخامت ۱ میلی‌متر بهترین شرایط جوشکاری حالت لوله‌های پره‌دار می‌باشد.

با توجه به نتایج جدول ۵ مشخص می‌گردد، در نمونه شماره ۸ حداقل استحکام کششی ۳۶۸/۲۳ مگاپاسکال می‌باشد، متوسط استحکام کششی (۶ فین متصل به لوله) در این نمونه ۳۷۹/۵۷ مگا پاسکال می‌باشد. جدول ۶ نتایج متوسط استحکام کششی مربوط به ۶ فین متصل به تیوب ۱۰ نمونه جوشکاری شده (بر اساس شرایط جدول ۳) را ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج جدول ۶ مشخص می‌گردد که تمامی نمونه‌ها با توجه به دارا بودن متوسط استحکام کششی بالاتر از ۲۷۵ مگا پاسکال مورد تایید می‌باشند. جدول ۶ سختی نمونه‌های شماره ۱ تا ۱۰ جوشکاری شده بر اساس شرایط جدول ۳ را در مناطق مختلف ارائه می‌دهد. بررسی نتایج جدول ۶ مشخص می‌نماید که بیش‌ترین سختی منطقه HAZ لوله از جنس فولاد کم آلیاژ کروم - مولیبدنی مقدار ۲۷۲ ویکرز مربوط به نمونه ۸ و کم‌ترین سختی منطقه HAZ لوله از جنس فولاد کم آلیاژ کروم - مولیبدنی مقدار ۲۵۰ ویکرز مربوط به نمونه ۴ می‌باشد. همچنین بیش‌ترین سختی منطقه HAZ فین از جنس فولاد پر آلیاژ کروم دار مقدار ۱۷۳ ویکرز مربوط به نمونه ۱ و کم‌ترین منطقه HAZ فین از جنس فولاد پر آلیاژ کروم - دار مقدار ۱۶۱ ویکرز مربوط به نمونه ۸ می‌باشد. بررسی دقیق جدول ۶ مشخص می‌نماید که بیش‌ترین اختلاف سختی بین HAZ فین با فین مقدار ۱۶۵ ویکرز مربوط به نمونه ۲ می‌باشد، همچنین بیش‌ترین اختلاف سختی

جدول ۷ - نتایج آزمون سختی سنجی نمونه‌های مختلف بر حسب ویکرز

| شماره | منطقه متاثر از حرارت فین | اختلاف سختی HAZ فین با فین | منطقه متاثر از حرارت لوله | اختلاف سختی HAZ لوله با لوله |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| ۱ | ۱۷۳ | ۱۵۱ | ۲۵۲ | ۱۶۹ |
| ۲ | ۱۶۲ | ۱۶۵ | ۲۷۰ | ۱۶۶ |
| ۳ | ۱۶۵ | ۱۵۶ | ۲۶۳ | ۱۶۳ |
| ۴ | ۱۷۰ | ۱۴۹ | ۲۵۰ | ۱۶۷ |
| ۵ | ۱۶۶ | ۱۶۰ | ۲۶۴ | ۱۶۵ |
| ۶ | ۱۷۱ | ۱۵۰ | ۲۶۷ | ۱۶۸ |
| ۷ | ۱۶۹ | ۱۴۸ | ۲۶۵ | ۱۶۴ |
| ۸ | ۱۶۱ | ۱۶۲ | ۲۷۲ | ۱۶۵ |
| ۹ | ۱۷۲ | ۱۵۹ | ۲۶۲ | ۱۶۲ |
| ۱۰ | ۱۶۴ | ۱۶۱ | ۲۵۸ | ۱۶۴ |

جدول ۸ - نتایج آزمون سختی سنجی نمونه مردود

| میکرو سختی بر حسب ویکرز | | | | شماره |
|---------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|
| اختلاف سختی HAZ لوله با لوله | منطقه متاثر از حرارت لوله | اختلاف سختی HAZ فین با فین | منطقه متاثر از حرارت فین | |
| ۱۷۵ | ۲۷۵ | ۱۸۹ | ۱۹۵ | ۱ |

جدول ۹ - پارامتر گام فین‌ها بر اساس قطر خارجی لوله، ضخامت و ارتفاع فین در حالت پره‌دار دنداندار و پره‌دار بدون دندانه

| فین بر حسب اینچ | | فین بر حسب متر | | حداکثر ارتفاع فین | | ضخامت فین | | قطر خارجی لوله | | حالت پره (نوع فین) |
|--------------------|-----|----------------|-----|----------------------|------|-----------|-----------|----------------|------|-----------------------|
| Ma | Min | Max | Min | inch | mm | inch | mm | inch | mm | |
| ۷ | ۲ | ۲۷۶ | ۷۹ | ۱/۰۰ | ۲۵/۴ | ۰/۰۳-۰/۰۴ | ۰/۹۰-۱/۲۵ | ۱/۵۰ | ۳۸/۱ | پره دار Serrated |
| ۷ | ۱ | ۲۷۶ | ۳۹ | ۰/۶۲ | ۱۶ | ۰/۰۳-۰/۱۰ | ۰/۹۰-۲/۶۰ | ۱/۵۰ | ۳۸/۱ | پره دار Solid |

نتیجه گیری

در این تحقیق اثر پارامترهای جوشکاری مقاومتی فرکانس بالا بر ریز ساختار و خواص مکانیکی اتصال لوله‌های فولادی فریتی ۱ Mo - Cr ۲/۲۵ به فین از جنس فولاد پر آلیاژ 409 بررسی و نتایج زیر حاصل شد:

۱- به دلیل انتخاب پارامترهای بهینه جوشکاری و محل‌های قرار گیری قطب‌های جوشکاری مقاومتی، تنظیمات جک هیدرولیکی فشار جهت فواصل غلتک‌های دستگاه و تراکم فین‌ها در اتصال غیرهمجنس لوله‌های فولاد کم آلیاژ کروم-مولیبدنی به فین پره‌های آلیاژی فولاد پر آلیاژ کروم‌دار نفوذ جوش تمامی نمونه‌ها بیش از ۹۰٪ می‌باشد.

۲- سیکل حرارتی ناشی از سرعت سرد شدن بالا همراه با پاشش آب، باعث ریز شدن ساختار میکروسکوپی و محدود شدن منطقه متاثر از حرارت در مقطع جوش می‌شود، لذا متوسط

استحکام کششی بالاتر از ۲۷۵ مگا پاسکال و سختی کلیه نمونه‌ها به دلیل انتخاب پارامترهای بهینه در محدوده پذیرش استاندارد می‌باشد.

۳- وضعیت نحوه ایجاد دندان بر روی لوله‌های پرده‌دار دنداندار نسبت به حالت پرده‌دار بدون دندان مرتبط به اندازه قطر خارجی و ضخامت فین و به حداکثر ارتفاع فین در این دو حالت بستگی دارد.

۴- هرچه پارامتر گام فین‌ها و ضخامت فین کم‌تر انتخاب گردد، امتزاج و نفوذ جوش فین به لوله بیش‌تر می‌گردد لذا در محدوده ۲۷۶ فین برحسب متر و ضخامت ۱ میلی‌متر بهترین شرایط جوشکاری حالت لوله‌های پرده‌دار می‌باشد.

تشکر و قدردانی

این تحقیق با حمایت شرکت مهندسی ساخت بویلر و تجهیزات مپنا و مساعدت دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج انجام گردیده است. لذا از همکاری مسئولین و کلیه پرسنل محترم آن واحدها تشکر و قدردانی می‌گردد.

[1] Eriksen V., Heat Recovery Steam Generator Technology, Woodhead Publishing, 2017.

[2] Eugene, Pis'mennyi ,Georgiy Polupan , Ignacio ,Carvajal-Mariscal ,Florencio ,Sanchez-Silva, Igor Piro , Handbook for Transversely Finned Tube Heat Exchanger Design Academic Press ,2016 .

[3]Więcek M., Wpływ technologii spawania na strukturę i właściwości rur ożebrowanych dla przemysłu energetycznego. PhD Thesis, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Materiałowej i Metalurgii, 2015.

[4] Breeze P., Raising steam plant efficiency – Pushing the steam cycle boundaries. PEI Magazine 20, 2012.

[5] Huseman R.: Advanced (700°C) PF Power Plant. A Clean Coal European Technology. Advanced Material for

AD700 Boilers, Cesi Auditorium, Milano, 2010.

[6] Mitrovic J., Heat Exchanger and Condenser Tubes, Tube Types Materials Attributes Machining. Publico Publications, 2004.

[7] Dziemidowicz Z., Szyszka P., Krupa I.: Power units on the horizon. The technical requirements of new generation units at PGE Power Plant Opole S.A. Electric Heat and Vocational Education, 11, 2011.

[8] J. Noordermeer, P. Eng., IAGT Symposium, Training Sessions, Banff Alberta, 2013.

[9] Kushima H, Watanabe T, Murata M, Kamihira K, Tanaka H, Kimura K. Metallographic Atlas for 2.25Cr-1Mo Steels and Degradation due to Long-term Service at Elevated Temperatures. OMMI;

4(1):1-13, 2007.

[10] Erling Næss, Experimental investigation of heat transfer and pressure drop in serrated-fin tube, *Applied Thermal Engineering* 30, 1531e1537, 2010.

[11] S. R. Mcilwain ,A Comparison of Heat Transfer around a Single Serrated, *IJRRAS* 2 (2), February 2010, 88-94.

[12] R. Kocurek, J. Adamiec, Manufacturing Technologies of Finned Tubes, *Advances in Materials Science*, Vol. 13, No. 3 (37), pp. 26-35, 2013.

[13] Janusz Adamiec, Michał Więcek, Technology for Laser Welding of Ribbed Pipes Made of Inconel 625 Nickel Alloy, *Biuletyn Instytut Spawalnictwa* , No. 5/,41-48, 2014.

[14]J. S. Zuback, T. Mukherjee, T. A. Palmer and T. DebRoy, Novel Dissimilar Joints between 2.25Cr-1Mo Steel and Alloy 800H through Additive Manufacturing, *Pennsylvania State University, AWS FABTECH Conference, Las Vegas, NV 2016.*

[15]Wagner Ferreira Limaa, Glaucio Rigueiraa, Heloisa Cunha Furtadoa, Maurício Barreto Lisboa, Luiz Henrique de Almeida, *Microstructure Evolution and Creep Properties of 2.25Cr-1Mo Ferrite-Pearlite and Ferrite-bainite Steels After*

Exposure to Elevated Temperatures, Materials Research, Vol.10, No. 1590, pp 0596-0601, 2017.

[16] ASTM A213 Standard Specification for Seamless Ferritic and Austenitic Alloy-Steel Boiler, Superheater, and Heat-Exchanger Tubes, 2019.

[17] ASTM A 240 Standard Specification for Heat Resisting Chromium and Chromium-Nickel Stainless Steel Strip For Pressure Vessels, 2019.

[18] King, Benjamin, Welding and Post Weld Heat Treatment of 2.25%Cr-1%Mo Steel, M.Eng thesis, Faculty of Engineering, University of Wollongong Australia, pp.13, 2005.

[19] Cem Ornek, Performance Characterisation of Duplex Stainless Steel in Nuclear Waste Storage Environment, PhD thesis, University of Manchester, pp.25, 2015.

[20] ASTM E340-19, Standard Test Method for Macro etching Metals and Alloys, 2019.

[21] ASTM A370-19, Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2019.

[22] ASTM E384-19, Standard Test Method for Micro indentation Hardness of Materials, 2019.

